

Abbruch und Schutz der Steilufer an der Ostseeküste*)

(Samland bis Schleswig-Holstein)

Von Marcus Petersen

Inhalt

A. Einleitung	101
B. Der Abbruch an Steilufern	102
I. Erdgeschichtliche Entwicklung	102
II. Landverluste	103
III. Das landseitige Kräftespiel im Kliff	109
IV. Das seeseitige Kräftespiel vor den Kliffs	110
a) Aufarbeitung der Schutthalde	110
b) Beschreibung und Bewertung der Wasserstände	111
c) Strömungs- und Brandungsverhältnisse vor der Küste	117
d) Abtragung des Unterwasserstrandes	119
V. Verbleib des Abbruchmaterials	122
a) Sedimentpetrologische Untersuchungen	122
1. Seegrundkartierung	122
2. Kartierung des Strandes	123
b) Kartenvergleiche	124
c) Berechnung der Transportkraft	124
C. Der Schutz von Steilufern	125
I. Bauformen	125
a) Dünenbau	125
b) Biologischer Uferschutz	126
c) Bedeutung der Steinentnahme	126
d) Längswerke	127
1. Flechrwerke	127
2. Steindämme	127
3. Ufermauern	128
4. Deckwerke	129
5. Kosten	133
e) Querwerke (Buhnen)	133
1. Anordnung der Buhnengruppen	133
2. Bauweisen	135
Längsschnitte	135
Grundrisse	137
Querschnitte	137
Baustoffe	138
3. Kosten	138
f) Dränung	139
g) Wirkung der Schutzmaßnahmen	139
II. Wirtschaftliche Betrachtungen für die Planung von Uferschutzmaßnahmen vor Steilufern	142
III. Vorschläge für flächenhafte Küstenschutzmaßnahmen	143
IV. Besiedlung von Steilufern	147
D. Zusammenfassung	147
E. Schriftenverzeichnis und Quellen	149

*) Diese Abhandlung erscheint zugleich als Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Würde eines Dr.-Ing. an der Technischen Hochschule (Franzius-Institut), Hannover.

A. Einleitung

Die Ostseeküste vom Samland bis Schleswig-Holstein (Abb. 1) ist durch den häufigen Wechsel von Abbruch- und Anwachsufeln gekennzeichnet. Die Küstenformen sind das Ergebnis eines unablässigen Kampfes zwischen Meer und Land. In diesem Ringen um die Vorherrschaft muß dem Meer eine gewisse Überlegenheit zugestanden werden, denn die Veränderungen, die an der Ostseeküste festzustellen sind, vergrößern fortdauernd die Wasserfläche in ihrer allgemeinen Umgrenzung.

Der Eingriff des Menschen in die natürliche Strandbildung begann mit dem Bau von Molen. Diese wurden zum Schutze der Hafeneinfahrten gegen Versandung angelegt. Die Schifffahrt forderte nach und nach größere Wassertiefen für die Zufahrt zu den Häfen. Das natürliche Sandwanderungsgebiet wurde durchschnitten. Auf der Luvseite der Molen fand eine Anreicherung und auf der Leeseite eine Forträumung des Sandes statt. Die Molen hatten weiter zur Folge, daß Schutzvorkehrungen einerseits zur Verhinderung der Sandanreicherung und andererseits zur Verhinderung des Uferabbruchs in Lee getroffen werden mußten.

An anderen Küstenstrecken führten Landverluste zu Eingriffen in das Naturgeschehen, wenn es Lotsenstationen oder Seezeichen zu schützen galt. Die Siedlungen rückten mit dem aufblühenden Fremden- und Bäderverkehr näher an die Küste heran mit der Begleiterscheinung, daß der Ruf nach Sicherheit gegen Überschwemmungen oder gegen Uferabbrüche answoll. Bei der intensiveren Bewirtschaftung des Bodens bemühten sich die Uferanlieger, ihre landwirtschaftlichen Nutzflächen vor dem Zugriff des Meeres, besonders nach Sturmfluten, zu bewahren.

Die Ausführung des Küstenschutzes war von Anfang an Sache der Interessenten. Die Aufgaben sind jedoch derart gewachsen, daß die staatliche Hilfe mehr und mehr in Anspruch genommen werden mußte. Namhafte Wasserbau-Ingenieure wie HAGEN (25) 1863, GERHARDT (19) 1900, HEISER (32) 1927, um nur einige zu nennen, haben sich um die Entwicklung von Schutzmaßnahmen an der Ostseeküste verdient gemacht.

In den letzten Jahrzehnten begannen auch Forscher verschiedener wissenschaftlicher Disziplinen sich mit den Naturvorgängen an der Küste zu beschäftigen [FRIEDRICH (13) 1901, KRÜGER (44) 1910, MORTENSEN (57) 1921, HARTNACK (29) 1926, WASMUND (96) 1938, GROSCHOPF (23) 1936 u.a.m.].

Allmählich war aus dem Zustand der Behelfslösungen ein Zustand des Versuchsens geworden. Da die Versuche bis auf wenige Ausnahmen in natürlicher Größe durchgeführt wurden und bei zahlreichen Bauwerken der erwartete Erfolg ausblieb, ergab sich die Frage nach den Ursachen der Küstenveränderungen. Die Antwort auf diese Frage ist von grundsätzlicher Bedeutung für die Behandlung des Uferschutzes.

Um den Küstenveränderungen nachzuspüren, beauftragte die Wasserstraßendirektion Stettin im Jahre 1939 das derzeitige meeresgeologische Forschungsinstitut des Reichsamtes für Bodenforschung in Kiel-Kitzeberg, an der pommerschen Küste systematische wissenschaftliche Untersuchungen über die Vorgänge im küstennahen Seegebiet vorzunehmen¹⁾. Damit ist ein neuer Abschnitt für die Beurteilung der Wirkung von Schutzwerken und für künftige Planungen an der Ostseeküste eingeleitet worden.

Als die Sicherung des Brodtener Steilufers bei Travemünde in den Jahren 1948 und 1949 ernsthaft erwogen wurde, waren sich alle Sachverständigen darin einig, daß dem Bau eine gründliche Untersuchung über die Ursachen des Abbruchs [vgl. auch WOHLBERG (104)] und die Möglichkeiten ihrer Verhinderung voraufgehen müsse. Durch die Arbeiten von REHDER 1890—1909, FRIEDRICH 1901—1909 und anderen war die Problematik dieses Gebietes bereits vor Jahrzehnten eingehend angesprochen worden.

In beiden Fällen wurden nun andere Wege beschritten. An der pommerschen Küste bearbeiteten drei Meeresgeologen je einen bestimmten Küstenabschnitt in ozeanographischer,

¹⁾ An der Westküste Schleswig-Holsteins wurde im Jahre 1934 mit der Durchführung eines groß-
zünftig angelegten Forschungsprogramms für die Pläne der Landgewinnung und der Landerhaltung im
Wattengebiet begonnen [LORENZEN (47)].

geologischer und petrographischer Hinsicht. Die Verhältnisse von Küstenabbruch, Strömung, Sandwanderung und Materialhaushalt sollten erforscht und dabei die angewandten Verfahren erprobt und verbessert werden. Die Arbeitsmethode am Brodtener Ufer wurde durch die auseinandergelassenen Ansichten über die Ursachen des Abbruchs wie auch über die Sicherung des Ufers bestimmt. Hier mußte in kurzer Zeit eine klare Entscheidung herbeigeführt werden, ob und wie gebaut werden sollte. Deshalb wurden mehrere Wissenschaftler verschiedener Fachrichtungen gleichzeitig in das technische Untersuchungsprogramm für einen verhältnismäßig kleinen Küstenabschnitt eingeschaltet. Auf diese Weise ließen sich die Ergebnisse der Einzeluntersuchungen miteinander vergleichen. Sie führten zu gegenseitigen Bestätigungen und Ergänzungen. Ungelöste Probleme traten am Ende deutlich hervor.

Die Untersuchungen an der pommerschen Küste und am Brodtener Ufer haben eine Reihe von neuen Erkenntnissen über die Naturvorgänge und über die Wirkung von Eingriffen in diese gezeitigt, so daß nunmehr eine eingehende Betrachtung des Schutzes von Steilufern an der Ostseeküste angebracht erscheint. Verfasser hat die schleswig-holsteinische Küste im Rahmen der Dienstgeschäfte als Leiter der Untersuchungsstelle Brodtener Ufer beim Wasser- und Schiffsamt Lübeck und als Mitarbeiter der Arbeitsgruppe Steil- und Flachküsten im „Küstenausschuß Nord- und Ostsee“ mehrmals besichtigen können. Wenn auch eine Ortsbesichtigung der mecklenburgischen, pommerschen und samländischen Küste nicht möglich war, so dürften die angezogenen Veröffentlichungen und Berichte ausreichen, um die beiden Hauptfragen dieser Arbeit unter Berücksichtigung der unterschiedlichen geographischen Lage der Küstenabschnitte zu behandeln:

1. Warum brechen Steilufer ab?
2. Wie wurden die Maßnahmen zur Verhinderung des Uferabbruchs ausgeführt?

Auf Grund einer rund hundertjährigen Bauerfahrung und der neuen Erkenntnisse über die Naturvorgänge an der Ostseeküste werden Überlegungen für künftige Uferschutzplanungen angestellt.

B. Der Abbruch an Steilufern

I. Erdgeschichtliche Entwicklung

Die Steilufer an der hier zu behandelnden Ostseeküste stellen im allgemeinen Anschnitte von Geschiebemergelrücken dar. Der Aufbau des Geschiebemergels und seine Formen sind das Ergebnis von Gletscherbewegungen. Wo Vorsprünge ins Meer hinausragen, werden sie durch das Zusammenwirken von landseitigen und seeseitigen Kräften in ihrer Form verändert, sie werden angeschnitten und abgetragen. Das vertikale Maß des Anschnitts wird durch die Lage des Meeresspiegels einerseits und durch die Höhe der Geländeoberfläche andererseits bestimmt.

Als die letzte Eiszunge aus der westlichen Ostsee verschwand, lag diese tief und trocken. Sie war bis vor etwa achttausend Jahren gegen die Nordsee abgeschlossen. Die tiefsten Becken füllten sich nach und nach mit Süßwasser. Der Einbruch des Salzwassers in die Ostsee erfolgte, als der Wasserspiegel etwa den Stand von — 18 m NN hatte. Damals lag vor dem heutigen „Brodtener Ufer“ eine Landzunge etwa 6000 m weit in die Lübecker Bucht hinein. Ein Steilufer gab es hier noch nicht.

Die zeitliche Datierung von Überflutungsmarken wurde an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste von TAPPER (90) und besonders an der inneren Lübecker Bucht von SCHMITZ (81) mit Hilfe pollenanalytischer Untersuchungen vorgenommen.

Der Angriff des Meeres auf die Brodtener Landzunge begann etwa um 4000 v. Chr. und dauert noch heute an. Die Verlagerung des Anschnittwinkels bzw. des Klifffußes ist also durch zwei Bewegungsrichtungen gekennzeichnet:

1. durch eine augenscheinlich landwärtige und
2. durch eine langsamere, von dem Ansteigen des Wasserspiegels abhängige, senkrechte Bewegung.

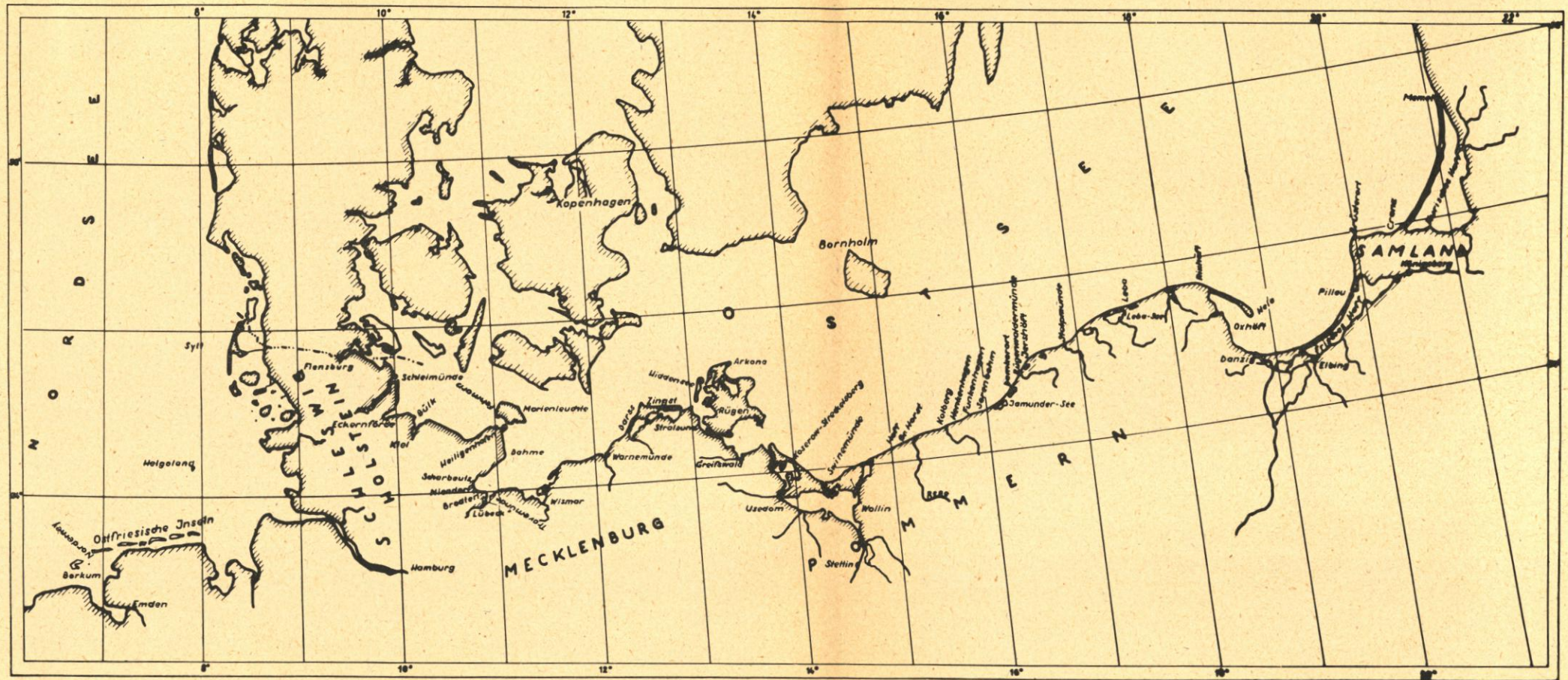


Abb. 1. Die deutsche Ostseeküste vom Samland bis Schleswig-Holstein

Erst wenn auch die Wurzel der Landzunge bis hinter das Dorf Brodten abgebaut sein wird, dürfte die natürliche Alterung des Kliffs, ähnlich wie seit längerem vor Scharbeutz, in der inneren Eckernförder Bucht und an anderen Steilufern eintreten.

Der heutige Zustand der Steilufer stellt nur eine Momentaufnahme des säkularen erdgeschichtlichen Geschehens dar. In diesen Vorgang wird man mit Erfolg nicht eher eingreifen können, bis eine Klärung der Grundbedingungen der Entwicklung herbeigeführt worden ist.

II. Landverluste

Die nicht künstlich beeinflusste Küste im Untersuchungsgebiet zeigt in der Regel die Steilküsten als Abbruch- und die Flachküsten als Anwachsstrecken. Wie überall in der Natur treten dazwischen Übergangsformen auf. Für die Begründung einer Schutzmaßnahme vor einem Steilufer bilden die Maße des Landverlustes bzw. des Uferrückgangs ein entscheidendes Merkmal. Hierüber finden wir bei HEISER (30 u. 31), HARTNACK (29) und GEIB (16) eine Reihe von Angaben, die in Tabelle 1 für das Samland und für Pommern zusammengestellt wurden.

Die 70 km langen Steilküsten des Samlandes traten danach jährlich im Mittel um 0,50 m zurück. Dieser Wert würde sich wahrscheinlich verringern, wenn er aus planmäßig für die Ermittlung des Landverlustes angelegten Messungen gewonnen werden könnte.

Die Angaben über den Rückgang der Steilküsten Pommerns mögen zunächst als reichlich erscheinen. Doch für eine genaue Ermittlung der mittleren Uferrückgangswerte fehlen vor allem Maße über die Küstenstrecken, denen die Werte für die Bestimmung des Areals jeweils

Tabelle 1
Landverluste an der samländischen und pommerschen Küste

Küstenabschnitt	Zeitabschnitt		Uferrückgang		Bemerkungen
	von — bis	Jahre	zus. m.	m/Jahr	
Samland [nach HEISER (31)]					
Marscheiten	1847—1885	38		0,85	
Marscheiten	1895—1920	25		0,37	
Kreislaken	1821—1910	90		0,50	
Kraxtepellen				0,50	
Palmnicken				0,50	
Hubnicken				0,50	
Sorgenauser Bucht				0,10	
Samland 70 km				0,50	
Pommern [nach HEISER (31) und HARTNACK (29)]					
Rixhöft				2,35 (?)	
Nordöstl. Stolpmünde	1862—1938	76	bis 150	bis 2,0	Maximalwert nach
Jershöft	1841—1883	42		0,60	GEIB (16)
	1883—1922	39		0,41	
	1841—1922	81		0,55	
Rügenwaldermünde	1872—1924	52	70—100	1,40—1,90	östlich der Molen
Sorenbohm		53	100	0,70—1,90	
Bornhagen		53	31—90	0,60—1,70	
Funkenhagen		53	60	1,15	
Bodenhagen		53	60	1,15	
Elysium		54	40	0,75	
Henkenhagen	1822—1924	102	40—50	0,45	
Horst	1842—1892	50		0,47	— ausgezeichnete Quelle
Horst	1842—1908	66		0,31	

Küstenabschnitt	Zeitabschnitt		Uferrückgang		Bemerkungen
	von — bis	Jahre	zus. m.	m/Jahr	
Kirche von Hoff	1750—1883	133		0,42	
Kirche von Hoff	1883—1922	39		0,23	
Misdroy-Swantuß	1694—1886	192		0,80	
Wollin	1695—1924	229	180—200	0,90	— Annahme (HEISER)
Usedom Koserow			320	1,45	— „an dieser Stelle“
Usedom Streckelsberg		220	240	1,00	
Usedom Streckelsberg	1874—1913	40			— „keinerlei wesentliche Abbrüche“
Zingst	1828—1924	96	75—220	1,50	— „an einer Stelle“ 2,30m

Tabelle 2
Landverlust der mecklenburgischen Küste nach ZANDER (105)

Küstenabschnitt	Länge km	m/Jahr	m ² /Jahr	Bemerkungen
Fischland	3,15	0,65	2 050	
Nehrung	6,5	0,52	3 380	
Nordöstl. Heide	17,9	0,60	10 700	geschätzt!
Breitling Ost	4,0	0,44	1 760	
Stoltera-Konventersee	10,9	0,32	3 480	
Heiligendamm-Buk	7,8	0,18	1 400	
Buk — Alt Gaarz	6,0	0,38	2 270	
Werder	1,5	0,26	390	
angrenzende Felder	3,8	0,05	190	
Redentin-Wismar	5,3	0,12	640	
Hohen Wieschendorf	6,4	0,47	3 000	
Redewisch	2,3	0,66	1 500	
Gr. Klütz Höved — Priwall	17,8	0,16	2 650	
Poel	11,9	0,23	2 700	
	115,25	0,32	36 110	

zugeordnet werden müßten. Auf Schätzungen kann daher nicht verzichtet werden. Wird angenommen, daß die Abbruchstrecken Pommerns zusammen rund 200 km umfassen und daß der Uferrückgang im Durchschnitt etwa 0,80 m/Jahr beträgt, dann dürften diese Werte im Vergleich zu anderen Küsten als reichlich angesehen werden können. Für die wirtschaftlichen Betrachtungen (vgl. S. 142) sind sie darum begründet, weil sie mit Sicherheit eher zu günstige als übertriebene Werte darstellen.

Mit der Ermittlung der Landverluste an der mecklenburgischen Küste haben sich GEINITZ (17) und ZANDER (105) befaßt. GEINITZ rechnete mit abgerundeten Maßen, die entsprechend zusammengestellt 52,7 km Abbruchküste und 33 590 m² Abbruchfläche, d. h. einen Uferrückgang von 0,64 m/Jahr, ergaben. ZANDER kam nach Auswertung von Vermessungen auf 115 km Abbruchküste und 36 110 m² Abbruchfläche, d. h. auf einen Uferrückgang von nur 0,32 m/Jahr (Tab. 2).

Entsprechende Untersuchungen an den Steilküsten Schleswig-Holsteins [KANNENBERG (39)] ergaben 53,5 km Abbruchufer und 0,21 m/Jahr als mittleren Rückgangsbetrag. Der letzte Wert kann mit einem mittleren Fehler von ± 17 v. H. behaftet sein (Tab. 3). Deshalb wird sicherheitshalber mit dem ungünstigsten Wert von rund 0,25 m/Jahr gerechnet.

Der durchschnittliche jährliche Bodenverlust beträgt danach für die betrachteten Küstenabschnitte:

Samland 70 km × 0,50 m	= 3,5 ha
Pommern 200 km × 0,80 m	= 16,0 ha
Mecklenburg 115 km × 0,32 m	= 3,6 ha
Schleswig-Holstein 53,5 km × 0,25 m	= 1,3 ha

zus. rund 24,4 ha

Sehr genaue Unterlagen sind über den Rückgang des Brodtener Ufers vorhanden, das an der schleswig-holsteinischen Ostsee die größten Werte aufzuweisen hat. Seit der Katastervermessung von 1877 sind mehrere Wiederholungsmessungen durchgeführt worden (Tab. 4). Aus den verlorenen Flächen der Uferparzellen und deren aus dem Plan entnommenen mittleren Breiten wurden die Beträge des Uferrückgangs berechnet, und zwar abschnittsweise für die Vermessungen 1877 bis 1949. Diese Beträge, bezogen auf die Anzahl der Jahre eines Zeitabschnitts, ergaben den mittleren jährlichen Rückgang. Infolge des ungleichen Abbruchs an den einzelnen Parzellen ergab der Durchschnittswert von allen Parzellen in der Zeit von 1877 bis 1949 (Tab. 4, Spalte 26) 0,46 m/Jahr.

Tabelle 3
Gesamtübersicht über den Rückgang der schleswig-holsteinischen
Steilufer von 1875 bis 1950 [KANNENBERG (39)]

Steilufer	Gesamtlänge km	Abbruch- länge*) km	Abbruch- fläche qm	mittl. Rückg. d. Abbruch- länge m	jährl. Rückg. d. Abbruch- länge m	F**) ± v. H.
Brodtten	4,5	4,0	130 000	32,5	0,43	1
Sierksdorf	2,4	1,3	12 000	9,2	0,12	5
Wintershagen	0,6	0,3	5 000	16,7	0,22	10
Pelzerhaken	1,3	(1,0)				
Bliesdorf	5,4	(3,0)	30 000	10,0	0,13	20
Dahmeshöved	2,0	1,6	50 000	31,2	0,42	10
Siggen	6,2	(3,8)	30 000	7,9	0,11	40
Großenbrode	4,3	(1,0)				
Lütjenbrode	2,4	(2,0)	15 000	7,5	0,10	50
Heiligenhafen	2,0	(1,5)	30 000	20,0	0,27	50
Johannisthal	4,0	(1,5)	15 000	10,0	0,13	40
Putlos	2,8	(2,0)	25 000	12,5	0,17	50
Weißenhaus	4,0	(1,2)	25 000	20,8	0,28	40
Hohwacht	0,7	(0,3)				
Lippe	0,3	0,2	2 000	10,0	0,13	30
Satjendorf	5,3	(3,0)	70 000	23,3	0,31	20
Stein	1,6	1,2	15 000	12,5	0,17	20
Kieler Innenförde	1,6	—				
Schilksee	1,8	(1,0)	10 000	10,0	0,13	30
Strande	0,5	(0,2)				
Alt-Bülk	0,8	0,3	3 000	10,0	0,13	30
Stohl	4,0	(3,0)	57 000	19,0	0,25	10
Dän. Nienhof	3,4	1,3	19 000	14,6	0,19	10
Surendorf	3,0	(0,8)	5 000	6,3	0,08	30
Nör	3,0	(1,5)	16 000	10,6	0,14	20
Altenhof	2,6	(1,0)	10 000	10,0	0,13	20
Hemmelmark	0,8	0,4	3 000	7,5	0,10	10

Steilufer	Gesamtlänge km	Abbruch- länge*) km	Abbruch- fläche qm	mittl. Rückg. d. Abbruch- länge m	jährl. Rückg. d. Abbruch- länge m	F**) ± v. H.
Klein Waabs	2,7	(2,2)	42 000	19,1	0,25	10
Boknis	2,3	1,6	35 000	21,8	0,29	5
Schönhagen	2,0	1,6	55 000	34,3	0,46	10
Düttebüll	2,1	(1,0)				
Geltinger Bucht	2,4	(1,8)				
Steinberghaff	2,2	(1,2)	10 000	8,3	0,11	20
Habernis	1,8	(0,8)	18 000	22,5	0,30	10
Neukirchen	2,6	(1,0)	14 000	14,0	0,19	20
Dollerupholz	3,8	(2,3)	23 000	10,0	0,13	30
Langballigholz	1,2	(0,8)				
Bockholm	2,8	—				
Holnis	2,7	(0,8)	9 000	11,2	0,15	20
Flensburg Innenförde	8,4	—				
Steilufer mit berechn. Abbruchfl.	83,0	47,4	783 000	16,5	0,22	17
Steilufer ohne berechn. Abbruchfl.	25,3	6,1	67 000	(Schätzung abgerundet)		
insgesamt	108,3	53,5	850 000	15,9	0,21	17

*) Die eingeklammerten Abbruchlängen umfassen lediglich die Hauptabbruchstrecken gemäß der Definition des Abbruchsteilufers.

**) F = Genauigkeit der berechneten Abbruchfläche. Die unterschiedliche Genauigkeit ergibt sich aus der Verschiedenartigkeit der zur Verfügung stehenden Meßergebnisse, je nachdem ob Nachvermessungen durch Katasterämter vorlagen oder in welchem Umfange eigene Messungen durchgeführt werden konnten.

In den Veröffentlichungen und Berichten über die Abbruchmaße schwankt der mittlere Wert des jährlichen Rückgangs zwischen 3,45 m [DALMANN (7)] und 0,34 m [BURK (3)]²⁾. Für die Stirnseite des Steilufers veröffentlichte FRIEDRICH (13) das Maß von 1,20 m/Jahr. REHDER hatte es für die Zeit von 1877 bis 1901 über die ganze Länge der Abbruchstrecke bereits zu 0,49 m/Jahr ermittelt. HEISER (31) gab für das Brodtener Ufer noch den Betrag von „mehr als 1,00 m“ an.

Bei den Erörterungen über die Gefahr für die Ortschaft Brodten rechneten FRIEDRICH (13) und REHDER (76) damit, daß das Kliff in dreihundert bis vierhundert Jahren den Ortsrand erreicht haben würde. Die kürzeste Entfernung zum Steilufer beträgt heute etwa 400 m und der mittlere jährliche Rückgang 0,43 m. Unter der Voraussetzung der seit 1877 beobachteten und gleichbleibenden Rückgangsgeschwindigkeit würde das bedeuten, daß Brodten in etwa neunhundert Jahren unmittelbar gefährdet sein dürfte.

Abbildung 2 zeigt die graphische Darstellung des Uferrückgangs. Die Kliffoberkante von 1877 wurde als gerade Bezugslinie aufgetragen mit den maßstäblichen Parzellenbreiten, den alten Bezeichnungen und Numerierungen der Gewannen und den Strand-Polygonpunkten der Vermessung von 1949. Über der Mitte des Parzellenabschnitts wurden die errechneten Abbruchwerte aneinander gefügt. Der gleichsinnige Verlauf der Ganglinien wird aus dem Aufbau des Geschiebemergelmassivs erklärt. Der auffällig starke Rückgang zwischen den Parzellen Großen Röde und Hochhorst steht offenbar mit der Hohlform des Geländes in unmittelbarer Beziehung (vgl. Verlauf der Kliffoberkante).

²⁾ In der Berechnung des mittleren jährlichen Abbruchs fehlt bei BURK die Fläche des Zeitabschnittes 1901 bis 1914. Führt man diese in die Rechnung ein, so erhöht sich der Wert auf 0,45 m/Jahr.

Abbruchflächen u. Mittelwerte d. Rückganges am Brodtener Ufer im Zeitabschnitt 1877-1949.

Nurz	Lagebezeichnung	1877 - 1901			1901 - 1914			1914 - 1929			1929 - 1943			1943 - 1949			1877 - 1949											
		Fläche m ²	Länge m	Brd./l. Abbr. m	Fläche m ²	Länge m	Brd./l. Abbr. m	Fläche m ²	Länge m	Brd./l. Abbr. m	Fläche m ²	Länge m	Brd./l. Abbr. m	Fläche m ²	Länge m	Brd./l. Abbr. m	Gesamt- Breite m	Gesamt- Länge m	Brd./l. Abbr. m									
1	Heidahl	1760	178	9,9	0,41	1433	195	7,35	0,56	809	205	3,73	0,26	-	-	-	-	-	-	4002	190	21,06	0,37	1				
2	V Uferkoppel	1758	138	12,74	0,53	932	121	7,70	0,59	624	109	5,72	0,38	-	-	-	-	-	-	3314	125	26,51	0,29	2				
3	Saalkampfbrede	1278	105	12,17	0,51	942	119	7,92	0,61	834	124	6,72	0,45	560	127	4,41	0,32	165	127	1,30	0,22	3779	115	32,66	0,46	3		
4	Ahrenlande	3695	344	11,3	0,47	3155	330	9,56	0,74	1345	325	4,14	0,28	3055	315	9,70	0,69	1156	305	3,79	0,63	12606	330	38,20	0,53	4		
5	Grosen-Röde	4147	162	22,6	0,95	2173	185	11,74	0,90	1261	185	6,82	0,45	2010	185	10,86	0,78	750	185	4,05	0,68	10341	185	55,90	0,78	5		
6	Hundskoppel	1580	62	25,5	1,06	893	65	13,73	1,06	450	70	6,43	0,43	680	70	9,70	0,69	215	75	2,87	0,48	3818	65	59,74	0,81	6		
7	IV. Uferkoppel	6539	293	22,3	0,93	3660	300	12,20	0,94	3453	300	11,52	0,77	3250	300	10,83	0,77	1079	300	3,60	0,60	17983	300	59,94	0,83	7		
8	Hochhorst	4360	212	20,6	0,86	2688	205	13,11	1,01	2117	205	10,33	0,69	2280	205	11,12	0,79	1056	205	5,15	0,86	12301	205	60,98	0,85	8		
9	Hakensee	3262	178	18,3	0,76	2133	185	11,53	0,89	1636	185	8,84	0,59	1910	185	10,32	0,74	750	185	4,05	0,68	9691	185	52,38	0,73	9		
10	III. Uferkoppel	2338	123	19,0	0,79	739	120	6,16	0,47	835	120	6,96	0,46	565	120	4,71	0,34	476	120	3,97	0,66	4953	120	41,28	0,57	10		
11	II. Uferkoppel	3417	276	12,4	0,52	1447	280	5,24	0,40	1779	280	6,35	0,42	1645	280	5,00	0,42	1105	280	3,95	0,66	9413	280	33,61	0,47	11		
12	II. Fallum	1333	142	9,4	0,39	1040	125	8,32	0,64	376	103	3,58	0,24	645	100	6,45	0,46	244	90	2,71	0,45	3638	120	30,31	0,42	12		
13	Ölckoppel	987	90	11,0	0,46	1110	115	9,65	0,74	763	115	6,63	0,44	440	125	3,52	0,25	280	155	1,81	0,30	3580	110	32,54	0,45	13		
14	I. Fallum	1618	128	12,6	0,53	1067	125	8,54	0,66	272	60	4,53	0,30	380	45	8,44	0,60	55	30	1,83	0,30	3392	95	35,70	0,50	14		
15	Vosskoppel	2000	197	10,6	0,43	904	200	4,52	0,35	966	200	4,85	0,32	1920	200	9,60	0,68	545	200	2,72	0,45	6335	200	31,68	0,44	15		
16	Wieskoppel	697	206	3,3	0,14	729	205	3,56	0,27	1340	205	6,54	0,44	1650	205	8,05	0,58	462	205	2,25	0,38	4878	205	23,90	0,33	16		
17	Mühlkamp	1762	345	5,1	0,21	592	350	1,69	0,13	661	350	2,89	0,13	395	350	1,15	0,08	483	350	1,38	0,23	3893	350	11,12	0,15	17		
18	Herrkamp	1530	195	7,8	0,33	587	195	3,01	0,23	450	195	2,31	0,15	240	195	1,23	0,09	533	195	2,73	0,46	3940	195	17,13	0,24	18		
19	Uferkoppel	2236	233	9,6	0,40	498	240	2,03	0,16	468	240	1,95	0,13	655	240	2,73	0,20	192	240	0,80	0,15	4049	240	16,87	0,23	19		
20	Hävenkamp	-	-	-	-	872	260	3,35	0,26	300	260	1,15	0,08	456	260	1,75	0,12	160	260	0,62	0,10	1768	260	6,88	0,10	20		
		46497	3627	12,8	0,53	27614	3220	7,04	0,54	20741	3858	5,40	0,36	22736	3507	6,48	0,46	9706	3507	2,77	0,46	127294	3875	32,65	0,45			
		Kontrolle: Mittel Sp. 6			Kontrolle: Mittel Sp. 10			Kontrolle: Mittel Sp. 14			Kontrolle: Mittel Sp. 18			Kontrolle: Mittel Sp. 22			Kontrolle: Mittel Sp. 26			Kontrolle: Mittel Sp. 30			Kontrolle: Mittel Sp. 34			Kontrolle: Mittel Sp. 38		
		12,8	0,53	27 614	-	7,0	0,54	20 741	-	5,40	0,36	22 736	-	6,48	0,46	9706	-	2,77	0,46	127 294	-	32,65	0,45					

Tabelle 4

Tabelle 4 gibt weiter zu erkennen, daß die jährlichen Rückgangswerte in verschiedenen Zeitabschnitten voneinander abweichen. Ob der Rückgang von Steilufern „in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts gegenüber der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts nachgelassen hat“ [KANNENBERG (39)], kann mit dem vorliegenden Zahlenmaterial nicht bewiesen werden; denn die Angaben von vor der ersten Katastervermessung fallen bei einem Vergleich mit den späteren Angaben in der Bewertung ab. Die mittleren Abbruchwerte von 1877 bis 1901 und von 1901 bis 1914 sind praktisch gleich groß (Sp. 6 u. Sp. 10), und das Nachlassen der marinen Aktivität beginnt erst mit dem Jahre 1914.

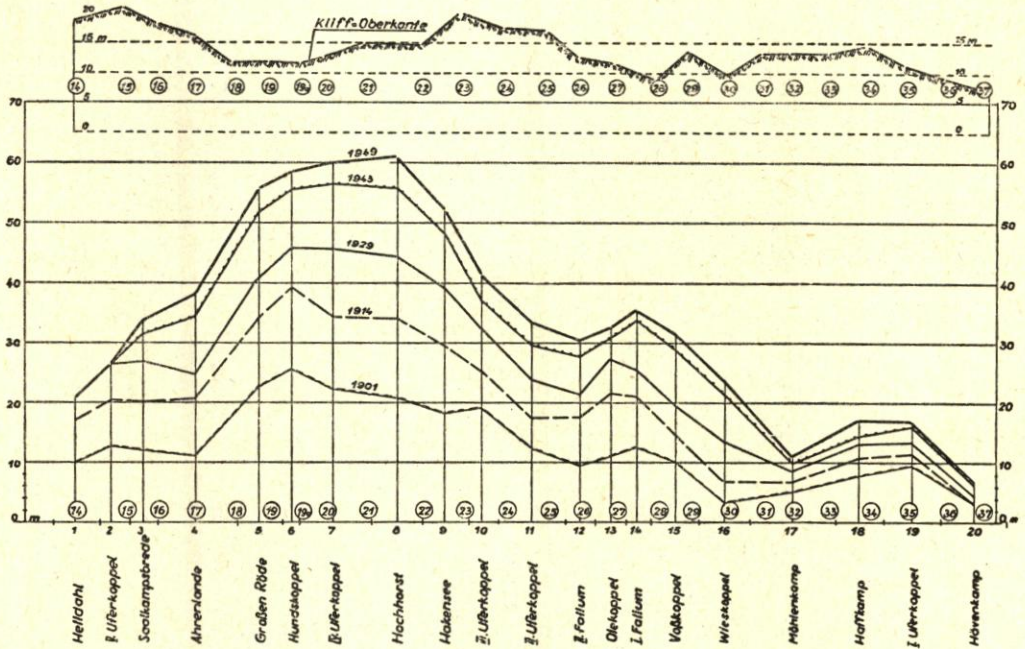


Abb. 2. Der Rückgang des Brodtener Ufers von 1877 bis 1949

An einigen Küstenstrecken wird der Abbruch von Steilufern durch die Wirkung von Uferschutzwerken langsamer vonstatten gehen. Es dürfte aber eine Beweisführung über den Anteil, den ein Bauwerk an der Verzögerung des Rückgangs gehabt hat, kaum gelingen; denn die am Uferrückgang beteiligten Faktoren stehen in zu komplizierter Wechselwirkung zueinander, um den quantitativen Anteil eines einzelnen Faktors erfassen zu können.

Nachdem die Landverluste für das Brodtener Gebiet als zuverlässig ausgewiesen werden konnten, war die Gegenüberstellung von Abbruch- und Anlandungsflächen zwischen dem Priwall und Klein-Timmendorf möglich. Den Vergleich der Mittelwasserlinien von 1877 und 1949 veranschaulicht Abbildung 3. Darin bedeutet die Abszisse die Mittelwasserlinie von 1877 mit den Strandpolygonpunkten von 1949. Die Unterschiedsbeträge aus beiden Vermessungen wurden an den Polygonpunkten als Anwachs bzw. Abbruch aufgetragen. Die Übergangszonen vom Abbruch- zum Anwachsgebiet finden sich etwa am Süden des Söhrmanddamms bei Travemünde und am Ansatz des Strandwalls in Niendorf. Die Störungen zwischen Kurhof und Söhrmanddamm und am Niendorfer Strand werden auf nachteilige Wirkungen von Bauwerken zurückgeführt [PETERSEN (67)]. Besonders auffällig treten die Spitzen an der Niendorfer Mole hervor. Dem Anwachs an der Ostseite der Mole steht an der Westseite ein nicht zu unterschätzender Abbruch gegenüber. Die kleine Anwachsspitze am Haus »Seeblick« steht im Widerspruch zu der Abbildung 2. An dieser Stelle ist die Kliffoberkante um etwa 12 m

zurückgetreten. Die seewärtige Verschiebung der Mittelwasserlinie³⁾ wird auf die ungenaue Erfassung der Mittelwasserlinie 1877, die nicht so einwandfrei festlag wie heute, und auf eine vorübergehende Ansammlung von Sand neben den Buhnen während der Vermessung 1949

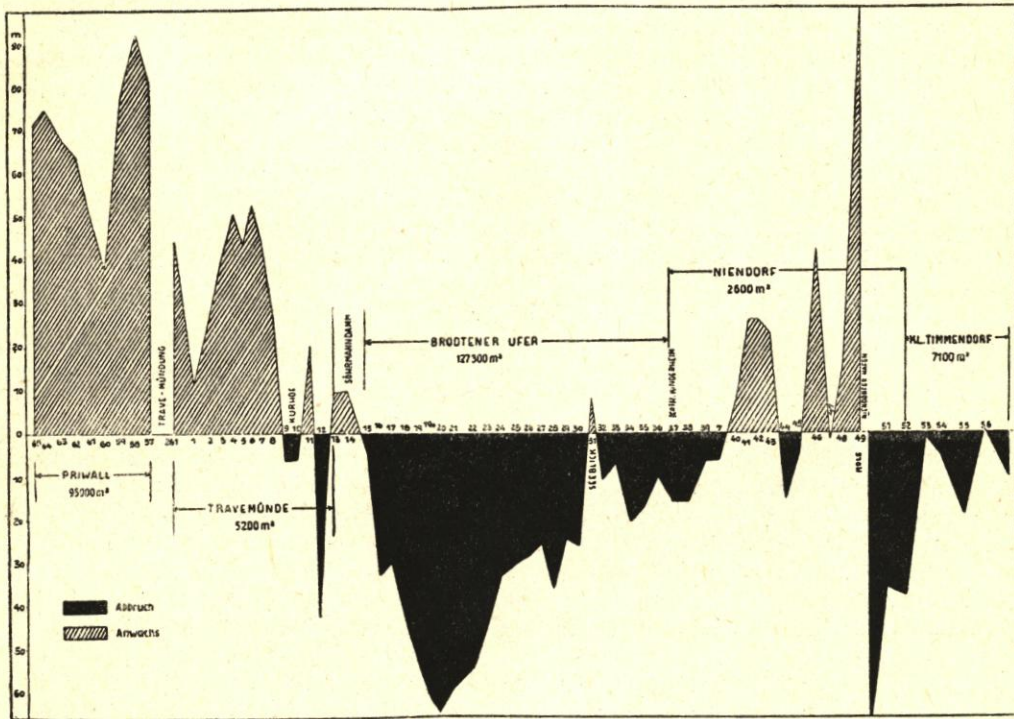


Abb. 3. Abbruch und Anwachs zwischen dem Priwall und Kl.-Timmendorf von 1877 bis 1949

zurückgeführt. Die Buhnen liegen als kurze, breite und flache Schwellen unter Wasser. Über dem gesamten Küstenabschnitt vom Priwall bis Klein-Timmendorf halten sich Anwachs- und Abbruchflächen nahezu die Waage.

Von anderen Küstenabschnitten sind ähnliche Untersuchungen nicht veröffentlicht worden. Zu der Bewertung von Einzelbeobachtungen über Landverluste sei hier bemerkt, daß diese meist zu übertriebenen Befürchtungen über das Fortschreiten der Abbrüche geführt haben und führen werden. Erst der langfristige Vergleich von gleichwertigen Vermessungen liefert objektive Werte.

III. Das landseitige Kräftespiel im Kliff

An der Wasserseite der Kliffs kann insbesondere nach Hochwassern ein buntes Geschiebe mit mehr oder weniger mächtigen Einlagerungen von Beckenabsätzen, mit Stauchungen und Störungen beobachtet werden. Die wechselvollen Aufschlüsse vermitteln bei geologischen, geographischen und anderen Studien vorzügliche Eindrücke von den formenden Kräften des Eises. Es ist verständlich, wenn als Folge der Mannigfaltigkeit der Eindrücke die verschiedensten Ansichten z. B. über die Vorgänge im Brodtener Steilufer auftauchten und verbreitet wurden [KANNENBERG (38)]; denn je nach der Jahreszeit, der Freilegung und der Zugänglichkeit des Aufschlusses und dem Grad des Wissens um die Zusammenhänge eröffnen sich dem Forscher und Beschauer viele Deutungsmöglichkeiten.

³⁾ MW = Mittelwasser ist das gewogene Mittel aller Terminbeobachtungen eines Zeitabschnitts (Monat, Jahreszeit, Jahr oder Jahresreihe).

In Ergänzung und Erweiterung der Arbeiten von GROSCHOPF [(23) und (24)] ermittelte DÜCKER (11) nach modernen Methoden im Laboratorium neue Werte über die Eigenschaften des Geschiebemergels, aus dem das Brodtener Kliff aufgebaut ist. Die aus allen Schichten des Steilhangs entnommenen ungestörten Proben wurden einer eingehenden bodenphysikalischen Untersuchung unterzogen. Außer spezifischem und Raumgewicht wurden Wasser- und Porengehalt, Plastizitätsindex, Wassererfallswert, Scherfestigkeit, Kornzusammensetzung und Gefährdung der Geschiebemergelschichten durch Frost experimentell festgestellt. Hiermit ist eine für die Ostsee-Steilküsten grundlegende Untersuchung durchgeführt worden, deren Ergebnisse geeignet erscheinen, eine Bewertung der im Kliff wirksamen Kräfte vorzunehmen.

Für die Beurteilung der Vorgänge im Brodtener Steilufer sind unter anderem folgende Erkenntnisse besonders bemerkenswert: Das Ufer ist an sich von erheblicher Standfestigkeit. Ein Niederbrechen an Scherflächen würde erst bei einem Böschungswinkel von mehr als 65 Grad eintreten, und bei einer Kliffhöhe von mehr als 27,5 m würde die Standfestigkeit überschritten. Diese wird aber gemindert durch Sicker- und Grundwasser und durch Einwirkung von Frost. Der Geschiebemergel ist aus sehr feinkörnigen Gesteinen zusammengesetzt; er gilt daher als frostgefährdet. Wenn Wasser in die Spalten des Mergels eindringt, wirkt es zunächst erweichend, nimmt dann feines Material mit fort und lockert beim Gefrieren den Zusammenhalt. Diese Änderung der physikalischen Eigenschaften des Bodens fördert die Geschwindigkeit des Uferrückgangs.

Zahlreiche Kluft-, Scher- und Absonderungsflächen kennzeichnen den Aufbau des Geschiebemergelmassivs (Abb. 4 u. 5). Sie streichen mit etwa 50 Grad bis 80 Grad nach See hin aus. Infolge der Stauchungen und Störungen sind die dem Grundwasser zugewiesenen Wege außerordentlich mannigfaltig. Die zeitlich und örtlich häufig wechselnden Grundwasser-austritte sind dafür bezeichnende Merkmale.

Die vorstehend beschriebenen Eigenschaften des Geschiebemergels dürften je nach Abweichung von dem hier untersuchten Boden auch für andere Steilküsten gelten. Sie erklären die in jedem Winter zu beobachtenden Schlammströme (Abb. 6), das Abstürzen der mehr oder weniger großen Mergelschollen (Abb. 7) und die Bildung der Schutthalde am Fuße des Kliffs. Bei einer Besichtigung des Steilufers unmittelbar nach einem Hochwasser kann man feststellen, daß die Schutthalde nicht mehr vorhanden ist. Sie wurde in der Brandung aufgearbeitet. Selbst das anstehende Kliff ist noch in Mitleidenschaft gezogen worden (Abb. 4 u. 8). Im Anschnittwinkel können und werden sich neue Bodenmassen anhäufen, bis sie demselben Schicksal verfallen. Es ist eine sich stets wiederholende Naturerscheinung.

In diesem Zusammenhang wird abschließend festgestellt: Ohne Einwirkung der lösenden und transportierenden Kräfte des Meeres würde sich vor den Steilufnern bald ein flach geböschter und bewachsener Hang ausbilden.

IV. Das seeseitige Kräftespiel vor den Kliffs

a) Aufarbeitung der Schutthalde

Der natürliche Überwasserstrand vor einem abbrechenden Steilufer ist meist schmal. Bei MW beträgt seine Breite etwa 8 bis 15 m. In den Wintermonaten wird der Überwasserstrand zeit- und streckenweise ganz mit breiigen Schlammmassen und abgestürzten Mergelbrocken bedeckt, die zur Bildung einer an die anstehende Geschiebemergelwand angelehnten Schutthalde führen (Abb. 6 u. 7).

Die Höhe des Überwasserstrandes beschränkt sich im allgemeinen auf wenige Dezimeter über MW, so daß die Schutthalde bereits bei etwas überhöhten Wasserständen benetzt wird.

Da die Entstehung der Schutthalde zeitlich in den Monaten November bis April mit häufig überhöhten Wasserständen zusammenfällt, sind die Voraussetzungen für eine laufende Aufarbeitung des niedergeflossenen bzw. -gestürzten Bodens günstig. Der lockere Boden wird durch die turbulente Bewegung des Wassers nach seinen Bestandteilen sortiert, und diese werden entsprechend ihrer Größe und Schwere abtransportiert. Zunächst werden die tonigen und schluffigen Teile ausgesondert und schwebend im Wasser fortgetragen. Die Ausfällung



Abb. 4 (oben)*), Brodtener Ufer,
21. Oktober 1949. Auswaschung
der klutfreien, anstehenden Ge-
schiebemergelwand mit freigelegter
Abrasionsplatte am Fuße des Kliffs



Abb. 5 (rechts). Brodtener Ufer,
10. Oktober 1949. Regelloser Ver-
lauf der Kluftspalten

*) Sämtliche Aufnahmen vom
Verfasser.



Abb. 6. Brodtener Ufer, 6. Dezember 1949.
Frische Schlammströme vor der Koppel Ahrenlande als Folge
intensiven Grundwasseraustritts



Abb. 7. Brodtener Ufer, 16. Januar 1950.
Staffelförmiger Schollenabbruch an der Koppel Ahrenlande als Folge
von Grundwasseraustritt und Frostwirkung



Abb. 8. Brodtener Ufer, 25. Januar 1950.
Brandungshöhlen 4 und 5 m tief, rechts Zusammenbruch der Steilwand



Abb. 9. Brodtener Ufer, 27. September 1949.
Vertrocknete, später durch Regenwasser erodierte Schlammassen.
Im oberen Teil freigelegte anstehende Geschiebemergelbank

und Ablagerung der Schwebstoffe findet in Zonen ohne oder mit geringer Wasserbewegung, d. h. in größeren Tiefen der Ostsee statt. Sande und Kiese hingegen verbleiben im Küstenbereich, wo sie den Kräften der Brandung und Strömung ausgesetzt auf dem ufernahen Seegrund entlang bewegt werden (Geschiebe). Etwa faustgroße und bei Stürmen auch kopfgroße Steine werden in der Uferzone fortgerollt (Gerölle). Die geringste Ortsveränderung erfahren Felsblöcke, die bei dem Ausbrechen aus dem Steilhang seewärts stürzen und im Abrasionsgebiet gelegentlich nochmals umkippen können und der Vertiefung des Unterwasserstrandes folgen.

Im Sommer bleibt die Form des Steilufers, von unwesentlichen Abbrüchen abgesehen, unverändert. Der Teil der Schutthalde, der im Frühjahr nicht mehr aufgearbeitet wird, erhärtet sich infolge Verdunstung der Feuchtigkeit und wird zu einem verhältnismäßig widerstandsfähigen Boden (Abb. 9).

Die Beseitigung der Schuttmassen vor Steilufern ist demnach ausschließlich auf die Dynamik des Meeres bei hohen Wasserständen zurückzuführen.

b) Beschreibung und Bewertung der Wasserstände

Um die Zeit, als eine verstärkte Bautätigkeit an den Hafeneinfahrten einsetzte, richtete die Wasserbauverwaltung einen Beobachtungsdienst zur Erfassung der Wasserstände ein, da über das Verhalten des Wasserspiegels und über die Ursache seiner Schwankungen für die Belange der Schifffahrt und für die Bemessung von Bauwerken genaue Angaben benötigt wurden. Die Aufzeichnungen am Lattenpegel Swinemünde und Kolberg reichen bis zum Jahre 1810 und die vom Lattenpegel Travemünde bis zum Jahre 1826 zurück (Tab. 5).

Tabelle 5
Beobachtungsreihen einiger Ostseepegel (vgl. Tab. 7)

Ostseepegel	Beobachtet seit	Lattenpegel (L) Schreibpegel (S)	Bemerkungen
Memel	1811	L + S	S seit 1901 veröffentlicht.
Stolpmünde	1. 2. 1858	L + S	Zeit der Inbetriebnahme
Kolberg	1. 8. 1810	L	liegt weiter zurück.
Swinemünde	1. 9. 1810	L + S	
Stralsund	1. 3. 1846	L	
Warnemünde	1855	L + S	
Wismar	1849	L + S	
Travemünde	1826	L + S	S seit 1885
Kiel	1870	L	
Flensburg	1. 3. 1872	L	

Nach HAGEN (25) wurde im Jahre 1845 die Vorschrift erlassen, „daß der Wasserstand jedesmal Mittags um 12⁰⁰ Uhr beobachtet und in die Tabelle eingetragen werden solle“. Seitdem gibt es eine systematische Beobachtung.

Da die Lattenpegelbeobachtungen zu erkennen gaben, daß sich die Wasserstände der Ostsee fortdauernd ändern, ging das Geodätische Institut Potsdam 1885 z. B. in Travemünde dazu über, einen Schreibpegel zu betreiben, der — von kurzen Störungen abgesehen — durchgehend alle Wasserstände aufzeichnete. Die Beobachtungsstellen entlang der Küste wurden laufend ergänzt und vermehrt. Mithin sammelte sich ein umfangreiches Zahlenmaterial an, das zu vergleichenden Untersuchungen reizte. Die Ergebnisse der wichtigsten Pegel werden seit 1901 im „Jahrbuch für die Gewässerkunde Norddeutschlands“ veröffentlicht. Eine einheitliche Behandlung der Wasserstandsbeobachtungen wurde erst durch die Pegelvorschrift vom 14. 9. 1935 geregelt. In den folgenden Jahren wurde der Pegel-Nullpunkt aller Seepegel auf — 5,000 m NN festgelegt. Damit fand schließlich eine wesentliche Vereinfachung der Auswertung von Beobachtungen der einzelnen Pegel, des Vergleichs der Pegel untereinander und der früher notwendigen umständlichen Rechenarbeiten statt.

Hochwasser-, Mittelwasser- u. Niedrigwasserstände in der Ostsee.

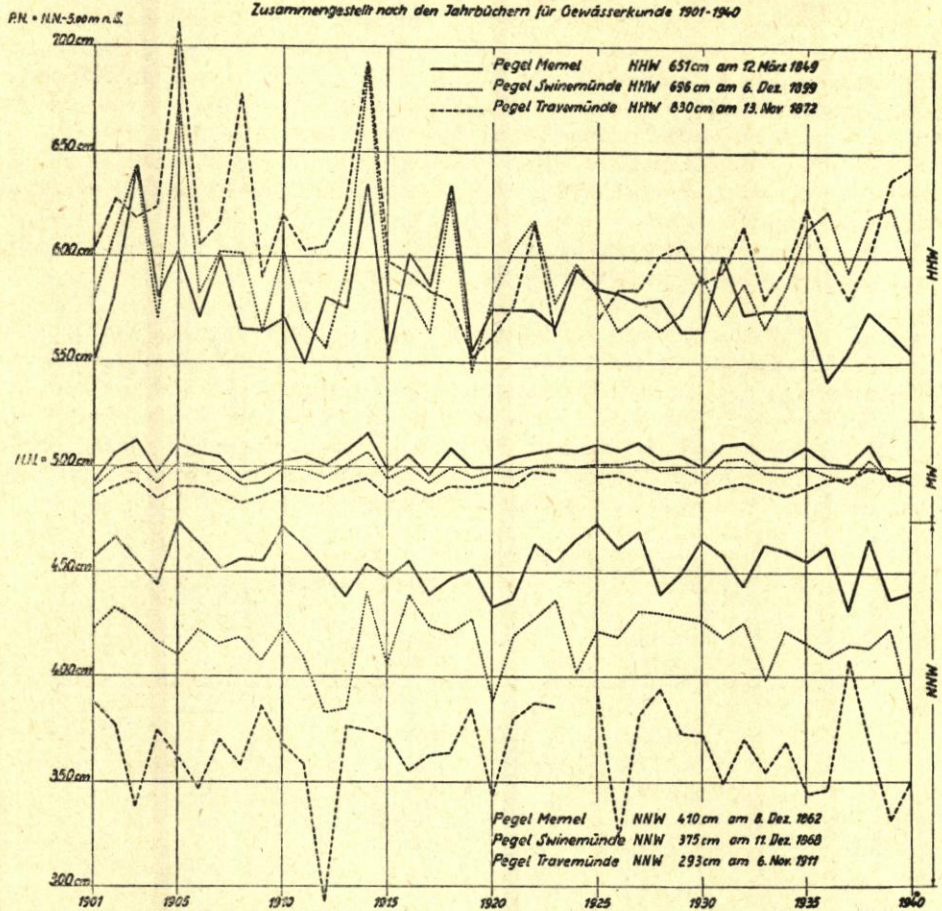


Abb. 10.

Die Auswertung der Aufzeichnungen zielt darauf hin, das MW an den Pegelstellen und die Abweichungen der Einzelbeobachtungen vom MW zu ermitteln. Die täglichen Schwankungen um das MW sind im Verhältnis zu den Gezeitenerscheinungen der Nordsee gering.

Tabelle 6
Extreme Wasserspiegelschwankungen in der südlichen Ostsee⁴⁾

	HHW	MW	NNW	HHW—NNW	HHW—MW
	1896—1925				
	cm	cm	cm	cm	cm
Memel	651	504	410	241	147
Swinemünde	696	498	375	321	198
Travemünde	830	490	293	537	340

⁴⁾ Jahrbuch für die Gewässerkunde Norddeutschlands, Abflußjahr 1926.

Die nach Osten erhöhte MW-Fläche (Abb. 10) erklärt sich als Stau infolge der vorherrschenden westlichen Winde. Die extremen Wasserstände dagegen vermögen in der westlichen Ostsee bis zu + 3,40 m MW anzuschwellen. Sie nehmen nach Memel hin ab.

Zum Vergleich sei erwähnt, daß der Unterschied vom mittleren Tidehochwasser (MThw 641 cm) zum höchsten beobachteten Wasserstand (HHThw 966 cm)⁵⁾ am Pegel Cuxhaven 3,25 m beträgt.

Als Ursache für die Wasserstandsschwankungen der Ostsee kommen meteorologische, morphologische und kosmische Faktoren in Betracht. Der wirksamste Faktor ist der Wind. Stürme aus SW oder NO überlagern alle anderen Schwankungserscheinungen, wenn sie in Richtung des langgestreckten Ostseebeckens das Wasser absenken oder anstauen. Bei sprunghaftem Luftdruckanstieg, rascher Temperaturzunahme, plötzlichem Umspringen des Windes oder ganz lokaler plötzlicher Steigerung der Windstärke ist in wenigen Minuten eine Hebung des Wasserspiegels bis zu 1,5—2,0 m möglich [CREDNER (6)].

Gelegentlich ist die Form des Ostseebeckens die Ursache für Eigenschwingungen, die sogenannten „Seiches“. Diese pflegen dann zu entstehen, wenn das Wasser bei Sturm in einer Hälfte der Ostsee angestaut ist und dann plötzlich der Wind nachläßt. Das Wasser schwingt zurück und läuft an den Küsten der anderen Hälfte hoch auf. Am Pegel Travemünde wurde in den ersten neun Stunden des 4. 10. 1949 ein Hub von 80 bis 90 cm beobachtet. Dabei

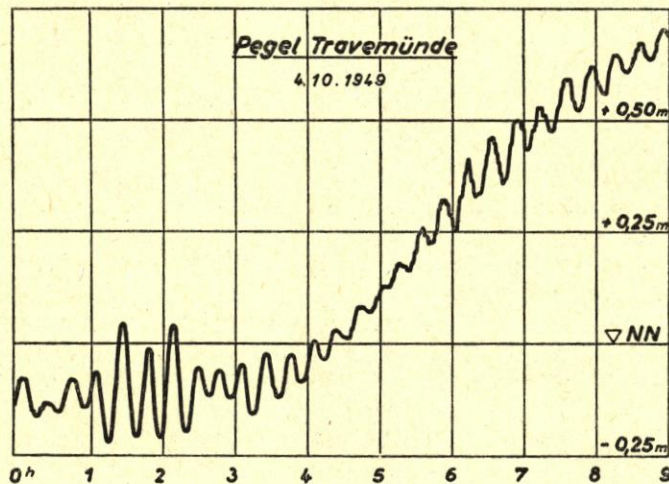


Abb. 11. „Seiches“ am Pegel Travemünde, überlagert durch drei Nebenschwingungen je Stunde

überlagerten jeweils drei Nebenschwingungen je Stunde die Hauptschwingung. Der Anstieg der stärksten Nebenschwingung betrug 28 cm in zwölf Minuten (Abb. 11). Es wird angenommen, daß im engen Mündungsschlauch der Trave Sonderschwingungen in Verbindung mit den großen Rückstaubecken Pötenitzer Wiek und Dassower See entstehen.

Über die Gezeitenerscheinungen in der Ostsee stellte schon HAGEN (25) umfangreiche Untersuchungen an. Er wies nach, daß sich die Gezeiten der Nordsee bis in die Ostsee hinein auswirken. So wurde in Stolpmünde noch die halbtägige Tide mit einem Hub von einem Zoll beobachtet. Die Untersuchungen erstreckten sich unter anderem auch auf Beobachtungen und Berechnungen der Springtiden. „Durchschnittlich zeigte sich bei der vierten Flut nach Voll- und Neumond die größte Differenz zwischen Hoch- und Niedrigwasser. Diese betrug meist 9 bis 10 Zoll⁶⁾).

⁵⁾ Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Küstengebiet der Nord- und Ostsee westlich Travemünde, Abflußjahr 1947.

⁶⁾ in Travemünde.

Man darf hieraus schließen, daß die Flutwelle etwa 12 Stunden gebraucht, um den sehr unregelmäßigen und vielfach gekrümmten Weg durch das Kattegat und den Großen Belt zurückzulegen.“ Den normalen Hub in Travemünde haben GRIESEL (22) und PETERSEN (66) mit 18 bis 19 cm nachgewiesen.

Die vorstehend beschriebenen fortdauernden Wasserstandsschwankungen gaben Veranlassung, die Aufzeichnungen der Schreibpegel Staatswerft Lübeck, Travemünde und Pelzerhaken mit den täglichen Terminbeobachtungen um 12⁰⁰ Uhr für das Abflußjahr 1950 zu vergleichen. Trotz der mehr und mehr eingeführten Schreibpegel blieb es bei der Regelung von 1845, die 12⁰⁰-Uhr-Ablesungen für Berechnungen von Mittelwerten zu verwenden. Es stellte sich bei den Vergleichsberechnungen für das Abflußjahr 1950 heraus, daß eine einzelne Tagesbeobachtung durchaus nicht als Tagesmittelwasser bezeichnet werden kann. Sie liefert eben nur einen Zufallswert [PETERSEN (66)]. Wenn sich die Unterschiede bei Mittelbildungen über größere Zeiträume auch zum Teil ausgleichen mögen (aber nicht müssen), so dürfte eine genauere Erfassung der Ausgangswerte für wissenschaftliche Arbeiten erwünscht sein. Das Beobachtungsmaterial des Jahres 1950 reicht für eine abschließende Beurteilung des zu beschreitenden Weges jedoch nicht aus. Die Untersuchungen auf diesem Gebiet werden fortzusetzen sein.

Für die Auswertung von Wasserstandsbeobachtungen größerer Zeitabschnitte haben MODEL (56) und GAYE (15) verschiedene Verfahren angewandt. Das Ergebnis beider Arbeiten kann dahingehend zusammengefaßt werden, daß in der südlichen Ostsee auch heute noch eine Niveaushiftung zugunsten des Meeres stattfindet. Was MODEL als „Küstensenkung“ deutet, erklärt GAYE als „Anstieg des Meeresspiegels“. Wahrscheinlich sind sowohl eustatische als auch isostatische Faktoren an dem Vorgang beteiligt. Nach GAYE beträgt die Verschiebung in hundert Jahren für Travemünde 25,6 cm und für Pillau 16,3 cm, d. h. sie nimmt nach Osten hin ab. Als REHDER 1886 die Peilungen vor der Travemündung ausführte, lag das MW 18 cm unter dem heutigen MW.

Diese Erscheinungen haben eine unmittelbare Bedeutung für den Abbruch von Steilufeln und für die Behandlung der Küstenschutzfrage. Da keine Anzeichen zu erkennen sind, daß der Meeresspiegel gegenüber dem Land in einer bestimmten Lage beharrt oder daß er fällt, wird die Niveaushiftung den Uferabbruch weiterhin aktivieren. Wenn man den Ausführungen von SCHOTT (82) folgt, so kann diese Frage noch nicht als endgültig gelöst angesprochen werden. Es handelt sich offenbar um ein „weltweites Problem“; denn an anderen deutschen, europäischen und außereuropäischen Küsten sind ähnliche Tendenzen festgestellt worden. Die Ursache für den Anteil der Meeresspiegelhebung dürfte nach dem heutigen Stand der Forschung in großräumigen meteorologischen Veränderungen zu suchen sein.

Den größten Einfluß auf die Küstenveränderungen haben die Sturmfluten mit den extremen Wasserständen. Sie bedeuten für die Bauwerke an der See zugleich Zeiten der Bewährung. Deshalb interessieren den Seebauingenieur in besonderem Maße die höchsten Wasserstände, die an einem Ort der Küste auftreten können, und die Häufigkeit ihrer Wiederkehr. Nach der verdienstvollen Zusammenstellung von KRÜGER (44) wurden die mit Höhenmaßen angegebenen Sturmfluten in Tabelle 7 übertragen, die für die letzten Jahrzehnte nach dem Jahrbuch für die Gewässerkunde noch ergänzt werden konnten.

Tabelle 7
Sturmfluten an den Küsten der südlichen Ostsee
(mit Wasserständen von 1,50 m und mehr über MW)

Jahr	Tag u. Monat	Ort	Wasserstand über MW in m	Quelle
1625	10. 2.	Rostock	3,06	KRÜGER (44)
		Lübeck	2,84	
1694	10./11. 1.	Lübeck	2,86	„
		Flensburg	2,7	

Jahr	Tag u. Monat	Ort	Wasserstand über MW in m	Quelle
1823	4./5. 12.	Kolberg	1,87	KRÜGER (44)
1835	19. 12.	Flensburg	2,54	"
1836	26. 12.	Lübeck	2,2	"
1855	2. 1.	Swinemünde	1,5	"
1864	29. 6.	Danzig	2,2	"
1864	5./6. 11.	Stralsund	1,8	"
1867	30. 12.	Lübeck	2,04	"
		Travemünde	1,97	"
1872	12./13. 11.	Lübeck	3,38	"
		Travemünde	3,40	Jahr. f. G.
		Flensburg	3,27	KRÜGER
1874	9./10. 2.	Kolberg	2,2	"
		Apenrade	2,09	"
1883	4./5. 12.	Stolpmünde	1,71	"
		Aarösund	2,13	"
1890	25. 11.	Travemünde	2,1	"
1898	24./25. 3.	Travemünde	1,72	"
1903	19. 4.	Kolberg	1,51	"
		Wismar	1,56	Jahr. f. G.
1904	30./31. 12	Swinemünde	1,73	"
		Warnemünde	1,93	"
		Travemünde	2,22	"
		Flensburg	2,33	"
1906	4. 12.	Flensburg	1,52	"
1908	9. 1.	Warnemünde	1,56	"
		Travemünde	1,96	"
		Flensburg	1,74	"
1910	25. 1.	Flensburg	1,59	"
1913	30./31. 12.	Swinemünde	1,85	"
		Warnemünde	1,89	"
		Wismar	2,09	"
		Travemünde	2,00	"
1921	7. 11.	Wismar	2,02	"
		Kiel	1,73	"
1935	2./3. 3.	Kiel	1,63	"
		Flensburg	1,80	"
1936	9. 2.	Flensburg	1,89	"
1939	13./14. 2.	Flensburg	1,55	"
1941	13. 11.	Flensburg	1,90	"
	27./28. 12.	Travemünde	1,70	"
		Kiel	1,69	"
		Flensburg	1,88	"
1946	13. 1.	Wismar	1,53	"
1949	2. 3.	Kiel	1,52	"
	11. 12.	Travemünde	1,58	"
		Kiel	1,63	"
		Flensburg	1,51	"

Zu der Vollständigkeit der Tabelle 7 ist folgendes zu bemerken: Bis zum Beginn des vorigen Jahrhunderts wurden nur außergewöhnlich hohe Sturmfluten mehr oder weniger zufällig überliefert. Im 19. Jahrhundert wuchs das Bedürfnis und damit das Interesse zur Beobachtung der Wasserstände, ohne daß sie gleich vollständig erfaßt werden konnten. Das Jahrbuch für Gewässerkunde, welches nach den ausgewerteten Wasserstandslisten zusammengestellt ist, enthält alle Sturmfluten, die an den verschiedenen Orten gemessen worden sind.

Aus Tabelle 7 geht weiter hervor, daß die hohen Wasserstände vor allem in der Beltsee keine Seltenheit sind. Zeitabschnitte ohne größere Sturmfluten, wie z. B. seit dem Jahre 1913, bieten keinerlei Gewähr dafür, daß Sturmfluten nicht wiederkehren. Von 1825 bis 1913, d. h. in rund neunzig Jahren sind an der Küste der westlichen Ostsee elf Sturmfluten mit Wasserständen von mehr als 2 m über MW gezählt worden. Im Durchschnitt muß also etwa alle zehn Jahre mit einer schweren Sturmflut gerechnet werden.

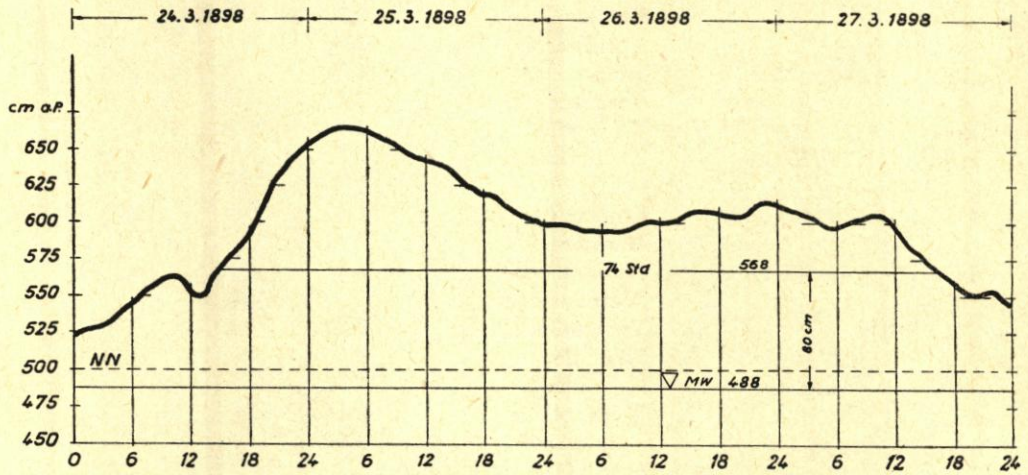


Abb. 12. Hochwasser 1898 am Pegel Staatswerft Lübeck

Daß nicht nur die Höhe, sondern auch die Dauer eines Hochwassers für die Aufarbeitung der Schutthalde und für den anschließenden unmittelbaren Angriff auf den anstehenden Geschiebemergel eines Steilufers entscheidend sein kann, mag Abbildung 12 veranschaulichen. Das MW lag im Jahre 1898 am Pegel Staatswerft Lübeck auf $-0,12$ m NN. Der höchste Wasserstand reichte bis $+1,72$ m MW; bei einem Wasserstand von mehr als einem Meter über MW tobte die Brandung rund achtzehn Stunden lang gegen das Brodtener Steilufer. Der Wasserstand von $+0,80$ m MW dauerte rund 74 Stunden an. Dieses Beispiel ist besonders geeignet, die Bedeutung der nicht sehr hohen, aber lang andauernden Hochwasser zu veranschaulichen. Am 10./11. Dezember 1949 stand das Wasser dagegen nur rund 33 Stunden lang über $+0,80$ m MW, und am Ende war der Fuß des Steilufers restlos von Schuttmassen geräumt.

Nun ist der Verlauf der Wasserstandsganglinien bei jedem Hochwasser ein anderer; denn die Entwicklung der Sturmfluten erfolgt jeweils bei unterschiedlichen Wetterlagen. Die Zugbahnen der Tiefs sind nie genau gleich, wie auch der Luftdruckgradient von Fall zu Fall verschieden ist.

In der westlichen Ostsee sind es ausschließlich Stürme mit Windrichtungen aus N, NO, O, die die hohen Wasserstände an der Küste hervorrufen. Der überwiegende Anteil entfällt auf die Nordostrichtung.

Im Rahmen der Untersuchungen am Brodtener Ufer wurde unter anderem versucht, eine Beziehung zwischen dem Landverlust und den hohen Wasserständen abzuleiten. Die lückenlose Beobachtungsreihe von 1885 bis 1949 am Pegel Staatswerft Lübeck lieferte das erforder-

liche Material für eine umfangreiche statistische Bearbeitung aller Wasserstände über + 0,50 m MW⁷⁾. Diese wurden sämtlich auf die hochwasserverursachenden Wetterlagen hin überprüft [STARK (89)]. Abbildung 13 zeigt einerseits die Abbruchflächen der Parzelle Hochhorst an der Stirnseite des Brodtener Ufers für die Zeitabschnitte der Vermessungen (vgl. Tab. 4). Für dieselben Zeitabschnitte sind andererseits die Stunden summiert worden, welche die Dauer eines Hochwassers z. B. mit einem höheren Wasserstand als + 0,80 m MW angeben. Die Verschiebung des Ansatzpunktes im ersten Zeitabschnitt erklärt sich aus dem ungleichen Beginn der Vermessungen 1877 und der Wasserstandsbeobachtungen 1885. Aus dem ähnlichen Verlauf der Ganglinien kann gefolgert werden, daß eine Beziehung zwischen

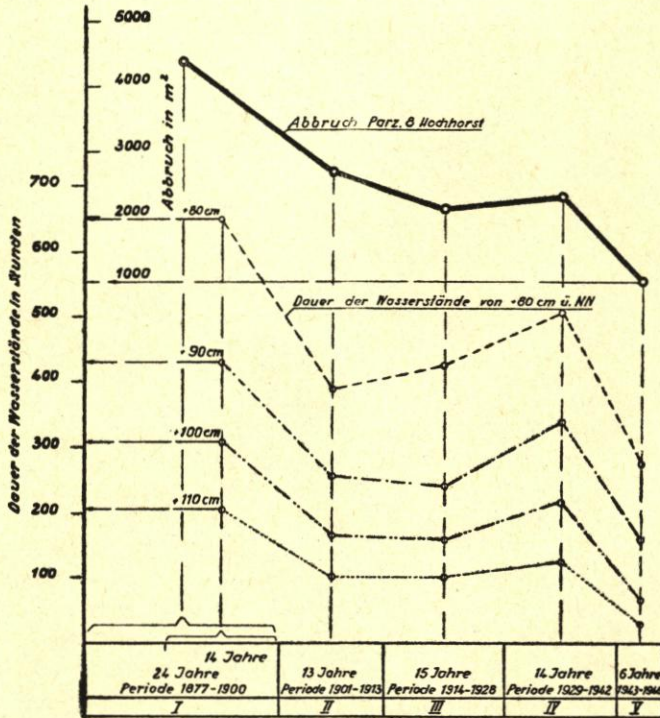


Abb. 13. Uferabbruch in Beziehung zur Dauer hoher Wasserstände

der Dauer der hohen Wasserstände und dem Maß des Uferabbruchs vorhanden ist [PETERSEN (65)]. Die Zusammenhänge sind vorläufig noch zu unübersichtlich, um dieses Ergebnis verallgemeinern zu können.

Die Wasserstandsganglinie eines Schreibpegels zeigt oft und vor allem bei Hochwasserlagen Steig- und Fallgeschwindigkeiten des Wasserspiegels an, die bei 10 bis 20 cm/Stunde und mehr liegen. Derartige vertikale Wasserbewegungen weisen auf den Transport großer Wassermassen im Seegebiet hin, d. h. sie sind mit Strömungserscheinungen verbunden.

c) Strömungs- und Brandungsverhältnisse vor der Küste

Eine Betrachtung der Strömungs- und Brandungsverhältnisse vor der Ostseeküste stößt insofern auf Schwierigkeiten, als im Vergleich zu Wasserstandsbeobachtungen überhaupt keine

⁷⁾ Die Aufzeichnungen des Pegels Travemünde, der s. Z. vom Geodätischen Institut in Potsdam betrieben wurde, standen nicht zur Verfügung. Für unsere Untersuchung ist die Lage des Pegels Staatswerft an der Untertrave von nebeneordneter Bedeutung, da die Spiegelschwankungen der Ostsee hier mit unwesentlichen Zeit- und Höhenunterschieden registriert werden.

zusammenhängenden und langfristigen Beobachtungen durchgeführt worden sind. Diese Tatsache erklärt sich dadurch, daß ein großer Aufwand an Fahrzeugen, Geräten und Personal erforderlich ist, diese Vorgänge zu messen. Es war bislang so gut wie gar nicht möglich, die Verhältnisse bei Sturmfluten von Schiffen aus zahlenmäßig zu erfassen. Außerdem fehlte es an den geeigneten Geräten. Die Aufzeichnungen, die an Bord der Feuerschiffe vorgenommen werden (also an einzelnen festen Punkten), haben keine Gültigkeit für den Küstenbereich. Die sehr unterschiedliche geographische Lage der Uferstrecken zur Hauptwindrichtung, die mehr oder weniger zergliederte Küste, die ungleiche Form des Meeresgrundes, wechselnde Salzgehalte und Temperaturen usw. ließen erst in jüngerer Zeit die Forderung nach systematischen Strommessungen in Verbindung mit anderen für die Deutung der Veränderungen an der Küste geeignet erscheinenden Untersuchungen aufkommen.

Abgesehen von örtlich begrenzten Schwimmermessungen oder auch Flügelmessungen, wurden im Untersuchungsgebiet erstmalig im Jahre 1939 großräumige Strommessungen vor der pommerschen Küste durchgeführt [WASMUND/WIRTZ (100)]. Da jeweils nur mit einem Gerät im Seegebiet des Darß, der Kösliner Bucht und vor Leba gemessen wurde, war eine vergleichende Darstellung der stündlichen, täglichen und langfristigen Stromverhältnisse im einzelnen Untersuchungsgebiet nicht zweckmäßig; denn jede Messung stellt einen Einzelwert an einem bestimmten Ort und zu einer bestimmten Zeit dar. Infolgedessen genügt das Beobachtungsmaterial nicht, um über Stromverhältnisse bei verschiedenen Wetterlagen Aussagen machen zu können. Die Aufgabenstellung zielte hier vielmehr auf die Erfassung meeresgeologischer Vorgänge auf dem Unterwasserstrand hin. Die dabei gewonnenen, teils sehr aufschlußreichen Erkenntnisse werden in den Abschnitten IV d und V besprochen.

Das Gebiet, das als nächstes im Jahre 1950 auf seine Stromverhältnisse hin bearbeitet wurde, war die Lübecker Bucht. Es wurde hierbei von dem Gedanken ausgegangen, die Strömungen in der geschlossenen Bucht möglichst unter gleichen Bedingungen zu erfassen. Zu dem Zwecke fanden eintägige Terminrundfahrten über ein Netz von festen Stationen statt, auf denen an der Oberfläche und in Stufen von 5 zu 5 m Wassertiefe bis etwa 1 m über Grund Strommessungen vorgenommen, Temperaturen bestimmt und Wasserproben zur Ermittlung des Salzgehalts entnommen wurden. Die Terminrundfahrten wurden mehrere Tage nacheinander mit denselben Stationen wiederholt. Um jahreszeitliche Abweichungen und typische Wetterlagen in die Auswertung einzubeziehen, wurden drei Meßperioden entsprechend über das Jahr verteilt. Während der letzten Periode wurden an fünf Stationen Dauerstrommessungen über je 48 Stunden durchgeführt, so daß auch die täglichen Schwankungen der Strömung an den einzelnen Stationen berücksichtigt werden konnten [WEIDEMANN (102)].

Das Strommeßprogramm erfuhr ferner durch den Einsatz von drei photographisch selbstregistrierenden Schaufelradstrommeßgeräten und einem Hochseepegel eine wertvolle Ergänzung. Letzterer lag etwa in der Mitte der offenen Lübecker Bucht auf der Linie Dameshöved—Klein-Klützhöved. Die Verteilung der Meßstellen erfolgte nach den oben beschriebenen Gesichtspunkten. Die Schreibdauer eines Gerätes lag etwa bei vierzehn Tagen. Zum Teil wurden die Messungen nach beiden Methoden miteinander gekoppelt [DIETRICH (10)].

Auf diese Weise ist ein reichhaltiges Beobachtungsmaterial über die Hydrographie der Lübecker Bucht zusammengetragen worden, das zu folgenden Ergebnissen führte:

Die Strömungen in der Lübecker Bucht wechseln häufig; sie folgen im allgemeinen den Windänderungen. Ein geschlossenes Strömungsbild stellt sich nur bei stetigen Wetterlagen heraus. Es überwiegen die westlichen Winde, bei denen sich nach einer gewissen Dauer an der Oberfläche eine auswärts gerichtete Strömung einstellt. Die bei westlichen Winden abtransportierten Wassermassen werden zum Teil ergänzt durch Kompensationsbewegungen in der Tiefe. Zeitweise starke Stromschichtung und der Auftrieb von kaltem, salzreichem Wasser sowie die Dauerstrommessungen in der offenen Bucht beweisen dies. Die Stromgeschwindigkeiten in der Lübecker Bucht erreichen nur in Ausnahmefällen, d. h. bei Sturmfluten, eine Größenordnung, die ausreichend erscheint, um einen unmittelbaren Abtrag des Unterwasserstrandes zu verursachen. Die Stromgeschwindigkeiten werden bei Wassertiefen von mehr als 7 m so gering,

daß dort auch bei Stürmen kaum ein Sandtransport wird auftreten können. Die gemessene Küstenströmung hat im wesentlichen Einfluß auf die Verfrachtung von Schwebstoffen und nicht auf die Wanderung der Sedimente am Boden.

Da die Mündung der Trave wegen der Versandungsgefahr der Platenrinne mit dem Abbruch des Brodtener Ufers im Zusammenhang steht, wurden die Strömungsverhältnisse in der Travemünder Bucht besonders ermittelt [DIETRICH (10) und PETERSEN (66)]. Gegenüber dem von Menschenhand unbeeinflussten Zustand findet heute als Folge der Travekorrektion ein wesentlich vermehrter Wasseraustausch im Mündungsschlauch statt. Allein die sonst fast unscheinbaren Gezeiten bewirken hier Stromgeschwindigkeiten bis zu 60 cm/s, die in der Lage sind, Sand aufzunehmen und zu verfrachten. Die periodischen Strömungen vermögen die Wasserstraße in und vor der Mündung offenzuhalten. Die Stromgeschwindigkeiten wachsen mit zunehmenden Steig- und Fallgeschwindigkeiten des Wasserspiegels in der Lübecker Bucht.

Abgesehen von dem Sonderfall in der Travemündung war im wesentlichen von dem meßbaren Küstenstrom die Rede. Die Vorgänge in der Brandungszone, d. h. in unmittelbarer Küstennähe, konnten mit den gegenwärtig verfügbaren Geräten nicht gemessen werden. In der Brandungszone spielt sich die für alle Küstenschutzmaßnahmen so entscheidende Sandwanderung ab. Die Verfrachtung des vor Steilufeln gelösten Bodens wäre ohne das Vorhandensein einer hinreichend starken Strömung nicht zu erklären.

Umfangreiche Untersuchungen in der Brandungszone sind in den letzten Jahrzehnten in den USA durchgeführt worden [DIETRICH (10) und WEIDEMANN (102)]. Danach kann man sich die Vorgänge kurz etwa folgendermaßen vorstellen: Bei Sturm läuft die Seegangs- bzw. Brandungswelle meist schräg gegen die Küste auf (1. Bewegungsrichtung: landwärts), sie erzeugt den Brandungstau. Die Folge ist eine Brandungsrückströmung (2. Bewegungsrichtung: seewärts). Da nun nicht die gesamte Energie in den Brechern vernichtet, bzw. vom Ufer reflektiert wird, folgt die Überführung eines Teiles der Bewegungsenergie in eine küstenparallele Brandungsströmung (3. Bewegungsrichtung: uferparallel). Geschwindigkeiten von 1 m/s sollen an amerikanischen Küsten nach Beobachtung und Rechnung keine Seltenheit sein.

Die Richtungen der Brandungsströmungen in der Lübecker Bucht lassen sich für die entscheidenden, bei Nordoststürmen auftretenden, hohen Stromgeschwindigkeiten angeben, jedoch nicht ihre Stärken. Eine Konvergenz der Brandungsströmungen ergibt sich in der Neustädter Bucht etwa vor Scharbeutz, eine weitere in der Travemünder Bucht vor dem Priwall. Auf dem Steinriff vor dem Brodtener Ufer findet eine Stromteilung statt, und zwar dort, wo die Windrichtung senkrecht auf den Bogen des Steilufers trifft. Die vorstehenden Beobachtungen und Überlegungen wurden für die Flanken des Brodtener Ufers durch geomorphologische Forschungen von SPETHMANN (88) und für die Lübecker Bucht durch eine hydrodynamische Untersuchung von HANSEN (28) bestätigt.

Über die Vorgänge in der Brandungszone sei abschließend betont, daß sie für die Beurteilung der Küstenbildung und der Wirkung von Küstenschutzwerken von hervorragender Bedeutung sind. Solange unsere Kenntnisse auf diesem Gebiet als unzureichend angesehen werden müssen, dürften Enttäuschungen und kostspielige Erneuerungs- und Unterhaltungsarbeiten an den Schutzwerken nicht ausbleiben. Deshalb wird es Aufgabe der nächsten Zukunft sein, über die Brandungszone grundlegende Untersuchungen anzustellen.

d) Abtragung des Unterwasserstrandes

Eine bemerkenswerte Beobachtung vom Unterwasserstrand vor einem Steilufer teilte BAENSCH (2) 1875 mit: „Jeder anhaltende Ostwind, welcher die Wellen über das Steinriff treibt, giebt dem Wasser im südwestlichen Theile der Bucht eine lehmgelbe Färbung, selbst wenn in Höhe des Fußes des Brodtener Ufers wenig oder gar kein Lehm weggewaschen wird, also ein Zeichen, daß die Wellen das Riff in See immer noch angreifen.“ REHDER veranlaßte dann im Jahre 1886 eine vorzügliche Vermessung des Seegrundes auf dem Steinriff und im Travemünder Winkel. Die damals vereiste innere Lübecker Bucht ermöglichte eine engmaschige Messung (Quadratnetz der Peilung mit 20 m, z. T. sogar mit 10 m Abstand) unter Angabe der Bezugsebene (MW) zu NN. Die Untersuchungen an der Küste Pommerns über die Abrasion des Unterwasserstrandes

waren vorwiegend sedimentpetrographischer Art. WASMUND/WIRTZ (100) faßten das Ergebnis wie folgt zusammen: „Hinsichtlich der Ursachen der Materialwanderung und des Materialhaushaltes müssen sich nach den neuen Ergebnissen mehr als bisher die Erkenntnisse durchsetzen, daß einerseits die Materialmengen zum weitaus überwiegenden Teil nicht von der Küste, sondern von der Abrasion des Unterwasserlitorals herkommen, daß aber auch die Ursachen der Materialwanderung selbst in den hydrographischen und morphologischen Eigenschaften des weiteren Seegebietes und der weiteren Küste, nie aber allein in dem betreffenden Küstenabschnitt zu suchen sind.“ Es mag zutreffen, daß die Materialmengen vorwiegend vom ausgedehnten Unterwasserstrand vor der Küste Pommerns herkommen. Wie Massenberechnungen gezeigt haben, liegen die Verhältnisse in der Lübecker Bucht anders.

REHDER vertrat in einer Bürgerschaftsverhandlung die Hypothese, daß die Bodenmasse aus der Abrasion den Betrag der Bodenmasse aus dem Steiluferrückgang um ein mehrfaches übertriffe. Er stützte sich dabei auf einen Vergleich seiner Eispeilung 1886 mit der französischen Karte von 1811 (Beautemps-Beaupré) und rechnete mit einem gleichmäßigen Abtrag des gesamten Steinriffs. In einer späteren Bürgerschaftsverhandlung sagte REHDER, „daß die Tiefen über 3 m hinaus sich in den letzten 100 Jahren nur wenig geändert haben“. Nachdem sich gezeigt hatte, daß die Peilung von 1811 und die späteren Seekarten für einen Vergleich mit der Vermessung von 1949 nicht genau genug durchgeführt worden sind, schloß die Eispeilung von 1886 diese Lücke.

Das Ergebnis der Massenberechnung besagt, daß in der Zeit von 1886 bis 1949 vor dem Steilufer im Durchschnitt jährlich rund 13 500 m³ Boden abgetragen wurden. Der Jahresverlust an Boden aus dem Brodtener Steilufer betrug dagegen für die Zeit von 1877 bis 1949 durchschnittlich rund 24 100 m³, d. h. hier überwiegen die Bodenmassen aus dem Steilufer.

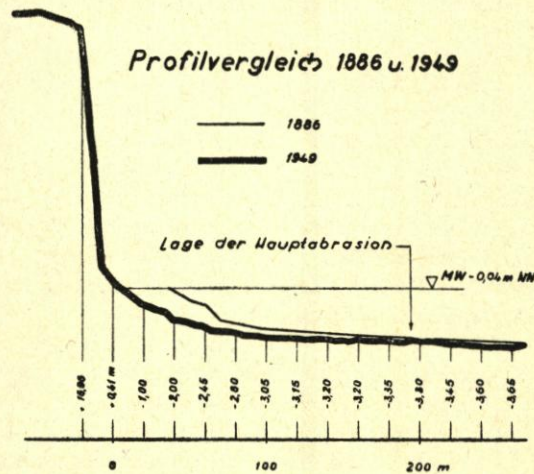


Abb. 14. Ausschnitt aus einem Profilvergleich am Brodtener Ufer

Aus der Betrachtung der Vergleichsprofile geht weiter hervor, wie es auch sinnvoll ist, daß die Mächtigkeit des Abtrags mit der Tiefe abnimmt (Abb. 14). Es gelang, die Hauptabrasionszone vor dem Steilufer abzugrenzen und die Gebiete geringer Abtragung anzudeuten (Abb. 15). Für eine Massenermittlung an den Flanken fehlten die Voraussetzungen. Das Hauptabrasionsgebiet reicht im allgemeinen bis zur 4,0-m-Tiefenlinie. Ferner konnte durch den Vergleich der mittleren Uferquerschnitte (aus sämtlichen Profilen berechnet, Abb. 16 und Tab. 8) ein beschleunigtes Vorrücken der Tiefenlinien gegenüber dem Rückgang des Steilufers aufgezeigt werden [PETERSEN (65)].



Abb. 17. Blockarmer Unterwasserstrand vor dem Brodtener Ufer bei -1 m MW. Abbruchkante bis zu $0,5$ m hoch („Tonbänke“), Fußspuren in durchweichter Geschiebemergeloberfläche. 24. Oktober 1949, 15 Uhr



Abb. 18. Blockarmer Unterwasserstrand vor dem Brodtener Ufer bei -1 m MW. Blick auf die mecklenburgische Küste. Geschiebemergelbänke senkrecht zum Ufer ausstreichend. 24. Oktober 1949, 15 Uhr



Abb. 19. Brodtener Ufer, 24. Oktober 1949, 15 Uhr.
Unterwasserstrand bei -1 m MW. Blick senkrecht zur Uferlinie auf seawärts
ausstreichende Geschiebemergelbänke und mit Geröll angefüllte Klüfte



Abb. 20. Brodtener Ufer, 30. August 1950, 14 Uhr.
Blick vom Haus „Seeblick“ nach Niendorf. Das Sandriff liegt frei bei $-0,75$ m MW



Abb. 21. Travemünde, 19. Oktober 1949.
Blick vom Leuchtturm auf den Priwall bei $-0,85$ m MW. Sandanreicherung



Abb. 22. Blockreicher Unterwasserstrand vor dem Brodtener Ufer bei -1 m MW.
Rechts im Bild „Tonbänke“ ohne Steinbedeckung. 24. Oktober 1949, 15 Uhr



Abb. 23. Der „Söhrmandamm“ bei Travemünde am 4. Juli 1950
bei + 0,40 m MW



Abb. 24. Abbruchkante am südlichen Ende des „Söhrmandammes“,
16. Januar 1950

Tabelle 8
Vorrücken der Tiefe auf dem Steinriff im Verhältnis zum Vorrücken
des Steilufers (1886—1949)

Vorrücken des Steilufers	um	0,46 m/Jahr
„ der 1-m-Tiefe	„	0,51 m/Jahr
„ „ 2-m-Tiefe	„	0,67 m/Jahr
„ „ 3-m-Tiefe	„	0,83 m/Jahr
„ „ 4-m-Tiefe	„	1,34 m/Jahr
„ „ 5-m-Tiefe	„	0,61 m/Jahr

Experimentelle Untersuchungen über das Verhalten des Geschiebemergels unter Wasser durch DÜCKER (11) ergaben, daß der vom Wasser bedeckte Geschiebemergel an der Ober-

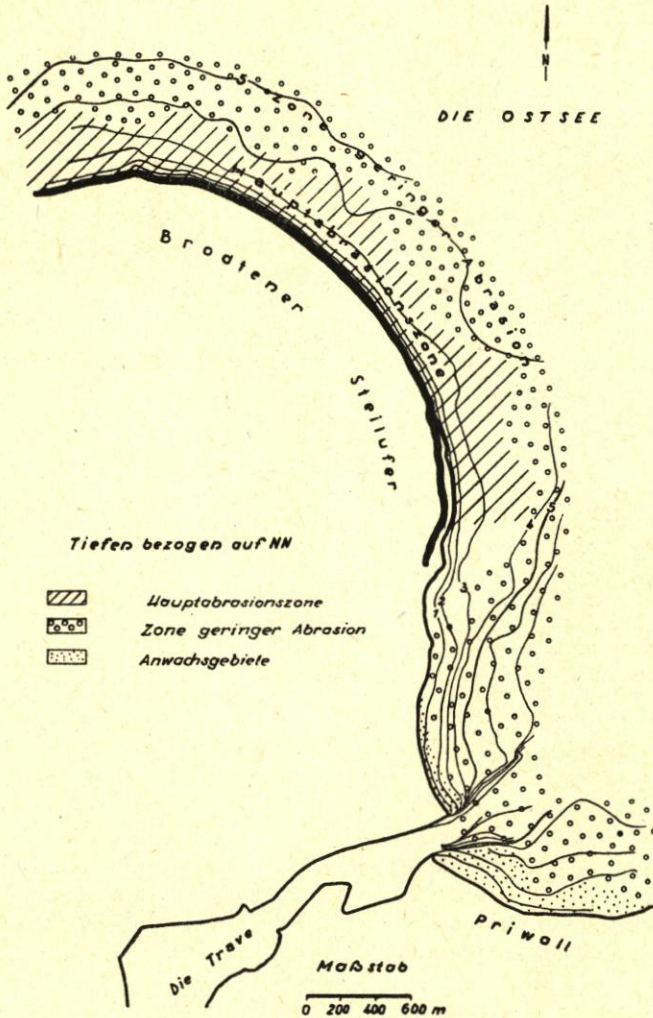


Abb. 15. Abrasionsgebiete Priwall — Brodten

fläche völlig durchweicht wird. Diese Feststellung wurde durch Beobachtungen in der Natur bei den Peilungen und beim Niedrigwasser vom 24. 10. 1949 bestätigt. In Abbildung 17 sind die Fußspuren an der durchweichten Oberfläche zu erkennen. Bei Seegang und Brandung wird

diese Schlammschicht alsbald aufgearbeitet. Das Wasser nimmt durch den gelösten Schlamm eine braungraue Färbung an, die sich als Trübung deutlich abhebt. Die Oberfläche des Geschiebemergels ist für neue Durchweichungen freigelegt.

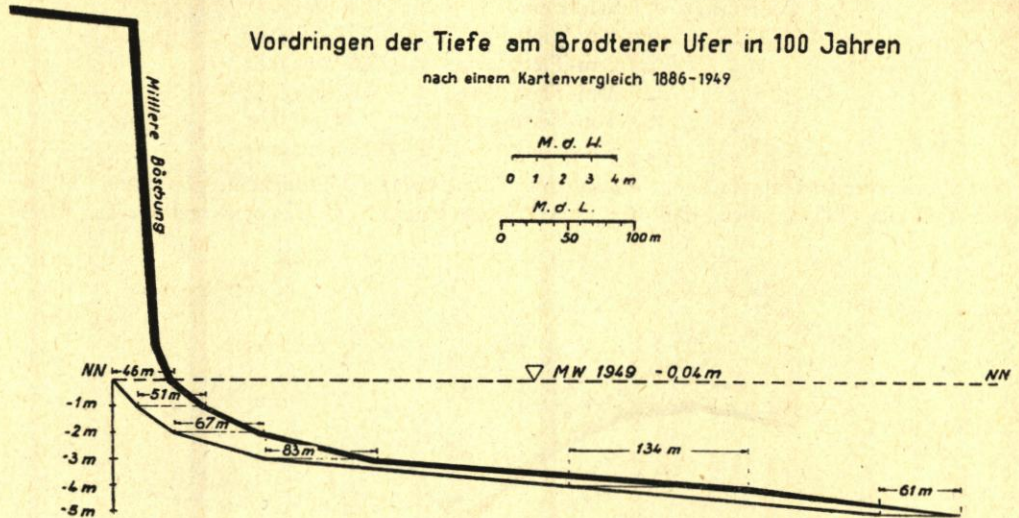


Abb. 16.

In der Hauptabrazionszone tritt noch eine verstärkte Erosionswirkung hinzu. Die Klüftungsspalten, die etwa senkrecht zum Ufer ausstreichen, werden von der Brandung ausgeräumt; in den Spalten bewegen sich die Gerölle hin und her und beschleunigen den Abtrag (Abb. 17—19).

Es wird an der Ostseeküste zur Zeit nur selten möglich sein, die Abrasion mengenmäßig zu bestimmen, da die dafür nötigen gleichwertigen Vermessungsunterlagen aus Zeitabschnitten mit jahrzehntelangen Abständen kaum vorhanden sein dürften. Deshalb wird die qualitative Methode mit Hilfe der Sedimentpetrographie auch künftig für weitere Forschungen nicht entbehrt werden können.

V. Verbleib des Abbruchmaterials

Das Geschehen in, an und vor dem Steilufer ist behandelt und erläutert worden. Nun steht noch eine Erörterung über den Verbleib des Abbruchmaterials aus.

a) Sedimentpetrologische Untersuchungen

Das sedimentpetrologische Verfahren ist an der Ostseeküste erst in jüngerer Zeit zur Anwendung gekommen. Die bisherigen Ergebnisse lassen erkennen, daß der Meeresgeologe in der Lage ist, dem Seebauingenieur damit wertvolle Angaben über die Materialbewegungen an und vor der Küste an die Hand zu geben. Die Arbeiten von PRATJE (71) und von WASMUND (96) waren richtungweisend für die Wasserstraßendirektion Stettin, dieses Verfahren bei der Klärung der Sandwanderung an der Küste Pommerns zu erproben [SCHUMACHER (83)].

Bei den Untersuchungen über die Ursachen des Abbruchs am Brodtener Ufer wurde der Ausbau der Arbeitsmethoden weiter gefördert [PETERSEN/WETZEL (69)].

1. Seegrundkartierung

Für Seegrundkartierungen sind schwimmende Fahrzeuge erforderlich. Die Bedeckung des Seegrundes wird probenweise mittels Bodengreifer festgestellt. Die Entnahme der Grundproben erfolgt in Profilen, die nach den auf der Seekarte erkenntlichen Bodenformen auszuwählen sind. Die Proben werden an Bord und im Labor auf Korngrößenverteilung und sonstige Sedimentationsmerkmale hin untersucht und der Lage entsprechend in Plänen dargestellt.

PRATJE (71) unterteilt die Bodenbedeckung in der südlichen Ostsee in fünf Zonen:

1. die küstennahe Sandanhäufungszone,
2. die Abtragungszone mit den Restsedimenten,
3. die küstenferne Sandanhäufungszone,
4. die sedimentarme oder -freie Zone,
5. die Schlickgebiete.

Eine klare Abgrenzung der einzelnen Zonen ist nicht zu erwarten. Überschneidungen sind naturbedingt. An den Küstenabschnitten vor Leba [GEIB (16)] oder in der Kösliner Bucht [WIRTZ (103)], wo z. B. die 40-m-Tiefenlinie etwa 70 km, die 60-m-Tiefenlinie etwa 120 km vom Ufer entfernt liegen, verteilen sich die Zonen klarer als an der schleswig-holsteinischen Küste [JARKE (37)] oder speziell in der Lübecker Bucht [RUCK (79)].

Hier erreichen die Tiefen kaum 25 m; die ersten vier Zonen drängen sich auf einem verhältnismäßig schmalen Küstenstreifen zusammen und vermischen sich dort. Während die Schlickgebiete vor Leba und Köslin nicht angetroffen wurden, konnten sie in der Lübecker Bucht eindeutig nachgewiesen werden. Die Bodenuntersuchungen ergaben hier, daß die Korngröße von Sand über Feinsand zu Schluff und Schlick mit der Entfernung vom Ufer abnimmt, d. h. nur grobkörniges Material verbleibt auf dem Strand und wird dort im ganzen gesehen küstenparallel verfrachtet. Auf dem Steinriff vor dem Brodtener Ufer wurde bis über die 10-m-Tiefenlinie hinaus ein dünner Sandschleier über dem Geschiebemergel angetroffen. Bei Stürmen ist mit einem Auswachsen der Feinkornanteile aus der durchweichten Oberfläche zu rechnen.

Das Schlickgebiet umfaßt den tiefen Mittelteil der Lübecker Bucht. Die Grenze gegen das Sandgebiet schwankt sowohl in der Breite als auch in der Tiefe. Die höchste Lage des Schlicks befindet sich in dem inneren Teil der Bucht vor Pelzerhaken bei nur 6,5 m Wassertiefe. Eine Sandwanderung über das Schlickgebiet hinweg, etwa quer über die Bucht, ist nicht möglich. Das lockere Material kommt ausschließlich vom Festland, d. h. vom Abbruch der Steilufer und von den vorgelagerten submarinen Abrasionsflächen.

2. Kartierung des Strandes

Die küstennahe Sandanhäufungszone (nach PRATJE die Zone 1) erhält für Küstenschutzmaßnahmen ein besonderes Interesse. Der von WIRTZ (103) vorgeschlagenen weiteren Unterteilung dieser Zone wird zugestimmt. Sobald unsere Kenntnisse von den Vorgängen in der Brandungszone vertieft sein werden, dürfte sich eine sinnvolle Abgrenzung aus den hydrologischen und bodenkundlichen Beobachtungen ergeben. In den uferparallelen Riffen spiegelt sich nach HARTNACK (29) und SCHÜTZE (86), WASMUND (98), TAUBER (91), GEIB (16) und WIRTZ (103) der Wanderweg des Sandes wider.

Über die Versuche, den Gerölltransport mit gefärbten Gesteinen zu messen, liegen unter anderem folgende Ergebnisse vor:

TAUBER: „So sehen wir, daß es der marinen Geröllwandung möglich war, in einem Falle innerhalb eines Zeitraumes von weniger als 6 Monaten Gerölle etwa 10 km vom Auswurfplatz zu entfernen, in einem zweiten Falle die Gerölle in etwa 4 Monaten nach beiden Richtungen auf eine Strecke von über 8 km zu verteilen.“ „Somit müssen wir zumindest für den weitaus größten Teil der bei Darßerort anlandenden Gerölle Transportweiten von 15—19 km annehmen.“

GEIB: „Fehlt ein stärkerer Küstenstrom, so bringt die auflaufende Dünung den Sand schubweise zum Lande. Ist dagegen der Küstenstrom stärker, so wandert der Farbsand nur auf dem Riffe und nicht zum Lande hin. Der starke Strom vom 17. 7. 1939 hatte den Blausand in wenigen Stunden 2,1 km nach Osten wandern lassen. Daraus läßt sich folgern, daß der Strom küstenzerstörend wirkt und den Sand nach Osten verfrachtet, die Dünung dagegen Sandbringer und damit küstenaufbauendes Element ist.“

Bei den Untersuchungen in der Kösliner Bucht beobachtete WIRTZ durch kombinierte Strömungs- und Sandwanderungsmessungen (letztere mit der Sandfalle nach Lüders) das Werden eines Riffs und weist nach, daß „das Riff als Form bei stärkerer Brandung verschwunden ist“. „Aus turbulenten Strömungen, die als Transportbänder des Sandes dienen, fallen bei nachlassender Stromgeschwindigkeit und Turbulenz die suspendierten Sandkörner nach ihrer Größe aus; es entsteht dann erst das Riff.“

An der inneren Lübecker Bucht bestimmte OTTO (63) den Wanderweg der Gesteine aus Proben vom trockenen Strand bzw. von der Wasserlinie. Es wurde der Nachweis erbracht, daß die gesamte Menge an Strandsand vor Niendorf (Abb. 20), die alten und jungen Strandwälle vor dem Hemmeldorfer See, der Timmendorfer Strand, der Strandwall vor dem bewachsenen Kliff von Scharbeutz und das Südende des Strandwalls vor den Haffwiesen aus den Bodenarten kommt, die das Brodtener Steilufer charakterisieren. Die Sande wurden von dem Küstenstrom so weit verfrachtet, bis sie auf einen gleich kräftigen vom Sierksdorfer Kliff stammenden Sandstrom stießen. Hier hat die beiderseitige Sandzufuhr zu einer allmählichen Verbreiterung des Strandwalls geführt (vgl. B IV c). Eine Zufuhr frischen Materials von See her findet nicht statt.

Die Küstenstrecke vom Brodtener Ufer bis Travemünde ist zu kurz, um mit diesem Verfahren ein eindeutiges Ergebnis erzielen zu können. Aus der Beobachtung, daß bei starkem aufländigem Wind lehmfarbiges Wasser in Richtung Travemünde fließt, wird gefolgert, daß auf dieser Küstenstrecke gleichartige Verhältnisse vorliegen wie auf der Küstenstrecke Brodten—Sierksdorf. An der mecklenburgischen Küste wurde eine Sandwanderung in Richtung auf den Priwall belegt.

Im Travemünder Winkel lassen die menschlichen Eingriffe in das Naturgeschehen eine scharfe petrographische Trennung des Sandes nach der Herkunft von Brodten oder Mecklenburg nicht zu. Nach den bisherigen Erkenntnissen wird der Travemünder Strand vom Brodtener Ufer her und der Priwall sowohl vom Brodtener Ufer als auch von der mecklenburgischen Seite her aufgebaut (Abb. 21).

b) Kartenvergleiche

So wie das Maß des Steiluferrückgangs und der Abrasion des Unterwasserstrandes durch Vergleiche von verschiedenen datierten und auf Grund genauer Vermessungen angefertigten Karten ermittelt werden kann, läßt sich ebenfalls der Nachweis für die flächen- und mengenmäßige Ausdehnung von Abbruch- und Anwachsgebieten führen.

Da von anderen Küstenstrecken keine vergleichbaren Messungen zur Verfügung stehen, werden die Untersuchungen vom Abschnitt des Priwall bis Timmendorfer Strand beispielsweise an Abbildung 3 erläutert. Hier tritt das Abbruchgebiet vor dem Steilufer deutlich hervor. Es wird von Anwachsflächen an beiden Flanken begrenzt. Der stärkste Anwachs wird vor dem Priwall vermerkt, wo die Mittelwasserlinie etwa um 1 m im Jahr vorverlegt wurde. Auch der Strand von Travemünde weist eine Verbreiterung gegenüber 1877 auf. Die Plate, die vor der Travekorrektur als Sandbarre quer vor der Travemündung lag, ist infolge des vermehrten Wasseraustausches fast völlig umgelagert worden. Dieser Sand dürfte entscheidend zu der seewärtigen Verschiebung des Priwall-Strandes beigetragen haben.

Der Sandvorrat an beiden Flanken des Brodtener Ufers verdankt seine Herkunft dem Abbruch des Hochufers und der Abtragung des Unterwasserstrandes. Die Bodenmassen vom Uferabbruch verhalten sich zu den Abrasionsbeträgen wie 24 100 m³/Jahr zu 13 500 m³/Jahr. Es entfallen von dem gesamten Abtrag (37 600 m³/Jahr) etwa 30 v. H. bis 35 v. H. = rund 11 000 bis 13 000 m³/Jahr auf Sand. Diese dürften sich angenähert je zur Hälfte an dem Aufbau des westlichen und östlichen Strandbereiches beteiligen [PETERSEN (65—68)].

c) Berechnung der Transportkraft

Der dänische Wasserbauer MUNCH-PETERSEN (71) entwickelte eine Formel, welche die Berechnung der Transportkraft für jeden Punkt der Küste zuläßt. Aus der Windstärke, Richtung, Häufigkeit und Anlaufbahn des Windes kann man einen Vektor berechnen, der in eine Hauptangriffshöhe (senkrecht zur Küste) und in eine Materialverfrachtunggröße (uferparallel) zerlegt werden kann. Diese Berechnungsmethode erlaubt einen vorausschauenden Überblick über die möglichen Rückgangswerte bei einem Vergleich mit anderen Punkten eines Küstenabschnitts der Ostsee, so daß danach schon die Dringlichkeit oder Nutzlosigkeit von technischen Maßnahmen zur Küstenverteidigung erkannt werden kann.

Genauere Berechnungen jedoch werden die physikalischen Eigenschaften des Abbruchmaterials sowie die Neigung und Oberflächenform des Unterwasserstrandes berücksichtigen müssen.

C. Der Schutz von Steilufern

In diesem Abschnitt soll eine Übersicht gegeben werden über die Art, wie der Schutz von Steilufern bisher behandelt wurde. Dazu wird zunächst festgestellt, daß es mit heute zur Verfügung stehenden technischen Mitteln durchaus möglich ist, den Abbruch eines Steilufers zu verhindern, wenn die erforderlichen Geldmittel zur Verfügung stehen. Aus der Vielzahl der Bauwerke, die zum Schutze der Ostseeküste erstellt worden sind und aus unserem heutigen Wissen um die Ursachen der Veränderungen im Küstengebiet wurden die Erfahrungen gesammelt.

Es kann nicht Gegenstand dieser Arbeit sein, sämtliche ausgeführten und geplanten Baumaßnahmen zu untersuchen. Die wesentlichsten Merkmale, die sich zum Teil widersprechen, werden herausgestellt, um für künftige Bauvorhaben verwertet werden zu können.

Eine Beschränkung auf den Schutz von Steilufern allein läßt sich nicht exakt verwirklichen, da die zur Sicherung von Flachküsten erforderlichen Bauten meist mit den Schutzmaßnahmen vor Steilufern in engem Zusammenhang stehen.

I. Bauformen

a) Dünenbau

Dünen sind alluviale Sandhügel. Voraussetzung für die Bildung von Dünen ist das reichliche Vorhandensein des locker lagernden Baustoffes Sand und der möglichst gleichgerichteten Transportkraft des Windes. Diese Bedingungen sind an den Küsten Mecklenburgs, Pommerns und Ostpreußens erfüllt, so daß sich die Dünen hier von Natur aus recht gut entwickeln konnten.

Aufgabe des Dünenbaues ist es, die Küste durch Festlegung der Dünen zu sichern, die Erhaltung des Landes zu gewährleisten und die Häfen und Flußmündungen gegen Versandung zu schützen. „Der Wechsel der Windstärke und Windrichtung, die Änderung der Wellenbewegung führen dauernd zu Unregelmäßigkeiten in der Strandausbildung [GERHARDT (19)]. Durch planmäßige Bepflanzung und sorgfältige Pflege der Dünen, insbesondere der Vordünen, entsteht ein widerstandsfähiger Dünenkörper, dessen Außenböschungen sich im Laufe der Zeit so flach formen, daß die Wellen bei höheren Wasserständen verhältnismäßig unschädlich auflaufen. „Der große Vorzug, den die Vordünen vor allen anderen Uferschutzwerken besitzen, liegt darin, daß ihren Aufbau allein die Natur besorgt. Der Mensch muß sie nur darin zur gegebenen Zeit in sachkundiger Weise unterstützen. Somit stellen die Dünen den billigsten Schutz der Küste dar“ [HEISER (32)]. Im Jahre 1864 wurde die Bewirtschaftung der Vordünen der Wasserbauverwaltung mit Ausnahme derjenigen Dünenstrecken übertragen, die Gemeinden oder Privaten gehören.

Als „Mittel zum Schutze der Küsten gegen die Angriffe der Ostsee und der atmosphärischen Kräfte“ werden nach SCHUMACHER (84) „nur die technischen Regeln des Dünenbaues an der Ostsee“ anerkannt, im Gegensatz zu den anderen noch umstrittenen Mitteln. „Wenn die Sandzufuhr zur Küste längs dieser, vom Meeresgrund her, oder durch Sandstauben so günstig ist, daß sich ein 30—40 m breiter Strand oberhalb des Mittelwasserstandes hält, dann genügt dies, um landwärts eine Vordüne durch Sandgraspflanzungen aufzubauen. Der Fuß dieser durchlaufenden Vordünen liegt bei der natürlichen Neigung des trockenen Ostseestrandes von 1:15 bis 1:20 etwa 2 m über MW, d.h. über Sturmfluthöhe. Der Dünenfuß wird zwar durch Wellenschlag höchster Sturmfluten angegriffen, der Verlust der Düne durch die Bildung einer Abbruchkante läßt sich aber bis zum Eintritt der nächsten hohen Sturmflut durch Sandfang mittels Sandgraspflanzungen wieder ausgleichen.“

Über den Dünenbau vor Steilufern berichtet HEISER (32): „Vor Hochufern, denen in der Regel ein ganz schmaler Strand vorlagert, ist die Heranziehung einer Vordüne erfahrungsgemäß über-

haupt ausgeschlossen. Hier kann sich der Sandflug überhaupt nicht wirkungsvoll und gleichmäßig entfalten. Der landwärts gerichtete Wind stößt sich an der steilen Wand des Hochufers und wirbelt den Sand hin und her, so daß er nicht zur Ruhe kommen und sich niederschlagen kann. An solchen gefährdeten Punkten müssen andere Mittel zur Sicherung der Küste angewendet werden. Sie bestehen in der Anlage künstlicher Uferschutzwerke.“

Nachdem zur Sicherung des Steilufers von Jershöft zunächst kurze Buhnen, dann eine massive Schutzmauer gebaut (nicht fertiggestellt) und schließlich die Buhnen verlängert und das Buhnensystem erweitert worden waren, rückte die Strandlinie seewärts vor, „der Hochuferfuß ist seit 1929 zur Ruhe gekommen und wies besonders im Ostteil der Hochuferstrecke eine kräftige Vordüne auf. Die Hochuferböschung ist durchweg bewachsen“ [SCHUMACHER (84)]. Dieser Erfolg verdient hervorgehoben zu werden.

An der schleswig-holsteinischen Ostseeküste gibt es keine nennenswerten Dünen. Es fehlen die Voraussetzungen für ihre Entstehung, da die Küstenstrecken kurz, die Sandwanderung entlang der Küste gering und der vorherrschende Wind aus den westlichen Sektoren ablandig gerichtet ist. An dem Brodtener Steilufer, das im Bogen nach Nordosten zur See hin abbiegt, wird der günstigenfalls vom Wind erfaßte Sand ins Meer hinausbefördert. Auflandige Winde verursachen im allgemeinen hohe Wasserstände. Auf einem feuchten oder gar überfluteten Sandstrand kann sich kein Sandflug entfalten. Die geringe Bedeutung des Windes für Sandumlagerungen wird durch die Beobachtung bestätigt, daß die Sandburgen am Badestrand von Travemünde über den Winter erhalten bleiben, wenn sie nicht durch Hochwasser oder Menschenhand eingeebnet werden.

b) Biologischer Uferschutz

Es ist des öfteren erwogen worden, Steilufer abzuschrägen und zu bepflanzen in der Annahme, auf der abgeflachten und biologisch befestigten Böschung die Energie der Brandung vernichten zu können [WOHLENBERG (104)]. Solange der Fuß des Kliffs aber nicht festliegt, bleibt die aufgewandte Mühe illusorisch. Eine natürliche oder am Kliffuß künstlich eingebrachte Vegetation vermag weder dem Anprall des Wassers noch der zerstörenden Arbeit des in der Brandung nagenden Gerölls Widerstand zu leisten [CHRISTIANSEN (5)].

c) Bedeutung der Steinentnahme

Bei der Aufarbeitung der Abbruchmassen und des Unterwasserstrandes bleiben Felsblöcke als Restsedimente vor den Steilufern zurück (Abb. 22), ohne wesentliche seitliche Ortsveränderungen erfahren zu haben. Sie stellen den natürlichen Schutz des Über- und Unterwasserstrandes dar, sofern sie nicht fortgeräumt wurden.

Da die Felsen vom Schiff mittels Zangen und Winden mit verhältnismäßig geringem Aufwand geworben werden können, hat die Steinfischerei seit langer Zeit eine bedeutende wirtschaftliche Rolle gespielt. Ostseefindlinge wurden in großen Mengen für Wehranlagen, für den Bau von Hausfundamenten, Häfen und Straßen und seit etwa hundert Jahren auch für Zwecke des Uferschutzes an der Ostsee selbst, an der Nordsee und an Wasserläufen angeboten und angekauft. Allein für das Steinriff vor dem Brodtener Ufer gab KANNENBERG (39) eine Entnahme von mindestens 100 000 m³ Steinen an. „Die Folge dieses schädlichen Gewerbes war eine beträchtliche Steigerung der Abrasionsmöglichkeit.“ Nach MEYER (53) sind an der Nordküste der Insel Poel viele Steine für den Straßenbau weggefischt worden. „Hierdurch verlor der Strand seinen natürlichen Wellenbrecher.“

Die Gefahr, die dadurch für die Erhaltung der Küste entstand, ist schon lange erkannt worden. Vor hundertfünfzig Jahren forderten die Brodtener Bauern bereits ein Unterbinden der Steinentnahme. Mehrfach sind Verbote ausgesprochen worden; Übertretungen waren jedoch keine Seltenheit.

Da ein beschleunigtes Vorrücken der Tiefenlinie gegen das Kliff vor Brodten festgestellt werden konnte (vgl. S. 120), liegt der Schluß nahe, daß dieser Vorgang mit der Räumung der natürlichen Steinbedeckung vom Unterwasserstrand in Beziehung steht.

Verbote zur Verhinderung der Steinentnahme sind ferner vom Samland, von Hiddensee

und von der Tromper Wiek auf Rügen bekannt geworden. Alle Verbote sind unwirksam, solange sie nicht konsequent durchgeführt und überwacht werden.

d) Längswerke

Der Schutz von Steilküsten ist in der Regel ohne Längswerke nicht zu schaffen. Es hat an Versuchen mit einfachen bis schweren Anlagen nicht gefehlt. Bei der Entwicklung sind sehr verschiedene Wege beschritten worden, die aus der ungleichen Beurteilung der wirkenden Kräfte zu erklären sind. Anfangs haben Gründe der Sparsamkeit die Planungen entscheidend beeinflusst, und oft sind die zerstörenden Kräfte des Meeres unterschätzt worden.

1. Flechtwerke

An der Südflanke des Brodtener Ufers, vor dem Seetempel, legte das Stadtgartenamt zu Lübeck im Jahre 1902 eine Versuchsstrecke aus, die mit Weidengeflecht bebaut wurde. Schon das nächste Hochwasser im April 1903 zerstörte die Anlage völlig. Trotz dieses Mißerfolges tauchte der Gedanke im Jahre 1949 abermals auf. GERLACH [(20) u. (21)] wollte „die Erde durch ein diagonales Weidengeflecht gegen Abspülung durch die See schützen“. Selbst bei sorgfältigster Ausführung ist dieses Vorhaben zum Scheitern verurteilt, da der Baustoff in jedem Jahre infolge Verwitterungs- und Hochwasserschäden verfällt bzw. fortgeräumt wird.

2. Steindämme

Steindämme sollen als Wellenbrecher wirken. Zu dem Zwecke baute man sie in den Bereich der Brandungszone, d. h. in etwa 20 bis 50 m Abstand vom Kliff. Sie wurden vornehmlich dort angelegt, wo reichlich Steine in der Nähe vorhanden sind: bei Brüsterort, bei Neufahrwasser, Oxhöft, Rixhöft, bei Rügenwaldermünde, am Ruden, an der Greifswalder Oie, vor Hiddensee, bei Saßnitz auf Rügen, bei Travemünde (Söhrmandamm) und an anderen Orten.

Bei der ältesten Bauweise sind möglichst große Findlinge ohne Unterbau locker zu einem Steinwall aufgeworfen worden. Es wurde daran beobachtet, daß die Zwischenräume zwischen den Steinen zu weit waren. Die Wellen drangen durch den Steinwall, entwickelten so große Geschwindigkeiten, daß der Sand hinter dem Bauwerk aufgewirbelt und durch den Sog der Wellen seewärts mitgenommen wurde; folglich sackte die Steinpackung in sich zusammen. Man zog die Lehren daraus und verlegte die Felsen dicht neben- und übereinander, nachdem die Sohle zunächst mit kleineren Steinen gegen Ausspülung abgedeckt worden war.

Es kam also nicht nur auf die Verwendung möglichst schwerer Steine und deren sorgfältige Lagerung, sondern auch auf die Sicherung der Sohle, d. h. auf das Fundament, an. Während bei festem Untergrund zum Teil auf eine spezielle Gründung verzichtet wurde, hat sich die Herstellung von Steinwällen auf Faschinenunterlage, die später als Senkmatten ausgebildet wurden, durchgesetzt.

Für die Entwicklung von durchlässigen Längswerken ist erwähnenswert, daß im Anfang einfache Pfahlreihen als Wellenbrecher ausgeführt worden sind. „Die Pfahlreihen bestanden aus 20 cm starken Pfählen, welche möglichst dicht gerammt wurden und ungefähr 1,5 bis 2 m über dem Mittelwasser der Ostsee hervorragten. Die Wellen haben die Vordünen beseitigt, die Pfähle niedergedrückt und den dahinterliegenden Diluvialboden angegriffen“ [GERHART (19)]. Es handelte sich dabei meist um die Verbindung von Pfahlbuhnen.

Ferner sind Steinkästen mit schräggestellten Pfahlreihen, zwischen denen Steine auf Buschunterlagen verpackt wurden, als Längswerke zur Anwendung gekommen. Diese Bauweise hat nach GERHARDT Erfolg gehabt, da „der von den ankommenden Wellen mitgeführte Sand durch die geringen Zwischenräume der dicht verpackten Steine und die daraus sich ergebende Verlangsamung der Rückströmung zurückgehalten worden ist“.

Auf Anregung eines Bauunternehmers entstand bei Travemünde zum Schutze des Ausflugslokals „Seetempel“ der nach seinem Erbauer benannte „Söhrmandamm“ von 350 m Länge. Die vom Steinriff und vom trockenen Strand vor dem Brodtener Ufer entnommenen Felsen waren zunächst ohne besonderen Unterbau zu einem Wall zusammengetragen worden, der nach kurzer Zeit an Höhe verlor. Nun wurde der Damm auf Senkmatten gegründet und

verbreitert. Der Senkungsvorgang scheint noch nicht abgeschlossen zu sein, denn die geplante Höhe der Dammkrone von + 2,50 m MW hat sich auf das Maß von etwa + 1,0 m MW im Jahre 1950 verringert (Abb. 23). Bei dem Vergleich der Peilungen von 1886 und 1949 sind vor dem Damm Vertiefungen um 60 bis 120 cm festzustellen. Die Ursachen des Absenkens dürften zum Teil in der Durchströmung des Dammes, zum Teil in der laufenden Abtragung des Unterwasserstrandes zu suchen sein.

Auf die Ausbildung des Strandes zwischen dem Söhrmandamm und dem Steilufer sowie auf die Alterung des Hanges hat der Steinwall zweifellos vorteilhaft gewirkt. Die erwartete Verlandung ist eingetreten. Die Erhöhung des Strandes am Kliffuß förderte die von Süden her fortschreitende Begrünung des Hanges. Diese für jedermann sichtbare Erscheinung hat in der Öffentlichkeit die Ansicht erweckt, daß der Söhrmandamm sich ausgezeichnet bewährt habe und daß die hier gewählte Bauweise für die Sicherung des gesamten Abbruchufers vor Brodten geeignet sei. Dieser Ansicht kann nicht zugestimmt werden. Erstens müßten die Felsen von ortsfremden Lagerstätten herbeigeschafft werden. Dadurch entstehen hohe Baukosten. Zweitens verursacht die Abrasion des Unterwasserstrandes entsprechend hohe Unterhaltungskosten.

Für die günstige Wirkung des Söhrmandammes sind folgende Gesichtspunkte zu nennen: Der Söhrmandamm liegt an einer Übergangsstelle vom Abbruch- zum Anwachsgebiet (Abb. 3). Von Natur aus neigt der Strand hier (jedenfalls im südlichen Teil) zur Verbreiterung, eine Erkenntnis, die auch aus der Karte von REHDER, 1886, abzulesen ist. Ferner steht die Bewährungsprobe bei einem Hochwasser von + 1,80 m bis + 3,30 m MW noch aus.

Die Beobachtung der Strandveränderungen zeigt an der südlichen Anschlußstrecke bis zur Möwenstein-Badeanstalt einen Abtrag des Strandes, welcher bei hohen Wasserständen auf die oberhalb der Graswuchsgrenze liegenden Gebiete übergreift. So erzeugte das Hochwasser vom 9. bis 10. Dezember 1949 einen von Norden nach Süden gerichteten Längsstrom hinter dem Steinwall und riß am südlichen Ende einen Geländestreifen von mehreren Metern fort (Abb. 24). Dieser Schaden ist ein Hinweis dafür, daß Querdämme zwischen dem Steinwall und dem Kliff erforderlich sind.

Da keine Untersuchungen vor Steinwällen von anderen Küstenabschnitten vorliegen, muß ein Vergleich mit den Verhältnissen bei Travemünde unterbleiben.

3. Ufermauern

Während Steinwälle in einiger Entfernung vom Ufer auf dem Strand stehen, wurden Ufermauern sowohl eben oberhalb der Mittelwasserlinie als auch unmittelbar am Fuße des Steilufers angeordnet.

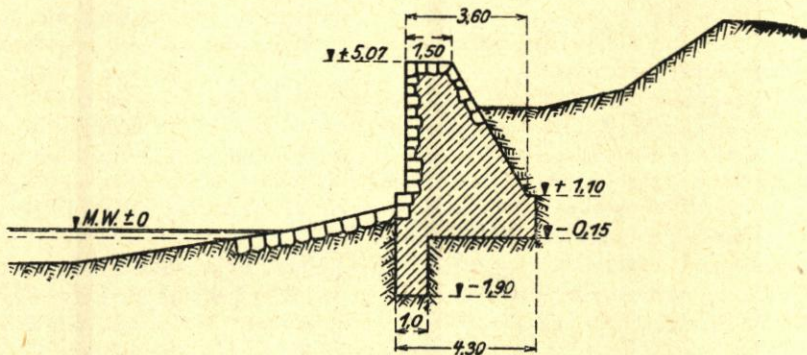


Abb. 25. Ufermauer vor Marienleuchte auf Fehmarn (aus HEISER 1927)

Im ersten Fall soll die Mauer, wie bei Jershöft, die Schlamm- und Abbruchmassen auffangen und die Füllung des zu diesem Zwecke geschaffenen Raumes bewerkstelligen. Die Anlage soll zugleich die Aufgabe eines Wellenbrechers erfüllen, deshalb ist sie besonders kräftig und standsicher herzustellen.

Die Querschnitte der Ufermauern sind recht vielgestaltig entwickelt worden (Abb. 25 u. 26). Nach der einfachen senkrechten Wand entstanden Schwergewichtsmauern ohne Fußsicherung, dann Mauern mit geneigter und mit konkav bzw. konkav und konvex gekrümmter Vorderfläche mit mehr oder weniger kräftiger Fußsicherung [GERHARDT (19), HEISER (32) u. a.]. Für alle Küstenabschnitte hat der Kampf mit den hohen Wasserständen und der ungebändigten Kraft der Brandung neue, aber teuer erkaufte Erfahrungen gebracht. Die Mauern

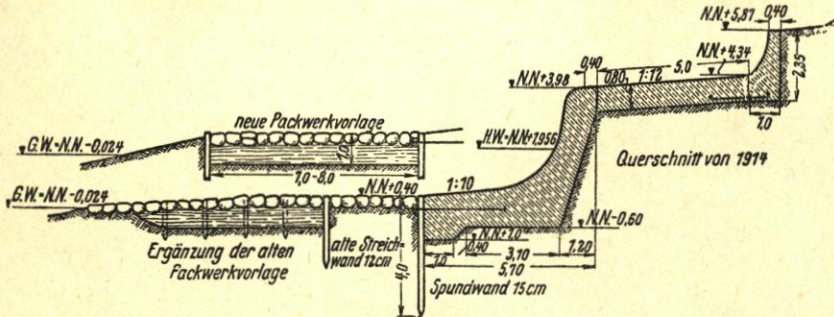


Abb. 26. Ufermauer am Streckelsberg (aus HEISER 1927)

wurden immer schwerer und damit in der Herstellung kostspieliger. Die senkrechten und leicht geneigten Werke erhielten Konstruktionshöhen von + 3,5 m bis über + 5,0 m MW. Die vorderseitig gekrümmten Ufermauern wurden sogar bis zu + 6,0 m MW hinaufgeführt.

Aus den Querschnitten der Ufermauern ist nicht zu erkennen, daß das HHW an den einzelnen Küstenstrecken für die Abmessungen bestimmend war, denn dieses fällt von Westen nach Osten. Vielmehr haben die an den steilen Bauwerken hinaufschwingenden Wellen die Höhe und Stärke einer Ufermauer maßgebend beeinflusst, wobei die durch die geographische Lage bedingten Unterschiede im HHW an Bedeutung zurücktreten.

4. Deckwerke

Als die Bühnen vor dem Streckelsberg auf der Insel Usedom keinen befriedigenden Erfolg gezeitigt hatten, versuchte man, das Steilufer durch ein Deckwerk zu schützen. Nach HAGEN (25) ist dieses im Jahre 1858 als erstes Deckwerk an der Ostseeküste gebaut worden. Es war 7,5 m breit und reichte von - 1 Fuß bis + 5 Fuß MW. Als Unterlage diente eine Strauchpackung, die mit kleinen Steinen bedeckt war. Darüber befand sich ein Pflaster aus schweren Findlingen. „Gleich im ersten Winter zeigte sich, daß diese Art der Befestigung nicht genügte.“

Als einfachste Form kann die Stranddeckung durch Steinbewurf angesprochen werden. Wie auf dem Unterwasserstrand vor einem Steilufer im allgemeinen eine Lage von Steinen aller Größen vorhanden ist, so hat man auch den trockenen Strand mit Steinen abgedeckt. An der samländischen Küste ist der Strand von Sorgenau auf diese Weise „nach den dort vorliegenden Verhältnissen hinlänglich geschützt“ worden [GERHARDT (19)]. Dieser Erfolg findet eine Erklärung darin, daß die Neigung des vorgefundenen Strandes beibehalten wurde.

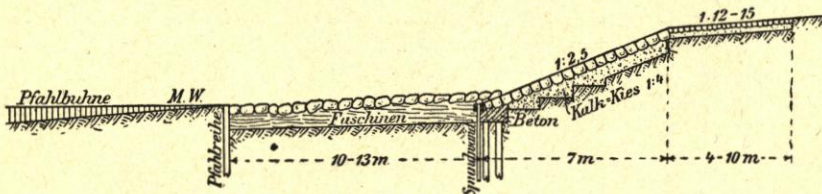


Abb. 27. Ufersicherung bei Heiligendamm (aus GERHARDT [1900])

Die Deckwerke entstanden in Neigungen zwischen 1:0,5 (Samland) bis 1:2,5. Für die steilen Decken waren feste Fußsicherungen nötig. Wo das Unterbett aus Sand bestand, wurden

die Fugen mit Zementmörtel verstrichen. Bei Beanspruchung durch Wellenschlag bröckelte der Mörtel bald ab und die Sandbettung wurde herausgesaugt. Unterhöhnung und Zusammenbruch waren die Folge.

Über die zweckmäßigste Oberflächengestaltung von Deckwerken gab es die verschiedensten Ansichten. Sie spiegelten sich in der Querschnittausbildung der Bauwerke wider. Bei Heiligendamm wurde ein glattes Pflaster auf Kalkkies in der Neigung 1:2,5 gebaut (Abb. 27). Einen gewagten Schritt stellte die erste Betondecke im Jahre 1884 im Ostseebad Heringsdorf (1:1,5) dar; sie war 0,4 bis 0,3 m stark (Abb. 28). Die Versuchsstrecke

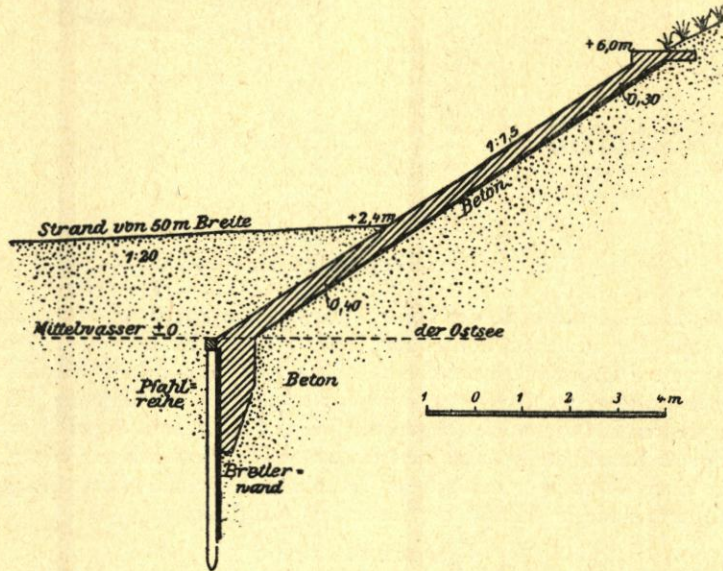


Abb. 28. Ufersicherung bei Heringsdorf (aus GERHARDT 1900)

am Streckelsberg westlich Swinemünde enthielt ein „beachtliches Gemisch von Bauwerken nahezu aller Arten, die zur Deckung eines unter Abbruch stehenden Steilufers in Frage kommen können“ [HEISER (32)]. Neben kräftigen Ufermauern mit fast senkrechten oder gekrümmten Vorderflächen standen schräge Deckwerke aus ganz glattem oder auch rauhem Böschungspflaster (Stachelpflaster). Die Bewährungsprobe fand in der Sturmflut um die Jahreswende 1913/14 statt. Das Ergebnis wurde von HEISER dahin zusammengefaßt, daß bei so starkem Seegang allein kräftige Ufermauern standsicher seien, und zwar müsse die Strandlinie „durch eine gekrümmte Vorderfläche der Mauer allmählich in die senkrechte Ebene übergeleitet werden“. Auf eine möglichst glatte Außenfläche, auf eine schlanke Linienführung und auf die sorgfältige Ausbildung der beiden Enden wurde besonders hingewiesen. Die Form der Mauer mit steiler Vorderfläche und die schrägen Deckwerke hätten sich als wenig vorteilhaft gezeigt. Letztere hätten am wenigsten dem Angriff der Wellen standgehalten. „Sie waren hinterspült und dann vollständig zerstört worden.“

Die Ablehnung der Deckwerke dürfte auf ihre damals noch unvollständige Ausbildung zurückzuführen sein.

Das „Stachelpflaster“ von Neufahrwasser mit einer Neigung 1:2 auf einem Betonbett von durchschnittlich 0,5 m Stärke, das erste dieser Art, erinnert an Bauwerke aus der heutigen Zeit. In Mittelwasserhöhe wurde das Pflaster von einer Spundwand gestützt. Davor lagen Senkfashinen mit Steinbelastung. Um eine möglichst rauhe Oberfläche der Böschung zu erhalten, wurden lange spitze Steine hochkant versetzt. Die Kraft der Wellen sollte daran gebrochen werden.

Nördlich der Schleimündung vor dem Gut Oehe befindet sich eine weitere Versuchsstrecke. Es sind hier ebenfalls verschiedene Bauausführungen nebeneinander angeordnet worden. Wenn auch dieser Versuchsstrecke keine überörtliche Bedeutung beigemessen werden kann, so ist hier doch offensichtlich, daß flache, rauhe Böschungen den Vorzug gegenüber den steilen Mauern haben. Sie gestatten eine Verbreiterung und Erhöhung des trockenen Strandes. Vor steilen Wänden dagegen bleibt der Strand niedrig.

Als neuartige Bauweise für ein Deckwerk sei die Asphalteingußdecke vor der Probstei erwähnt, die den Abbruch eines zum Seedeich ausgebauten Strandwalls verhindern soll. Betonmauern ohne Fußsicherung hatten den Angriffen des Meeres nicht standgehalten. Die Asphalteingußdecke erhielt die Neigung 1:2. Sie sollte unbedingt dicht und wasserundurchlässig sein. Auf die Decke hat man ein rauhes Steinpackwerk gelegt, das die Energie der auflaufenden Wellen brechen und vernichten soll (Abb. 29). Versuchsweise wurde auf einer Strecke die kost-

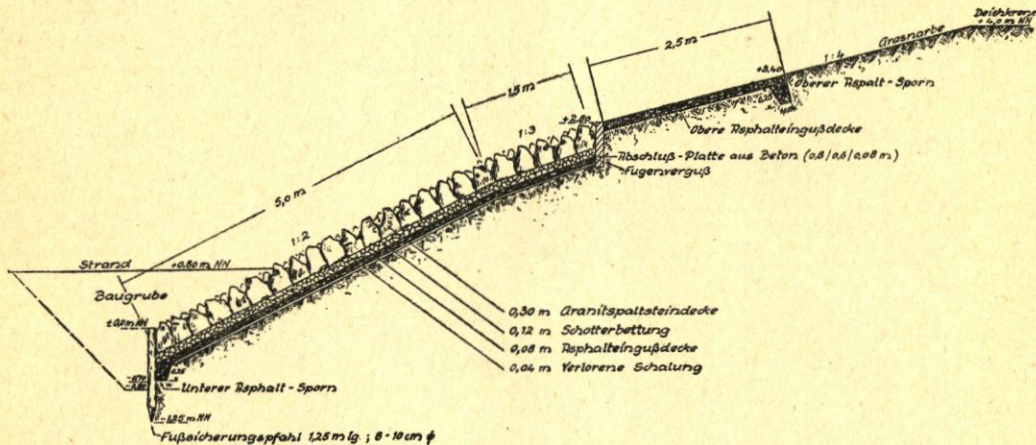


Abb. 29. Uferdeckwerk zur Sicherung des Ostseedeiches vor der Probstei (aus FINK 1951)

spielige Granitspaltsteindecke eingespart und die Asphalteingußdecke dafür stärker bemessen mit der Neigung 1:3. „Einer Bewährungsprobe sind die neuen Werke bei einem Flutangriff der an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste so gefürchteten Nord-Ost-Hochwasser noch nicht ausgesetzt gewesen“ [FINK (12)]. Die guten chemischen und physikalischen Eigenschaften des Asphalts deuten eine Weiterentwicklung dieser Bauweise für den Küstenschutz und für andere Gebiete des Wasserbaues an [SCHUSTER (85)].

An der Nordseeküste wurden Längswerke neuerdings mit gutem Erfolg als flache, schwere Deckwerke hergestellt. Das durchgehende Basaltstein-Pflaster liegt in der Böschung 1:4; es wird von eisernen Spundwänden eingefasst. Die Fußsicherung schließt seawärts mit der Neigung 1:10 an [LÜPKES und SIEMENS (50) u. (51)]. Das Deckwerk bestand seine Probe in mehreren Sturmfluten, ohne Schaden zu erleiden. Auf der flachen Böschung läuft die Welle sich schnell aus; dabei wirken die Spalten zwischen den Basaltsteinen bremsend. Dies sind Eigenschaften, die auch für den Uferschutz an der Ostseeküste richtungweisend sein können [SCHUMACHER (84)].

In den Niederlanden hat sich nach SCHAGEN und DWARS (80) die Deckwerksneigung 1:4 ebenfalls durchgesetzt. Bei Betondeckwerken wurden dort zahlreiche Versuche zur Erzielung unebener, energieschluckender Böschungen ausgeführt. Auch Asphaltbauweisen gewinnen an Bedeutung, denn Steine müssen mit hohen Kosten nach den Niederlanden eingeführt werden.

In dem Kostenanschlag für die Herstellung eines Uferschutzwerkes bei Travemünde [PETERSEN (68)] liegt ein Entwurf vor, der nach den bisherigen Erfahrungen bei Küstenschutzwerken und auf Grund der neuen Untersuchungsergebnisse bearbeitet wurde. Das projektierte Deckwerk (Abb. 30) ist dem Verlauf des Strandes weitgehend angepaßt. Es bietet dem Klifffuß einen kräftigen Halt. Die Höhe der Deckwerksoberkante wurde aus Beobachtungen in der

Natur abgeleitet. Der Abbruch eines Steilufers an der schleswig-holsteinischen Küste beginnt dann aufzuhören, wenn der Fuß des Kliffs 2,0 bis 2,5 m über MW zu liegen kommt. Die Abschrägung des Steilufers und seine Begrünung werden alsbald ohne menschliche Hilfe erfolgen. Die extremen Sturmfluten werden dem Ufer dann keinen Schaden mehr zufügen können. Im Schutze des Deckwerks bleibt der Geschiebemergel ungestört stehen. Beim Bau muß jedoch Vorsorge getroffen werden, daß das Sickerwasser abgefangen wird und daß bei Sturmfluten kein Längsstrom hinter dem Bauwerk entstehen kann. Daraus ergibt sich die Forderung nach einer Dränung des Deckwerks und nach möglichst weit landwärts durchgeführten Querwänden.

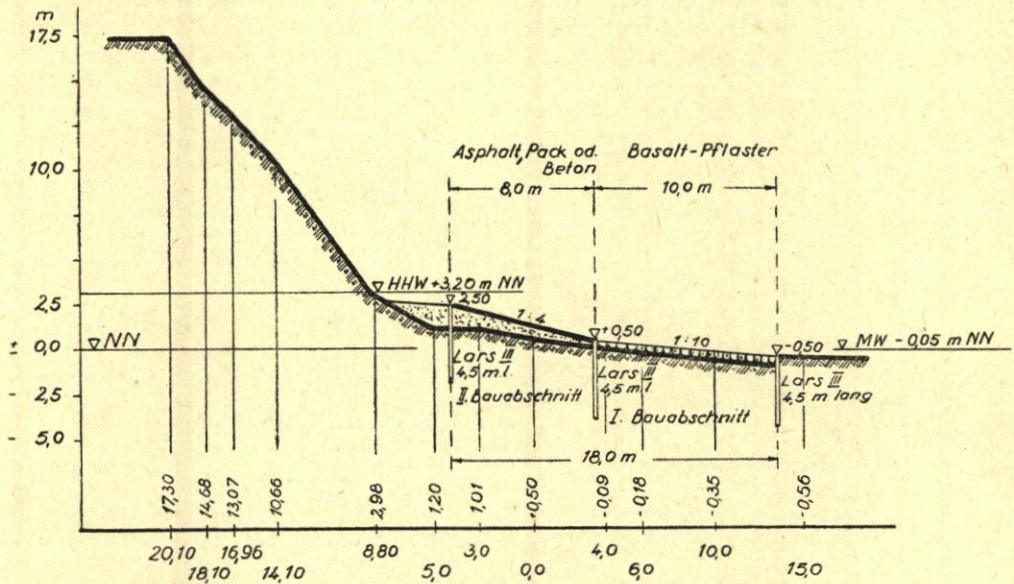


Abb. 30. Entwurf eines Deckwerks für die Sicherung des Brotener Ufers bei Travemünde 1950

Die Standsicherheit des Längswerks ist im wesentlichen von der Länge und Widerstandsfähigkeit der vorderen Längswand abhängig. Die Auswaschung des Geschiebemergels vor dieser Wand läßt sich nicht vermeiden. Hier werden Unterhaltungsarbeiten in Form von Steinerschüttungen laufend anzusetzen sein; in den ersten Jahren weniger, später mehr. Die rückwärtige Längswand soll die Unterwaschung des Bauwerks bei außergewöhnlichen Wasserständen verhindern, vor allem für die Zeit, solange der Bewuchs zwischen dieser Spundwand und dem Kliff noch nicht kräftig genug ist.

Die Neigung der Bauwerksböschung nach See zu setzt bei $-0,50$ m NN mit 1:10 an und reicht bis $+0,50$ m NN, von dort ab sind weitere zwei Meter der Höhe in der Neigung 1:4 auszubilden. Die zahlreichen niederen Hochwasser werden dann bereits in der Böschung 1:10 gewendet. Dieser Bereich erhält deshalb eine widerstandsfähige Oberfläche in Form eines Steinpflasters. Frostschäden sind nicht zu erwarten. Für den oberen Teil des Deckwerks (1:4) ist eine Packlage auf 15 cm starkem Schotterbett vorgesehen. Diese Bauweise hat bei sachkundigem Setzen den Vorteil der guten Schluckfähigkeit bei auflaufender Welle. Die mittlere Spundwand im Böschungsknick ist notwendig zur Trennung der beiden Bauweisen, zur Begrenzung möglicherweise eintretender Schäden bei Sturmfluten und zur Sicherung des ersten Bauabschnitts während der Bauzeit.

Die Gewinnung des Steinmaterials vor dem Ufer selbst und auf dem Steinriff soll unbedingt unterbleiben, da der Unterwasserstrand sonst noch mehr seines natürlichen Schutzes entblößt würde. Die Heranführung ortsfremder Baustoffe dürfte sich kaum umgehen lassen.

Um eine Übersicht über die Kostenverteilung zu bekommen, wurde neben der beschriebenen Bauweise für die Böschung 1:4 auch die Ausführung in Asphalt und Beton kalkuliert. Ein bedeutender Preisunterschied bei den Ausführungen in Setzpack, Asphalt oder Beton ist nicht vorhanden. Glatte Böschungen jedoch entsprechen den gewünschten Bedingungen nur angenähert

5. Kosten

Um die Kosten der einzelnen Längswerke miteinander vergleichen zu können, wurden sie auf den Preisindex des Jahres 1950 umgerechnet. Die Herstellung eines lfdm Steinwalls (Krone auf + 2,5 m MW, Sohle auf - 1,0 m MW, Gründung auf einer Buschmatte von 0,5 m Stärke) kostet demnach bei Verwendung von Ostseefindlingen rund 600,— DM, bei Verwendung ortsfremder Steine rund 1800,— DM.

Die Baukosten für einen lfdm Ufermauer betragen, wenn die Konstruktionsoberkante auf + 5,0 m MW liegt, rund 2000,— DM.

Für die am Brodtener Ufer entworfene Bauart belaufen sich die Kosten für die Herstellung eines lfdm Deckwerks auf rund 1900,— DM.

e) Querwerke (Buhnen)

Bei den Bemühungen, die Steilküsten an der Ostsee gegen die Angriffe des Meeres zu schützen, waren die mit „Buhnen“ bezeichneten Querwerke von Anfang an vertreten. Die Buhnen sollten entweder die Strömung von der Küste fernhalten oder den am Strand entlang wandernden Sand zur Verbreiterung und Erhöhung des Strandes auffangen. Meist wurden ihnen beide Aufgaben zugleich zugeordnet. Daß es nicht einfach ist, diese zu erfüllen, beweist der Aufwand für die Entwicklung der Buhnensysteme und der einzelnen Bauwerke.

1. Anordnung der Buhnengruppen

An der Ostseeküste wurden die ersten Buhnen etwa um 1845 auf der Insel Ruden zum Schutze der Lotsenstation gebaut. HAGEN (25): „Die hier ausgeführten Werke sind sehr einfach konstruiert. Sie sind von verschiedener Länge nach der Gestaltung des Ufers, auch treten ihre Köpfe keineswegs in eine vorher bestimmte Streichlinie, vielmehr sind sie jedesmal bis zu einer gewissen Wassertiefe, nämlich von etwa 3 Fuß, herausgeführt.“ Ihre Wurzeln lagen am Fuße der Düne etwa auf + 1,8 m MW. Die Längen wechselten zwischen 20 und 40 m. Der Buhnenabstand betrug etwa 25 m. „Bei dieser sehr leichten Konstruktion, deren Wahl nur darauf beruhte, daß die erforderlichen Baumaterialien mit den geringsten Kosten beschafft und in der einfachsten Weise verbunden werden sollten, konnten vielfache Beschädigungen nicht ausbleiben.“

Diese ersten Steinkistenbuhnen sind nach dem Muster der älteren Dämme, die zur Einfassung der Mündungsufer von Hafeneinfahrten an Wasserläufen dienten, in verkleinerter Form entstanden.

HAGEN (25) hatte gegen Ende der fünfziger Jahre des vorigen Jahrhunderts erkannt, daß von einer einzelnen Buhne am Strande keine allzu große Wirkung zu erwarten sei. Er ließ damals zum Schutze des Streckelsbergs westlich von Swinemünde erstmalig eine größere Gruppe von 76 leichten Pfahlbuhnen herstellen. HEISER (32) berichtet, daß davon im Jahre 1927 noch einige vierzig vorhanden waren. „Sowohl ihre Bauweise als ihre allgemeine Anordnung bewährten sich jedoch nicht. Es kam noch der ungünstige Verlauf des Küstenstriches zu den besonders gefährlichen NO-Stürmen hinzu, die hier genau senkrecht zur Uferlinie gerichtet sind. Infolgedessen liefen die von ihnen erzeugten hohen Wellen ganz ungehindert zwischen den Buhnen auf den Strand auf und griffen den Berg immer wieder an. Durch die herabgestürzten Bodenmassen hatte sich anfänglich ein verhältnismäßig breiter Strand herausgebildet, der sich auch längere Zeit hielt.“ „Bald wurde aber der Strand wieder schmaler und ging ständig zurück, so daß später zum weiteren Schutz des Berges kräftige Längswerke nötig wurden.“

Auf der Westseite des Steilufers von Jershöft fand zehn Jahre später die Herstellung einer Gruppe von vierzehn Buhnen statt. Darüber schreibt BAENSCH nach der Sturmflut von 1872, daß die doppelreihigen Pfahlbuhnen sich gut bewährt hätten. Nur drei am östlichen Ende des Systems liegende Buhnen waren „hinterspült und wurzellos geworden“.

Für die Anlage einer Buhnengruppe wurde die im Flußbau — zur Lenkung des Stromes — gebräuchliche „Streichlinie“ übernommen; sie verbindet die seeseitigen Enden der Buhnen. Die Streichlinie soll vorhandene Unregelmäßigkeiten des Strandes ausgleichen und eine gleichmäßige Entwicklung des Strandabschnitts herbeiführen. Die Länge der Buhnen richtet sich nach dem Abstand der Streichlinie vom Ufer. Anfangs beschränkte man sich wegen der wachsenden Kosten für längere Buhnen auf 20 bis 30 m [GERHARD (19)].

Nachdem HARTNACK 1926 (29) auf die Bedeutung der Sandriffe hingewiesen hatte, ordnete HEISER 1927 (32) die Streichlinie einer Buhnengruppe nach der Lage der Sandriffe an. KRESSNER (43) führte 1928 einen grundlegenden Modellversuch durch. Man hatte in diesen Jahren also begonnen, die Vorgänge auf dem Unterwasserstrand sorgfältiger zu beobachten und sie bei der Planung von Schutzmaßnahmen zu berücksichtigen. Die Streichlinie fiel nun etwa mit der 2-m-Tiefenlinie zusammen. Daraus ergab sich die Länge der Buhnen an der pommerschen Küste zu 70 bis 80 m (von der MW-Linie am Strand gerechnet). Die Buhnen durchschneiden somit das erste Sandriff und reichen bis auf das zweite Riff hinaus.

Ein ungelöstes Problem ist die Ausbildung des leeseitigen Abschlusses einer Buhnengruppe geblieben.

HEISER empfiehlt, die Streichlinie im Winkel von 2 Grad bis 3 Grad gegen das Festland abzuschragen. Dabei sollen die Abstände der Buhnen voneinander gleich lang bleiben oder entsprechend der verkürzten Buhnengänge kleiner werden. Die zu wählende Art wird von der Lage des Küstenabschnitts zur Hauptwindrichtung abhängig gemacht. Durch Modellversuche für die Ausgestaltung des leeseitigen Abschlusses von Buhnengruppen kam KRESSNER 1928 (43) auf eine Abschrägung der Streichlinie ≥ 6 Grad. Beide Lösungen brachten nach mündlicher Mitteilung von Regierungsbaudirektor TREPLIN † nicht den gewünschten Erfolg. Nach v. ZYCHLINSKI (106) schwächt eine durchlässige Bauweise der Abschlußbuhnen den Küstenstrom und vermindert die Erosion.

Die Sicherung des Strandes in Lee des Buhnensfeldes auf Hiddensee durch leichte Strandbuhnen und ein Längswerk am Fuße der Vordüne wurde von POPPE (70) beschrieben. Bald nach Fertigstellung der Buhnengruppe setzte am südlichen Ende der Abbruch des Strandes und der ungeschützten Vordüne auf 400 m ein. Zur Wiederherstellung der früheren Strandbreite „wurden nach und nach 12 kurze, leichte Buhnen in Abständen von 20—25 m vom Fuß der Vordüne bis zur früheren Strandlinie gebaut, die nicht senkrecht unter 90° zum Strand, sondern leicht geneigt gegen die vorherrschende Nord-Südströmung hergestellt wurden“ (Abb. 31). „Die Oberkante steigt wie

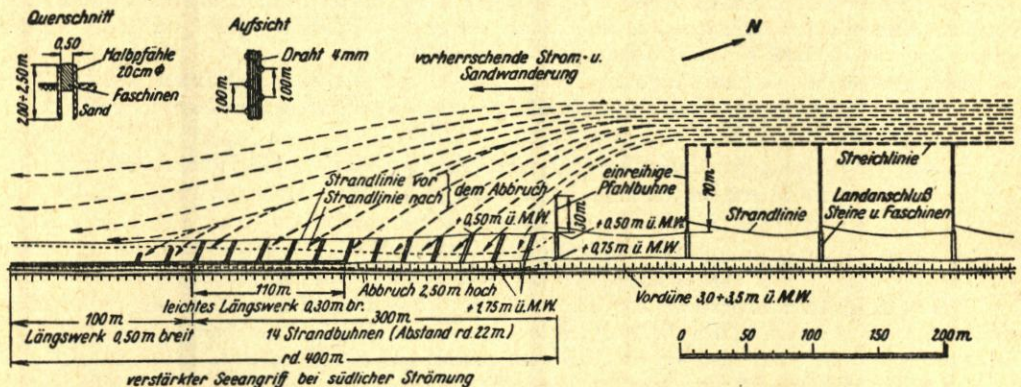


Abb. 31. Sicherung des Strandes in Lee eines Buhnensfeldes (aus POPPE 1942)

bei den Landanschlüssen von 0,50 m an der Seeseite bis 1,75 m über MW am Fuß der Vordüne... Bei hohen Wasserständen wurde die Küstenströmung durch die Buhnen und das in ihren Feldern gehaltene Wasserpolster ferngehalten und durch Wellenschlag wurden Sandbänke zur Ablagerung gebracht, die dann sehr bald bei höheren Wasserständen den Fuß der Vordüne erreichten, überlagerten und vor weiterem Seeangriff Schutz boten. Nach einigen Wochen bereits war festzustellen, daß der

Strand nicht weiter abgebaut, sondern zwischen den Strandbuhnen völlig wieder bis zur früheren Höhe und darüber hinaus aufgefüllt wurde, was dann auch der Wiederaufhöhung der Vordüne zugute gekommen ist. Im Anschluß an die letzte, südliche Strandbuhne ist der Fuß der Vordüne noch auf 130 m Länge durch ein Längswerk gleicher Bauart wie die Strandbuhnen gesichert, um den südlich der letzten Strandbuhne noch herumholenden Küstenstrom und Seeangriff abzuwehren.“

Hier scheint der Abschluß einer Buhnengruppe mit Erfolg unter der Voraussetzung einer starken Sandwanderung gelungen zu sein.

Als die Stahlspundwand-Buhne neue Wege für die Sicherung gefährdeter Uferstrecken darbot, forderte HANSEN 1938 (26) ein „Totalitätsverfahren“. Nach dem „System der festen Punkte“, das vor der Jahrhundertwende in den Niederlanden zur Anwendung gekommen war, sollte der ganze gefährdete Küstenabschnitt durch „Großbuhnensysteme“ geschützt werden. HANSEN wollte die durch den Küstenstrom verursachte Sandverfrachtung unterbinden; das sei nur möglich, „wenn keine offene Uferstrecke vorhanden“ sei. In Abständen von 500 m wären eiserne Spundwandbuhnen von der Uferlinie etwa 90 bis 100 m seewärts zu rammen. Kürzere Buhnen sollten die Zwischenfelder ausfüllen und die Großbuhnen in ihrer Wirkung unterstützen. Allerdings dürfe der Großbuhne nicht die Aufgabe eines Wellenbrechers zukommen.

Die Sandwanderung an der Küste vollzieht sich anders als HANSEN sie sich vorstellte. Der Wanderweg des Sandes wird bis vor das Buhnensystem vorverlegt. Ferner muß mit einem weiteren Abtrag des Sandvorrats in den Buhnenfeldern gerechnet werden, da der Eingriff in die natürliche Küstenbildung reichlich hart ist.

Über den Versuch in der Natur mit längeren hölzernen Buhnen, der aber nicht zu Ende geführt werden konnte, berichtet SCHUMACHER 1950 (84): „Im Verlauf der Arbeiten ergab sich bereits, daß der Aufwand für den Einbau der der größeren Wassertiefe entsprechenden längeren und stärkeren Pfähle unverhältnismäßig anstieg. Zerstörungen durch Eis, die an sich bei allen Ostseebuhnen in größeren Zeitabständen bei leichten, aber wirtschaftlichen Bauweisen in Kauf genommen werden müssen, waren bei den langen Versuchsbuhnen besonders groß.“ Modellversuche mit langen Buhnen waren ergebnislos verlaufen.

Die schleswig-holsteinischen Buhnengruppen umfassen selten mehr als zwanzig Buhnen, deren Längen im allgemeinen 25 bis 60 m betragen, z. B. Niendorf—Timmendorfer Strand, Heiligenhafen, Kembs—Behrendorf, Kalifornien—Brasilien, Eckernförde, Koppelheck. Bei diesen Anlagen kommt es meist darauf an, den Abbruch der zu Deichen verstärkten Strandwälle aufzuhalten. Buhnengruppen vor Steilufern sind seltener und mit Ausnahme von Schilksee (23 Buhnen) von geringerem Umfang, z. B. vor Sierksdorf (6 Buhnen), Dahmshöved (10 Buhnen) und Neukirchen (12 Buhnen). Neuerdings sind Gruppen mit leichten Buhnen zu beiden Seiten der Möwensteinbadeanstalt bei Travemünde gebaut worden. Sie sollen Sand fangen. Es handelt sich hier um eine Ausführung ähnlich den Schlickfängern (Lahnungen) an der Nordseeküste.

Zusammenfassend kann über die Buhnengruppen an der Ostseeküste gesagt werden, daß bei ihrer Anordnung bis in die jüngste Zeit recht unterschiedliche Auffassungen vertreten wurden. Weder für die Lage der „Streichlinie“ noch für den Umfang der Buhnengruppe hat sich eine eindeutige Richtung ergeben. Der Großversuch in der Natur „läuft“ weiter.

2. Bauweisen Längsschnitte

Seit Beginn des Buhnenbaues an der Ostseeküste sind die Längsschnitte der Buhnen ohne größere Abwandlungen geblieben; das gilt vor allem für den längeren seeseitigen Teil. Die Höhe des Buhnenrückens dürfte sich aus rammtechnischen Gründen auf + 0,50 m bis etwa $\pm 0,0$ m MW gehalten haben (Abb. 32). Vor Kopf der Buhne entsteht an dem steilen Abschluß infolge des hier erzeugten Wirbelstroms ein Kolk. Der Buhnenkopf wurde deshalb zur Abschwächung der Kolkbildung auf 6 m um 1 m geneigt. HANSEN (26) legte den Rücken der Großbuhne sogar auf + 1,0 m MW und behielt diese Höhe bis zum Ende der Buhne bei, so daß hier eine senkrechte Wand von 3,0 m und mehr die natürliche Wasserbewegung erheblich stören mußte.

Der landseitige Teil paßt sich dem Gefälle des Strandes an, d. h. die Buhne ragt zweckmäßig um wenige Dezimeter über die Oberfläche des Strandes hinaus. Mehr als 0,50 m überstehende Wände beeinflussen den Sandflug bereits nachteilig. Die Bauweise auf dem trockenen Strand, dessen Breite zu 30 bis 40 m mit der Neigung 1:15 bis 1:20 angestrebt wird, soll möglichst beweglich gehalten werden, um den naturbedingten Veränderungen gegebenenfalls folgen zu können. In der Praxis ist die Richtigkeit dieser Bedingungen schon bestätigt worden mit den Landanschlüssen nach ostpreussischer Bauart (Abb. 33). Auf dem trockenen Strand

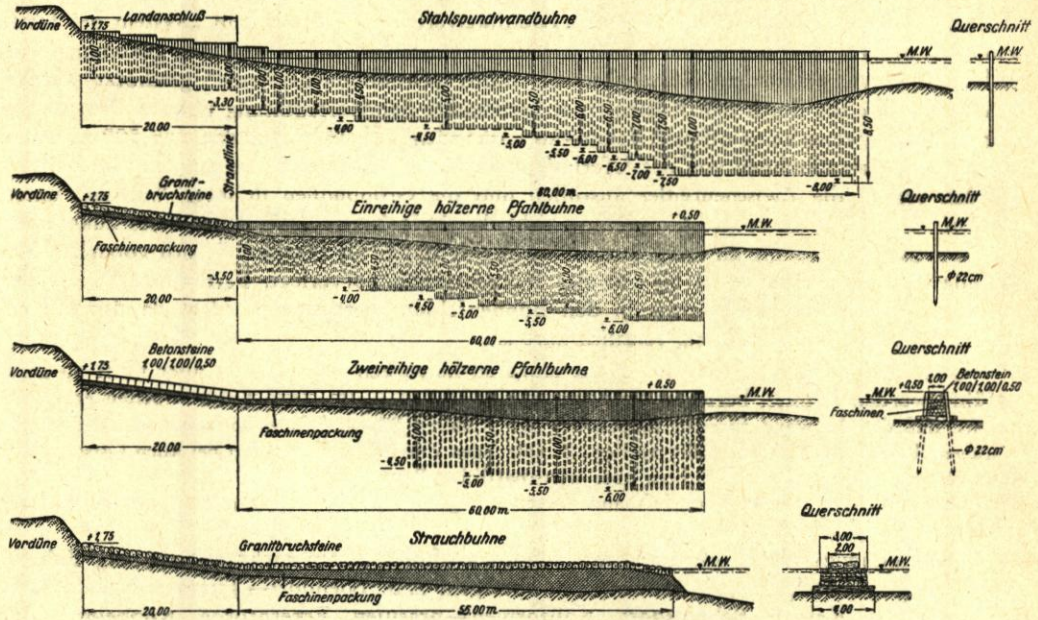


Abb. 32. Ostseebuhnen (aus POPPE 1942)

werden Buschmatten etwa 0,50 m tief in den Sand eingebaut und mit Natur- oder Betonsteinen belastet. Die Buschmatten sind mit Rücksicht auf das nachträgliche Anheben der Landanschlüsse bei fortschreitender Versandung etwa 2 bis 3 m breit und 0,30 bis 0,50 m stark herzustellen. „Bei zu schmalen Unterbau neigt sonst der Landanschluß zum Kippen, besonders wenn bei stärkerem Seegang der Strand von neuem in Abbruch gerät und damit der Landanschluß wieder mehr freigespült wird“ [v. ZYCHLINSKI (106)]. Betonsteine wurden 0,50 m hoch, 1 m breit und 1 m lang mit einem eisernen Tragbügel gefertigt, um das Versetzen zu erleichtern. Die Vorteile dieser Bauweise gegenüber den Pfahlanschlüssen bestehen

- a) in der kurzen Bauzeit,
- b) in der größeren Dichtigkeit gegen auflaufende Wellen,
- c) in der größeren Rauigkeit des Buschunterbaues bei auflaufenden Wellen,
- d) in der geringen Höhe, die den Sandflug begünstigt,
- e) in der Möglichkeit, den Landanschluß den Veränderungen des Strandprofils anzupassen.

Besondere Sorgen bereitet von jeher der Anschluß der Buhne an das Steilufer bzw. an die Vordüne. Auch hier hat sich das starre, bis zur erstrebten Strandhöhe fertiggestellte Bauwerk im weichen Dünenkörper nicht durchzusetzen vermocht. Unversandet gebliebene hohe Anschlüsse sind auf + 0,50 m bis + 1,50 m MW abgeschnitten worden. An anderen Stellen wurden die Pfähle beseitigt und durch „im Grundriß keilförmige oder geradlinige Strauchpackungen“ ersetzt, die sich mit wachsendem Strande unschwer aufhohen lassen. „Auch hier gestattet die Natur nur ein schrittweises Vorgehen“ [POPPE (70)].

Es ist auch versucht worden, den leeseitigen Abschluß von Buhnengruppen durch Unterwasserbuhnen herzustellen [HOECH (35)]. Die letzte Buhne erhielt durchgehend das Ge-



Abb. 33. Landanschluß (aus v. ZYCHLINSKI 1931)



Abb. 34. Stahlbetonbühne bei Eckernförde, 12. Oktober 1951



Abb. 35. Timmendorfer Strand, Abbruch an der Leeseite einer Findlingsbuhne am 11. Juli 1950 bei -20cm MW



Ab. 36. Wie vor



Abb. 37. Am Brodtener Ufer frei stehender Dränschacht, 29. September 1950



Abb. 38. Travemünde, 24. Oktober 1949, 14.15 Uhr. Bühne vor dem Strandpavillon. Landseitiger Teil aus Holzspundbohlen mit Fenstern bei — 1 m MW

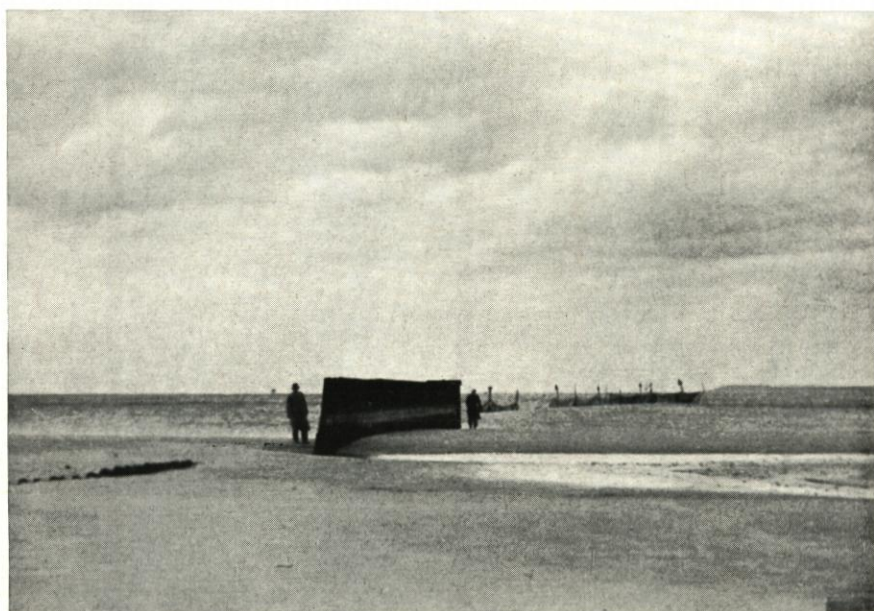


Abb. 39. Die gleiche Bühne wie auf Abb. 38. Seeseitiger Teil, Mittelstück abgebaut

fälle 1:25; der Bühnenkopf lag bei — 1,60 m MW. Die vorletzte Buhne fiel auf — 0,75 m MW und die nächste auf — 0,50 m MW. Die vierte Buhne von Osten hatte die normale Höhe mit + 0,50 m MW. Über die Wirkung schreibt HEISER (32): „Die angeblich gute Verlandung dieser abfallenden Bühnen hat jedoch keinen langen Bestand gehabt. Durch die Sturmfluten in der Sylvesternacht 1921/22 und Anfang 1922, die beide an Heftigkeit und Wirkung hinter der großen Sturmflut um die Wende des Jahres 1913/14 zurückblieben, sind gerade von diesen Bühnen sehr viele Pfähle ausgespült worden. Durch den schweren Eisangriff im Winter 1923/24 wurden dann die übriggebliebenen Teile noch vollständig weggeschoben.“ Die Ursache für den Mißerfolg dürfte darin liegen, daß diese Abschlußbühnen im Gebiet der Lee-Erosion der Buhnengruppe lagen und daß sie selbst als starre Werke noch zur Erzeugung der Lee-Erosion beigetragen haben. Die Ausspülung der Pfähle ist in der Bauart (zu kurze Pfähle) begründet. Die vollständige Zerstörung der Reste durch Eisdruck mag wohl in der Bauart und auch darin zu suchen sein, daß die Bühnen nicht unterhalten wurden.

Grundrisse

Der am häufigsten vorkommende Grundriß einer Buhne stellt die Senkrechte auf die Uferlinie dar. Davon abweichend sind Bühnen auch mit Querwänden versehen worden, um die unmittelbar auf die Küste auflaufende Welle vorzeitig abzufangen und den für die Standicherheit der Buhne gefährlichen Längsstrom (an der Buhne entlang) auszuschalten. Nach den Erprobungen in der Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau in Berlin hat die Kreuzform die beste Wirkung der untersuchten Formen ergeben. Die Flügel, 40 m hinter den Bühnenkopf zurückgelegt, parallel zur Strandlinie und je 20 m lang, sind den Angriffen der Brandung allerdings ganz besonders ausgesetzt; der Rücken des Flügels war waagrecht und in Höhe seines Anschlusses an die Hauptbuhne angeordnet, d. h. er lag über MW [v. ZYCHLINSKI (106)]. Die Versuche in der Natur erstreckten sich darüber hinaus auch auf die T-Form.

Querschnitte

Die Darstellung der Querschnitte soll sich auf die Besprechung einiger oft verwendeter Typen beschränken (Abb. 32). Die einreihigen und doppelreihigen Pfahlbühnen haben sich vom Beginn des Bühnenbaues an bis auf den heutigen Tag gehalten. Dasselbe gilt für Steinkistenbühnen, die als ostpreußische oder pommersche Bauart mit etlichen Abarten vertreten sind.

Bei der ostpreußischen Bauart werden die Pfähle in der Neigung 4:1 gerammt. Die obere Breite beträgt 1,00—1,20 m, die untere Breite kurz vor Kopf etwa 1,90 m. Die Faschinenlage von 0,30 m bis 0,50 m dient als Unterbau für die Steinpackung. Nach mündlicher Mitteilung von Oberregierungsbaurat RIEDER erforderte die Unterhaltung der Buhne erhebliche Mittel, weil die Gurtung bei starkem Seegang oft brach und die Stärke der Anker laufend wegen der intensiven Rostbildung geschwächt wurde. Die Folge war, daß die Steine von der Brandung herausgeworfen wurden.

Aus Mangel an Findlingen erhielt die ostpommersche Buhne eine Faschinenpackung, die von Betonsteinen $1,0 \times 1,0 \times 0,5$ m abgedeckt wurde. Mit der Neigung der Pfähle 10:1 wurde erreicht, daß die Betonblöcke beim Setzen der Faschinen von den Pfählen gehalten wurden und daß sie sich nicht zu sehr verkanteten.

Beide Bühnen, vor allem die ostpreußische, sind wasserdurchlässig. Den Angriffen durch Eis haben sie verhältnismäßig gut zu widerstehen vermocht [Poppe (70)]. Sie haben sich in ihrer Wirkung bisher am besten bewährt.

Eine bemerkenswerte Bauart liegt bei der Strauchbuhne von Zingst vor (Abb. 32). Auf eine Faschinenpackung von 3 bis 4 m Breite werden bis zu $0,5 \text{ m}^3$ große Bruchsteine gepackt. Der Kopf liegt etwa auf 1,3 m Wassertiefe und ist durch ein abgetrepptes Sinkstück gesichert. Nach Möglichkeit sollen nur lange, über drei bis vier Faschinen reichende Steine zur Verwendung kommen. Da der Rücken dieser Buhne meist auf + 0,50 m MW lag, war dieser Faschinendamm wenig widerstandsfähig gegen Brandung und Eisgang.

An der schleswig-holsteinischen Ostseeküste befinden sich neben ein- und zweireihigen Pfahlbühnen und der ostpreußischen Bauart zum Teil schwerere Werke. Die in die Kieler Bucht vorspringende Landzunge von Bülk wird von 8 m breiten und 1,5 m hohen und ähn-

lichen Buhnen geschützt [BAENSCH (2)]. Auf dem Küstenabschnitt von Niendorf und Timmen-dorfer Strand stehen massive, gemauerte Findlingsbuhnen, deren Kopfteil im Wasser im all-gemeinen als doppelte Pfahlreihe mit Steinpackung ausgebildet ist (Abb. 35 u. 36). Es sind eindeutig stromabweisende Anlagen, die wegen ihrer Undurchlässigkeit und Höhe über dem trockenen Strand den Wandersand auf der Luvseite ansammeln.

Auf der Leeseite dagegen ist die Auswaschung entsprechend stark ausgeprägt. Letztere würde noch unangenehmer in Erscheinung getreten sein, wenn die Buhnen weiter seewärts vor-getrieben worden wären. Ähnliche Bauwerke stellen die Möwensteinbuhne bei Travemünde und die Abschlußbuhne vor Dahme dar.

Im letzten Jahre ist bei Eckernförde und vor der Probstei mit der Herstellung von Stahl-betonpfahlbuhnen begonnen worden. Der Planung lagen die Erfahrungen mit Betonspund-wandbuhnen am Weststrand von Sylt zu Grunde. Die Pfähle werden fabrikmäßig in Längen von 1,50 m bis 4,00 m und mit Querschnitten von 18×33 cm bzw. 23×50 cm hergestellt (Abb. 34).

Baustoffe

Bei der Wahl der Bauart einer Buhne spielte die Beschaffung der Baustoffe eine ausschlag-gebende Rolle. Wo Steine reichlich vorhanden waren, wurden sie beim Bau von Buhnen ver-wandt; wenn sie fehlten, wurden sie durch Beton ersetzt. Gebräuchliche Baustoffe sind Holz-pfähle und Faschinen. Ihre Anwendung wird fraglich, wenn die Gefahr einer Zerstörung durch den Bohrwurm (*teredo navalis*) vorliegt. HAGEN (25) schreibt, daß der Bohrwurm vom Atlantik her allmählich in die Nordsee vorgedrungen sei und daß er in der Ostsee „gar nicht“ vorkomme. Nach POPPE (70) ist der Holzschädling mittlerweile bis nach Darßerort vorge-drunen⁸⁾.

Die von dem Bohrwurm verursachten, erstaunlich hohen Unterhaltungskosten an See-bauten gaben Veranlassung, die Buhnen an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste nunmehr versuchsweise in Stahlbeton zu bauen. Bei der Verwendung von Beton sind die Bestimmungen über die Herstellung von Beton für Seebauten, die Erfahrungen über das Verhalten von Beton im Meerwasser und bei dem Bau von Stahlbetonbuhnen auf Sylt zu beachten. Am Strand der Probstei sind Stahlbetonpfähle mit vorgespanntem Rundstahl 90 vorgesehen. Der Beton wird mit Innenrüttlern verdichtet.

Der Baustoff Eisen hat sich im Bühnenbau nicht behaupten können. Die Eigenschaft des Rostens ergibt bald eine Schwächung des Profils. Spundwandbuhnen an Küsten mit starker Sandbewegung vermögen auch dem Sandschliff auf die Dauer nicht zu widerstehen. Der Quer-schnitt wird in Höhe des Unterwasserstrandes infolge der anhaltenden Sandbewegung (land-wärts und seewärts) so stark vermindert, daß die Buhne in der Brandung schließlich zerbricht und umfällt (Erfahrungen von Sylt).

3. Kosten

Eine Zusammenstellung der Kosten für die Herstellung und Unterhaltung von verschieden-artigen Seebuhnen hat POPPE (70) gegeben. Seitdem sind die Preise im allgemeinen auf den doppelten Betrag angestiegen. Nach dem Preisindex von 1950 belaufen sich die überschläg-lichen Baukosten für einen lfdm Buhne mit 6,15 m Pfahl- bzw. Spundbohlenlänge, einer Wassertiefe von 1,55 m und einer Höhenlage von + 0,50 m MW auf:

a) einreihige, hölzerne Pfahlbuhne	220.— bis 290.— DM
b) ostpommersche Bauart, zweireihig	300.— bis 350.— DM
c) Strauchbuhne am Zingst	160.— DM
d) Stahlspundwandbuhne	300.— bis 360.— DM;
ebenfalls überschläglich ermittelt sind die Kosten für	
e) Findlingsbuhne bei Niendorf ⁹⁾	300.— bis 400.— DM
f) Stahlbetonbuhne	100.— bis 400.— DM.

⁸⁾ Grundlegende Untersuchungen über Vorkommen und Lebensbedingungen des Bohrwurms, über Schäden und Bekämpfungsmittel sind vom „Küstenausschuß Nord- und Ostsee“ im letzten Jahre ein-geleitet worden.

⁹⁾ aus ortsfremdem Steinmaterial.

Über die Unterhaltungskosten sind vergleichende Angaben nicht zugänglich. Erfahrungsgemäß betragen sie jährlich im Durchschnitt rund 5 v. H. der Herstellungskosten.

f) Dränung

Der mit zunehmender Besorgnis beobachtete Austritt des Grund- und Sickerwassers an den Steilufern führte unter anderem zur Anlage von Dränsystemen. Das Wasser wurde gesammelt und an geeignet erscheinenden Stellen abgeführt. Die künstliche Ableitung im Bereich eines Steilufers erfordert die Herstellung von Sammelschächten in der Nähe des Hochufers, um den gefährlichen Wasseraustritt möglichst tief zu legen. Das Schicksal eines Schachtes veranschaulicht Abbildung 37. Die Rohrleitung vom Schacht zum Kliffhang verlor mit dem Fortschritt des Uferrückgangs ihren Halt und fiel nach und nach dem Meer zum Opfer. Der Schacht wurde undicht, das wild fließende Wasser suchte sich neue Wege und förderte den Rückgang des Steilufers an dieser Stelle.

Die Untersuchungen über die Eigenschaften des anstehenden Geschiebemergelmassivs haben gezeigt, daß der Boden außerordentlich unregelmäßig geschichtet ist [DÜCKER (11)]. Die durch Sturmfluten freigelegten Lagen von Kreidemergel und Talsanden sowie die systemlos gestaffelten Grundwasseraustritte deuten auf ähnlich unregelmäßig gelegene Grundwasserträger hin.

Auch die Oberflächenformen des Geländes können den Grundwasserhaushalt beeinflussen. Die Aufschlüsse an den Steilufern lassen gelegentlich erkennen, daß der Grundwasseraustritt unter einer Geländemulde stärker ausgeprägt ist als unter einem Höhenzug. Diese Beobachtung deutet auf eine ungleiche Ansammlung des Grundwassers hin [PETERSEN (67)].

Wenn nun die in allen Neigungen beobachteten Klüftungen des Mergels noch in die Betrachtungen einbezogen werden, dann kann als Ergebnis für die Möglichkeiten zur Fassung des Grund- und Sickerwassers herausgestellt werden, daß die Eigenart des Bodenaufbaues eine Dränung mit vertretbaren Mitteln nicht zuläßt. Um die Mängel der im Bereich von Broden vorhandenen Dränanlage abzustellen, müßte angestrebt werden, das oberirdische und unterirdische Wasser rückwärtig zum Mühlenbach hin abzuleiten. Sorgfältige Untersuchungen über die Lagerstätten des Grundwassers müßten der Baumaßnahme vorausgehen. Die Herstellung dieser Anlage würde mit umfangreichen Erdarbeiten für die Verlegung der Leitungen in tiefe Geländeinschnitte, vielleicht sogar mit Stollenbau, verbunden sein.

Über Erfahrungen mit Dränungen berichtet RIEDER (78) 1948 von der Samlandküste. Es hat sich dort als unmöglich erwiesen, das Sickerwasser auch in einem nur einigermaßen hinreichenden Umfang durch Dränungen aufzufangen und abzuleiten. Die gefährlichen, nach See hingeneigten Oberflächen der Tonschichten blieben trotz aller Entwässerungsmaßnahmen noch so „glitschig“, daß der Erdabrutsch weiter fortschreiten mußte.

g) Wirkung der Schutzmaßnahmen

Als mit dem Bau von Küstenschutzwerken begonnen wurde, galten diese zunächst den Steilufern. Es wurde versucht, den Abbruch zu unterbinden, um den Landverlust und die Versandung von Wasserstraßen zu verhindern, denn die Herkunft des Sandes von den Steilufern war augenscheinlich. So entstanden im Anfang, wie es auch nicht anders sein konnte, einfache und leichte Anlagen. Die Abmessungen der Längs- und Querwerke reichten meist nicht aus, den bei Sturmfluten ausgelösten Kräften hinreichenden Widerstand entgegenzusetzen. Die Werke wurden mehr oder weniger beschädigt bzw. zerstört, und der Uferabbruch ging weiter.

Aus den Schäden an den Schutzbauten wurde die Erkenntnis gewonnen, daß schwerere Längswerke und kräftigere Buhnen den Abbruch zum Halten bringen müßten. Längswerke wuchsen zu schweren Steinwällen bis nahezu 3 m über Mittelwasser, zu massiven Ufermauern und stabilen Deckwerken mit mehr oder weniger flach geneigten, glatten und rauen Böschungen bis zu 6 m über Mittelwasser an. Auf dem Wege dahin wurden zahlreiche Zwischenstufen überwunden.

Steinwälle brechen die Brandung bereits in einiger Entfernung vor dem Kliff. An sandreichen Küstenabschnitten füllt sich der Raum zwischen Steinwall und Kliff mit Abbruch-

material und mit von der Brandung über den Steinwall geworfenem Sand auf, so daß die dadurch erhöhte Lage des Klifffußes eine Begrünung des Kliffhanges folgen läßt. Außerdem können sich bei günstiger Lage zur Hauptwindrichtung Vordünen bilden. Vor dem Steinwall ist eine Abrasion des Unterwasserstrandes im Laufe der Zeit wahrscheinlich; dieser wird wieder von Sand bedeckt, wenn die Brandungswirkung aufhört. — An sandarmen Küstenabschnitten, wie z. B. am Brodter Ufer bei Travemünde, ist an den Flanken ein Sandfang möglich, jedoch nicht vor der Stirnseite. Eine Vordüne kann sich hier nicht bilden, und der Unterwasserstrand vor dem Steinwall ist einer verstärkten Abtragung ausgesetzt.

Über die Wirkung von Ufermauern kann folgendes gesagt werden: Bei Hochwasser mit auflandigen, stürmischen Winden haben senkrechte Mauern die volle Kraft der Brandung abzufangen. Die Welle weicht beim Anprall zunächst nach oben aus, um alsbald in sich zusammenzubrechen. Der Boden unmittelbar vor der Mauer wird dadurch gelöst und fortgespült. Senkrechte Mauern müssen deshalb außerordentlich kräftig ausgebildet und mit einer widerstandsfähigen Fußsicherung versehen werden. — Ufermauern mit gekrümmter Außenböschung zwingen die Brandungswelle während des Auflaufens zum Umkippen. Da die Brandungsenergie nur teilweise abgeschwächt wird, kann auch hierbei auf eine starke Fußsicherung nicht verzichtet werden. Über die Bauweise — Betonschale mit Klinkerverblendung — liegen inzwischen einige beachtenswerte Erfahrungen vor. Auf den Nordseeinseln Borkum und Norderney erforderte die Beseitigung von Sturmflutschäden an derartigen Ufermauern in jüngster Zeit kostspielige Aufwendungen. Nach den Sturmfluten von Januar bis März des Jahres 1949 stellte sich z. B. heraus, daß die Ufermauer auf Norderney zu flach gegründet worden war. Der Strand hatte sehr an Breite und Höhe verloren, so daß das Bauwerk schließlich auf 450 m unterspült und zerstört wurde. Die Fußspundwand der Ufermauer war zu kurz. Nun sind die Verhältnisse der ostfriesischen Küste nicht ohne weiteres mit denen der Ostseeküste zu vergleichen. Die Sturmfluten pflegen hier zwar seltener aufzutreten; aber in ihrer Wirkung sind sie kaum geringer, wie die Sturmflut vom 11. November 1872 vor allem an der Küste der westlichen Ostsee gezeigt hat. Für die Standsicherheit von Ufermauern gelten hier deshalb ähnliche Bedingungen.

An flach geneigten Deckwerken, die sich etwa der natürlichen Form des Strandes anpassen, wird die Brandungsenergie zum Teil verzehrt. Sie verdienen deshalb im allgemeinen vor Steinwällen und Ufermauern den Vorzug. Auch Deckwerke müssen so kräftig gebaut werden, daß sie bei stärkster Beanspruchung nicht zerschlagen werden können.

Die Entwicklung der Längswerke scheint vorläufig zum Abschluß gekommen zu sein. Der Brandung wird einerseits mit der Masse in Form von Steinwällen und Ufermauern entgegengetreten, andererseits verzehrt die flache Neigung einer Deckwerksböschung einen wesentlichen Teil der Brandungsenergie. Die Kosten für die Herstellung der einzelnen Längswerk-Typen unterscheiden sich nur wenig voneinander.

Im Bühnenbau dagegen sind noch Fragen von grundsätzlicher Bedeutung offen. Weder die Anordnung von Bühnengruppen oder die Länge der Bühne, der Längsschnitt oder die Grundrißgestaltung, noch die Ausbildung der Querschnitte können als eindeutig geklärt angesprochen werden. Lediglich der landseitige Teil der Bühne, der auf dem trockenen Strand als beweglicher Ländanschluß gebaut wird, ist hinreichend erprobt.

Neben der Steinkistenbühne findet man heute hölzerne Pfahlbühnen, Strauchbühnen, gemauerte Findlingsbühnen, Stahl- und Stahlbetonpfahlbühnen. Eine eingehende Beurteilung über die Bewährung der verschiedenen Bühnenarten teilte POPPE (70) auf Grund eigener Beobachtungen mit¹⁰⁾. Die Darstellung verdient wegen der Erfahrungen im schweren Eiswinter 1939/40 besonders herausgestellt zu werden. Den größten Widerstand gegen Eisschub bietet danach die zweireihige, hölzerne Pfahlbühne mit Faschinen und Steinbeschwerung infolge ihres breiten Querschnitts. Die Unterhaltungskosten sind zwar beträchtlich, „weil die Faschinen-

¹⁰⁾ Die erste Stahlbetonpfahlbühne an der Ostsee wurde 1951 gebaut, so daß über ihre Bewährung in dieser Abhandlung nichts ausgesagt werden kann.



Abb. 40. Luftbildaufnahme von Niendorf bis Timmendorfer Strand (1938)

packung teils durch den Seeangriff in sich selbst, teils durch die Steinauflast so stark zusammensackt, daß die Steine meist schon nach 2 bis 3 Jahren gehoben werden mußten“. „Dieses Spiel wiederholt sich dann in regelmäßigen Abständen von 3 Jahren.“

Von kurzer Dauer war die Buhne am Nordabschluß der Strandpromenade von Travemünde. Dem Gedanken von REHDER [(74), (75) u. (76)] folgend, hier einen Seedamm von 350 m Länge und 70 m Breite herzustellen, wurde im Jahre 1933 auf 100 m eine verholzte Holzspundwand (Abb. 38) und auf weitere 80 m eine Stahlspundwand gebaut (Abb. 39). Die Spundwand reichte etwa 1,80 m über den Unterwasserstrand hinaus (+ 0,70 m MW) und wies damit den Strom und die Sandwanderung seewärts ab. Auf der Südseite machte sich sehr bald eine unangenehme Wirkung bemerkbar: Der Travemünder Badestrand nahm an Breite und Güte ab. Um nun den Strandverlust südlich der Buhne zu beheben, wurde in den Jahren 1949/50 eine Verkürzung der im Mittelteil beschädigten Buhne auf rund 85 m vorgenommen. Die in die Holzspundwand eingeschnittenen neun Fenster hatten für den Sandaustausch zwischen der Nord- und Südseite keine Bedeutung. Der stehengebliebene hölzerne Teil der Buhne wurde Ende 1950 in gleichmäßigem Gefälle bis auf den Strand auslaufend abgeschnitten und neu verholmt. Seitdem der Rest der eisernen Spundwand im Jahre 1951 beseitigt worden ist, sind nun die Voraussetzungen für eine gleichmäßige Strandbildung wieder geschaffen. Die gewünschte Strandbreite kann hier allerdings erst wieder erreicht werden, wenn auch die Einbuchtung zwischen der Möwensteinbadeanstalt und dem Abschluß der Strandpromenade aufgefüllt sein wird [PETERSEN (67)]. Dieses Beispiel läßt erkennen, daß gelegentlich durch Beseitigung einer nachteilig wirkenden Anlage weitere Schäden behoben werden können.

Bei allen Uferschutzmaßnahmen, die ursprünglich für einen örtlich begrenzten Küstenabschnitt vorgesehen waren, hat sich eine unangenehme Wirkung nicht beheben lassen: die Lee-Erosion. Sie überschattet ihrer Bedeutung nach sämtliche sonstigen Erscheinungen.

Jedes starre Bauwerk im labilen, trockenen wie nassen Sandstrand bewirkt in Lee der Hauptangriffsrichtung einen Verlust an Boden. Die Sturmfluten greifen an der Leeseite eines Längswerks die Nahtstelle zwischen dem harten Küstenbau und dem weichen Boden an, lösen ihn und räumen ihn fort. Das ist am Ende eines Buhnensystems wie auch bei jeder Einzelbuhne schon bei normalen Wetterlagen der Fall.

Folgende Beispiele aus der Lübecker Bucht mögen diese Erscheinung weiter erläutern. Die massive Findlingsbuhne am Timmendorfer Strand, die in den Abbildungen 35 und 36 gezeigt wurde, hat auf der Luvseite Sand, Kies und Gerölle auf ihrem Wanderweg abgefangen und deren Anhäufung verursacht. Gleichzeitig wurde auf der anderen Seite in ähnlichem Maße der Strand abgetragen; denn es fehlte der Nachschub; der Überwasserstrand verlor an Breite und Höhe. Die Gerölle zeugen hier von einem ausgesprochenen Abbruchstrand. Abbildung 24 läßt dieselbe Wirkung am Südende des Söhrmandammes bei Travemünde erkennen (vgl. S. 128). Je weiter eine Buhne oder eine Mole in das Gebiet der Sandwanderung vorstößt, desto intensiver macht sich die Lee-Erosion bemerkbar. Nach Auffüllung an der Luvseite wandert der Sand vor Kopf der Buhne etwa parallel zur natürlichen Uferlinie weiter. Eine scharfe Wendung der Wanderrichtung landwärts, die zur Anlandung auf der Leeseite notwendig wäre, findet nicht statt. Der Strand in Lee muß weiter „hungern“. Vorstehende Beobachtung wurde an der etwa 230 m langen Mole an der Einfahrt zum Hafen Niendorf sowohl durch Vermessungen als auch durch eine Luftbildaufnahme (Abb. 40) und an anderen Querwerken der schleswig-holsteinischen Ostseeküste in eindeutiger Weise bestätigt [PETERSEN (67)].

Was war dagegen zu tun? Die Schäden mußten beseitigt werden, d. h. die Längswerke und noch mehr die Buhnensysteme nahmen an Ausdehnung in Richtung des wandernden Sandes zu. Schäden entstanden aber auch noch, als die Anlagen bereits bis in die natürlichen Anwachsgebiete vorgetrieben worden waren. So wurden Anwachsstrecken gegen alle Erwartungen zu Abbruchstrecken.

LEPPIK (46) wie auch der XVII. Internationale Schiffahrtskongreß [ABECCIS (1)] bekennen offen, daß man zur Zeit noch nicht viel darüber weiß, „wie sich eigentlich die Küstenerosion vollzieht“. SCHUMACHER (84) erklärt dazu: „Die Praxis verleitet zu der entmutigenden Auf-

fassung, daß die Lee-Erosion erst aufhört, wenn die gesamte in Abbruch liegende Küste künstlich befestigt ist. Daher entsteht der Forschung hier eine wichtige Aufgabe.“

Wir befinden uns also in einer Lage, die für Planungen von Küstenschutzmaßnahmen an der Ostsee zur intensivsten Vorarbeit mahnt. Auf gründliche Untersuchungen kann nicht mehr verzichtet werden.

An dieser Stelle sei auf den hervorragenden Wert von Luftbildaufnahmen bei der Beurteilung von Naturvorgängen am unberührten natürlichen und am bebauten Strand hingewiesen (Abb. 40). Bei einer Strandbegehung bleibt der Blickwinkel des Beschauers nahezu in der Ebene begrenzt. Ähnlich verhält es sich bei der Betrachtung eines Ufers vom Schiff aus. Die Perspektive aus der Luft drängt die Grenzen beiseite und eröffnet die gleichzeitige und umfassende Schau eines weiten Küstengebietes. Die Möglichkeit, zu einer bestimmten Zeit das Steilufer mit dem rückwärtigen Gelände, mit dem Über- und Unterwasserstrand und mit seinen Flanken betrachten zu können, erschließt der Planung für Schutzmaßnahmen an der Ostseeküste ein nicht hoch genug zu bewertendes Hilfsmittel. In den bei ruhiger See geflogenen Aufnahmen heben sich z. B. die als Wanderwege des Sandes erkannten Riffe so deutlich ab, daß ihre Beeinflussung durch Uferschutzwerke unmittelbar abgelesen werden kann. Die Wirkung jeder Buhne tritt anschaulich hervor. Das Luftbild ist zugleich für die Grundlagenforschung (z. B. bei der Deutung der Vorgänge in der Brandungszone) unentbehrlich.

II. Wirtschaftliche Betrachtungen für die Planung von Uferschutzmaßnahmen vor Steilufern

Es ist eine feststehende Tatsache, daß die Herstellung und Unterhaltung von Seebauten außergewöhnlich hohe Kosten verursacht. Da die Zweckmäßigkeit der seit rund hundert Jahren betriebenen Maßnahmen zum Schutze von Abbruchufern an der Ostsee bezweifelt worden ist [WASMUND (99)], soll versucht werden, den Uferschutz einer wirtschaftlichen Betrachtung zu unterziehen. Die zeitbedingten Umstände zwingen zwar dazu, auf das bei einigen Bauämtern angesammelte Zahlenmaterial zu verzichten, so daß hier Schätzungen nicht zu umgehen sind. Diese wurden, wo es möglich war, mit bekannten Werten abgestimmt. Die Ergebnisse können und sollen nur die Größenordnungen veranschaulichen, mit denen im Küstenschutz an der Ostsee etwa zu rechnen sein wird.

Über den Nachweis der Wirtschaftlichkeit von künstlichen Uferschutzanlagen schreibt HEISER (32), daß sie sich rechnerisch nicht so gut erbringen läßt, „wie solches bei anderen Bauwerken möglich ist. Es kommt mehr auf die genaue Untersuchung der Folgen an, die zu erwarten sind, wenn eine gefährdete Küstenstrecke nicht unter wirksamen Schutz gebracht wird und sich weiter überlassen bleibt.“

Die Kostenberechnung für Längswerke hat ergeben, daß bei dem Preisindex vom Jahre 1950 für die Herstellung eines lfdm Längswerk im Durchschnitt ein Betrag von 1900.— DM, d. h. für einen Küstenkilometer 1 900 000.— DM benötigt werden. Dabei wurden die einzelnen Bauarten so bemessen, daß sie bei schweren Sturmfluten ihre Standsicherheit zu bewahren und ihre eigentliche Aufgabe zum Schutze eines Steilufers zu erfüllen in der Lage sind. Die Erfahrungen haben gelehrt, daß wesentliche Einsparungen bei dem Bau von Längswerken fast in jedem Falle entsprechend höhere Unterhaltungskosten zur Folge hatten.

Soll statt eines Längswerks oder als Ergänzung zu einem Längswerk eine Buhnengruppe geschaffen werden, dann müssen Beträge von etwa 200 000.— DM für einen Küstenkilometer (ebenfalls bei dem Preisindex von 1950) in die Rechnung eingeführt werden (bei 10 Buhnen je km von je 80 m Länge und einem Baupreis von 250.— DM je lfdm Buhne). An Uferstrecken mit längeren Buhnen wird der Abstand von Buhne zu Buhne vergrößert, die Anzahl der Buhnen wird kleiner. Bei kürzeren Buhnen ist das Verhältnis umgekehrt. Die gesamte Buhnenlänge auf 1000 m Ufer beträgt bei der bisherigen Bauweise etwa 770 bis 800 m. Die Anzahl der Buhnen, die an der Küste gebaut worden sind, und deren Länge ließen sich für Schleswig-Holstein einwandfrei ermitteln; für die übrigen Küstenstrecken war nur eine über-

schlägliche Erfassung an Hand der einschlägigen Literatur möglich. Danach verteilen sich die Buhnen auf die Küstenabschnitte wie folgt:

Schleswig-Holstein	270 Buhnen i. M.	40 m lang
Mecklenburg	150	„ „ 60 „ „
Pommern	1 000	„ „ 70 „ „
Samland und Nehrung	75	„ „ 70 „ „

Der Bauwert der Buhnen an der Ostseeküste kann auf Grund der vorstehenden Angaben zu rund 24 Millionen DM angegeben werden.

Eine ähnliche Erfassung der durch Längswerke gesicherten Uferstrecken war leider nicht möglich. Aus der Gegenüberstellung der Kosten für die Herstellung eines Küstenkilometers Längswerk und Querwerk geht hervor, daß der Schutz mit Buhnen am preiswertesten durchzuführen ist. Andererseits werden Ufer, die mit Buhnen allein nicht zu halten sind, mit 2 Millionen DM je Küstenkilometer zu veranschlagen sein, wobei der leeseitige Abschluß der zu schützenden Strecke erfahrungsgemäß meist eine Erweiterung der Buhnengruppe, zum Teil auch des Längswerks, nach sich zieht und die Kosten erhöht.

Die lautende Unterhaltung der Küstenschutzwerke, die zeitweise oder dauernd den Angriffen des Meeres ausgesetzt sind, ist mit weiteren Kosten verbunden. Im Seebau haben sich diese im Durchschnitt etwa zu 5 v. H. der Bausumme je Jahr ergeben. Für einen Küstenkilometer Buhnen belaufen sich die Unterhaltungskosten etwa auf 10 000.— DM. Für die Längswerke mit kräftiger Dimensionierung, die der Berechnung zugrunde gelegt ist, können günstigenfalls 2 v. H. jährliche Unterhaltungskosten in Ansatz gebracht werden. Dies entspricht einer jährlichen Summe von etwa 38 000.— DM.

An Küstenstrecken, wo der Landverlust allein die Veranlassung für den Bau von Uferschutzwerken gab, wird der Wert der abbrechenden landwirtschaftlichen Nutzfläche bei wirtschaftlichen Überlegungen in Ansatz zu bringen sein. Auf einen Küstenkilometer beträgt der jährliche Landverlust im Durchschnitt für

Schleswig-Holstein	rund 250 m ²
Mecklenburg	„ 320 „
Pommern	„ 800 „
Samland	„ 500 „

Bei einem Wert von 4 000.— DM je ha Bodenfläche beläuft sich der jährliche Verlust in DM für einen Küstenkilometer in

Schleswig-Holstein	auf rund 100.— DM
Mecklenburg	„ „ 130.— „
Pommern	„ „ 320.— „
Samland	„ „ 200.— „

In den meisten Fällen liegen mehrere Gründe vor, einen Küstenabschnitt zu sichern, sei es, daß es die Versandung von Wasserstraßen und Häfen zu vermeiden gilt, oder daß Ortschaften, Seezeichen usw. geschützt werden sollen. Es gehen dann entsprechend höhere Werte in die Rechnung ein. Zu vorstehender Erörterung wird ausdrücklich festgestellt, daß jede Küstenstrecke durch besondere Eigenarten gekennzeichnet ist. Deshalb werden wirtschaftliche Überlegungen bei den einzelnen Vorhaben jeweils gesondert anzustellen sein. Die Verhältnisse am Brodtener Steilufer sind dafür beispielhaft. Schutzmaßnahmen zur Verhinderung von Landverlusten sind hier technisch wie wirtschaftlich nicht zu vertreten [PETERSEN u. WETZEL (69)].

III. Vorschläge für flächenhafte Küstenschutzmaßnahmen

Als der XVII. Internationale Schiffahrtskongreß in Lissabon über „Schutzbauten an der Küste zwecks Einschränkung der Erosion“ beraten hatte, faßte ABECECIS (1) das Ergebnis wie folgt zusammen: „Die Lösung eines Problems zum Schutze der Küsten trägt mitunter dazu bei, neue ähnliche Probleme an anderen Stellen aufzuwerfen, denn diese Lösung entzieht der Küstenströmung einen Teil des Materials, mit dem sie vorher versorgt wurde. Der Kongreß glaubte deshalb, zu Beginn auf die gebotene Vorsicht und auf die Notwendigkeit einer gewissen Kontrolle der Arbeiten durch den

Staat hinweisen zu müssen.“ „Was das Mittel gegen den festgestellten Übelstand anbetrifft, d. h. das Verhalten und die Wirkung eines bestimmten Bauwerkes zum Schutze der Küsten, so konnte der Kongreß nur mit Bedauern von unserem heutigen mangelhaften Wissen auf diesem Gebiet sprechen.“

Dieses und die wirtschaftlichen Betrachtungen veranlassen bei einer Abwägung mit dem tatsächlich Erreichten zu der Überlegung, ob es nicht noch andere Möglichkeiten gibt, den Landverlust an besonders gefährdeten Stellen aufzuhalten. WASMUND (99) hat einen Weg angedeutet: „Längswerke und Querwerke bleiben lineare starre Schutzlinien, obwohl es gar nicht darauf ankommt, feste Linien sondern Flächen zu erhalten oder das Küstenvorfeld bestenfalls zu verbreitern und auszufachen.“

Das ist an sich derselbe Gedanke, der seit langem an der Nordseeküste praktisch verwirklicht wird. Dort betreibt man Küstenschutz durch Landgewinnung. Das weite, flache, dem Ufer vorgelagerte Watt bietet in Verbindung mit der aufbauenden Eigenschaft des Meeres gute, naturgegebene Voraussetzungen für eine flächenhafte Verteidigung. Seit Generationen wird das bodenbildende Moment dort beobachtet und gefördert. Die Förderung brachte mit sorgfältig an die Wattformen angepaßten Lahnungssystemen den lohnenden Erfolg. Die Gezeiten lassen das Wasser zweimal täglich von den Watt abfließen und machen sie für die Herstellung von Landgewinnungswerken verhältnismäßig gut zugänglich.

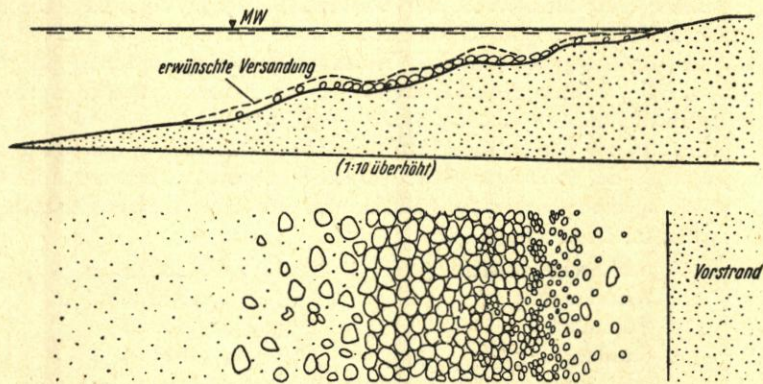


Abb. 41. Flächenchutzpackung vor einer sandigen Flachküste
(aus WASMUND 1940)

Die Bodenformen und hydrologischen Bedingungen sind an der Ostsee zwar grundlegend andere. Im allgemeinen fällt der Unterwasserstrand steiler und auf größere Tiefen ab. Der Wasserspiegel der Ostsee schwankt in einem bestimmten Bereich unregelmäßig und normalerweise nur um wenige Dezimeter. Es ist deshalb verständlich, daß die Beobachtung der Vorgänge am Strand vornehmlich auf den oberhalb des Wasserspiegels liegenden Teil beschränkt blieb. Wie HAGEN, REHDER und andere haben sich in jüngster Zeit Wissenschaftler und Ingenieure mit dem Studium des Strandes unterhalb des Wasserspiegels befaßt und an einigen Küstenabschnitten eine Vorstellung über Bodenaufbau und -formen sowie über die hier wirkenden Kräfte gewonnen.

Diese lassen teils zerstörende, teils aber auch aufbauende Eigenschaften erkennen. Abbruchufer sind Zeugen der Zerstörung, Anwachsgebiete solche des Aufbaues, über wie unter Wasser. Aus den bisherigen Erfahrungen im Bühnenbau kann gefolgert werden, daß die Querwerke zum Teil recht harte Eingriffe in die Natur bedeuten.

Das Ziel des Uferschutzes besteht in einer örtlichen Verbreiterung und Erhöhung des trockenen Strandes und Abflachung des ufernahen Unterwasserstrandes.

WASMUND (99) bezeichnete als „besten Lehrmeister die Natur“ und stellte als Meeresschutze drei Vorschläge zur Diskussion:

- a) „Der Flächenchutz des Unterwasserstrandes oder eines strandnahen Streifens des Küstenvorfeldes

könnte durch Belegung mit natürlichen Steinen (Findlinge und Kopfsteine genügender Größe) erreicht werden. Günstiger und billiger noch erscheint die Möglichkeit, mit sperrigen Betonbruchsteinen zu arbeiten“ (Abb. 41).

- b) „Man könnte daran denken, Längswerke in Form von Steinwällen oder küstenparallelen Unterwasserbuhnen zu bauen“ (Abb. 42).

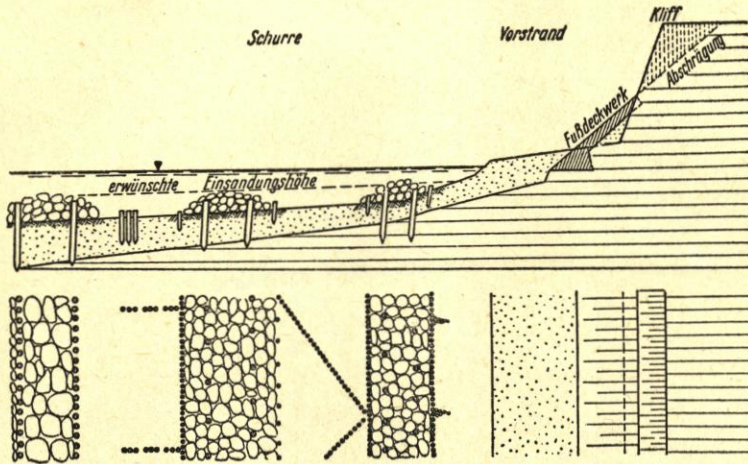


Abb. 42. Unterwasser-Schutzfalle (Grundschwelle) vor einem Steilufer mit schmalen Strande (aus WASMUND 1940)

- c) „Schließlich ist auch an punktweise Versteinung (Silifizierung) des Unterwasserstrandes zu denken.“ Eine technische Verarbeitung und Erprobung dieser Vorschläge hat noch nicht stattgefunden.

Ein anderes Verfahren zur flächenhaften Verteidigung der Küste wurde im Jahre 1951 vor Norderney angewandt. Mittels Spüler und Rohrleitungen hat man über eine Million m³ Baggersand vor die gefährdete Küstenstrecke gepumpt. Der Strand erhielt dadurch die gewünschte Breite und Höhe. Ob sich dieses Verfahren bewähren wird, bleibt abzuwarten (vgl. Heft 1 dieser Schriftenreihe).

An der Ostsee hat man zur Verbesserung der Badeverhältnisse z. B. am Strand vor Grömitz, Laboe, Glücksburg und Travemünde eine Vorspülung vorgenommen. Die mittlere Sturmflut von nur rund + 1,30 m MW am 20./21. Januar 1952 räumte den größten Teil des Sandes vom Badestrand vor Grömitz (u. Kellenhusen) fort. Dieser Verlust ist auf eine für diese Küstenorte gefährliche Windrichtung zurückzuführen. Ob das Vorspülverfahren vor einem Steilufer von Erfolg sein kann, wird bezweifelt.

Aus den Überlegungen und Versuchen mit Buhnen in der Natur und im Modell und aus der bisherigen Kenntnis über die Vorgänge auf dem trockenen Strand wie auf dem ufernahen Unterwasserstrand werden folgende Vorschläge abgeleitet:

Um das Naturgeschehen am Meeresstrand möglichst wenig zu stören und die aufbauenden Kräfte in ihrer Tätigkeit zu fördern, sollte naturähnlich gebaut werden.

Die zweckmäßigste Form eines Längswerks ist ein möglichst flach geneigtes, schweres Deckwerk.

Unter naturähnlichen Querwerken sind Buhnen zu verstehen, die sich im Längsprofil der Neigung des Strandes anpassen, d. h. sie werden im seeseitigen Teil vornehmlich als Schwellen unter Wasser liegen müssen (Abb. 43).

Die Länge der Buhne wird durch die Lage der Sandriffe bestimmt. Die Buhne soll auf der seeseitigen Böschung eines Riffes enden.

Zwei Buhnen sollen jeweils durch Längsbuhnen verbunden werden, die in die Mulden zwischen Uferlinie und Riff bzw. zwischen zwei Riffe zu legen sind.

Die Buhnen sind aus etwa 4 m breiten und 0,30 m starken Senkmatten mit Belastung durch spezifisch möglichst schwere Spaltsteine 30×50 cm herzustellen.

Die Bauweise ist eine bewegliche, d. h. nach teilweiser oder vollständiger Versandung des Buhnensystems kann dieses in derselben Weise erhöht und seawärts vorverlegt werden. Bei Sturmfluten soll das angelegte Buhnennetz die Abtragung des Strandes verzögern.

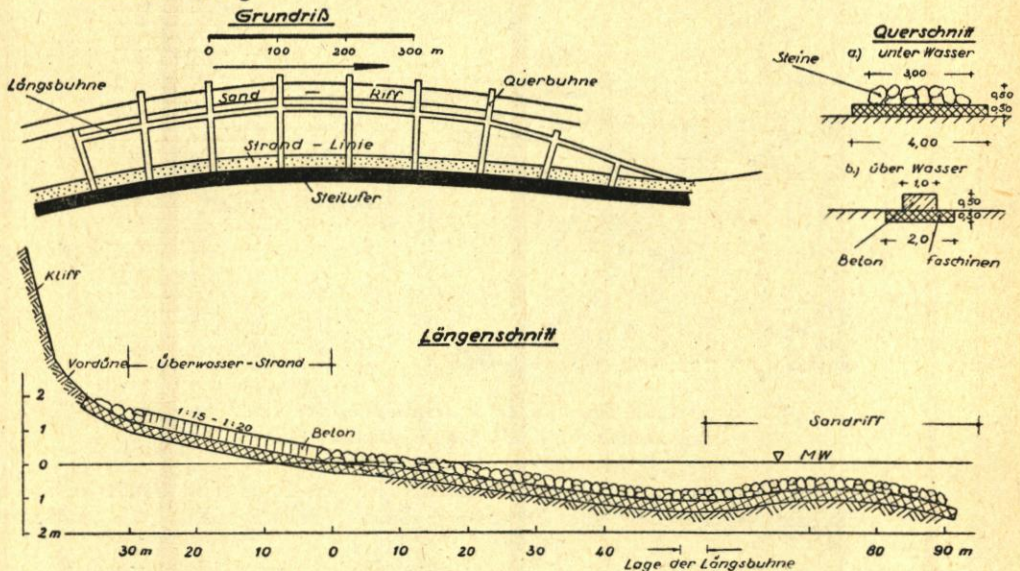


Abb. 43. Prinzip-Skizze für flächenhaften Uferschutz

Eisschäden können nur an den nicht versandeten Buhnenteilen entstehen.

Die sorgfältige Beobachtung und Unterhaltung des Buhnensystems ist eine unbedingte Voraussetzung für den Erfolg. Vor Beginn der Bauarbeiten muß die Frage der Unterhaltungspflicht geregelt sein. Die Unterhaltungskosten werden an Küsten mit starker Sandbewegung geringer sein als an solchen mit geringer Sandbewegung.

Die örtliche Begrenzung des Buhnensystems auf den zu schützenden Küstenbereich scheint möglich zu sein, da eine Lee-Erosion bei Unterwasserbuhnen kaum zu erwarten sein dürfte. Die Benachteiligung von Nachbarstrecken würde ausgeschaltet.

Es wird empfohlen, den kostspieligen Versuchen in der Natur eine eingehende Untersuchung im Modell voraufgehen zu lassen.

Das Buhnensystem ähnelt dem im Dünenbau erfolgreich angewandten Verfahren, den Sand mit Strauchzäunen zu fangen. Das Transportmittel „Wasser“ entspricht etwa dem Transportmittel „Wind“.

Der Abstand zweier Querbuhnen dürfte gleich der Entfernung des Riffs von der Uferlinie sein.

Zweck des Buhnensystems soll sein:

- a) den trockenen Strand allmählich zu verbreitern und zu erhöhen, sowie günstige Voraussetzungen für den Dünenbau zu schaffen,
- b) den ufernahen Unterwasserstrand allmählich möglichst flach und gleichmäßig auszubilden.

Von einem im Abbruch liegenden Steilufer, an dem keine gleichgerichtete Sandwanderung stattfindet, dürfte eine Erhöhung und Verbreiterung des Strandes auch mit derartigen Buhnensystemen kaum möglich sein.

Buhnen, die zerstörende Strömungen ablenken sollen, müssen dicht sein, dagegen müssen Auffangbuhnen durchlässig sein.

Im allgemeinen ist bisher die Frage verneint worden, ob Steilufer mit vertretbaren Mitteln gegen Abbruch geschützt werden können [XV. u. XVII. Intern. Schiffahrtskongreß: COEN CAGLI (4) und ABECECIS (1)]. Vor dem Brodtener Ufer speziell halten DALMANN (7), GERHARDT (19), REHDER [(74), (75) u. (76)], HEISER (32) und PETERSEN (68) den Bau von Buhnen für zwecklos, da die Voraussetzungen für einen Erfolg fehlen. Der flächenhafte Uferschutz liegt hier in der Erhaltung der natürlichen Steinlage durch Unterbindung der Steinfischerei.

IV. Besiedlung von Steilufern

Seitdem der Fremdenverkehr mit Erholungsuchenden in die Küstenorte strömt, rücken diese mehr und mehr an die Ufer heran. In Verkennung der möglichen Naturereignisse hat sich damit eine verständliche, aber ebenso bedenkliche Entwicklung angebahnt. Für Abbruchufer wird zu erwägen sein, ob nicht ein besonders festzuliegender Uferstreifen aus Gründen der Sicherheit und der wachsenden Verpflichtungen von der Besiedlung ausgeschlossen werden soll.

An der schleswig-holsteinischen Ostseeküste nimmt vor allem die Besiedlung der anschließenden Strandwälle Ausmaße an, die eine grundlegende Überprüfung als erforderlich erscheinen lassen, denn der Strandwall stellt eine natürliche, aber veränderliche Form auf der Grenze zwischen Land und Meer dar. Seine Höhe liegt von Natur aus nicht hochwasserfrei, dies bedeutet, daß die Besiedlung eines Strandwalls bei schweren Sturmfluten zu Überschwemmungskatastrophen führen kann oder muß.

Gegen die Besiedlung von Hochufern wenden sich unter anderem die Vertreter des Naturschutzes. Die Hansestadt Lübeck hat bereits den größten Teil des Brodtener Uferstreifens zum Naturschutzgebiet erklären lassen. Darüber hinaus ist die Befestigung des Steilufers vom Standpunkt des Naturschutzes unerwünscht [BURK (3)]. Wie unterschiedlich diese Frage auch behandelt wird, mag daraus hervorgehen, daß die Sicherung des Steilufers am Dornbusch auf der Insel Hiddensee „nicht zuletzt auch aus Gründen des Heimatschutzes geboten“ war, um „dies in seiner Eigenart und großartigen Urwüchsigkeit unvergleichlich schöne Geschenk der Natur“ zu erhalten [POPPE (70)]. Der Dornbusch erhebt sich bis zu 72 m über MW der Ostsee.

D. Zusammenfassung

Die Form der Ostseeküste ist das Ergebnis eines fortdauernden Kampfes zwischen Meer und Land. Daß die zerstörende Tätigkeit des Meeres die aufbauende überwiegt, zeigt der Abbruch an den Steilufern. Auf den Küstenstrecken vom Samland bis Schleswig-Holstein kann im Jahresdurchschnitt mit einem Landverlust bis etwa 24 ha gerechnet werden, der örtlich und zeitlich sehr verschieden auftritt. Die mittleren Uferrückgangswerte liegen etwa bei 0,25 bis 0,80 m.

Die Steilufer sind als Anschnitte vom Geschiebemergelücken zu bezeichnen; die Anschnittswinkel verschieben sich landwärts und zum geringeren Teil aufwärts. Diese Bewegung wird in erster Linie durch seeseitige Kräfte hervorgerufen und infolge Veränderung der physikalischen Eigenschaften des kluftreichen Geschiebemergels in Verbindung mit Grundwasser und Frost gefördert.

Am Fuße des Steilufers bildet sich während der Wintermonate eine Schutthalde aus abgestürzten Mergelbrocken und aus Mergelbrei. Bei Sturmfluten wird das Material aufgearbeitet und der Anschnittswinkel ausgeräumt. Der Vorgang wiederholt sich je nach der Dauer und der Häufigkeit der Wiederkehr von Sturmfluten mit Wasserständen von mehr als etwa + 0,80 m MW. Die höchsten Wasserstände erreichten in Memel etwa + 1,50 m MW, in der westlichen Ostsee dagegen + 3,40 m MW. Die entscheidenden Materialverfrachtungen an der Küste geschehen bei Sturmfluten. Vorstehende Naturerscheinungen wie auch die Lage eines Küstenabschnitts zur hochwassererzeugenden Windrichtung und die Stärke der Brandung an Steil-

ufern sind bestimmend für den Landverlust. Darüber hinaus trägt die anhaltende säkulare Niveauverschiebung zur Aktivierung des Uferrückgangs bei.

Die Abrasion des Unterwasserstrandes vor Steilufern konnte qualitativ und vor dem Brodtener Ufer quantitativ nachgewiesen werden; hier reicht die Hauptabrasion bis etwa zur Wassertiefe von vier Metern.

Die aufgearbeiteten Stoffe des Geschiebemergels folgen den Strömungsbedingungen des Wassers. Der Wanderweg ist von der Größe und Schwere des Stoffes, von der Stärke und Richtung der Strömung und von der Küstenform abhängig. Die Korngröße nimmt vom Herkunftsort mit der Entfernung von diesem ab. Felsen erfahren die geringste Ortsveränderung, Gerölle, Kiese und Sande wandern an der Küste entlang und die feinen tonigen Teile werden schwebend bis in die Tiefen der Ostsee und deren Buchten fortgetragen und dort sedimentiert. Ein Transport von Sand aus der Tiefe der Ostsee zum Strand hin findet nicht überall statt. Sandreiche Küstenstrecken verdanken ihre Entstehung einem kräftigen und stetigen Nachschub, sandarme Abschnitte lassen hingegen auf weniger ergiebige Herkunftsstätten schließen.

Die Vorgänge in der Brandungszone (Strömungsverhältnisse und Wanderung des Sandes im einzelnen) sind bis heute, von einigen Ansätzen abgesehen, noch wenig geklärt. Wenn Längs- und Querwerke zum Schutz von Steilufern in die Brandungszone hineingebaut werden müssen und wenn kostspielige Fehlinvestitionen erspart werden sollen, werden Untersuchungen hier vordringlich fortzusetzen sein.

Seit etwa Mitte des 19. Jahrhunderts wird versucht, Steilufer an der Ostsee durch Bauwerke zu schützen, um Vorkehrungen gegen die Versandung von Wasserstraßen und Häfen zu treffen, um den Landverlust vor Seezeichen, Lotsenstationen und Siedlungen aufzuhalten und um landwirtschaftliche Nutzflächen vor dem Zugriff des Meeres zu bewahren.

Die bis heute angewandten Bauformen sind im Prinzip ähnliche geblieben. An sandreichen und in der Hauptwindrichtung gelegenen, langgestreckten Küstenabschnitten kann die Heranziehung von Vordünen erfolgreich betrieben werden. An der schleswig-holsteinischen Ostseeküste gibt es keine nennenswerten Dünen. — Biologische Schutzmaßnahmen scheiterten bislang an der geringen Widerstandsfähigkeit der Vegetation in der Brandung. — Als natürliche Wellenbrecher vor Steilufern wirken dichte Steinfelder: die Restsedimente des abgebauten Geschiebemergels. Eine Unterbindung der Entnahme von Felsen hat eine geringere Abrasionsmöglichkeit und einen langsameren Uferrückgang zur Folge. — Ein sicherer Schutz gegen Landverluste wird mit Längswerken in Form von Steinwällen, Ufermauern oder Deckwerken erreicht, wenn sie standsicher und kräftig genug für die Beanspruchung bei schweren Sturmfluten angeordnet werden. Die technisch beste Querschnittsausbildung zeigt das flach geneigte Deckwerk mit rauher Oberfläche. — Querwerke (Buhnen) werden sowohl auf dem trockenen als auch auf dem nassen Strand mit der Zweckbestimmung gebaut, den am Strand entlang wandernden Sand zur Verbreiterung und Erhöhung des Strandes aufzufangen und die Strömung von der Küste fernzuhalten. Bei dem landseitigen Teil der Buhnen kommt es fast ausschließlich auf den Sandfang an. Diese Aufgabe ist mit gutem Erfolg durch bewegliche Bauweisen gelöst worden. Der seeseitige Teil wurde als undurchlässige oder fast undurchlässige Wand bis über die Wasseroberfläche aufragend ausgebildet. Die Buhnen wirken überwiegend stromabweisend.

Ein ungelöstes Problem ist die Ausbildung des leeseitigen Abschlusses einer Buhnengruppe geblieben. Die Anlagen an der Leeseite mußten bis in die Anwachsgebiete erweitert werden, so daß auch diese in Abbruchgebiete verwandelt wurden. — Die Eigenart des Bodenaufbaues der Steilufer läßt eine Fassung und sinnvolle Ableitung des Grund- und Sickerwassers in Dränsystemen mit vertretbaren Mitteln nicht zu.

Die Neubaukosten für den Schutz von Steilufern mit den bisherigen Bauformen sind mit etwa 2 Millionen DM je Küstenkilometer zu veranschlagen. Erfahrungsgemäß ziehen die Unterhaltung und die Ausbildung des leeseitigen Abschlusses einer Anlage weitere Kosten nach sich; denn der Eingriff in das Naturgeschehen an einer Stelle der Küste hat meist Veränderungen an anderer Stelle zur Folge.

Bei der Planung von künftigen Küstenschutzmaßnahmen wird dem Sandfang mittels niedriger, schwellenartiger Unterwasserbuhnen, die je nach Verlandung erhöht und verlängert, bzw. ergänzt werden können, größere Bedeutung zuzumessen sein. Flächenhaft angelegte Schutzwerke werden die gefährliche Lee-Erosion vermindern oder ganz ausschalten können.

Die meisten Naturerscheinungen an der Küste, wie die hochwasserverursachenden Stürme, die Häufigkeit ihrer Wiederkehr, die Wasserstände, der Seegang, die Brandung, die Meeresströmungen, die säkulare Niveaushiftung und andere sind unveränderlich. Der menschliche Einfluß wird sich deshalb auf die Befestigung des Klifffußes und die Nutzbarmachung der Sandwanderung beschränken müssen.

E. Schriftenverzeichnis und Quellen

1. ABECECIS, A. C. K.: Schutzbauten an der Küste zwecks Einschränkung der Erosion. XVII. Internat. Schiffahrtskongreß, Lissabon 1949.
2. BAENSCH: Die Sturmflut vom 12/13. Nov. 1872 an den Ostseeküsten des Preussischen Staates. Ztschr. f. Bauwesen 1875.
3. BURK, K.: Die Natur am Brodtener Ufer. Lübeckische Blätter 1950.
4. COEN CAGLI: Verteidigung der Küsten gegen das Meer, an Küsten mit und ohne vorwiegende Sinkstofführung. XV. Internat. Schiffahrtskongreß, Venedig 1931.
5. CHRISTIANSEN, W.: Die Vegetation am Brodtener Ufer. Unveröff. Januar 1951 (WSA. Lübeck)¹¹⁾, vergl. dieses Heft S. 95.
6. CREDNER: Über den „Seebären“ der westlichen Ostsee am 17. Mai 1888. Greifswald 1888.
7. DALMANN, J.: Gutachten über den Schutz des Brodtener Ufers. Hamburg 1873.
8. DALSTEIN: Schutz des Brodtener Ufers. Unveröff. 1947 (WSA. Lübeck).
9. Deutsche Gewässerkundliche Jahrbücher. 1901—1940, 1946 u. 1947.
10. DIETRICH, G.: Messungen mit Schaufelradstrommeßgeräten und Hochseepiegel. Unveröff. 1950 (WSA. Lübeck), vergl. dieses Heft S. 69.
11. DÜCKER, A.: Über die physikalischen Eigenschaften der das Brodtener Ufer aufbauenden Bodenarten und ihre Bedeutung für den Steiluferrückgang und Errichtung eines Uferschutzwerkes. Unveröff. 1950 (WSA. Lübeck), vergl. dieses Heft S. 21.
12. FINK, H.-H.: Ostseedeichsicherung durch Asphalteingußdecken. Wasser und Boden 1951 u. Bitumen 1951.
13. FRIEDRICH, P.: Das Brodtener Ufer bei Travemünde. Sein Rückgang und seine Erhaltung. Lübeckische Blätter 1901.
14. GÄHRS: Die Arbeiten der Reichswasserstraßenverwaltung im Jahre 1937. Die Bautechnik 1938.
15. GAYE, J.: Wasserstandsänderungen in der Ostsee in den letzten 100 Jahren. Schriften Naturw. Ver. Schl.-Holst. 1951.
16. GEIB, K. W.: Meeresgeologische Untersuchungen im Bereich der ostpommerschen Küste von Stolpmünde bis zur ehemaligen deutsch-polnischen Grenze. Geol. Meere u. Binnengew. 1944.
17. GEINITZ, E.: Der Landverlust der mecklenburgischen Küste. Mitt. Großherzogl. Meckl. Geol. Landesanst. 1903.
18. GEINITZ, E.: Die Einwirkung der Sylvester-Sturmflut 1904 auf die mecklenburgische Küste. Mitt. Großherzogl. Meckl. Geol. Landesanst. 1905.
19. GERHARDT, P.: Handbuch des deutschen Dünenbaues. Berlin 1900.
20. GERLACH: Gefährdetes Brodtener Ufer — ein Vorschlag zur Erhaltung. Lübecker Freie Presse 1948.
21. GERLACH: Biologische Uferbefestigung. Lübecker Nachrichten 1949.
22. GRIESEL: Beziehungen zwischen Gezeitenströmungen und Salzgehalt in der Trave. Mitt. Geogr. Ges. Lübeck 1934.
23. GROSCHOFF, P.: Physikalische Bedingungen des Kliffrückgangs an der Kieler und Lübecker Bucht. Kieler Meeresforschungen 1936.
24. GROSCHOFF, P.: Landverluste an der Kieler und Lübecker Bucht im Winter 1936/37. Geol. Meere u. Binnengew. 1937.
25. HAGEN, G.: Handbuch der Wasserbaukunst, Seeufer- u. Hafengebäude, 3. Teil, I. Bd. Berlin 1863.
26. HANSEN, A.: Küstenschutz an der Ostsee. Die Bautechnik 1938.

¹¹⁾ WSA. = Wasser- und Schiffsamt.

27. HANSEN, A.: Molen und Wellenkräfte an Molen im deutschen Ostseegebiet. Zentralbl. d. Bauverw. 1940.
28. HANSEN, W.: Wasserstandsänderungen in der Lübecker Bucht. Unveröff. 1950 (WSA. Lübeck), vergl. dieses Heft S. 90.
29. HARTNACK, W.: Die Küste Hinterpommerns unter besonderer Berücksichtigung der Morphologie. Stolp 1926.
30. HEISER, H.: Über die zweckmäßigste Anordnung der äußeren Hafendämme von Seehäfen an sandiger Küste. Ztschr. f. Bauw. 1920.
31. HEISER, H.: Der Rückgang der deutschen Ostseeküste. Die Bautechnik 1925.
32. HEISER, H.: Uferschutzbau an der deutschen Ostseeküste. Die Bautechnik 1927.
33. HEISER, H.: Die Verteidigung der Küsten gegen das Meer an Küsten mit und ohne vorwiegende Sinkstoffführung. Die Bautechnik 1932.
34. HELA, I.: Über die Schwankungen des Wasserstandes in der Ostsee. Helsinki 1944.
35. HOECH: Die Entwicklung der Pfahlbuhnen im Bezirk des Hafenbauamts Kolberg. Ztschr. Verb. dtsh. Arch. u. Ing. Ver. 1917.
36. HURTIG, Th.: Morphologische Beobachtungen an der mecklenburgischen Küste zwischen Darßer Ort und Warnemünde. Erdkundeunterricht 1950.
37. JARKE, J.: Die Unterschiede in der Sedimentation vor der Ost- und Westküste Schleswig-Holsteins. Unveröff. Diss. 1948 (Geolog. Inst. d. Univers. Kiel).
38. KANNENBERG, E. G.: Literaturbericht über das Brodtener Ufer. Unveröff. 1950 (WSA. Lübeck), vergl. dieses Heft S. 1.
39. KANNENBERG, E. G.: Die Steilufer der schleswig-holsteinischen Ostseeküste. Schr. Geogr. Inst. Univers. Kiel 1951.
40. KELLER, H.: Studien über die Gestaltung der Sandküsten und die Anlage der Seehäfen im Sandgebiet. Ztschr. f. Bauwesen 1881/82.
41. KRAUSE, E.: Beitrag zur Frage der Häfen an sinkstoffführenden Küsten. Die Bautechnik 1935.
42. KRES, J.: Deutsche Küstenflüsse. Berlin 1911.
43. KRESSNER, B.: Modellversuche über die Wirkung der Strömungen und Brandungswellen auf einem sandigen Meeresstrand und die zweckmäßige Anlage von Strandbuhnen. Die Bautechnik 1928.
44. KRÜGER, G.: Über Sturmfluten an den deutschen Küsten der westlichen Ostsee. Jahrb. Geogr. Ges. Greifswald 1910.
45. LEPPIK, E.: Verbesserung von Flußmündungen an Meeren ohne Tidebewegung mit besonderer Berücksichtigung der Ost- und Südküste der Ostsee. Hamburg 1949.
46. LEPPIK, E.: Maßnahmen zur Verminderung der Erosionswirkungen an der offenen Küste. Hamburg 1949.
47. LORENZEN, J. M.: Planung und Forschung im Gebiet der Schleswig-Holsteinischen Westküste. Westküste, H. 1. 1938.
48. LORENZEN, J. M.: Vorarbeiten für Seebauten. Jahrb. Hafenbautechn. Ges. 1939/40.
49. LORENZEN, J. M. u. SCHELLING, H.: Arbeitsbericht über die Luftbildaufnahmen vom Wattgebiet vor der Westküste Schleswig-Holsteins. Unveröff. 1940 (Husum, Nissenhaus).
50. LÜPKES, H. u. SIEMENS, H. P.: Uferschutzbauten vor Westerland. Zentralbl. d. Bauverw. 1938.
51. LÜPKES, H. u. SIEMENS, H. P.: Planung und Stand der Maßnahmen zur Sicherung des Ellenbogens von Sylt. Westküste, H. 2/3. 1940.
52. MARTENS, P.: Morphologie der Schleswig-Holsteinischen Ostseeküste. Breslau 1927.
53. MEYER, E.: Die Insel Poel. Eine landes- und inselkundliche Untersuchung. Mitt. Geogr. Ges. Rostock, Beiheft Nr. 12. 1940.
54. MIKKELSEN, V. M.: Praestö Fjord (SO Seeland). The development of the postglacial vegetation and contribution to the history of the baltic sea. Dansk Botanik Arkiv 1949.
55. MODEL, F.: Wasserstand, Strom und Singularitäten in der Ostsee. Ann. Meteorol. 1948.
56. MODEL, F.: Gegenwärtige Küstenhebung im Ostseeraum. Mitt. Geogr. Ges. Hamburg 1950.
57. MORTENSEN, H.: Die Morphologie der samländischen Steilküste auf Grund einer physikalisch-morphologischen Kartierung des Gebietes. Veröff. Geogr. Inst. Alb. Univers. Königsberg 1921.
58. MUSSET, M.: Untersuchung über die Einwirkung der Form der Molen auf Küstenströmung und Sandwanderung vor den Hafeneinfahrten. Ztschr. f. Bauw. 1920.
59. NIESE: Maßnahmen zur Beseitigung der Sturmflutschäden vom 30./31. Dez. 1904 an den Außenküsten des Regierungsbezirks Stralsund. Ztschr. f. Bauw. 1910.

60. NUSSER, F.: Die Eisverhältnisse des Winters 1947/48 an den deutschen Küsten. Dtsch. Hydr. Ztschr. 1948.
61. NUSSER, F.: Gebiete gleicher Eisvorbereitungszeit an den deutschen Küsten. Dtsch. Hydr. Ztschr. 1950
62. Ostseehandbuch, südlicher Teil. Hamburg 1944.
63. OTTO, W.: Sedimentpetrographische Untersuchungen an der Küste der inneren Lübecker Bucht. Unveröff. 1950 (WSA. Lübeck), vergl. dieses Heft S. 45.
64. Pegelvorschrift. Berlin, 14. 9. 1935.
65. PETERSEN, M.: Ufermessungen, Peilungen, Kartenvergleiche an der inneren Lübecker Bucht. Unveröff. 1951 (a) (WSA. Lübeck).
66. PETERSEN, M.: Wasserstandsbeobachtungen im Abflußjahr 1950. Unveröff. 1951 (b) (WSA. Lübeck).
67. PETERSEN, M.: Küstenschutzmaßnahmen an der inneren Lübecker Bucht. Unveröff. 1951 (c) (WSA. Lübeck).
68. PETERSEN, M.: Kostenanschlag für die Herstellung eines Uferschutzwerkes am Brodtener Ufer bei Travemünde. Unveröff. 1951 (d) (WSA. Lübeck).
69. PETERSEN, M. u. WETZEL, G.: Hauptbericht über die Untersuchungen der Ursachen für die Abbrüche am Brodtener Ufer bei Travemünde und die Möglichkeiten ihrer Verhinderung 1949/50. Unveröff. 1951 (WSA. Lübeck).
70. POPPE, F.: Uferschutzarbeiten an der Ostseeküste vom Darß bis Hiddensee. Die Bautechnik, 1942.
71. PRATJE, O.: Die Materialwanderung an den Küsten der Ostsee und ihre Berechnung nach der Formel von MUNCH-PETERSEN. VI. Balt. Hydrolog. Konf. 1938.
72. PRATJE, O.: Die Sedimentation in der südlichen Ostsee. Ann. Hydr. 1939.
73. PRATJE, O.: Die Bodenbedeckung der südlichen und mittleren Ostsee. Dtsch. Hydr. Ztschr. 1948.
74. REHDER, P.: Bericht über das Ergebnis der Untersuchungen betr. Abbruch und Befestigung des Brodtener Ufers. Unveröff. 1903 (Stadtarchiv Lübeck).
75. REHDER, P.: Bericht betr. Befestigung des Brodtener Ufers. Unveröff. 1905 (Stadtarchiv Lübeck).
76. REHDER, P.: Herstellung eines Deckwerkes zum Schutze des Brodtener Ufers. Unveröff. 1909 (Stadtarchiv Lübeck).
77. REINHARDT, H.: Die Märzflut 1949 an der Mecklenburgischen Ostseeküste. Forschungen und Fortschritte, 1950.
78. RIEDER: Schutzmaßnahmen an der Steilküste des Samlandes. Unveröff. 1948 (WSA. Lübeck).
79. RUCK, H. W.: Seegrundkartierung der Lübecker Bucht. Unveröff. 1950 (WSA. Lübeck), vergl. dieses Heft S. 55.
80. SCHAGEN, C. u. DWARS, A. W. C.: Zeewerken, Rivierwerken, Droogmakerijen, Afwatering en Ontwatering Kanalen. Waterbouwkunde, Amsterdam 1950.
81. SCHMITZ, H.: Pollenanalytische Untersuchungen an der inneren Lübecker Bucht. Unveröff. 1950 (WSA. Lübeck), vergl. dieses Heft S. 34.
82. SCHOTT, C.: Die Westküste Schleswig-Holsteins. Probleme der Küstensenkung. Schr. Geogr. Inst. Univ. Kiel 1950.
83. SCHUMACHER, W.: Stellungnahme zu den Ergebnissen der Untersuchungen an der Küste Pommerns im Sommer 1939 durch das meeresgeologische Forschungsinstitut des Reichsamtes für Bodenforschung in Kitzberg bei Kiel. Unveröff. 1942 (Küstenausschuß Nord- u. Ostsee, Kiel).
84. SCHUMACHER, W.: Bilanzbericht über Erfolge und Mißerfolge von Schutzmaßnahmen an den Küsten der Ostsee. Unveröff. 1950 (Küstenausschuß Nord- u. Ostsee, Kiel).
85. SCHUSTER, R.: Bewährung und Leistungsfähigkeit von Asphaltbauweisen im Wasserbau. Das Bau-gewerbe, 1949 u. 1950.
86. SCHÜTZE, H.: Kliffs, Strand und Riffe der Südküste der Eckernförder Bucht (Ostsee). Geol. Meere u. Binnengew. 1939.
87. SEIFERT, G.: Geologie am Brodtener Ufer (Bestandsaufnahme). Unveröff. 1950 (WSA. Lübeck), vergl. dieses Heft S. 15.
88. SPETHMANN, H.: Geomorphologische Forschungen an den Flanken des Brodtener Ufers. Unveröff. 1951 (WSA. Lübeck), vergl. dieses Heft S. 58.
89. STARK, E.: Meteorologische Ursachen für hohe Wasserstände in der Lübecker Bucht von 1885 bis 1949. Unveröff. 1950 (WSA. Lübeck), vergl. dieses Heft S. 67.
90. TAPPER, E.: Meereresgeschichte der Kieler und Lübecker Bucht im Postglazial. Geol. Meere u. Binnengew. 1941.
91. TAUBER, A.: Die Bedeutung rezenter, mariner und limnischer Geröllwanderung für das Auftreten von exotischen Geröllen mit Beispielen aus den tertiären Sedimenten des Wiener Beckens. Jb. Reichsst. f. Bodenforschung 1940.

92. TEUSCHL: Erfahrungen bei Küstenschutzbauten. Zentralbl. d. Bauverw. 1940.
93. de THIERRY, G.: Verteidigung der Küsten gegen das Meer an Küsten mit und ohne vorwiegende Sinkstoffführung. XV. Internat. Schiffahrtskongreß, Venedig 1931.
94. TREPLIN: Denkschrift über die Arbeiten zum Schutze des Brodtener Ufers. Unveröff. 1949 (WSA. Lübeck).
95. WALTHER, F.: Naturforschung und Seewasserbau. Zentralbl. d. Bauverw. 1940.
96. WASMUND, E.: Grenzen der Berechnung gesteinstransportierender Kräfte an der deutschen Ostseeküste. VI. Balt. Hydrolog. Konf. 1938.
97. WASMUND, E.: Färbung und Glaszusatz als Meßmethode mariner Sand- und Geröllwanderung. Geol. Meere u. Binnengew. 1939 (a).
98. WASMUND, E.: Flachsee-Beobachtungen bei Sturm-Niedrigwasser an der gezeitenschwachen Kieler Förde (Ostsee). Geol. Meere u. Binnengew. 1939 (b).
99. WASMUND, E.: Angriff, Aufbau und Verteidigung der Küste. Zentralbl. d. Bauverw. 1940.
100. WASMUND, E. u. WIRTZ, D.: Die Ergebnisse der meeresgeologischen Untersuchungen an der Küste Pommerns. Unveröff. 1942 (Küstenausschuß Nord- u. Ostsee, Kiel).
101. WEIDEMANN, H.: Untersuchungen über unperiodische und periodische hydrographische Vorgänge in der Beltsee. Kieler Meeresforschungen, 1950.
102. WEIDEMANN, H.: Hydrographische Untersuchungen in der Lübecker Bucht. Unveröff. 1950 (WSA. Lübeck).
103. WIRTZ, D.: Die Beziehungen zwischen submariner Abtragung und Sandwanderung an der Küste Pommerns. Mitt. Geol. Staatsinst. Hamburg 1949.
104. WOHLBERG, E.: Forschungsaufgaben am Brodtener Ufer. Unveröff. 1948 (WSA. Lübeck).
105. ZANDER, R.: Die rezenten Änderungen der Mecklenburgischen Küste. Mitt. Geogr. Ges. Rostock, Beiheft Nr. 1, 1934.
106. v. ZYCHLINSKI: Uferschutzbau an der deutschen Ostseeküste. Die Bautechnik, 1931.

Anmerkung: Von dem Aufsatz „Die Befestigung des Brodtener Steilufers, ein Vorschlag der Gemeinde Brodten“, Vaterstädtische Vereinigung Lübeck von 1949 e. V., 3. Jahrgang, Nr. 2, erhielt der Verfasser erst nach Fertigstellung des Manuskriptes Kenntnis.

Weitere Quellen wurden eingesehen in folgenden Behörden und Instituten:

Wasser- und Schiffahrtsdirektion Kiel
Wasser- und Schiffahrtsämter Lübeck, Ostsee Kiel und Norden
Stadtarchiv Lübeck
Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Kiel — Wasserwirtschafts-
verwaltung —
Wasserwirtschaftsamt Lübeck
Landesvermessungsamt Kiel
Katasterämter Lübeck und Eutin
Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg
Meteorologisches Amt für Nordwest-Deutschland, Hamburg
Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Kiel
Marschenbauamt Husum
Forschungsstelle Westküste Husum
Technische Hochschule Hannover