

# Die Küste

ARCHIV  
FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK  
AN DER NORD- UND OSTSEE



3950-A-2012-00000104

Küstenausschuß „Nord- und Ostsee“  
Kiel-Wik  
Hindenburgufer 247  
F. 3 08 61

JAHRGANG 1

31. DEZEMBER 1952

HEFT 2



Die Küste, 1 Heft 1 (1952), 1-158

# Die Küste

**ARCHIV  
FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK  
AN DER NORD- UND OSTSEE**

**HERAUSGEBER:  
DER KÜSTENAUSSCHUSS NORD- UND OSTSEE**

**JÄHRGANG 1952  
HEFT 2**

**DRUCK UND KOMMISSIONSVERLAG:  
WESTHOLSTEINISCHE VERLAGSANSTALT BOYENS & CO. HEIDE I. HOLST.**

Anschriften der Verfasser dieses Heftes:

CHRISTIANSEN, Willi, Dr. phil. h. c., Kiel, Eckernförder Allee 18; DIETRICH, Günter, Dr., Hamburg 11, Seewartenstr. 9, Deutsches Hydrographisches Institut; DÜCKER, Alfred, Dr., Kiel, Gartenstr. 7, Amt für angewandte Geologie; GRIPP, Karl, Professor Dr., Kiel, Neue Universität, Olshausenstr. 40/60, Geologisches Institut; HANSEN, Walter, Oberregierungsrat Dr., Hamburg 11, Seewartenstr. 9, Deutsches Hydrographisches Institut; KANNENBERG, Ernst-Günter, Dr., Ratzeburg, Möllnerstr. 27; KÖSTER, Erhard, Lund (Schweden), Sölvegatan 18, Geografiska Institutionen; OTTO, Wolfgang, Dipl. geol., Kiel, Neue Universität, Olshausenstr. 40/60, Geologisches Institut; PETERSEN, Marcus, Regierungsbaurat Dr.-Ing., Kiel, Mühlenweg 166, Haus 13, Landesstelle für Gewässerkunde; PURPS, Hans, cand. phil., Kiel, Eckernförder Allee 18; RUCK, Klaus-Wolfgang, cand. geol., Kiel, Neue Universität, Olshausenstr. 40/60, Geologisches Institut; SCHMITZ, Heinz, Professor Dr., Kiel, Neue Universität, Olshausenstr. 40/60, Geologisches Institut; SEIFERT, Gerhard, Dipl. geol., Kiel-Friedrichsort, Poststr. 3; SPETHMANN, Hans, Dr., Lübeck, Kalandstr. 1; STARCK, Erich, Wetterdienst-Techniker, Lübeck, Hafenstr. 2, Wetterwarte; WEIDEMANN, Hartwig, Dr., Kiel, Hohenbergstr. 2, Institut für Meereskunde.

---

Nachdruck aus dem Inhalt nur mit Genehmigung des Herausgebers: „Küstenausschuß Nord- und Ostsee“,  
Ministerialrat i. R. Gaye, Kiel-Wik, Hindenburgufer 247, gestattet.  
Schriftleiter: Dr. habil. E. Wohlenberg, Husum, Nissenhaus.

## Inhaltsverzeichnis

|  |     |
|--|-----|
| KANNENBERG, Ernst-Günther, Dr.<br>Das Lübecker Lokal-Schrifttum über das Brodtener Ufer . . . . .  | 1   |
| GRIPP, Karl, Professor Dr.<br>Die Entstehung der Lübecker Bucht und des Brodtener Ufers . . . . .  | 12  |
| SEIFERT, Gerhard<br>Der Aufbau und die geologische Entwicklung des Brodtener Ufers und der<br>angrenzenden Niederungen . . . . .   | 15  |
| DÜCKER, Alfred, Dr.<br>Über die physikalischen Eigenschaften der das Brodtener Ufer aufbauenden<br>Bodenarten und ihre Bedeutung für den Steiluferrückgang und Errichtung eines<br>Uferschutzwerks . . . . . | 21  |
| SCHMITZ, Heinz, Professor Dr.<br>Pollenanalytische Untersuchungen an der inneren Lübecker Bucht . . . . .  | 34  |
| OTTO, Wolfgang<br>Sedimentpetrographische Untersuchungen an der Küste der inneren Lübecker<br>Bucht . . . . .  | 45  |
| RUCK, Klaus-Wolfgang<br>Seegrundkartierung der Lübecker Bucht . . . . .  | 55  |
| SPETHMANN, Hans, Dr.<br>Studien an den Flanken des Brodtener Ufers . . . . .   | 58  |
| STARK, Erich<br>Hohe Wasserstände in der Lübecker Bucht von 1885 bis 1949 . . . . .  | 67  |
| DIETRICH, Günter, Dr. und<br>WEIDEMANN, Hartwig, Dr.<br>Strömungsverhältnisse in der Lübecker Bucht . . . . .  | 69  |
| HANSEN, Walter, Oberregierungsrat Dr.<br>Hydrographische Untersuchungen in der Lübecker Bucht . . . . .  | 90  |
| CHRISTIANSEN, Willi, Dr. h. c. und<br>PURPS, Hans<br>Die Pflanzenwelt des Brodtener Ufers . . . . .  | 95  |
| PETERSEN, Marcus, Regierungsbaurat Dr.-Ing.<br>Abbruch und Schutz der Steilufer an der Ostseeküste (Samland bis Schleswig-<br>Holstein) . . . . .  | 100 |
| KÖSTER, Erhard<br>Die Veränderungen im Steilufer und in der Strandterrasse des Naturschutz-<br>gebietes Stoltera bei Warnemünde . . . . .  | 153 |

# Das Lübecker Lokal-Schrifttum über das Brodtener Ufer

Von E. G. Kannenberg

## Einführung

Im Folgenden wird an Hand des im Literaturverzeichnis aufgeführten Lübecker Schrifttums sowie der Berichte an die Lübecker Baudeputation und von Bürgerschaftsverhandlungen in großen Zügen ein Überblick über den historischen Verlauf in der Entwicklung der Naturvorgänge, die darüber entstandenen Auffassungen und Erkenntnisse sowie der sich daraus ergebenden Planungen und Maßnahmen am Brodtener Steilufer und in der seitlich anschließenden Travemünder Bucht gegeben (Abb. 1).

### Zeitabschnitt 1835 bis 1860

Für die wirtschaftliche Entwicklung der Hansestadt Lübeck als Hafen an der Ostsee waren das Fahrwasser der Untertrave und die Schifffahrtsverhältnisse an der Travemündung von jeher von großer Bedeutung. Daher bestand an allen Vorgängen und Maßnahmen, die diese Lebensader Lübecks betrafen, stets ein reges öffentliches Interesse. Für diese Tatsache ist es kennzeichnend, daß sich Lübecker Bürger auch des Mittels der Publizistik bedienten, sobald es ihnen zur Verfügung stand, um ihre Meinung zu bekunden.

Nachdem diese Möglichkeit im Jahre 1835 durch die Herausgabe der „Neuen Lübeckischen Blätter“ geschaffen war, liegt bereits 1837 die erste und bisher älteste bekannte Veröffentlichung über „Das Brodtener Ufer“ (1) von einem ungenannten Verfasser vor, der schon damals Uferschutzmaßnahmen fordert, da der Verlust an fruchtbarem Ackerboden auch die hauptsächliche Ursache der beständigen Versandungen der Hafeneinfahrt zu sein scheint. — Ein Zusammenhang zwischen dem Abbruch des Brodtener Ufers und der Versandung der Travemündung ist also schon sehr frühzeitig erkannt worden.

Im gleichen Jahre wird in drei weiteren Aufsätzen (2, 3, 4) zur obigen Meinungsäußerung über die Versandung der Hafeneinfahrt Stellung genommen, und es werden verschiedene Erklärungsversuche gegeben. Darunter stammt der letzte Aufsatz aus der Feder des Lübecker Stadtbaumeisters SPETZLER (4), der die Ansicht vertritt, daß die Plate vor der Mündung der Trave sich durch die Ablagerung der vom Fluß mitgeführten Sandmassen gebildet habe und weder durch den Sandtransport aus dem Abbruch des Brodtener Ufers, noch durch Sandwehen vom Leuchtenfelde oder vom Priwall. — SPETZLER war zu dieser Zeit mit dem Neuaufbau der Nordermole beschäftigt, die durch die Dezember-Hochwasser von 1835 und 1836 starke Beschädigungen erlitten hatte. Ebenfalls wurde damals unter der Leitung SPETZLERS mit der Herstellung einer Fahrrinne durch die vor der Travemündung liegende Plate, ein Sandfeld in einer natürlichen Tiefe von 2,7 m unter MW, durch neubeschaffte Dampfbagger begonnen, die nach Abschluß dieser Arbeiten im Jahre 1845 eine Tiefe von 16 Fuß (= 4,6 m) aufwies.

### Zeitabschnitt 1860 bis 1900

In den Jahren 1860 bis 1865 folgte wieder eine Serie von Aufsätzen über das Brodtener Ufer (5—8). Inzwischen waren bereits drei Gesuche der Bewohner von Brodten an den Lübecker Staat mit der Bitte um Maßnahmen für einen Uferschutz gerichtet worden, ohne daß sie einen Erfolg gehabt hatten (1857/60).

Im ersten dieser Aufsätze über „Die Meeresabspülungen und Erdstürze am Brodtener Ufer“ (5) werden erstmals zahlenmäßige Mitteilungen über das Ausmaß des Uferrückgangs gemacht, die jedoch mit der Angabe von 750 Lübecker Quadratruthen, d. h. etwa 16 000 qm

jährlichen Landverlustes nach den Ergebnissen der späteren Vermessungen als mehrfach überschätzt oder übertrieben angesehen werden müssen. Vor allem wird angeführt, daß es Aufgabe des Staates sein muß, Gegenmaßnahmen zum Schutze des Ufers zu treffen, wobei sich die entstehenden Kosten dadurch rechtfertigen lassen, daß die Versandung der Plate vor der Travemündung größtenteils vom Abbruch des Brodtener Ufers herrührt und die dadurch erforderliche Ausbaggerung erspart werden kann.

Im übrigen (6, 7 und 8) wurde zu den in dieser Zeit laufenden Verhandlungen in der Bürgerschaft über die Herstellung einer Uferbefestigung, deren Planung vom Baudirektor MÜLLER bearbeitet worden war, positiv oder negativ Stellung genommen. Dabei wurde 1865 der erste konkrete Vorschlag zur Beschaffung genauer Unterlagen über den Uferrückgang gemacht.

Das verheerende und bislang höchste Hochwasser von 1872 fand in einem „Bericht der Baudeputation betr. die Überschwemmung am 12./13. November 1872“ seinen Niederschlag, der auf Ermittlungen des Baudirektors Dr. KRIEG fußt (61). Die Mitteilungen betreffen in erster Linie die Wasserstandshöhen im Vergleich zu früheren Hochwassern, während Angaben über Zerstörungen und Schäden völlig fehlen.

Noch im gleichen Jahre wurde von einem ungenannten Verfasser (9) erstmalig ein näher umrissener Vorschlag für Maßnahmen am Brodtener Ufer unter Hinweis auf ein bei Niendorf befindliches Schutzsystem veröffentlicht, während bisher nur Maßnahmen ohne Angabe der Möglichkeiten gefordert wurden.

Die erheblichen Landverluste beim Hochwasser vom 13. November 1872 brachten erneute Anstrengungen zur Herstellung einer Uferbefestigung, wozu die Stellungnahme des Hamburger Wasserbaudirektors DALMANN (62) eingeholt wurde. Darin heißt es, daß an vielen Stellen der deutschen Ostseeküste Steilufer der Einwirkung der Wellen unterliegen, aber nur dort Abwehrmaßnahmen ergriffen worden seien, wo Bauwerke oder Siedlungen in unmittelbare Gefahr gerieten oder die Schifffahrt gefährdet wurde. Vor allem stellt DALMANN die Verhältnisse an der Ostseeküste denen der Nordseeküste gegenüber, wo riesige Gebiete den Gefahren eines Meereseinbruchs ausgesetzt sind und Menschenleben auf dem Spiele stehen, und er betont, daß es Sache der Küstenanlieger sei, die Kosten für einen Uferschutz aufzubringen, und der Staat es keinesfalls als eine Verpflichtung anerkennen könne, das Eigentum der Untertanen gegen elementare Zerstörungen zu schützen. DALMANN kommt auf Grund seiner Untersuchungen über den Einfluß des Brodtener Ufers auf die Versandung der Travemündung zu dem Ergebnis, daß trotz eines etwaigen Schutzes des Brodtener Ufers gegen Abbruch die Versandung der Fahrrinne in absehbarer Zeit nicht einmal gemäßigt würde und daher ein technischer Grund für Schutzmaßnahmen am Brodtener Ufer nicht vorliegt.

Das Problem eines Uferschutzes war damit fast drei Jahrzehnte zur Ruhe gekommen, und das Brodtener Ufer fand in dieser Zeit keine Erwähnung. Trotzdem wurden in diesem Zeitabschnitt wertvolle Unterlagen für die spätere Zukunft geschaffen. Nach der ersten Katastervermessung von 1877 wurde bereits im Jahre 1887 eine Nachmessung des Steilufergebietes durch die Baubehörde vorgenommen, um endgültig erste genaue Ergebnisse über den Uferrückgang zu erhalten.

Kurz vor der Jahrhundertwende erschienen noch zwei Aufsätze von ungenannten Verfassern in den Lübeckischen Blättern (10, 11), die sich eingehend mit der „Versandung der Travemündung“ (11) und den Möglichkeiten zur Abwendung dieser Gefahr durch einen „Bollwerksbau“ (10) befaßten. Zu den beachtlichen Vorschlägen, die jeweils auf die Errichtung einer Mole in Höhe des Seetempels abzielten, wurden Beispiele von anderen Ostseehäfen und außereuropäischen Häfen herangezogen.

#### Zeitabschnitt 1900 bis 1918

Die rasch fortschreitende Entwicklung der Schifffahrt machte um die Jahrhundertwende erneute Verbesserungen des Travefahrwassers notwendig. Die Pläne hierzu wurden 1898 in

einem umfangreichen Bericht des damaligen Lübecker Wasserbaudirektors REHDER (63) niedergelegt, wobei die Zustände in der Travemündung eine besonders betonte Berücksichtigung fanden.

In diesem „Bericht über die Vertiefung der Trave auf 7,50 m Wassertiefe“ (63) werden die „Einfahrt in den Travemünder Hafen und Schutzvorkehrungen gegen die Versandung des Seegats (Plate)“ ausführlich behandelt, da die Versandung der Travemünder Bucht langsam aber stetig fortschreite und sich eines Tages eine sehr kostspielige Molenvorverlängerung nicht mehr vermeiden ließe. Den Grundgedanken der Planung zur Gewährleistung einer unbehinderten Schifffahrt von See in die Trave formuliert REHDER hier anschließend folgendermaßen: „Diesen Zeitpunkt möglichst lange hinauszuschieben, oder bis dahin die Uferbildung von beiden Seiten her allmählich so vorzubereiten, daß die neue vorgeschobene, durch Molendämme geschlossene Hafeneinfahrt entweder ganz entbehrlich wird oder, wenn sie wider Erwarten infolge zunehmender Versandung doch erbaut werden muß, alsdann der neue Dammabschluß billig herzustellen ist und ohne besondere Schwierigkeiten den für die Einfahrt dann unentbehrlichen weiten Bassinhafen liefert, das muß die Aufgabe der Gegenwart sein.“ Den Hauptanteil an diesem Plan hat ein bis über Sturmfluthöhe aufragender, rechtwinklig zur Küste liegender Seedamm, der das starke Zutreiben beweglichen Materials vom Brodtener Ufer verhindern soll. Als weitere dringende Maßnahme wird ferner eine Erhöhung des Priwall zur Verhinderung jeglicher Durchbruchgefahr bei Hochwasser empfohlen, wobei eine sehr ausführliche Darstellung der Geschichte der Travemündung und des Priwall zur Erläuterung der Notwendigkeit dieser Maßnahme gebracht wird.

Die Bedeutung dieses Berichtes für den hier zu betrachtenden Problembereich liegt in der Tatsache, daß er den Ausgangs- und Anknüpfungspunkt zahlreicher Veröffentlichungen, mehrerer weiterer Berichte des Wasserbaudirektors sowie einer sich über ein Jahrzehnt hinziehenden Polemik darstellt, da der geplante Seedamm bei seiner Ausführung das Erscheinungsbild und die Strandverhältnisse des Seebades Travemünde wesentlich beeinflusst hätte.

Nach späteren Angaben von FRIEDRICH veranlaßte ihn eine Lücke in den oben entwickelten Planungen REHDERS (63), nämlich die einer Befestigung des Brodtener Ufers, die Abbrucherscheinungen des Steilufers einer eingehenden Untersuchung zu unterziehen. Die Veröffentlichung hierüber unter dem Titel „Das Brodtener Ufer bei Travemünde, sein Rückgang und seine Erhaltung“ (12), bildet 1901 den zweiten Ausgangspunkt für weitere kritische Stellungnahmen und Erörterungen in den folgenden Jahren. Sie ist die erste ausführliche und erschöpfende Behandlung des Brodtener Ufers in seiner geologischen und historischen Entwicklung unter Heranziehung von Urkundenmaterial und Auswertung bisheriger Vermessungen und gipfelt in Uferschutzvorschlägen.

Die wesentlichen Gesichtspunkte seiner Arbeit hat FRIEDRICH in folgenden acht Leitsätzen zusammengefaßt:

1. In dem Zeitabschnitt 1810 bis 1900 ist der mittlere Teil des Brodtener Ufers um 110 bis 120 m zurückgegangen. Das entspricht einem jährlichen Landverlust von 1,2 m.
2. Der Rückgang ist beschleunigt worden durch die Wegnahme der Steine vom Ufer und der davorliegenden Flachsee in den letzten Jahrhunderten.
3. Es ist wünschenswert, daß in bestimmten Pausen die Vermessungen des ganzen Brodtener Ufers fortgesetzt werden.
4. Der Lübeckische Staat ist der einzige deutsche Küstenstaat, der zur Erhaltung seiner abbrechenden Seeufer bisher keine Maßnahmen getroffen hat.
5. Die Erhaltung des Brodtener Ufers kann nur erreicht werden durch den Bau von Bühnen. Der Zweck der Bühnenbauten ist die Schaffung eines möglichst über 40 m breiten Strandes mit einer mehr als 2 m hohen Vordüne.
6. Zur Sicherung des mittleren Uferabschnittes bedarf es außerdem noch eines besonderen Uferschutzes durch Parallelwerke nach dem Beispiel von Wustrow-Ahrenshoop.
7. Das Fortschreiten in der Sicherung des Brodtener Ufers wird eine beträchtliche Verminderung der Versandung in der Fahrinne der Trave zur Folge haben.
8. Daher ist es zweckmäßig, die beiden Fragen:  
Wie schützen wir die Mündung der Trave vor Versandung und wie schützen wir das Brodtener Ufer vor weiterem Abbruch als eine einzige Frage zu betrachten und ihre Lösung gleichzeitig praktisch in Angriff zu nehmen.

Der Kieler Ozeanograph KRÜMMEL (1901) urteilte über diese Arbeit: „Daß der Verfasser für seine Untersuchung die vorhandene Literatur für die übrigen Ostseeküsten sehr vollständig herangezogen hat, gibt seiner Arbeit eine mehr als lokalpolitische Bedeutung.“

Der Seedamm, der sich bereits im Anfangsstadium der Bauvorbereitung befand, forderte noch im selben Jahre (1901) eine weitere, nun verschärfte Stellungnahme von FRIEDRICH (13) heraus, in welcher er sagt, daß durch den Seedamm eine Versandung der Fahrrinne, zumindest vorerst, verhindert würde, doch die Ursache der Versandung keinesfalls beseitigt wäre.

Gegen das Seedamm-Projekt von REHDER (63) wurde 1901 noch in vier weiteren Aufsätzen mit ähnlichen Argumenten polemisiert (13—17).

Im Jahre 1902 war „der erste lübeckische Uferschutzversuch bei Travemünde“ in Form eines uferparallelen Flechtwerkzaunes unternommen worden. Da diese Anlage von einem Hochwasser bei Nordoststurm restlos vernichtet wurde, wird in zwei Aufsätzen (20, 21) die Forderung nach sofortigen energischen Maßnahmen im Uferschutz erhoben, zumal der Staat selbst inzwischen (1902) Anlieger durch Erwerb von drei Uferparzellen unmittelbar nördlich des Seetempels geworden war und seinen Besitz dazu noch unter Aufwendung weiterer Kosten aufforsten ließ (19).

Auf Grund der Veröffentlichungen von FRIEDRICH aus dem Jahre 1901 (12, 13) beauftragte der Senat die Baudeputation, einen Bericht über die Möglichkeit einer Sicherung des Brodtener Ufers einzureichen.

Im Jahre 1903 liegt der von REHDER aufgestellte „Bericht über das Ergebnis der Untersuchungen betr. Abbruch und Befestigung des Brodtener Ufers“ vor (64). Die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse sind folgende:

1. Der Abbruch des Steilufers beträgt im Zeitraum 1877 bis 1901 auf der Uferlänge von 4 km 46 937 qm, was einem jährlichen Landverlust von 1950 qm, einem jährlichen Abbruch von 0,49 m und einem jährlichen Bodenabbruch von 27 736 cbm entspricht.
2. Die Mittelwasser-Strandlinie rückt in demselben Maße vor wie das Steilufer zurückgeht.
3. Der Abbruch des Unterwasserstrandes geht in demselben Maße vor sich wie der Abbruch des Steilufers über Wasser und vollzieht sich bis zu 4 bis 5 m Wassertiefe. Dieser Vorgang wird durch tiefe Einrisse im Tongrund unter Wasser bestätigt.
4. Der stärkste Uferabbruch besteht im mittleren Uferabschnitt an der Stirnseite des Steilufers.
5. Der Unterwasserstrand besteht nur aus Tongrund und weist nur ganz minimale Sandablagerungen auf, die zur Gewinnung eines Sandstrandes nicht die geringste Bedeutung haben.

Auf Grund dieser Untersuchungsergebnisse vertritt REHDER daher in der Uferschutzfrage die Ansicht, daß das Brodtener Ufer infolge der Sandarmut des Unterwasserstrandes nicht durch Buhnen, sondern nur durch ein kostspieliges Deckwerk ausreichend geschützt werden könne, während er in der Frage der Versandungsgefahr der durch die Plate gebaggerten Fahrrinne die Auffassung aus dem Jahre 1873 von DALMANN (62) teilt, daß ein vollständiger Schutz des Brodtener Ufers gegen Abbruch die Versandung der Fahrrinne vorerst nicht einmal mäßigen würde. „Es liegt daher ein technischer Grund für die Deckung des Brodtener Ufers nicht vor.“ REHDER schließt daher seinen Bericht mit folgender Feststellung: „Die Versandungsgefahr der ausgebagerten Fahrwasserrinne auf der Plate liegt ganz allein in dem durch viele Jahrtausende angetriebenen massigen Sandfelde zwischen dem Möwenstein und der mecklenburgischen Küste. Dieses Sandfeld tunlichst unschädlich zu machen, sollte der geplante Seedamm mithelfen.“

Die Bedeutung dieses Berichtes liegt in den Ergebnissen einer erstmaligen Untersuchung des submarinen Grundes vor dem Steilufer, während bei allen bisherigen Untersuchungen am Brodtener Ufer die Verhältnisse unter Wasser wenig berücksichtigt wurden.

Das Problem Seedamm oder Uferschutz am Brodtener Ufer erörtern noch zwei kleinere Veröffentlichungen von unbekanntem Verfassern (22, 24), wobei sich der erstere für Buhnenbauten, der letztere für die Errichtung eines Seedammes einsetzt.

Von grundsätzlicher Bedeutung war wieder eine Veröffentlichung von FRIEDRICH unter dem Titel „Das Brodtener Ufer und der Seedamm“ (25), die auf den obigen Bericht zurückgeht und sich mit dessen Ergebnissen und den gezogenen Folgerungen auseinandersetzt. Nach kritischen Stellungnahmen zu einzelnen Punkten in den REHDERSCHEN Berichten von 1898 und 1903 tritt FRIEDRICH bei Nichtvorliegen eines technischen Grundes zur Deckung des Brodtener

Ufers dennoch für die Erbauung von Buhnen an den Flanken des Steilufers ein. Andererseits mußte er einsehen, daß die Gewinnung eines dauerhaften Strandes vor dem mittleren Teil des Brodtener Ufers ausgeschlossen ist.

Die Ausführungen von REHDER in einer Bürgerschaftsverhandlung (68) enthalten zur Beweisführung gegen die verschiedenen Einwände zahlreiche bedeutende Hinweise und zahlenmäßige Angaben, die nicht in den Bericht von 1903 aufgenommen worden waren. Aus diesem Grunde sei besonders darauf hingewiesen.

Inzwischen trat am Silvestertag 1904 ein Hochwasser auf, wie es seit 1872 nicht mehr geschehen war. Mit diesem Hochwasser und dessen Folgen befaßten sich sechs Veröffentlichungen, von denen diejenigen von FRIEDRICH (27) und SPETHMANN (26) hervorzuheben sind. Bemerkenswert ist ferner, daß sich diesmal fast alle Berichte auch mit der Wirkung auf das Brodtener Ufer, die Travemündung und sogar andere Küstenstriche der inneren Lübecker Bucht beschäftigten.

Nach dem Abschluß der Untersuchungen über den Abbruch des Brodtener Ufers stellte REHDER 1905 einen „Bericht über die Befestigung des Brodtener Ufers“ (65) auf. An erster Stelle nimmt er dabei zur „Nutzlosigkeit des Buhnenbaues vor dem Brodtener Ufer“ nochmals eingehend Stellung. Im weiteren erläutert er die technische Ausführung des Uferdeckwerkes und teilt mit, daß dem Entschluß zur Ausführung des kostspieligen Uferbauwerkes eine Inwertsetzung des Steilufers durch Freigabe zur Villenbebauung folgen müsse, da der Bodenpreis des jährlich abbrechenden Areals mit etwa 500 M in keinem Verhältnis zu den hohen Baukosten steht und das Bauwerk unter dieser Bedingung nicht zu rechtfertigen ist. Schließlich weist er darauf hin, daß der Staat besonderen Wert darauf legen müsse, den Bau auf dem 400 m langen Gneversdorfer Uferabschnitt (Seetempel) bald auszuführen, da er hier selbst Anlieger ist. Doch stellt REHDER abschließend fest, daß das Interesse des Staates an der gesamten Befestigung des Brodtener Ufers von untergeordneter Bedeutung sei, da die Versandung des Fahrwassers auf der Plate hierdurch in absehbarer Zeit nicht gemindert wird, und er macht vor allem auf die Möglichkeit gewisser Wirkungen auf den Zustand des Travemünder Strandes durch das glatte Abströmen der Wassermassen von dem Deckwerk in Richtung Travemünde aufmerksam, was nur durch den geplanten Seedamm verhindert werden kann.

Nach einer fast dreijährigen Pause gab erst das Hochwasser vom 9. Januar 1908 wieder Veranlassung zu Stellungnahmen und Einwendungen, die sich vor allem in einer Veröffentlichung FRIEDRICHS „Zur Erhaltung des Seetempels bei Travemünde“ (29) kundtun. Er stellt dabei nicht wiedergutzumachende Versäumnisse der verantwortlichen Stellen im Bereich des Seetempels fest und verweist wiederholt auf die Berechtigung von Buhnenbauten an den Flanken des Steilufers am Beispiel der Buhne bei Niendorf. Der Schutz des Seetempels, der nur geringe Mittel erfordert, sollte Ehrenpflicht des Lübecker Staates sein.

Von der endgültigen Aufgabe des Seedamm-Projektes gab 1909 eine Mitteilung in den Verhandlungen der Bürgerschaft Kenntnis, in welcher der Senatsantrag ohne Debatte angenommen wurde (69).

Die im Jahre 1909 bevorstehende Inangriffnahme des Deckwerkbaues am Brodtener Ufer vor dem Seetempel in einer Länge von etwa 400 m gab Veranlassung zu einer Welle von anonymen Meinungsäußerungen, die sich in acht Veröffentlichungen kundtun (30—37). Im allgemeinen — mit Ausnahme der Vertreter des Heimat- und Naturschutzes (34) — wird darin die Notwendigkeit eines Uferschutzes anerkannt, doch wenden sich die Verfasser gegen die Art der Ausführung. Teilweise werden Schutzbauwerke anderer Ostseeküsten-Abschnitte zum Vergleich herangezogen, bei denen das Steilufer selbst unangetastet blieb. Im gleichen Jahre fanden dann zwei Bürgerschaftsverhandlungen (70, 71) statt, in denen die Ausführung des Deckwerkprojektes — im Bauabschnitt Seetempel — debattiert wurde. Die erste Verhandlung am 25. Oktober 1909 erfolgt ohne Anwesenheit des zuständigen leitenden Baubeamten, so daß ihr eine feste Linie fehlt. In der zweiten Verhandlung am 29. November 1909 macht Oberbaudirektor REHDER (71) längere Ausführungen zum geplanten Uferdeckwerk und geht auf die in der vorangegangenen Sitzung geäußerten Bedenken ein, die folgende waren:

1. Die Seetiefe würde in kurzer Zeit heranrücken und das Deckwerk zum Einsturz bringen;
2. das Deckwerk sei nicht haltbar, man müsse zunächst Bühnen bauen und könne auch mit diesen auskommen;
3. das Deckwerk brauche nicht mit Klinkern verblendet zu werden, es könne überhaupt billiger gebaut werden;
4. kein Techniker könne die Garantie übernehmen, daß das Deckwerk sich bewähren würde.

Die Nutzlosigkeit des Bühnenbaues wird nochmals mit den gleichen Argumenten wie in den Berichten von 1903 und 1905 betont. In der Frage der Klinkerverblendung wird festgestellt, daß diese für die Haltbarkeit des Bauwerks gegen die Brandung unerlässlich sei. Schließlich wird das Näherrücken der Tiefenlinie an das Steilufer sehr ausführlich erläutert und eine solide Bauweise versichert, „daß man wegen einer Unterspülung des Deckwerkes keine Besorgnisse zu haben braucht“. —

In der anschließenden Debatte wird fast ausschließlich gegen die Ausführung des Deckwerks Stellung genommen, und zwar aus finanziellen Gründen. In namentlicher Abstimmung wird der Antrag nach Beendigung der Debatte mit 57 gegen 38 Stimmen abgelehnt. Auch dieser Verhandlungsbericht sei gleichfalls wie derjenige von 1904 durch die Tatsache besonders hervorgehoben, daß die Ausführungen von REHDER eine Fülle wichtiger Bemerkungen und Zahlenangaben enthalten, die in keinem Bericht zum Ausdruck kommen.

Mit der negativen Entscheidung der Bürgerschaftsversammlung ist vorerst das allgemeine Interesse am Brodtener Ufer erloschen und damit die durch den Bericht REHDERS (63) von 1898 eingeleitete Phase beendet.

Im Jahre 1910 folgte noch eine Veröffentlichung mit einem Vorschlag zum Schutz des Steilufers durch Bepflanzung (38). Dies war der erste eingehende Vorschlag für biologische Maßnahmen.

Kurz vor dem ersten Weltkrieg wurde das Brodtener Ufer nach dem Hochwasser vom 30. Dezember 1913 noch zweimal in einer Veröffentlichung angesprochen (39, 40). Nach diesem Naturereignis mit seinen Folgen für das Steilufer war erneut eine Kommission „mit der Vorprüfung der Frage der Erhaltung des Travemünder Strandes und des Brodtener Ufers“ beauftragt worden, ohne daß nennenswerte Fortschritte erzielt worden sind.

Auch während des ersten Weltkrieges hat die Frage des Uferschutzes nicht völlig geruht, wie die Mitteilung über eine Bürgerschaftssitzung vom 15. Januar 1917 (72) mit dem Antrag auf „Herstellung dreier Strandbühnen am Brodtener Ufer“ beweist. Der Antrag wurde nach kurzer Debatte angenommen, der Bau kam jedoch nicht mehr zur Ausführung.

### Zeitabschnitt 1918 bis 1933

Nach dem ersten Weltkrieg trat ein wesentlicher Wandel in der Art der Veröffentlichungen ein. Während zuvor neben wenigen Vertretern der Wissenschaft, wie FRIEDRICH und SPETHMANN, auch zahlreiche Laien unter dem Mantel der Anonymität das Wort ergriffen — letztere allerdings fast ausschließlich in der Kritik an geplanten Schutzmaßnahmen —, so konzentrierte sich in der nachfolgenden Zeit der Kreis derjenigen, die sich mit dem Brodtener Ufer befaßten, fast nur auf HAASE-LAMPE, OHNESORGE und BENICK, die das Steilufer und die Abbruchvorgänge in heimatkundlichem und wissenschaftlichem Interesse betrachten.

Für die Erkenntnis der Ursachen des Uferrückganges ist eine Veröffentlichung von L. BENICK über „Das Brodtener Ufer im Winter 1925/26“ (45) von grundsätzlicher Bedeutung, zumal gleichzeitig auch neue erweiterte zahlenmäßige Angaben über den Uferrückgang gemacht werden. BENICK versucht hier erstmalig den Ursachen der Zerstörung des Steilufers tiefer nachzugehen und unterscheidet die beiden Kräftegruppen des Meeres und der Atmosphäre, um sie einzeln in ihrer Wirkung auf das Kliff einer Analyse zu unterziehen. Es wird festgestellt, daß sich alle bisherigen Maßnahmen allein gegen die erste Gruppe richteten. Die Betrachtung der zweiten Kräftegruppe gipfelt in der Forderung einer systematischen Dränung des Uferhinterlandes sowie der Anlage eines uferparallelen Waldstreifens.

Einen wesentlichen Beitrag zur Uferschutzfrage stellten von OHNESORGE veröffentlichte

„Neue Vorschläge zum Schutz des Brodtener Steilufers“ (50) dar, die über den bisherigen Rahmen hinausgingen. Es tritt hier erstmalig der Gedanke ausgeprägt in Erscheinung, von der Natur selbst Hinweise für Schutzmaßnahmen zu erhalten. — OHNESORGE macht in drei Punkten Vorschläge für einen Steiluferschutz, der mit geringen Mitteln erstellt werden kann:

1. Es wird eine sorgfältig durchdachte Dränung der Randstrecke des Steilufers gegen die zahlreich austretenden Grundwässer empfohlen.
2. Der günstige Verlauf des Söhrmann-Damm-Versuches vor dem Seetempel soll Veranlassung zu weiteren Schutzbauten nach gleicher Methode an anderen gefährdeten Stellen werden.
3. Als Hauptveranlassung wird ein Vorschlag zu Schutzmaßnahmen vorgetragen, der auf einem Vergleich zwischen dem Brodtener Ufer und dem Steilufer zwischen Rönna und der Stülper Huk an der Westseite der Pötenitzer Wiek beruht. Die Widerstandskraft des letztgenannten Steilufers wird auf seine üppige, oft strauchartige Vegetation zurückgeführt. Daher wird für das Brodtener Ufer eine entsprechende Bepflanzung für die Fläche des Steilabfalles vorgeschlagen. OHNESORGE schließt mit den Worten: „Dränage oben, weitere Steindämme unten, Schutz der Reste des Steinriffs vor jeder Beraubung und Bepflanzung des Abfalles dürften es ermöglichen, dem Steilufer auch ohne kostspielige Bühnen- oder Deckwerkbauten den ihm notwendigen Schutz zu gewähren.“

Über die „Steinfischerei der Travemünder Einwohner“ in ihrer historischen Entwicklung gaben zwei Artikel von W. STIER und R. NEHLSSEN (53, 54) sehr aufschlußreiche und die Angaben von FRIEDRICH (12) ergänzende Auskünfte, welche die ungeheure Entblößung des Steinriffs vor dem Brodtener Ufer eindrucksvoll vor Augen führen.

„Die Absturzbewegungen am Brodtener Ufer im Winter 1931/32“ wurden von HAASE-LAMPE (55) beschrieben, wobei folgende Beobachtungen hervorzuheben sind:

1. eine Änderung in der Teilung des nord-südlichen Wasserabströmens bei Nordoststurm,
2. das Umkippen des Friedrichssteins,
3. die Zerstörung der Borchert-Bühnen und
4. weitere Landverluste vor der Aufforstung beim Seetempel.

#### Zeitabschnitt 1933 bis 1945

Nach dreijähriger Unterbrechung wurde 1936 das Problem des Brodtener Ufers erneut aktuell. — Ein Bilderbericht über „Neue Abstürze am Brodtener Ufer“ von W. HAASE-LAMPE (57) gab über weitere indes am Steilufer eingetretene Veränderungen Auskunft.

Auf Grund einer Besichtigung durch interessierte Stellen im März 1936 entstand eine „Denkschrift der Kreisbauernschaft Lübeck, Fachschaft Landeskultur, über den Abbruch des Brodtener Ufers“ (66), welche in erster Linie vom Standpunkt des mit seiner Scholle verbundenen Bauern ausgeht, der durch den fortlaufenden Verlust wertvollen Kulturlandes eine dauernde Schmälerung seiner Lebensgrundlage erfährt. Hierbei wurde der für die damalige Situation grundsätzliche Gesichtspunkt betont, daß „es letzten Endes nicht zu verantworten sei, auf der einen Seite unter Aufwendung erheblicher Mittel der See Land abzuräumen (Nordsee), um auf der anderen Seite untätig zuzusehen, wie sich die See ein Stück besten Ackerlandes nach dem anderen wieder raubt“.

Als Grundlage für die weitere Planung wurde daraufhin (1936) ein Bericht zum Bauentwurf „Der Schutz des Brodtener Ufers“ von Oberbaurat STUEMUND und Regierungsbaumeister MORSCH angefertigt (67). — Nach einer einleitenden Darstellung des geologischen Aufbaues der Umgebung und der Ergebnisse der bisherigen Vermessungen werden die Ursachen des Uferabbruchs erörtert.

Es wird hier erstmalig der Gedanke ausgesprochen, daß nach einer Sicherung des Steilufers gegen den Angriff der See alle übrigen Wirkungen von selbst in ein natürliches Gleichgewicht kommen. Die neue Planung schließt sich nicht an die früheren Entwürfe an, die zuvor einer eingehenden Würdigung unterzogen werden, sondern beruht auf Beobachtungen, die im Laufe der vorangegangenen Jahre an den kleinen Uferschutzbauten gemacht wurden.

Das Projekt wurde wegen der Vordringlichkeit anderer Arbeitsvorhaben vorerst zurück-



Abb. 1. Brodter Ufer und Priwall bei Travemünde  
(Ausschnitt aus dem Meßtischblatt)

gestellt. Lediglich kleinere Maßnahmen zur Vorbereitung des späteren Bauvorhabens sowie Verbesserungen und Änderungen an den vorhandenen Schutzwerken kamen zur Ausführung.

Zu diesen Arbeiten nahm der Travemünder Bauunternehmer SÖHRMANN, auf dessen Initiative der Findlingsdamm vor dem Seetempel errichtet wurde, in zwei Aufsätzen unter dem Titel „Zu den Brodtener Uferschutzbauten“ (58, 59) Stellung. — SÖHRMANN fordert beidemal eine Verlängerung und Erhöhung der Nordermole, da sie in ihrer jetzigen Ausdehnung die Versandung des Fahrwassers nicht mehr verhindern kann, und empfiehlt weiterhin Verbesserungen an seinem Steinwall. Vor allem aber setzt er sich wiederholt für die Beseitigung der Buhnen am Travemünder Strand ein, weil sie diesen völlig ruinieren. — Beide Veröffentlichungen SÖHRMANNs sind durch ihre darin enthaltenen zahlreichen Einzelbeobachtungen, unter anderem über die Grundwasserverhältnisse am Seetempelwäldchen, über die Beschaffenheit des submarinen Grundes vor dem Steilufer und über den Strand nördlich vom Möwenstein wertvoll.

Anderweitige Forschungen über die Ursachen der Zerstörung von Steilküsten an der Ostsee durch WASMUND und GROSCHOFF ließen „Neue Erkenntnisse über die Ursachen der Zerstörungen am Brodtener Ufer“ zu, die BENICK (60) als letzten Beitrag vor dem zweiten Weltkrieg zu Problemen veröffentlichte, welche das Brodtener Ufer nun schon seit mehr als hundert Jahren aufwarf — wenn der Blick sich noch einmal auf die am Beginn dieses Berichtes erwähnte Veröffentlichung aus dem Jahre 1837 zurückwendet.

BENICK trennt entsprechend den beiden Hauptfaktoren für die Zerstörung des Steilufers, den Meeresfluten und den Sickerwässern, auch die Vorschläge zu deren Abwehr in zwei Gruppen. Zu den Maßnahmen gegen die Sickerwässer gehören Dränungen und Bepflanzungen mit stark wasserbrauchenden Bäumen, während gegen das Meer Buhnen oder Steindämme errichtet werden. Den Erfolg oder Mißerfolg dieser einzelnen Möglichkeiten zum Schutz des Brodtener Ufers stellt BENICK sehr kritisch dar. Anschließend bespricht er die für die Erkenntnis der Ursachen des Steiluferabbruchs neuen Veröffentlichungen von WASMUND (Chemisch-physikalische Daten der Alttertiärtonne um Fehmarn und der innere Küstenerfall) und GROSCHOFF (Physikalische Bedingungen des Kliffrückgangs an der Kieler und Lübecker Bucht), deren Bedeutung in der Untersuchung des Bodens selbst liegt, während bisher nur außerhalb des Bodens liegende Ursachen untersucht wurden. Beide Arbeiten schließen mit einer Betrachtung über die sich aus den neuen Erkenntnissen ergebenden Folgerungen für den Küstenschutz, für den rigorose Maßnahmen vorgeschlagen werden, vor allem eine Abschrägung des gesamten Kliffs bis über den natürlichen Böschungswinkel. BENICK untersucht abschließend die Bedeutung des Vorschlags für das Brodtener Ufer unter Anführung aller bisher hinlänglich bekannten Gegenargumente des Natur- und Heimatschutzes.

Während des letzten Weltkrieges kamen alle eingeleiteten Maßnahmen und Planungen zum Stillstand.

#### Schriftenverzeichnis\*)

##### A. Chronologische Zusammenstellung der Veröffentlichungen

1. — Das Brodtener Ufer. NLB 1837, Nr. 39, S. 311—312.
2. — Das Leuchtenfeld und Brothener Ufer bei Travemünde als die Urheber der Plate im Fahrwasser. NLB 1837, Nr. 43, S. 339—340.

##### \*) Erläuterung der Abkürzungen:

- HB = Heimatblätter, Mitteilungen des Vereins für Heimatschutz Lübeck
- LB = Lübeckische Blätter, Lübeck
- VB = Vaterstädtische Blätter, Lübeck
- LGA = Lübecker General-Anzeiger, Lübeck
- NLB = Neue Lübeckische Blätter, Lübeck
- VLT = Von Lübecks Türmen, Lübeck
- LBV = Lübeckische Blätter, Berichte der Bürgerschaftsverhandlungen

3. — Erwiderung auf den Aufsatz über die Entstehung der Plate bei Travemünde in Nr. 43. NLB 1837, Nr. 46, S. 371—372.
4. SPETZLER, A.: Marginalien zu den verschiedenen Aufsätzen in den Neuen Lübecker Blättern. Plate, Brodtener Ufer, Leuchtenfeld usw. betreffend. NLB 1837, Nr. 47, S. 380—381.
5. — Die Meeresabspülungen und Erdstürze am Brodtener Ufer. LB 1860, Nr. 20, S. 162—163.
6. — Das Brodtener Ufer. LB 1861, Nr. 25, S. 198—199.
7. — Das Brodtener Ufer. LB 1862, Nr. 26, S. 205—206.
8. — Brodtener Ufer. LB 1865, Nr. 42, S. 340.
9. — Der Schutz des Brodtener Ufers. LB 1872, Nr. 95, S. 517.
10. — Bollwerksbau in Travemünde. LB 1898, Nr. 15, S. 177.
11. — Die Versandung der Travemündung. LB 1900, Nr. 36, S. 462—465.
12. FRIEDRICH, P.: Das Brodtener Ufer bei Travemünde. Sein Rückgang und seine Erhaltung. LB 1901, Nr. 4, S. 38—41; Nr. 5, S. 55—58; Nr. 6, S. 66—71; Nr. 7, S. 82—84; Nr. 8, S. 98—104.
13. FRIEDRICH, P.: Das Brodtener Ufer und der projektierte Seedamm bei Travemünde. LB 1901, Nr. 34, S. 416—420.
14. — Der Seedamm am Travemünder Strand. LB 1901, Nr. 34, S. 420—421.
15. DEECKE, W.: Das Brodtener Ufer und der projektierte Seedamm bei Travemünde. LB 1901, Nr. 36, S. 443—444.
16. — Zur Befestigung des Brodtener Ufers. LB 1901, Nr. 40, S. 493.
17. — Zur Befestigung des Brodtener Ufers. LB 1901, Nr. 43, S. 530—531.
18. — Brodtener Ufer. LB 1901, Nr. 46, S. 588—589.
19. — Die Anpflanzung eines Gehölzes am Brodtener Ufer bei Travemünde. VB 1902, Sp. 26—30.
20. — Das hohe Brodtener Ufer bei Travemünde. VB 1903, Sp. 138—140.
21. — Der erste Lübeckische Uferschutzversuch bei Travemünde. LB 1903, Nr. 18, S. 233—234.
22. — Seedamm und Bühnenbauten bei Travemünde. LB 1903, Nr. 41, S. 523—524.
23. — Die Sicherung des Brodtener Ufers. LB 1903, Nr. 52, S. 713—717.
24. — Brodtener Ufer und Seedamm. VB 1904, S. 5—6.
25. FRIEDRICH, P.: Das Brodtener Ufer und der Seedamm. LB 1904, Nr. 1, S. 4—7; Nr. 2, S. 19—26; Nr. 3, S. 34—39.
26. SPETHMANN, H.: Das Brodtener Ufer und der Niendorfer Strand nach der Sturmflut. VB 1905, S. 12—13.
27. FRIEDRICH, P.: Die Sylvestersturmflut und das Brodtener Ufer. LB 1905, Nr. 3, S. 26—29.
28. SPETHMANN, H.: Neue Abstürze am Brodtener Ufer. VB 1905, S. 61—62.
29. FRIEDRICH, P.: Zur Erhaltung des Seetempels bei Travemünde. LB 1908, Nr. 24, S. 356—357.
30. — Das Brodtener Ufer. VB 1909, S. 129—130.
31. — Der Schutz des Brodtener Steilufers. LB 1909, Nr. 34, S. 485—486.
32. — Deckwerk des Brodtener Ufers. LB 1909, Nr. 34, S. 486—487.
33. — Die Erhaltung des Brodtener Ufers vom Standpunkte des Heimatschutzes. LB 1909, Nr. 36, S. 512—514.
34. — Das Brodtener Ufer und das Deckwerk. LB 1909, Nr. 36, S. 514—515.
35. — Vom Werte des Brodtener Ufers. LB 1909, Nr. 38, S. 549—550.
36. — Der Schutz des Brodtener Ufers. LB 1909, Nr. 42, S. 609.
37. — Nochmals Brodtener Uferschutz. LB 1909, Nr. 43, S. 629—630.
38. — Brodtener Ufer. LB 1910, Nr. 36, S. 523—524.
39. J.: Das Brodtener Ufer bei Travemünde. VB 1913/14, S. 131—132.
40. KOBLINSKY, M.: Das gefährdete Brodtener Ufer. VLT 1914, Nr. 23, S. 179—183.
41. HAASE-LAMPE, W.: Die letzten Abstürze am Brodtener Ufer. VLT 1920, Nr. 8, S. 32.
42. HAASE-LAMPE, W.: Das Brodtener Ufer und seine Bewegungen. HB 1924, Nr. 2, S. 5—7; Nr. 4, S. 13—15.
43. HAASE-LAMPE, W.: Die Absturzbewegung am Brodtener Ufer. HB 1926, Nr. 20, S. 77.
44. HAASE-LAMPE, W.: Schutz der Baumgruppen am Seetempel des Brodtener Ufers. HB 1926, Nr. 21, S. 84.
45. BENICK, L.: Das Brodtener Ufer im Winter 1925/26. HB 1926, Nr. 22, S. 85—86.
46. HAASE-LAMPE, W.: Die Landabstürze am Brodtener Ufer. HB 1927, Nr. 34, S. 144.
47. — Die Schutzbauten am Brodtener Ufer. VLT 1927, Nr. 28, S. 115—116.
48. HAASE-LAMPE, W.: Schutzversuche am Brodtener Ufer. HB 1928, Nr. 43, S. 179.
49. HAASE-LAMPE, W.: Am Brodtener Ufer, Februar 1928. HB 1928, Nr. 45, S. 188.

50. OHNESORGE, W.: Neue Vorschläge zum Schutz des Brodtener Steilufers. HB 1929, Nr. 63, S. 257 bis 258.
51. OHNESORGE, W.: Neues vom Brodtener Ufer. HB 1929, Nr. 65, S. 265—266; Nr. 66, S. 271—272.
52. HAASE-LAMPE, W.: Der Landniederbruch am Brodtener Ufer. HB 1931, Nr. 81, S. 329—330.
53. STIER, W.: Steinfischerei der Travemünder Einwohner. VB 1932, S. 41—42.
54. NEHLSSEN, R.: Steinfischerei der Travemünder Einwohner. VB 1932, S. 48—49.
55. HAASE-LAMPE, W.: Die Absturzbewegungen am Brodtener Ufer im Winter 1931/32. HB 1932, Nr. 96, S. 389.
56. HAASE-LAMPE, G.: Die Redewischer Höhe, eine Betrachtung der Absturzbewegungen an den Steilküsten der Lübecker Bucht. HB 1932, Nr. 104, S. 421—423.
57. HAASE-LAMPE, W.: Neue Abstürze am Brodtener Ufer. HB 1936, Nr. 134, S. 543.
58. SÖHRMANN, F.: Zu den Brodtener Uferschutzbauten. LGA 1936, Nr. 112, vom 13. Mai.
59. SÖHRMANN, F.: Zu den Brodtener Uferschutzbauten. LGA 1938, Nr. 300, vom 23. Dez.
60. BENICK, L.: Neue Erkenntnisse über die Ursachen der Zerstörungen am Brodtener Ufer. HB 1938, Nr. 155, S. 639—641.

#### B. Chronologische Zusammenstellung der Berichte und Gutachten

61. KRIEG: Bericht betr. die Überschwemmung am 12. u. 13. Nov. 1872. Verhandlg. d. Naut. Vereins in Lübeck, 1872, S. 34.
62. DALMANN, J.: Gutachtliche Äußerung über den Schutz des Brodtener Ufers an die Baudeputation Lübeck. Hamburg, Dez. 1873.
63. REHDER, P.: Bericht über die Vertiefung der Trave auf 7,5 m Wassertiefe an die Baudeputation Lübeck. Lübeck, 28. Dez. 1898.
64. REHDER, P.: Bericht über das Ergebnis der Untersuchungen betr. Abbruch und Befestigung des Brodtener Ufers an die Baudeputation Lübeck. Lübeck, 17. Juli 1903.
65. REHDER, P.: Bericht betr. Befestigung des Brodtener Ufers an die Baudeputation Lübeck. Lübeck, 10. März 1905.
66. BARTZSCH/MAACK: Denkschrift der Kreisbauernschaft Lübeck, Fachschaft für Landeskultur, über den Abbruch des Brodtener Ufers. Lübeck, 28. April 1936.
67. STUEMUND/MOTSCH: Bericht zum Bauentwurf. Der Schutz des Brodtener Ufers an die Bauverwaltung Lübeck. Lübeck, Juni 1936.

#### C. Chronologische Zusammenstellung der Bürgerschaftsverhandlungen

68. Besprechung der Vorlage betr. Seedamm in Travemünde. Bürgerschaftsverhandlung am 22. Febr. 1904. LB-Verhandlungsberichte 1904, S. 31—46.
69. Abstandnahme von der Errichtung eines Seedammes in Travemünde. Bürgerschaftsverhandlung am 22. Febr. 1909. LB-Verhandlungsberichte 1909, S. 130.
70. Herstellung eines Deckwerks zum Schutze des Brodtener Ufers. Bürgerschaftsverhandlung am 25. Okt. 1909. LB-Verhandlungsberichte 1909, S. 634—649.
71. Herstellung eines Deckwerks zum Schutze des Brodtener Ufers. Bürgerschaftsverhandlung am 29. Nov. 1909. LB-Verhandlungsberichte 1909, S. 688—710.
72. Herstellung dreier Strandbuhnen am Brodtener Ufer. Bürgerschaftsverhandlung am 15. Jan. 1917. LB-Verhandlungsberichte 1917, S. 10—12.

## Die Entstehung der Lübecker Bucht und des Brodtener Ufers

Von Karl Gripp

Die Ostsee-Küste ist Kampfgebiet. Ziel des Kampfes ist es, dem ständig in Bewegung befindlichen Meere eine möglichst ausgeglichene Grenzfläche gegen das Land zu verschaffen, eine Fläche, an der Bewegung und Widerstand sich im Gleichgewicht befinden. Man sollte annehmen, das Gleichgewicht wäre bei den lockeren Absätzen, die das norddeutsche Flachland aufbauen, schon längst erreicht.

Schon vor 130 000 Jahren gab es eine Ostsee, die der letzten Zwischeneiszeit, auch Eemzeit genannt. Deren Drift-Ströme und Wellen suchten schon ebenso eine Ausgleichsküste zu erreichen, wie sie die gleichen Kräfte in der heutigen Ostsee erstreben. Aber der heutige Kampf um jene Gleichgewichtsfläche ist nicht die Fortsetzung desjenigen vor 130 000 Jahren.

Zwischen beiden liegen zwei wichtige Ereignisse:

1. die letzte Vereisung Nord-Europas und damit des Ostsee-Gebietes,
2. das Absinken des Meeresspiegels tiefer als der Boden von Ostsee und Nordsee.

Beide Ereignisse stehen im Zusammenhang. Je größer die Eiskappen an den Polen während der Eiszeit anwuchsen, um so mehr Wasser wurde dem Kreislauf des Wassers entzogen, um so weniger Wasser war im Weltmeer. Nach heutigem Wissen lag der Meeresspiegel während der Vereisung um 70 bis 80 m tiefer als heute. Das Becken der eemzeitlichen Ostsee lag also trocken, als das Inlandeis darin und darüber vordrang.

Das Inlandeis drang weit über den Ostsee-Trog hinaus bis Ahrensburg unweit von Hamburg. Es zerstörte die alte Küste und hinterließ neuen Schutt. Hier interessieren jedoch nur die Ereignisse aus der Zeit des Abschmelzens des Eises.

Mehrere Vorstöße des Eises während dieser Zeit des allmählichen Rückzugs ließen um das Lübecker Becken an drei Seiten ansehnliche Endmoränenzüge, kurz als M-Moränen bezeichnet, entstehen. Von den Höhen zwischen Lübeck und Segeberg (Reinsbek und Niendorf) oder Lübeck und Sandesneben (Christianshöhe) blickt man in das 40 bis 60 m tiefer gelegene Zungenbecken hinein. Das Eis zog sich anschließend nach Nordosten zurück, unbekannt, wie weit. Dann stieß es abermals vor, bis zur Linie Lensahn—Neustadt—Pansdorf; es drang anscheinend zunächst in das ältere Lübecker Zungenbecken vor, endete aber später an der Linie Pansdorf—Ruppersdorf—Hohe Lieth—Kreuzkamp—Ovendorf—Warmsdorf—Gneversdorf—Eversdorf—Seetempel. Der Trog des Hemmeldorfer Sees dürfte das Teilzungenbecken für dieses Stadium sein. Vermutlich ist auch das Gebiet der Travemündung mit Pötenitzer Wiek und Dassower See zur gleichen Zeit von einer randlichen Sonder-Eiszunge eingenommen worden. Diese scheint bis zur Linie Pöppendorf—Stülper Huk—nördlich Teschow und weiter bis Wieschendorf gereicht zu haben. Leider ist ein wichtiger Teil dieses Gebietes näherer Untersuchung zur Zeit nicht zugänglich.

Diese beiden Eiszungen, die Hemmeldorfer und die Pötenitzer, waren Teile jener großen Eiszunge, die den Trog der Lübecker Bucht in gleicher Weise formte, wie es etwas früher durch eine ältere Eiszunge mit dem Lübecker Becken geschehen war.

Die Tatsache, daß das letzte Inlandeis des Gebietes zunächst weiter nach Westen bis in das Lübecker Becken reichte, dann aber nur kleinere Eiszungen beiderseits von Brodten Sonderbecken erfüllten, erklärt möglicherweise die Einlagerung von Schluff und Mehlsand (Beckenabsätze) inmitten der Schichtenfolge im Brodtener Kliff. Denn in verlassenen Zungenbecken sammelten sich die Schmelzwässer zu Seen. In ihnen setzte sich die Gletschertrübe als Schluff und Feinsand ab. Daher ist der Boden sowohl des Alten-Kremper wie des Lübecker Beckens von solchen Beckenabsätzen bedeckt.

Schließlich schwand auch die letzte Eiszunge aus unserem Gebiet. Von den Höhen von Scharbeutz oder der damaligen Höhe über dem Steinriff von Brodten bot sich ein ähnlicher Blick wie heute von Reinsbek oder Christianshöhe in das nicht ertrunkene ältere Lübecker

Becken. Das heißt, die Lübecker Bucht, Hemmelsdorfer See und das Pötenitzer—Dassower Becken, ja die ganze westliche Ostsee lagen trocken. Zwischen der Senke von Hemmelsdorf und der von Pötenitz lag ein Rücken, der 6 km weiter nach Norden vorsprang als heute.

Anfangs lagen die vom Eise frisch hinterlassenen Schuttmassen nackt da. Zunehmend kehrte Pflanzenwuchs wieder. Um 7500 bis 6500 v. Chr., als Kiefernwälder unser Gebiet bedeckten, war der Meeresspiegel inzwischen allmählich bis auf — 25 m NN angestiegen.

Damit begann die erste schmale Überflutung der tiefsten Teile der westlichen Ostsee. Als der Wasserspiegel um weitere 7 m angestiegen war, drang Seewasser über die Darsser Schwelle in den östlich davon gelegenen großen baltischen Süßwasser-See (*Ancylus*-See) ein. Dadurch wurde die gesamte heutige Ostsee wieder Meer, das sogenannte Litorina-Meer.

Ein Meer im Flachland ist als Folge seines Grundwasserstaus von Mooren umgeben. In ihnen bleiben die Pollenkörner gut erhalten, sie dienen daher zur Rekonstruktion der jeweiligen Pflanzenwelt, und aus dieser kann man relatives und teilweise absolutes Alter bestimmen.

Die Altersbestimmung über die verschiedenen Ereignisse bei der Wiederkehr der Ostsee sind für unser Gebiet nur einmal durch TAPFER untersucht worden. Dänische Forscher wiesen auf gewisse Unsicherheiten einiger Datierungen dieser Arbeit hin\*).

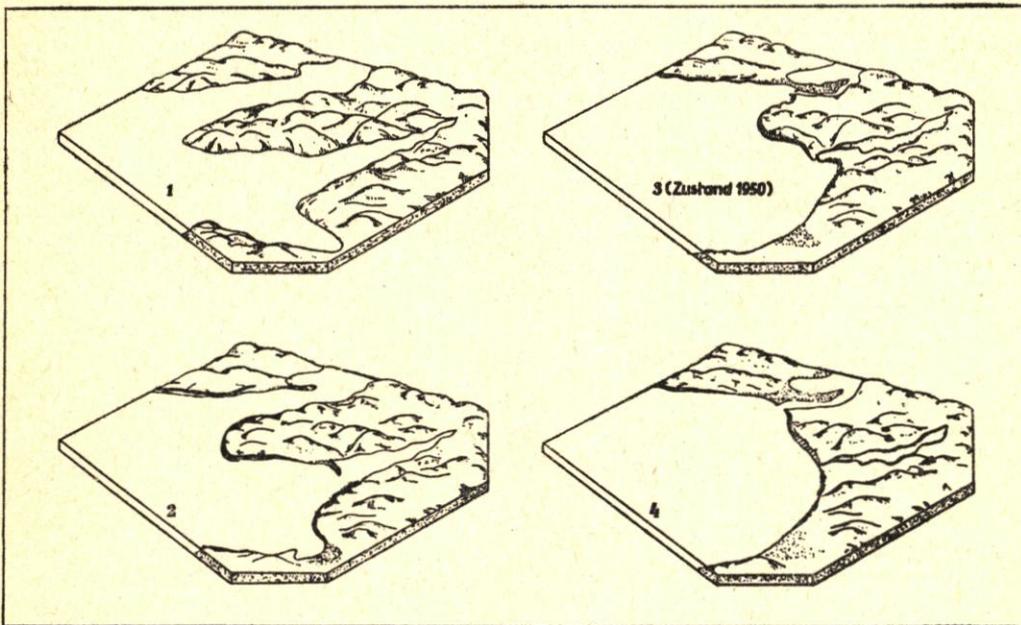


Abb. 1. Schema der Entwicklung der Küste in der Travemünder und Neustädter Bucht

1. Trave-Mündung und Hemmelsdorfer See noch offene Buchten; dazwischen Brodtener Nase weit vorspringend.
2. Brodtener Nase und Scharbeutzer Vorsprung vom Meere teilweise abgetragen; vor Travemünde und dem Hemmelsdorfer See Nehrungen im Aufbau.
3. Priwall und Niendorf-Timmendorfer Strandwall sperren Trave und Hemmelsdorfer See bis auf einen engen Durchlauf vom Meere ab. Brodtener Nase erheblich zurückverlagert.
4. Künftige Entwicklung: Abtragung, besonders des Brodtener Ufers und Ausbau der Nehrungen und Strandwälle, bis eine ausgeglichene Bogen-Küste erreicht sein wird.

In Anlehnung an D. W. JOHNSON: Shore processes and shoreline development, New York, 1919; gezeichnet von v. Wjatkin.

\*) Siehe den Beitrag von H. SCHMITZ, S. 42.

Um die Geschwindigkeit des Wasseranstiegs, vor allem aber den Zeitpunkt des Erreichens des heutigen Meeresspiegels und damit die Dauer der Zerstörung des Brodtener Ufers in heutiger Höhenlage und die der Aufhäufung des Priwalls kennenzulernen, war eine erneute sorgfältige Bestimmung der Zeiten auf pollenanalytischer Grundlage erforderlich.

Den Geologen beschäftigt die Frage: Wie verhielt sich die neue Ostsee zu den Geländeformen, die das Inlandeis hinterlassen hatte?

Es ist als sicher anzunehmen, daß ein langer Geländesporn vor Brodten, ein kürzerer vor Scharbeutz und ein weiterer vor dem heutigen Sierksdorfer Kliff in die See hinausgereicht haben. Außerdem dürften noch manche Kuppen vorhanden gewesen sein, die früher oder später der Abtragung durch das Meer anheimgefallen sind (Abb. 1).

Die drei genannten Sporne sind von der See weitgehend abgetragen und in Kliffs verwandelt worden. Das mittlere, das Scharbeutzer Kliff, liegt nicht mehr im Abbruch; es ist tot, und zwar anscheinend auf natürlichem Wege, ohne menschliche Hilfe, stillgelegt. Das Material, das vom Meere den Kliffs entnommen wurde, liegt in seinen gröberen Kornanteilen als Nehrung vor den Niederungen zwischen den Spornen, und zwar:

der Priwall vor der Pötenitzer Niederung,  
der Niendorf—Timmendorfer Strandwall vor dem Hemmelsdorfer Becken,  
der Haffkruger Strandwall vor dem Becken mit den Haffwiesen.

Aus diesen eindeutigen Hinweisen auf einen beträchtlichen Umfang des Küstenausgleichs ergeben sich als für die wasserbaulichen Aufgaben wichtige Fragen:

1. In welcher Richtung erfolgt der Abtransport des in den Kliffs losgerissenen Gesteinsmaterials?
2. Kommt das in den Strandwällen zusammengetragene Material nur aus den Kliffs oder auch vom Meeresboden selber?
3. Lassen sich Angaben über den Lieferungsbereich der einzelnen Kliffs machen?

Zur Antwort auf diese Fragen sind besondere Untersuchungen mit teilweise neuen Methoden durchgeführt worden, wie aus den betreffenden Beiträgen dieses Heftes zu sehen ist.

## Der Aufbau und die geologische Entwicklung des Brodtener Ufers und der angrenzenden Niederungen

Von Gerhard Seifert

**Einführung.** Die im Jahre 1949 erneut in Angriff genommene Untersuchung der Probleme des Brodtener Ufers ließ es zweckmäßig erscheinen, auch vom geologischen Standpunkt aus eine Sammlung bisheriger Forschungsergebnisse durchzuführen. Diese geologische Bestandsaufnahme sollte die erdgeschichtlichen Entwicklungstendenzen des Brodtener Ufers aufzeigen, aus denen das heutige Bild verständlich wird und die natürliche Weiterentwicklung in großen Zügen abzulesen ist. Darüber hinaus sollte ein geologisches Untersuchungsprogramm vorgeschlagen werden, durch das die bisherigen Erkenntnisse erweitert und vertieft werden konnten.

Infolge der Kürze der zur Verfügung stehenden Zeit (2 Monate) konnten Schrifttum und Bohrungen nicht erschöpfend gesammelt werden. Namentlich größere Gruppen von Bohrungen in der Pötenitzer Wiek und im Dassower See wurden erst längere Zeit nach Abschluß des Berichtes aufgefunden. Diese Bohrungen sowie die im Jahre 1950 von der Untersuchungsstelle selbst durchgeführten Bohrungen und Greiferproben sind in dem vorliegenden Kurzbericht mitverwertet. Die Zahl der im engeren Untersuchungsgebiet bearbeiteten Bohrungen erhöht sich damit auf rund 960. Vorliegender Bericht stützt sich im wesentlichen auf eine Auswertung dieser Bohrungen. Aus Raumgründen mußte eine Diskussion älterer Auffassungen unterbleiben. Der spezielle Aufbau des Brodtener Ufers selbst wird an anderer Stelle (vgl. Bericht A. Dücker) ausführlich besprochen.

**Die diluviale Entwicklung.** Der Geschiebemergel des engeren Untersuchungsgebietes schließt außergewöhnlich viele Absätze diluvialer Becken (Feinsande, Schluffe, Tone) ein. Diese Sedimente wurden häufig in Bohrungen (vom Stülper Huk bis Travemünde, unter dem Priwall und auf dem Steinriff) angetroffen, treten aber auch am Dummerdorfer Ufer, auf der Insel Buchhorst im Dassower See, bei Pötenitz und am Brodtener Ufer selbst zutage. Der Hauptteil dieser Absätze dürfte zu einer Zeit in die Grundmoräne geraten sein, als das Eis nach einem größeren Rückzug wieder in den Lübecker Stausee vorstieß.

Dieser Vorstoß schuf unter anderem die Höhenzüge, die in der Linie Pansdorf—Ratekau—Kreuzkamp—Ovendorf—Ivendorf—Teschow—Wieschendorf verlaufen. Auf dem Scheitel dieser Höhen verläuft die Grenze zu den Kies- und Sandgebieten im Westen und Süden. Nördlich dieser Grenze nimmt der Geschiebemergel den Hauptteil der Oberfläche ein. Eine Gruppe von 144 Bohrungen hat ergeben, daß der Dassower See keine Unterbrechung des Endmoränenzuges, sondern eine Fortsetzung der im Teschower Gebiet angedeuteten Verflachung der Höhenrücken darstellt. Die Verbindung liefern Aufragungen des diluvialen Untergrundes, über denen die das Seebecken ausfüllende marine Gytta weniger mächtig ist (s. Abb. 1). Diese Aufragungen sind vielleicht mit den Inseln in Verbindung zu bringen, die noch im Mittelalter im Dassower See vorhanden waren und inzwischen dem Meere zum Opfer fielen.

Der Rückzug des Eises aus dem Untersuchungsgebiet geschah allmählich unter dem Wechsel von Abschmelzen und erneuten Vorstößen. Das Becken des lebenden Eises dürfte sich von Ost nach West bis zum Restzungenbecken des Hemmelsdorfer Sees verengt haben. Durch schwache Vorstöße entstanden sogenannte *Toteisstauchmoränen*. Es sind dies der durch die 10- bzw. 15-m-Isohypse erkennbare Höhenzug von Volksdorf—Pötenitz—Rosenhagen und der durch die 20-m-Isohypse charakterisierte Höhenzug von Gneversdorf—Seetempel.

Als Hauptentwässerungskanal für die glacialen Schmelzwässer diente das Tal der Trave; ein weiterer Abfluß mag durch den Hemmelsdorfer See erfolgt sein.

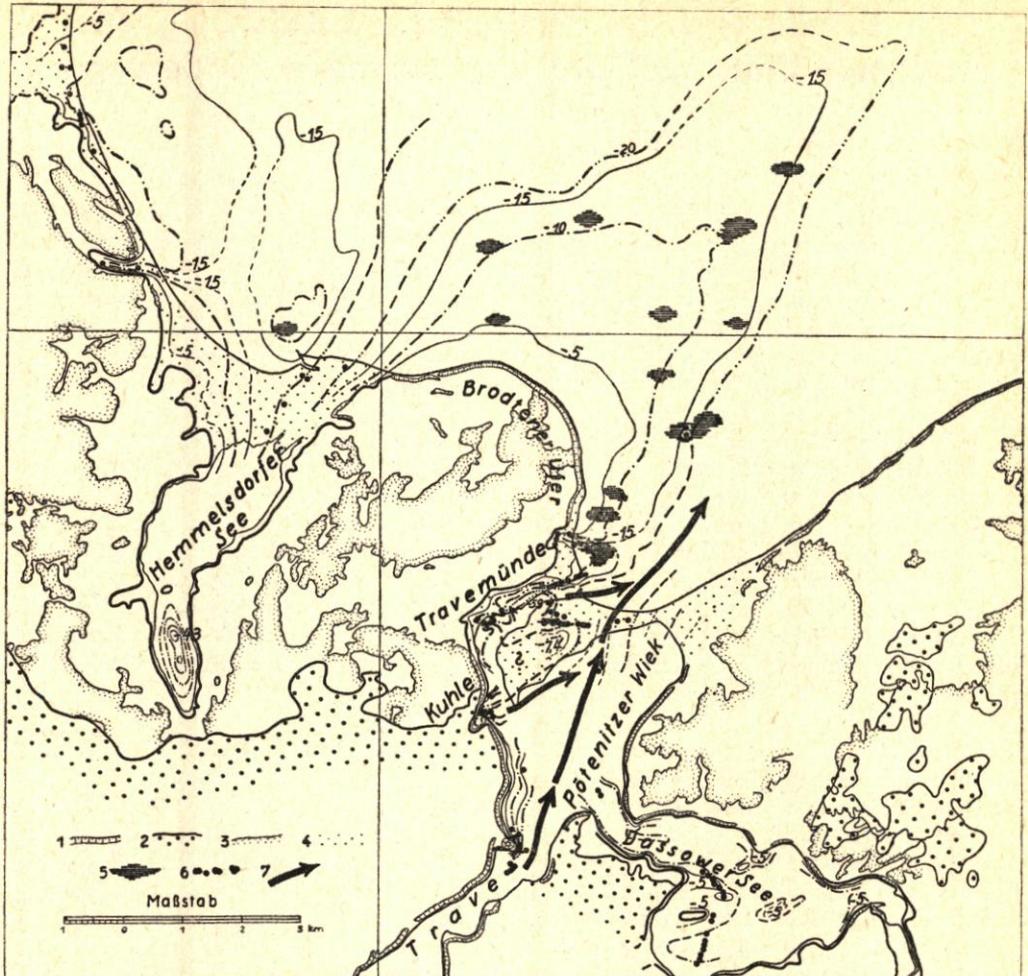


Abb. 1. Übersicht zur Geologie des Brodter Ufers

1. Steilufer.
2. Grenze der Kies- und Sandgebiete.
3. Toteisstauchmoränen.
4. Strandwallebenen.
5. Anzeichen ehemaliger Landoberflächen im Gebiet der submarinen Abrasionsflächen (Torfe, Wurzelreste, gelber Geschiebemergel).
6. Bohrungen und Greiferproben, die Torfe oder limnische Sedimente antrafen.
7. Verlauf postglacialer Rinnen

Die Tiefenlinien beziehen sich auf die Tiefenlage der Oberkante des Diluviums unter NN

Das postglaciale Landschaftsbild. Zahlreiche Bohrungen im Gebiet der alluvialen Anschwemmungen erlauben eine Rekonstruktion der unter diesen Ablagerungen vorhandenen diluvialen Morphologie (s. Abb. 1). Im Gebiet der submarinen Abrasionsflächen gaben Greiferproben Hinweise auf den Verlauf der Tiefenlinien. Die heutigen Wassertiefen wurden übernommen, falls die Greiferproben anstehendes Diluvium oder Restsedimente ergaben.

Der Verlauf jener Tiefenlinien ist von Wichtigkeit:

1. für die Beurteilung der Entwicklungsgeschichte des Gebietes. Die pollenanalytischen Untersuchungen (vgl. Bericht H. Schmitz) haben ergeben, daß die Tiefenlage eines Transgressionskontaktes nicht mit dem Stand des Meeresspiegels in der betreffenden Zeit gleichbedeutend zu

sein braucht. Es ist daher von größter Wichtigkeit, die näheren geologischen Verhältnisse, insbesondere die Morphologie in der Umgebung des jeweiligen Kontaktes, zu kennen,

2. für eine Beurteilung der Ausdehnung ehemaliger Landrücken, heutiger Abrasionsflächen vor den Kliffs,
3. für die Abschätzung des Umfangs der jungen Meeresanschwemmungen.

Bestimmend für die postglaciale Morphologie im engeren Untersuchungsgebiet waren die Höhenrücken der Toteisstauchmoränen. Vor dem Pötenitzer Höhenrücken zieht sich die Senke mit dem Deipsee hin. Östlich des Gneversdorfer Rückens liegt die Travemünder Niederung mit der in diesem Gebiet größten Mächtigkeit des Alluviums von nahezu 60 m in der Nordwestecke des Priwalls. Südöstlich dieser größten Tiefe steigt die Oberkante des Diluviums rasch bis auf  $-7,40$  m NN an. Unter dem südöstlichen Priwall liegt somit eine diluviale Höhe verschüttet, die durch mehrere Bohrungen belegt ist. Überraschenderweise biegen sowohl südlich der Siechenbucht als auch nördlich der sogenannten „Kuhle“ die Tiefenlinien bis hinauf zur  $-5$ -m-Linie deutlich in Richtung auf diese Priwallhöhe um. Ein Zusammenhang dieser Anhöhe mit dem Gebiet zwischen Siechenbucht und „Kuhle“ ist daher wahrscheinlich.

Für einen Zusammenhang sprechen folgende Tatsachen:

1. Die Richtung des sich aus dieser Konstruktion ergebenden Höhenrückens entspricht derjenigen der beiden Toteisstauchmoränen.
2. Auch diesem Höhenrücken ist eine Rinne vorgelagert, wie sich aus der heutigen Morphologie und den Bohrungen in der „Kuhle“ ergibt.
3. Falls der Höhenrücken existiert hat, muß die postglaciale Trave östlich an ihm vorbeigeflossen sein. Tatsächlich fällt die diluviale Oberkante etwa halbwegs zwischen Südermole und Mecklenburger Grenze auf wahrscheinlich mehr als 25 m ab. Westlich des Priwall finden sich dagegen keine Anzeichen für einen frühen Travelauf. Vielmehr ergeben die Bohrungen hier eindeutig eine Fortsetzung der auf dem Meßtischblatt sichtbaren Rinnen bis unter die alluvialen Anschwemmungen. Südlich der „Kuhle“ ist wiederum ein Ausbiegen der Tiefenlinien in die Nordostrichtung zu beobachten, und erst am Stülper Huk finden sich die ersten Anzeichen einer Trave-Erosion.

Für das Landschaftsbild der frühen Nacheiszeit ergibt sich folgendes: Im Gebiet von Travemünde lag ein tieferer See, dessen Ufer teilweise verlandete. Belegt wird diese Verlandung durch einen bei der Priwallfähre auf der Travemünder Seite in 35 m Tiefe angebroffenen Torf. Damit wird ein früher Stand des Seespiegels in etwa  $-35$  m NN bewiesen. Die Bohrungen auf dem Priwall trafen in diesen Tiefen nur limnische Sedimente an. Zufluß erhielt dieser See durch den westlich vom heutigen Dorf Rönnau entspringenden Bach. Ein Abfluß in die Trave in späterer Zeit ist wahrscheinlich. Die Trave selbst durchquerte die Pötenitzer Wiek in nordnordöstlicher Richtung. Sie erhielt möglicherweise weiteren Zufluß durch die Stepenitz sowie durch kleinere Rinnen, die von der „Kuhle“ und von der Villa Possehl her zur Trave ziehen. Auch im Gebiet der Villa Possehl dürfte sich, wie die neueren Bohrungen zeigten, ein kleinerer See befunden haben, der schnell verlandete.

Im Gebiet der Hemmelsdorfer Niederung liegen nur wenige Bohrungen vor. Die Verhältnisse sind hier also noch nicht sicher zu beurteilen. Dort, wo der See heute Tiefen von 20 und mehr Metern aufweist, wird auch damals schon ein See vorhanden gewesen sein. Eine Verbindung zu der unter Niendorf nachgewiesenen, über 20 m tiefen Rinne ist jedoch noch nicht belegt.

Zwischen den Niederungen der Pötenitzer Wiek und des Hemmelsdorfer Sees schob sich ein Höhenrücken weit bis in die Lübecker Bucht vor. Um die Ausdehnung und Höhe dieses Rückens zu ermitteln, war vorgeschlagen worden, die Abrasionsfläche vor dem Brodtener Ufer auf die Beschaffenheit des Geschiebemergels hin zu untersuchen.

Ein längere Zeit der Verwitterung ausgesetzter Geschiebemergel zeigt von oben nach unten folgendes Profil:

- Geschiebelehm (entkalkter Geschiebemergel),
- gelber Geschiebemergel,
- grauer Geschiebemergel.

Der Geschiebelehm reicht durchschnittlich bis zu 1,5, gelber Geschiebemergel bis zu 5 bis 6 m Tiefe.

Durch ein enges Netz von Greiferproben sollte auf der Abrasionsfläche die Grenze gelber/graue Geschiebemergel kartiert werden. Leider konnten diese Untersuchungen nicht in vollem Umfang durchgeführt werden; die ausgeführten Greiferproben und Bohrungen gestatten jedoch, einige Vermutungen auszusprechen.

Der Bereich der Hauptabrazionszone oberhalb der 5-m-Tiefenlinie ist durch ältere Bohrungen gut bekannt. Unverwittertes Diluvium bildet hier den Hauptanteil der Abrasionsfläche. Restsedimente treten zurück. In 5 bis 10 m Tiefe werden Restsedimente am Meeresboden verbreitet angetroffen. Auch hier fehlt noch im allgemeinen der gelbe Geschiebemergel. Lediglich an der Traveflanke tritt er häufig auf. Der Bereich von 10 bis 20 m Tiefe ist nur sehr lückenhaft untersucht, doch treten bloßliegender Geschiebemergel und Beckenabsätze bis zu Wassertiefen von 20 m auf. Der Anteil des gelben Geschiebemergels scheint hier größer zu sein. Wiederum an der Traveflanke treten deutliche Zeichen der ehemaligen Landoberfläche, wie Wurzelreste und Torfe, in Erscheinung. Zusammenfassend kann gesagt werden, daß oberhalb der heutigen 5-m-Tiefenlinie wahrscheinlich 10 bis 15 m, oberhalb der heutigen 10-m-Tiefenlinie mehr als 6 m und in der heutigen Tiefe von 10 bis 20 m bis maximal 6 m Sediment vom Meere abgetragen wurden. Lediglich an der Traveflanke war die Abtragung geringer.

**Die Transgression.** Als erstes Zeichen des heranrückenden Meeres machte sich im gesamten Gebiet ein Anstieg des Grundwasserspiegels bemerkbar. Die Trave staute sich im Gebiet des Priwall zu einem See auf, der mit dem früheren Travemünder See in Verbindung trat. Es kam zu einer kurzfristigen Verlandung, wie die in verschiedenen Bohrungen angetroffenen unteren Torfe bezeugen. Der Grundwasserstau schritt jedoch weiter fort, so daß die Sedimentationsfolge im Seebecken mit Kalkmudde wieder rückläufig wurde. Die Umgrenzung des Gewässers dürfte bei Einbruch des Salzwassers mit der 20-m-Tiefenlinie übereingestimmt haben. In der Siechenbucht wurden unterhalb dieser Linie torfige Absätze angetroffen, ebenso in der „Kuhle“. Diese Rinnen werden die letzten Ausläufer des Sees gewesen sein. Zwei neuere Bohrungen auf dem Priwall haben über der Kalkmudde eine weitere dünne Torfschicht angetroffen, die am Transgressionskontakt Zeichen einer Abrasion zeigte. Es ist möglich, daß diese Torfschicht in den älteren Bohrungen überbohrt wurde. Sie kann jedoch auch an vielen Stellen vollkommen vom späteren Meere aufgearbeitet sein.

Im Gebiet unter Niendorf entstand zu gleicher Zeit wie der Priwallsee durch den Grundwasseranstieg ein Seebecken, welches schnell verlandete. Der Bruchwaldtorf zeigte Anzeichen schnell zunehmender Vernässungserscheinungen, so daß sich auch hier ein weiterer Grundwasseranstieg bemerkbar macht.

Der erste Salzwassereinbruch traf die Becken des Priwall- und Niendorfer Sees offenbar nahezu gleichzeitig. Unter Niendorf deutet sich in den Pollendiagrammen eine leichte Verzögerung der Transgression an. Dies mag zum Teil an der durchschnittlich etwas geringeren Tiefe der Transgressionskontakte, zum Teil an der im Priwallgebiet stattgehabten geringfügigen Abrasion der Süßwassersedimente liegen. Die Zeitunterschiede dürften jedenfalls der Annahme, daß beide Becken mit der offenen Lübecker Bucht in Verbindung standen, nicht widersprechen. Dies bedeutet aber, daß man es hier mit direkten Transgressionskontakten zu tun hat, d. h. die Tiefe des Kontaktes entspricht innerhalb gewisser Fehlergrenzen dem Stand des Meeresspiegels.

Der weitere Anstieg des Meeresspiegels offenbart sich in vielfältiger Weise. In der Pötenitzer Wiek darf vom ersten Salzwassereinbruch an mit einer verstärkten Abtragung der Landvorsprünge gerechnet werden. Die Absätze des ehemaligen Priwallsees wurden durch eine sandige Tongyttja eingedeckt, die wahrscheinlich zum größten Teil aus dem Material der Landvorsprünge in der Wiek selbst entstand.

Die Bohrungen am Stülper Huk haben das Bild einer langsam ertrinkenden Flußmündung ergeben. Hier treten Torfe ohne größeren Zusammenhang in den verschiedensten Tiefen zwischen — 17,80 und — 3,0 m NN auf. Immer wieder kam es an den Flußufern zu Verlandungen. Der übergespülte Sand und Kies des Ufers verhütete eine Aufarbeitung der Torfe.

Die Bohrungen vor der Enge zwischen Dassower See und Pötenitzer Wiek haben einen frühen Strandwall erschlossen, der sich vor den Eingang der Dassower Niederung geschoben haben muß. In der Mitte des Eingangs ist dieser Strandwall in 10 m Tiefe noch nicht durchteuft. Der Dassower See bildete also ein abgeschlossenes System, welches erst relativ spät in den Bereich des Salzwassers geriet. Größere zusammenhängende Torfdecken sind im Südwestteil des Sees in 4 bis 10 m Tiefe erbohrt worden. Eine Überflutung konnte erst eintreten, nachdem der Priwall den vom Mecklenburger Ufer herunterkommenden Sand fing und das Volkstorfer Kliff vor stärkerer Abtragung schützte, der Strandwall vor dem Dassower See also nicht genug Nahrung erhielt. Deswegen dürfte der Salzwassereinbruch in den See erst bei einem Wasserstand von  $-4$  m NN erfolgt sein.

Ausgezeichnete Hinweise auf den Anstieg des Meeresspiegels geben kleinere Rinnen wie diejenigen der „Kuhle“, Siechenbucht und Villa Possehl. Infolge der geschützten Lage hinter Strandwällen oder Landvorsprüngen entstanden hier Torfablagerungen, deren zeitliche Stellung die Transgressionsentwicklung beleuchtet, da sie in verschiedenen Tiefen von marinen Ablagerungen überdeckt werden. Vor der „Kuhle“ kam es nicht zu ausgeprägten Strandwallbildungen, so daß die Torfe hier direkt von mariner Gytta überlagert werden und offenbar keine nennenswerte Aufarbeitung erfahren haben. In der Siechenbucht lag vor der Rinne in 10 bis 15 m Tiefe ein Strandwall, der sich auf Süßwasserabsätze geschoben hatte. Diese wurden stärker aufgearbeitet, und erst die höher liegenden Torfe überlagert eine marine Gytta. Auch vor der Rinne, die von der Villa Possehl zur Trave weist, lag vermutlich ein Strandwall, wahrscheinlich dort, wo die 10-m-Tiefenlinie in die Rinne einschwenkt. In fünf Bohrungen bei der Villa liegt über den limnischen Sedimenten marine bis brackische Tongyttja. Trotz des gleichen Alters dieser Kontakte (vgl. Bericht H. Schmitz) wechselt deren Tiefe zwischen  $-7,70$  und  $-10,83$  m NN. Die Morphologie der diluvialen Oberfläche spricht dafür, daß nicht nur die Höhe der Seeufer, sondern auch ein Strandwall die Transgression solange verhinderte, bis diese ein solches Niveau erreicht hatte, daß ein Salzwassereinbruch möglich war. Die Höhe des Meeresspiegels zu dieser Zeit ergibt sich dann mit dem geringsten Fehler aus dem höchsten Transgressionskontakt. Im Schutze des Strandwalls entstanden nach der Transgression brackische Ablagerungen. Anzeichen für vorübergehende Aussüßungen sind jedoch vorhanden, so daß der Strandwall auch weiterhin niedrig aber durchgehend ausgebildet war. Er schob sich im weiteren Verlauf immer näher an die heutige Küstenlinie heran. Wie die Wasserbohrungen vor der Villa Possehl gezeigt haben, wurden dabei die Torfe seewärts des Strandwalls zum größten Teil aufgearbeitet.

Eine Reihe von Bohrungen traf auf dem Leuchtenfeld in 10 bis 13,30 m Tiefe zusammenhängende Torfablagerungen an. Diese Torfe wurden beim Vorschreiten der Strandlinie übersandet. Von  $-10$  m an aufwärts wurden nur noch unzusammenhängende geringmächtige Torfe angetroffen, die offenbar zwischen Strandwällen entstanden sind.

In Fortsetzung des alten Strandwalls vor der Villa Possehl schob sich demnach offenbar im Gebiet der 10-m-Tiefenlinie ein Haken in Richtung auf die heutige Nordermole vor, in dessen Schutz eine Verlandung im Gebiet des Leuchtenfeldes einsetzte.

Die Bildung dieses ältesten nachweisbaren Hakens wäre nicht möglich gewesen, wenn die Trave damals schon ihre heutige Mündung besessen hätte. Die Abdrängung der Travemündung nach Westen konnte erst erfolgen, als der die Abdrängung bewirkende Priwall an Größe zunahm. Wie die Verhältnisse am Eingang des Dassower Sees vermuten lassen, ist die eigentliche Priwallnehrung jedoch relativ jung. Für die Bildung der den Sockel des Priwall bildenden Tongyttjen und Sande steht dagegen der gesamte Zeitraum seit Beginn der Transgression in diesem Gebiet zur Verfügung.

Im Gegensatz zur Pötenitzer Wiek sind die Verhältnisse im Gebiet der Hemmelsdorfer Niederung und der Haffwiesen offenbar recht einfach. Seewärts liegen vor dem Gebiet ausgedehnte Abrasionsflächen, über deren Abtragungsbeträge sich jedoch nichts näheres aussagen läßt. Die Bildung der Torfe setzte sowohl im Kühlbroktal bei Timmendorfer Strand als auch in den Haffwiesen erst nach Abschluß dieser Buchten durch die Strandwälle ein. Die Mäch-

tigkeit der Strandwälle von teilweise über 10 m spricht jedoch für eine ständige Erhöhung bei steigendem Wasserstand. Auch in der Hemmelsdorfer Niederung setzte eine erneute Vermoorung nach den heutigen Kenntnissen erst nach vollständigem Abschluß durch den Niendorfer Strandwall ein.

### Schl u ß b e m e r k u n g

Abschließend läßt sich sagen, daß im Untersuchungsgebiet, namentlich in den Randgebieten der Pötenitzer Wiek durch Bohrungen vielfältige Zeugen des postglacialen Meeresspiegelanstiegs erschlossen sind, deren möglichst vollständige pollenanalytische Auswertung ein recht genaues Bild des Transgressionsablaufes in diesem Gebiet ergeben wird, wenn einige dieser Bohrungen unter Entnahme ungestörter Proben wiederholt werden können. Schon jetzt treten aber folgende Tatsachen klar hervor:

1. Im gesamten Gebiet der inneren Lübecker Bucht ist ein ständiger Anstieg des Meeresspiegels vom Beginn der ersten Meeresüberflutung an zu beobachten. Zahlreiche, in den verschiedensten Tiefen zwischen — 20 und 0 m NN angetroffene Torfablagerungen und alte Strandwälle beweisen dies.
2. Diese alten, heute teilweise erheblich unter dem Meeresspiegel liegenden Strandwälle und Mächtigkeiten jetziger Strandwälle von über 10 m deuten an, daß auch in Zeiten eines niedrigeren Meeresspiegels der Küstenausgleich und damit der Abbruch der Landvorsprünge in der inneren Lübecker Bucht tätig war. Ein Brodtener Kliff wird daher schon vom ersten Meereseinbruch an im Gebiet der äußersten Spitze des durch die heutige 20-m-Tiefenlinie angedeuteten Landvorsprungs bestanden haben.
3. Der Abschluß der Traveförde durch den Priwall begann erst zu einer Zeit, als der Meeresspiegel auf — 5 bis — 4 m NN gestiegen war. Die eigentliche Priwallnehrung und damit die heutige Lage der Travemündung sind also erst relativ spät entstanden.

Absolute Zeitangaben lassen sich jedoch erst nach weiteren pollenanalytischen Untersuchungen in diesem Gebiet machen.

### S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

1. FRIEDRICH, P.: Die Grundwasserverhältnisse der Stadt Lübeck und ihrer Umgebung. Lübeck 1917.
2. FRIEDRICH, P. und HEIDEN, H.: Die Litorina- und Praelitorinabildungen unter dem Priwall bei Travemünde. Mitt. geogr. Ges. u. nat. hist. Mus. Lübeck, H. 24. 1912.
3. GRIPP, K.: Glacialmorphologie und Kartierung. Z. geol. Ges. 99. 1947.
4. RANGE, P.: Geologische Karte von Preußen, Erläuterungen zu Blatt Schwartau. 1938.
5. RANGE, P.: Geologische Karte von Preußen, Erläuterungen zu Blatt Schwartau. 1938.

Benutzte Archive: Landesanst. für angewandte Geologie — Versuchsanstalt für Wasser-, Erd- und Grundbau Hamburg — Wasser- und Schifffahrtsamt Lübeck — Wasser- und Hafenbauamt Lübeck — Tiefbauamt Lübeck.

# Über die physikalischen Eigenschaften der das Brodtener Ufer aufbauenden Bodenarten und ihre Bedeutung für den Steiluferrückgang und für die Errichtung eines Uferschutzwerks

Von Alfred Dücker

1. Einleitung
2. Kennziffernmäßige Beschreibung der am Aufbau des Kliffs beteiligten Bodenarten:
  - a) Kornverteilung
  - b) Zustandsform
  - c) Wasseraufnahmevermögen
  - d) Scherfestigkeit
3. Der geologische Aufbau des Kliffs und die Lagerungsverhältnisse der Bodenarten
4. Die Stabilitätsverhältnisse des Kliffs
5. Die Veränderlichkeit der Festigkeitswerte
  - a) der Einfluß des Oberflächenwassers
  - b) der Einfluß des Grund- und Sickerwassers
  - c) die Mitwirkung des Klimas
  - d) die Einwirkung des Meeresswassers
  - e) der biologische Einfluß
6. Zusammenfassung und Stellungnahme zu den geplanten Schutzmaßnahmen

## 1. Einleitung

Durch die Planung einer massiven Uferwand, bzw. eines aus flachgeböschtem Deckwerk bestehenden Uferwerks zum Schutz des Brodtener Ufers, sah sich die Untersuchungsstelle beim Wasser- und Schifffahrtsamt in Lübeck veranlaßt, im Rahmen einer planmäßigen Durchforschung des Gesamtfragenkomplexes über die Ursachen des Steiluferrückgangs auch den Einfluß der physikalischen Eigenschaften der das Kliff aufbauenden Bodenarten quantitativ zu ermitteln. Mit der Durchführung dieser Aufgabe wurde die Bundesanstalt für Wasser-, Erd- und Grundbau — Außenstelle Hamburg — beauftragt.

Für die Untersuchung standen 43 Bodenproben zur Verfügung, die an verschiedenen Stellen aus neu angelegten Schürfgruben in der Steiluferwand in ungestörtem Zustand entnommen wurden. Ihre Größe betrug  $10 \times 10 \times 15$  cm bzw.  $15 \times 15 \times 25$  cm; sie wurden mit einem Spatel sorgfältig aus der Schurfwand herausgearbeitet, mit einem passenden Holzbehälter umgeben und mit Paraffin luftdicht abgeschlossen. Lediglich dreizehn nichtbindige Bodenproben wurden mit Hilfe eines Stahlzylinders von 12 cm Durchmesser gewonnen, der in den zumeist lockeren Untergrund leicht eingedrückt werden konnte. Von der Untersuchung der gelegentlich im Hangenden des Kliffs auftretenden holozänen Ablagerungen, wie Flachmoortorf, Faulschlamm, Wiesenkalk u. a., wurde Abstand genommen.

Unter Ermittlung insbesondere der Kornverteilung, der Plastizität, des Wasseraufnahmevermögens, der Scherfestigkeit und der Frostbeständigkeit\*), sollte im wesentlichen das Verhalten des Geschiebemergels

- a) oberhalb des Wasserspiegels,

\*) Die Versuche wurden im wesentlichen nach den in der Bodenmechanik üblichen Vorschriften durchgeführt. Methodische Einzelheiten mögen aus: CASAGRANDE-FADUM (1) oder SCHULTZE-MUHS (4) entnommen werden.

- b) in ruhigem und bewegtem Wasser mit und ohne Steinabdeckung und
  - c) nach Errichtung eines Uferschutzwerks
- geklärt werden.

## 2. Kennziffernmäßige Beschreibung der am Aufbau des Kliffs beteiligten Bodenarten

a) **Kornverteilung.** An dem Aufbau des Brodtener Ufers sind im wesentlichen Bodenarten glazigenen bzw. fluvioglazigen Ursprungs beteiligt. Wie aus den in dem Konzentrationsdreieck zusammengefaßten Ergebnissen der Sieb- und Schlämmanalysen hervorgeht (Abb. 1), bestehen sie entweder aus 40 v. H. bis 60 v. H. Siebkorn ( $> 0,06$  mm) und 60 v. H. bzw. 40 v. H. Schlämmkorn ( $< 0,06$  mm) oder aus 5 v. H. Siebkorn und 95 v. H. Schlämmkorn. Dabei handelt es sich einmal um glazigene, ungleichförmige Ablagerungen der Grundmoräne ( $U = 30$  bis  $60$ ) („Lehme“ in Abb. 1) und zum anderen um gleichförmige ( $U = 5$ ), als

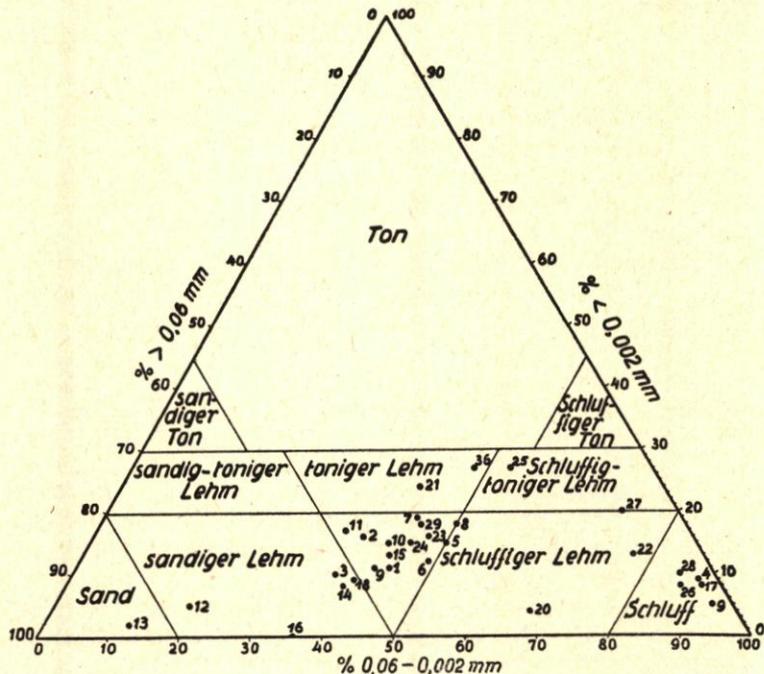


Abb. 1. Die Kornzusammensetzung der Bodenproben Nr. 1 bis 30 aus verschiedenen Teilen des Brodtener Ufers und ihre Einordnung in das Dreieck-Koordinatensystem. Die meisten Böden sind Lehme, wie aus der Häufung der Punkte in dem kleinen Dreieck für „Lehm“ (ohne nähere Bezeichnung) hervorgeht

Staubckenabsätze zu deutende Sedimente („Schluff“ und „schluffiger Lehm“ in Abb. 1). Der durchschnittliche Gesamt-Sandkornanteil aller Bodenarten ist mit etwa 30 bis 35 v. H. zu veranschlagen, wovon etwa 60 v. H. der Feinsand-Kornfraktion  $0,2$  bis  $0,06$  mm angehören. Innerhalb eines Profils läßt sich beobachten, daß die Sandkornkomponente im großen und ganzen vom Liegenden zum Hangenden zugunsten des Schluffkornanteils abnimmt (Abb. 2), wobei auch der Feinstkornanteil unter  $2\mu$  eine leichte Zunahme erfährt. Diese Erscheinung hängt offensichtlich mit der Entstehung des hangenden Geschiebemergels zusammen, auf die weiter unten eingegangen wird.

b) Zustandsform. Der Plastizitätsindex ( $I_w$ ), der sich aus der Differenz des Wassergehaltes bei der Fließgrenze ( $F_w$ ) und der Plastizitätsgrenze ( $P_w$ )

$$I_w = F_w - P_w$$

ergibt, vermittelt einen Anhaltspunkt über die Zustandsform der Bodenarten. Er schwankt im allgemeinen zwischen 10 und 17. Lediglich der im Bereich der heutigen Verwitterungsvorgänge liegende hangende Geschiebelehm (siehe Abb. 3, Probe Nr. 22) mit einem Plastizitätsindex von 30 und der gelegentlich als Scholle in der Moräne einverleibte Kreidemergel mit

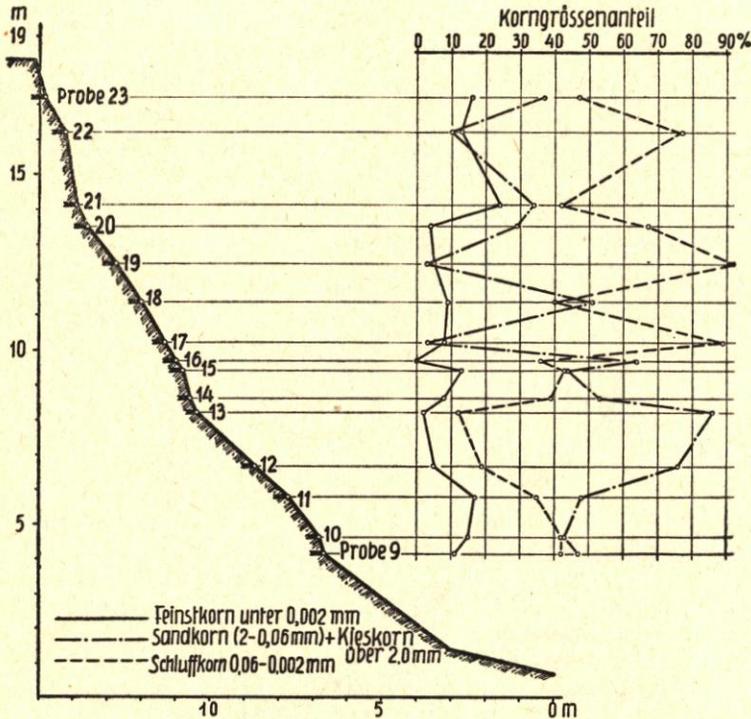


Abb. 2. Der Anteil an Sand, Schluff und Feinstkorn (Ton) innerhalb der Bodenproben aus Station 25,0—50 in profilgerechter Aufeinanderfolge

einer Plastizitätsziffer von 3,7 fallen aus dem allgemeinen Rahmen heraus. Innerhalb des Querprofils läßt sich feststellen, daß die Werte der Fließ- und Plastizitätsgrenze entsprechend der Sandkornabnahme vom Liegenden zum Hangenden hin zunehmen. Dabei ist zu erkennen, daß fast alle Proben eine sehr feste Konsistenz aufweisen, da ihr natürlicher Wassergehalt stets nahe bzw. sogar vielfach unterhalb der Plastizitätsgrenze liegt.

c) Wasseraufnahmevermögen. Die Werte der Wasserbindung (Enslinwert) zeigen, daß die Zeit bis zum Erreichen der im Endzustand aufgenommenen Wassermenge klein ist. Diese Erscheinung läßt darauf schließen, daß Tonminerale mit hohem Wasseraufnahmevermögen mengenmäßig nicht in Erscheinung treten. Vielmehr bewegen sich die angesaugten Wassermengen und die erforderlichen Zeiten zur Erreichung des Endzustands in einem Bereich, der im wesentlichen Mischungen aus Quarz und Kaolinit bzw. Illit gleichkommt (vgl. ENDELL [2]). Selbstverständlich sagt diese Schlußfolgerung nichts aus über die wirkliche Natur der vorhandenen Tonminerale, da die ermittelten Enslinwerte weitgehend von dem hohen Quarzmineralanteil bestimmt werden. Welche Tonminerale daher im einzelnen an dem Aufbau der Brodtener Bodenarten beteiligt und für ihren bodenphysikalischen Charakter ausschlaggebend sind, läßt sich nur auf Grund einer quantitativen röntgenographischen Unter-

suchung feststellen. Der relativ hohe Enslinwert der Probe Nr. 22 (Abb. 3) dürfte vermutlich auf die Anwesenheit neu gebildeter Tonminerale zurückzuführen sein, die mit den Bodenbildungsvorgängen in der Zeit nach dem Rückzug des letzten Eisvorstoßes in Zusammenhang stehen. Dabei zeigt sich, daß eine Abhängigkeit des Wasseraufnahmevermögens von der Kornfeinheit, d. h. von dem Kornanteil unter  $2\mu$  nicht besteht. Während zum Beispiel die

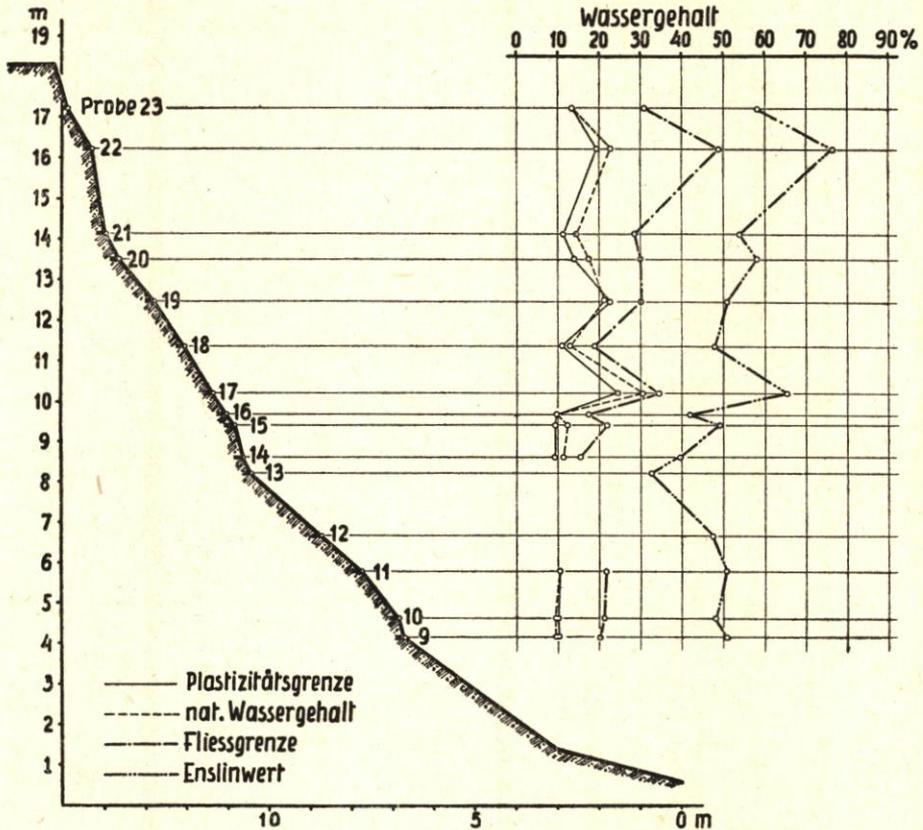


Abb. 3. Der natürliche Wassergehalt der Bodenproben bei Station 25,0—50 in profilgerechter Aufeinanderfolge im Vergleich zum Wassergehalt an der Plastizitätsgrenze und der Fließgrenze sowie zum Enslinwert

Probe Nr. 21 mit einem Kornanteil von 24 v. H. unter  $2\mu$  nur einen Wassergehalt bei Sättigung von 54 v. H. aufweist, erreicht die Probe Nr. 22 mit nur 13 v. H. an Korngrößen unter  $2\mu$  den höchsten überhaupt gefundenen Enslinwert von rund 76 v. H. Die genetisch verschiedenen Bodenarten dagegen heben sich durch einen für sie charakteristischen Enslinwert voneinander ab. So lassen sich die schluffigen Beckenabsätze trotz ihres geringen, 10 v. H. kaum überschreitenden Kornanteils unter  $2\mu$  deutlich von den übrigen Bodenarten unterscheiden. Das gleiche gilt beispielsweise für den Kreidemergel (Probe Nr. 30), der wahrscheinlich auf Grund fast fehlender Tonminerale einen auffällig geringen Wassersättigungswert besitzt, obwohl sein Kornanteil unter  $2\mu$  den höchsten Wert (27 v. H.) aller Bodenproben erreicht.

d) Scherfestigkeit. Der für die Standfestigkeit des Steilufers maßgebende physikalische Festigkeitswert des Bodens ist die Scherfestigkeit ( $\tau_0$ ), die sich aus dem normalen Druck ( $\sigma$ ) mal dem Tangens des Winkels der inneren Reibung ( $\varrho$ ) plus Kohäsion ( $c$ )

$$\tau_0 = \sigma \cdot \tan \varrho + c$$

zusammensetzt. Über die Größenordnung der Scherfestigkeit unterrichtet die Tabelle 1.

**Tabelle 1**  
Zusammenstellung der Scherfestigkeiten der wichtigsten Bodenarten vom Brodtener Ufer

| Probe-Nr. | Kennzeichen | Geologische Bezeichnung | natürl. Wassergeh. v. H. | Raumgewicht $t/m^3$ | Porenziffer $\epsilon$ | Winkel d. inneren Reibung | Kohäsion $c$ |
|-----------|-------------|-------------------------|--------------------------|---------------------|------------------------|---------------------------|--------------|
| 24        | WLü/1—17/1a | Geschiebemergel         | 9,5                      | 2,18                | 0,374                  | Max.<br>=                 | Max.<br>=    |
| 9         | WLü/1—17/1b | Geschiebemergel         | 10,7                     | 2,21                | 0,330                  | 28° 30'                   | 0,55         |
|           | WLü/1—25/1  | Geschiebemergel         | 9,9                      | 2,15                | 0,352                  | Min.<br>=                 | Min.<br>=    |
| 29        | WLü/1—21/2  | Geschiebemergel         | 18,8                     | 2,06                | 0,540                  | 26° 30'                   | 0,1          |
| 25        | WLü/1—17/2  | Kreidemergel            | 15,4                     | 2,18                | 0,404                  | 28° 50'                   | 0,75         |
| 26        | WLü/1—17/3  | Mergelsand              | 21,2                     | 2,06                | 0,543                  | Max.<br>=                 | Max.<br>=    |
| 28        | WLü/1—21/1a | Mergelsand              | 20,9                     | 2,04                | 0,575                  | 29°                       | 0,45         |
|           | WLü/1—21/1b | Mergelsand              | 24,3                     | 2,00                | 0,660                  | Min.<br>=                 | Min.<br>=    |
|           | WLü/1—21/1c | Mergelsand              | 24,8                     | 2,02                | 0,673                  | 25°                       | 0            |

Wie Abbildung 4 zeigt, schwankt die mit Hilfe der MOHR'schen Spannungskreise festgestellte Kohäsion  $c$  für den Geschiebemergel je nach seinem Wassergehalt zwischen 0,1 und

**Geschiebemergel**  
ungestörte Proben Nr.:

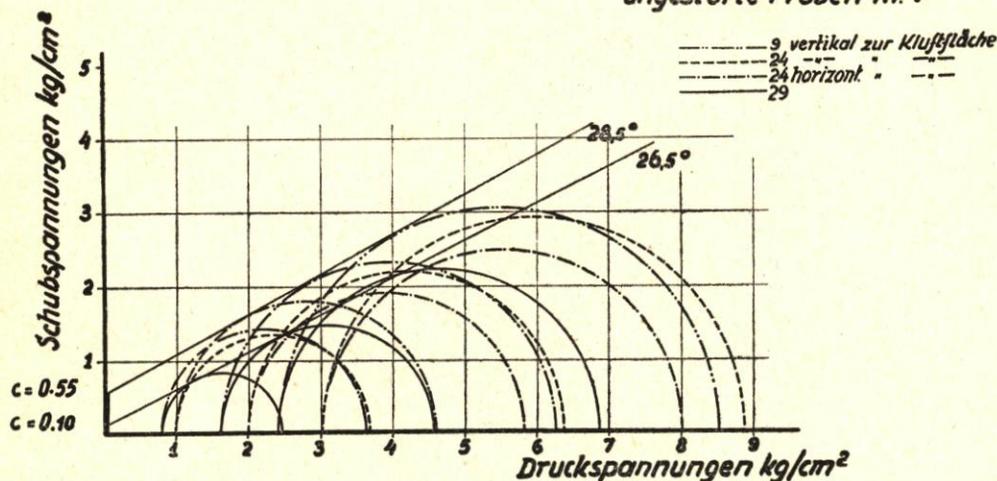


Abb. 4. Die Ergebnisse der dreiachsialen Bestimmungen der Scherfestigkeit (Winkel der inneren Reibung  $\rho$  und Kohäsion  $c$ ) verschiedener Geschiebemergelproben aus dem Liegenden des Brodtener Ufers

0,55  $kg/cm^2$ . Der Winkel der inneren Reibung bewegt sich zwischen 26 Grad und 28 Grad. Ähnliche Ziffern weisen auch die in dem Geschiebemergelkomplex eingelagerten, bzw. als Scholle auftretenden, schluffigen Staubeckenabsätze und Kreidemergel auf. Dabei ist zu beachten, daß der „natürliche Böschungswinkel“ des Steilufers nicht mit dem Reibungswinkel des Bodens identisch ist, da zum Beispiel der Geschiebemergel infolge seiner Bindigkeit auch noch eine Kohäsion besitzt, die ihrerseits von dem Gefügewiderstand und der Haftfestigkeit der einzelnen Bodenteilchen beherrscht wird.



Die Ursachen der Massenbewegungen müssen mithin auf Faktoren zurückgeführt werden, die eine weitgehende Änderung der Scherfestigkeit im Gefolge haben, durch die die Massen zum Abgleiten gezwungen werden. Da die Scherfestigkeit, und zwar vornehmlich die Kohäsion, weitgehend durch eine Änderung des Bodenwassergehaltes beeinflusst werden kann, erscheint es notwendig, das hydrologische Moment in den Vordergrund der Betrachtungen über die Ursachen des Kliffrückgangs zu stellen.

## 5. Die Veränderlichkeit der Festigkeitswerte

### a) Einfluß des Oberflächenwassers

Mehr oder weniger tief eingefurchte Regenrunsen in den abgestürzten Schuttmassen, ausgewaschene und vertiefte Klüfte in dem Geschiebemergel deuten mit Nachdruck auf eine lineare, meist vertikale Erosionswirkung des oberflächlich abfließenden Wassers hin. Besonders dort, wo ein gesammelter Abfluß am Steilufer in die Ostsee einmündet, wie das am Mühlbachtal nördlich des Dorfes Brodten der Fall ist, oder wie oft mangelhaft verbaute Drainageleitungen zeigen, beobachtet man eine stark rückschreitende Erosion, die zur Entstehung von Einschnitten und tiefen Schluchten führt. Wenn auch dadurch zweifellos ein gewisser Bodenverlust eintritt, so spielt dieser im großen und ganzen gesehen für den Kliffrückgang doch nur eine untergeordnete Rolle, da eine wesentliche Änderung der physikalischen Eigenschaften des Bodens infolge der dynamischen Wirkung des abfließenden Wassers nicht eintritt.

### b) Einfluß des Grund- und Sickerwassers

Die abtragende Wirkung des Grundwassers einschließlich des periodisch verstärkt auftretenden Sickerwassers wird durch zahlreiche, an der Kliffböschung zu beobachtende Grundwasseraustritte unterstrichen. Hierbei dürfte das im Raume der Hermannshöhe vorhandene Sandgebiet als das rückwärtige Einzugsgebiet des Grundwassers aufgefaßt werden. Als Grundwasserleiter kommen die im Liegenden des hangenden Geschiebemergels auftretenden sandigen Beckenabsätze in Frage. Da die Lagerungsverhältnisse dieser Schichten starke Stauchungs- und Abscherungserscheinungen aufweisen, sind die damit dem Grundwasser zugewiesenen Wege außerordentlich kompliziert und vielgestaltig. Dies lassen auch die zeitlich und räumlich stark wechselnden Grundwasseraustritte erkennen. Dort, wo das Grundwasser am Steilufer ungehindert ausfließen kann, wie es besonders im Winter durch die Entstehung eines „Eisbartes“ sichtbar wird, werden infolge der hydrostatischen Druckwirkung besonders die sehr feinsandigen Beckenabsätze mehr oder weniger stark ausgespült (Abb. 6). Dadurch entstehen in der Kliffwand Höhlungen, die schließlich bei entsprechendem Ausmaß der Ausschlämmungen einen Absturz der hangenden Schichten im Gefolge haben. Nischenförmige Ein- und Abbrüche sind daher die überaus kennzeichnenden Erscheinungsformen dieser Grundwassererosion.

Werden durch die abgestürzten Schuttmassen die Austritte des Grundwassers vorübergehend abgesperrt, so versickert das Wasser in die zerrütteten, in ihrer Struktur weitgehend gelockerten Bodenmassen. Der vordem wirksam gewesene Belastungsdruck der überlagernden Schichten ist zum größten Teil verschwunden, so daß der Boden eine weitgehende Aufnahmebereitschaft für das Wasser zeigt. Die Folge ist ein allmähliches Durchweichen bis an die Grenze des Fließzustandes, so daß der Boden infolge der erreichten Nullreibung breiartig abgleitet.

Infolge der gestörten Lagerungsverhältnisse der wasserführenden Beckenabsätze tritt aber das Grundwasser immer nur an einigen örtlich begrenzten Stellen des Steilufers aus. In den überaus größten Teilen des Kliffs wird es gestaut, indem es das vorhandene Spaltensystem des Geschiebemergels völlig erfüllt. Hierbei übt das Wasser auf die Seitenflächen der einzelnen Geschiebemergelschollen den vollen hydrostatischen Druck aus, der beispielsweise bei einer Spaltentiefe von 3,0 m auf den Wert von

$$\frac{\gamma_w \cdot h^2}{2} = \frac{1 \cdot 3^2}{2} = 4,5 \text{ t/m}^2$$

ansteigen kann. Zum anderen ist mit der Wasserüberflutung des Spaltensystems eine Raum-

änderung des Bodenmaterials verbunden (Abb. 11), die besonders dort, wo der natürliche Wassergehalt des Geschiebemergels niedrig ist, eine Erweiterung der Klüfte im Gefolge hat. Außerdem wird durch die Wasseraufnahme des in Schollen gegliederten Bodenmaterials die Scherfestigkeit infolge der Herabsetzung der Kohäsion soweit vermindert, daß die Bodenmassen durch ihr Eigengewicht — vermehrt um das Gewicht des das Kluftsystem erfüllenden Wassers — durch den hydrostatischen Druck auf einer zumeist vorgebildeten alten Scherfläche abgleiten werden. Entsprechend der nur langsam eintretenden Wasseraufnahme des Bodens entlang der Kluftflächen erfolgen die Schollenabbrüche gleichfalls nur langsam. Sie machen sich auf der Steilhangoberkante schon lange Zeit vorher durch uferparallel verlaufende Risse und Spalten kenntlich (Abb. 7).

### c) Mitwirkung des Klimas

Die zerstörende Tätigkeit des Grundwassers wird noch wesentlich verstärkt durch die Mitwirkung extremer Temperaturschwankungen. Insbesondere die im negativen Temperaturbereich sich abspielenden Vorgänge sind von großem Einfluß auf die morphologische Umgestaltung des Steilufers. Dabei sind zwei grundsätzlich verschiedene Erscheinungen zu unterscheiden:

1. Spaltenfrost. Sofern der Boden als geschlossenes System vom Gefriervorgang erfaßt wird, wie es der Fall sein kann, wenn das in sehr feinen Haarrissen stehende Sickerwasser gefriert, treten mit abnehmender Temperatur immer größer werdende Druckwirkungen auf. Bei  $-5$  Grad C betragen sie bereits über 600 at und erreichen ihren maximalen Wert von 2115 at bei  $-22$  Grad C. Da aber nicht angenommen werden kann, daß ein derart hoher Druck von dem bereits von Natur aus stark zerrütteten Geschiebemergel überstanden wird, kommt es durch Erweiterung des Spaltensystems sehr rasch zu einer Druckentlastung. Die Spaltenfrostwirkung im Geschiebemergel besteht mithin in einem Wettlauf zwischen der Druckzunahme beim Gefriervorgang und der Entlastung des Systems durch die Möglichkeit der Auflockerung des Gefüges. Auf diese Weise können besonders an sehr steilen Uferböschungen ganze Bodenschollen zum Absturz gebracht werden, wie dies zur Zeit des Frostes immer wieder beobachtet wird.

2. Bodenfrost. Wie bereits eingangs gezeigt, besitzen die das Steilufer aufbauenden Bodenarten einen erheblichen Schluffkornanteil, der durchschnittlich wenigstens 25 v. H. bis 30 v. H. beträgt. Damit ist der Boden des Brodtener Ufers für Erscheinungen vorbestimmt, die den sogenannten frostempfindlichen Bodenarten zukommen. Wie aus den in Abbildung 8 dargestellten Gefrierversuchsergebnissen, die an ungestört entnommenen Bodenproben erzielt wurden, hervorgeht, zeigt der gefrorene Boden einen erheblich größeren Wassergehalt als der ungefrorene Boden. Durch den Gefriervorgang werden aus dem Untergrund bzw. aus dem Grundwasser- oder Stauwasserhorizont mehr oder weniger große Wassermengen entnommen und bis in die Höhe der jeweiligen Frostgrenze gefördert, wo sie parallel zur Null-Grad-Isotherme in Form von reinen, millimeter- bis zentimeterstarken Eisschichten und Eislinsen zur Auskristallisierung gelangen. Neben der damit verbundenen Volumenausdehnung des Bodens (Abb. 9) parallel zur Geländeoberfläche, die aber auf die morphologische Umgestaltung des Steilufers von untergeordneter Bedeutung ist, kommt es bei Frostaufgang im Frühjahr zu einer Wasserübersättigung des Bodens, die, wie aus Abbildung 8 hervorgeht, zum Teil weit über die Fließgrenze des Bodens hinausgeht. Dabei wird der Gefügewiderstand und die Haftfestigkeit der einzelnen Bodenteilchen völlig aufgehoben, so daß die Standfestigkeit des Bodens mehr oder weniger verschwindet. Entsprechend der Reibung in einer zähen Flüssigkeit strebt der Boden einem Gleichgewichtszustand zu, der praktisch einem natürlichen Böschungswinkel von nahezu Null gleichkommt. Die Folge ist ein Abfließen der Bodenmassen, das verheerende Ausmaße annehmen kann. Es kommt dabei zur Entstehung von Schlammströmen, die — vergleichbar mit den Solifluktionserscheinungen arktischer Gebiete — sich hangabwärts wälzen und als Muren den Kliffuß völlig unter sich begraben, wie dies Abbildung 10 in eindrucksvoller Weise erkennen läßt.

Die Betrachtungen zeigen also, daß das Grundwasser infolge seiner hydrostatischen und kryostatischen, den Strukturverband des Bodens auflockernden Druckwirkung und infolge der

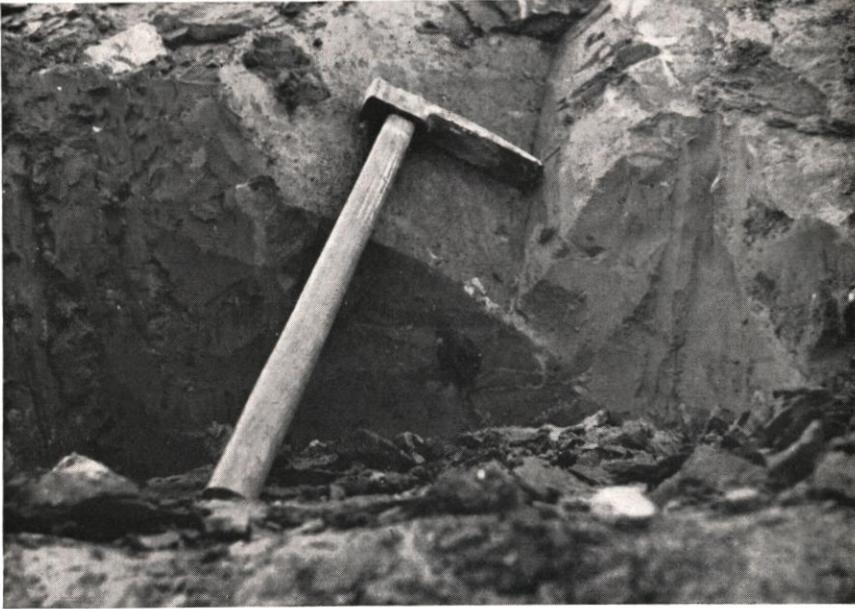


Abb. 5 (oben). Als Kluft- und Gleitfläche ausgebildete Grenz-Mergelsandscholle (rechts) und Geschiebemergel (links) im Profil bei Station 25,0—50

Aufn. Dücker 10. 10. 1949

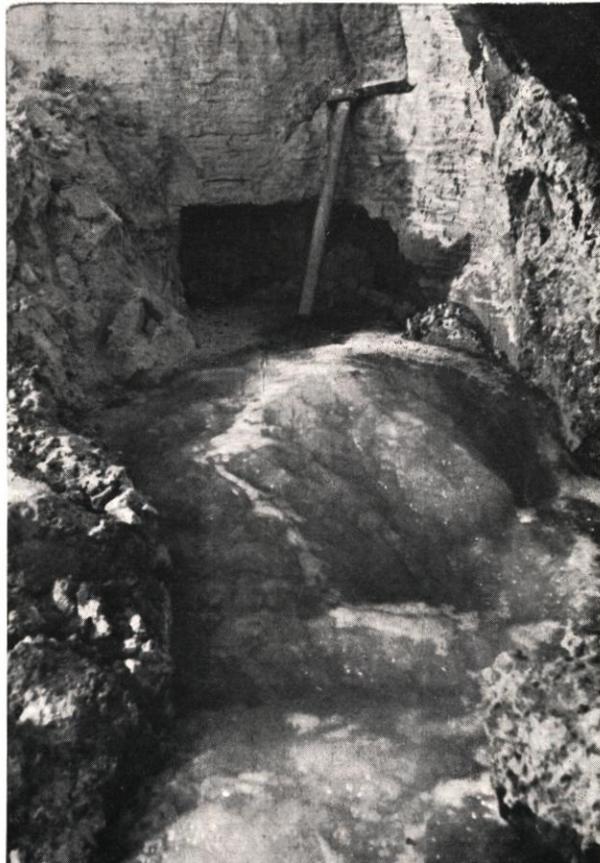


Abb. 6 (rechts). Aus der Kliffwand austretendes Grundwasser, das infolge der Auspülung feinkörniger Bodenteilchen zur Bildung einer Höhlung führt, die bei genügender Größe zu nischenartigen Abbrüchen Veranlassung gibt

Aufn. Dücker 28. 1. 1950



Abb. 7 (links). Auf einer vorgezeichneten Gleitfläche gelöste und im Abrutschen befindliche Bodenscholle

Aufn. Dücker 28. 1. 1950

Abb. 10 (unten). Über den Vorstrand gewälzte Schlamm-Mure bei Frostaufgang, die sich infolge übermäßig starker, durch den Gefriervorgang bedingter Wasseranreicherung bildete

Aufn. Dücker Februar 1950



mit der Wasseraufnahme verbundenen Verminderung der Kohäsion und Erhöhung des Eigengewichtes des Bodens ein wichtiger und wesentlicher Faktor des durch Schollenabbrüche gekennzeichneten Steiluferrückganges ist.

#### d) Einwirkung des Meereswassers

Würde man sich das Brodtener Ufer nicht als Steilufer an der See, sondern als tiefen Einschnitt in einer Moränenlandschaft vorstellen, so würde eine unter 45 Grad hergestellte Böschung in verhältnismäßig kurzer Zeit in ihren eigenen Schuttmassen ertrinken. Nach Herausbildung einer flachen, natürlichen Böschung käme der Brodtener „Einschnitt“ zur Ruhe. Durch die stark exponierte Lage des Brodtener Ufers innerhalb der Lübecker Bucht wird jedoch durch den Einfluß des Meeres eine natürliche Böschungsbildung verhindert.

Dabei kann die Ostsee nur dann einen unmittelbaren Einfluß auf die Morphologie des Steilufers nehmen, wenn durch stürmische Winde Wasserstandserhöhungen hervorgerufen werden, die zu einer Überflutung des Strandes und damit zu einer Einwirkung auf die Kliffwand führen. Stürmische, zumeist aus Nordost und Ost kommende Winde verursachen einen erheblichen Wasserstau, dessen gestaltender Einfluß auf die Morphologie des Steilufers sich

- a) in einer Materialverfrachtung und
- b) in einer Abrasionswirkung

geltend macht. Hierbei werden zunächst die am Kliffuß angereicherten Absturzmassen von der Brandung angegriffen, aufgearbeitet und durch den Küstenversatzstrom abtransportiert. Die Geschwindigkeit, mit der das abgestürzte Schuttmaterial fortgeräumt wird, ist abhängig von der Wasseraufnahmefähigkeit, der Durchlässigkeit und dem Ausmaß der Zerstörung und Vernichtung der ursprünglichen Struktur und Textur der Bodenmassen. Größere, zusammenhängende Geschiebemergelschollen vermögen der Einwirkung der Brandung längere Zeit hindurch standzuhalten. Kleinere Schollen und Bruchstücke werden in der Brandung zu einzelnen Geschiebemergelgeröllen umgeformt und nach und nach abgerollt. Je weitgehender aber das ursprüngliche Gefüge des abgerutschten Bodens durch die Faktoren der Atmosphärien zerstört ist, desto schneller wird der Boden von der angreifenden See erfaßt und fortgeräumt, so daß in verhältnismäßig kurzer Zeit der gewachsene Geschiebemergel des Kliffußes — völlig reingewaschen — von der vollen Wucht der Brandung getroffen wird. Es entstehen dann meist glatte, nach oben immer steiler werdende Abrasionsflächen, die das innere gleitflächenstruierte Gefüge des Geschiebemergels deutlich hervortreten lassen. Dabei bilden sich gelegentlich auch Schliffhohlkehlen heraus, die aber nur selten größeren Umfang erreichen, so daß eine den Absturz fördernde Unterhöhlung des Kliffußes nicht stattfindet. Dagegen weisen die durch Auskolkung lockerer Bodenarten (Sand und Schluff) und einzelner Geschiebe und Findlinge entstandenen Höhlungen, die man als „Schwapplöcher“ bezeichnet, auf eine nennenswerte morphologische Folgeerscheinung der Brandung hin. Sie können beträchtliche Ausmaße erreichen, indem sie oft mehrere Meter tief in das Steilufer hineinragen und dabei zum Nachbrechen der hangenden Schichten führen. Trotzdem kann aber gesagt werden, daß der unmittelbare Einfluß einer Wasserstandserhöhung in der Lübecker Bucht sich in der Hauptsache auf die Forträumung des abgestürzten Bodens beschränkt und somit die Voraussetzungen für ein weiteres Nachbrechen neuer Massen schafft, während der unmittelbare Einfluß auf den Kliffrückgang nur gering zu sein scheint.

Eine besondere Bedeutung kommt der Brandungswirkung am submarinen Grund zu. Wie entsprechende Versuche gezeigt haben (Abb. 11), wird ein vom Wasser bedeckter Geschiebemergel mit einem Wassergehalt etwas unterhalb der Plastizitätsgrenze in seiner oberflächennahen Schicht unter Volumenzunahme völlig durchtränkt und durchweicht. Eine Bestätigung dieses Versuchsvorganges zeigen die Beobachtungen, die davon berichten, daß die aus dem Geschiebemergel bestehende Abrasionsfläche eine schmierige, schlammige Oberfläche aufweist. Sobald durch stürmische Nordostwinde das Wasser in stärkere Bewegung gerät, wird die oberflächlich erweichte Schicht der Abrasionsfläche angegriffen, aufgearbeitet und fortgeführt. Durch die Aufwirbelung der feinsten Tonteilchen nimmt das Wasser eine braungraue Färbung an, die sich als mehr oder weniger breites Band vor dem Ufer kenntlich macht. Das Ergebnis dieser

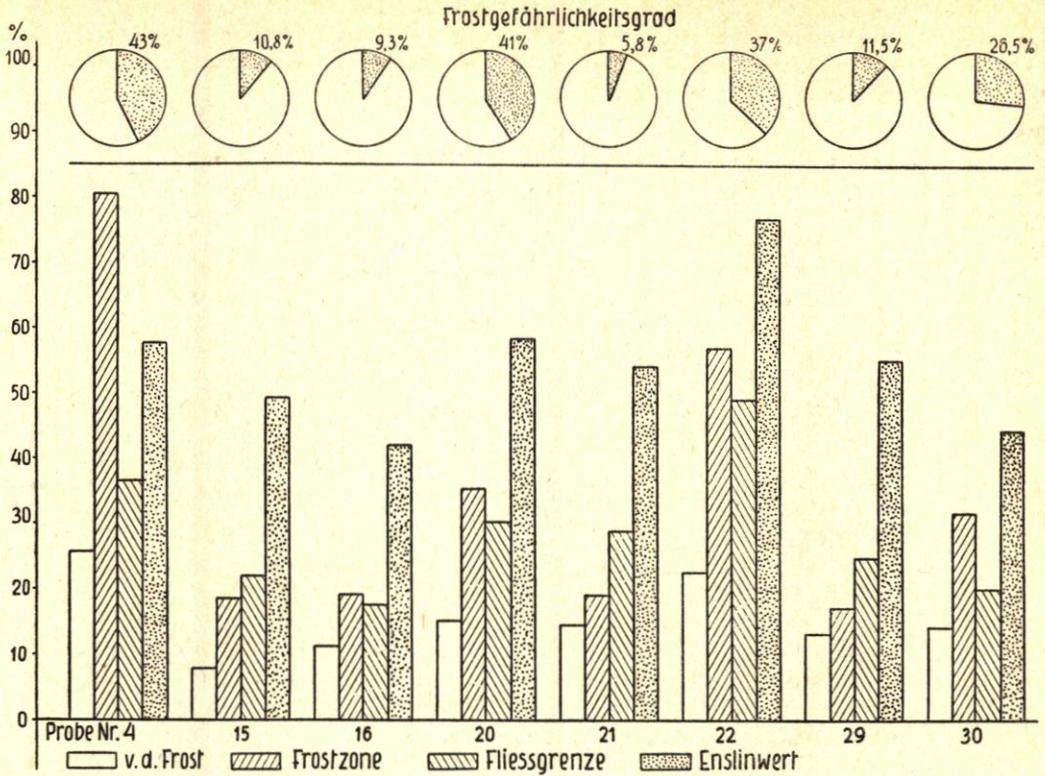


Abb. 8. Ergebnisse der Gefrierversuche mit ungestörten Bodenproben (Nr. 4, 15, 16, 20, 21, 22, 29, 30). Gegenüberstellung des natürlichen Wassergehaltes (vor dem Gefrieren) und des durch Frostwirkung erhöhten Wassergehaltes (nach dem Gefrieren) mit dem Wassergehalt an der Fließgrenze und dem Enslinwert.

$$\text{Frostgefährlichkeitsgrad } F \% = \frac{\text{Frosthebungsbeitrag} \cdot 100}{\text{Frosteinbringungsbeitrag}}$$

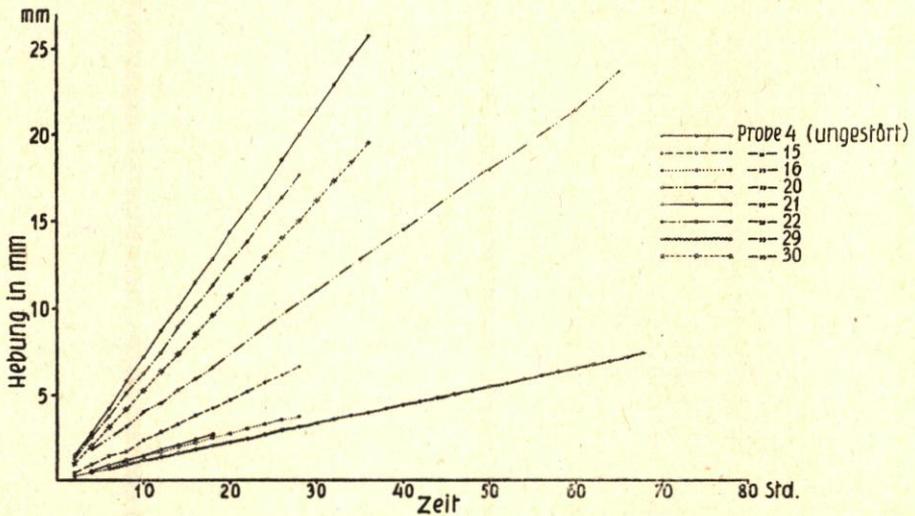


Abb. 9. Frosthebungsverlauf ungestörter Bodenproben aus dem Brodtener Ufer (Nr. 4, 15, 16, 20, 21, 22, 29, 30)

submarinen Abrasion ist mithin die Freilegung neuer Oberflächen des Geschiebemergels, die damit erneut der Wasseraufnahme zugänglich und der Erweichung ausgesetzt sind. Mit der erfolgten Tieferlegung des Unterwasserstrandes geht ein Vorrücken der Mittelwasserstrandlinie gegen das Ufer im gleichen Maße einher.

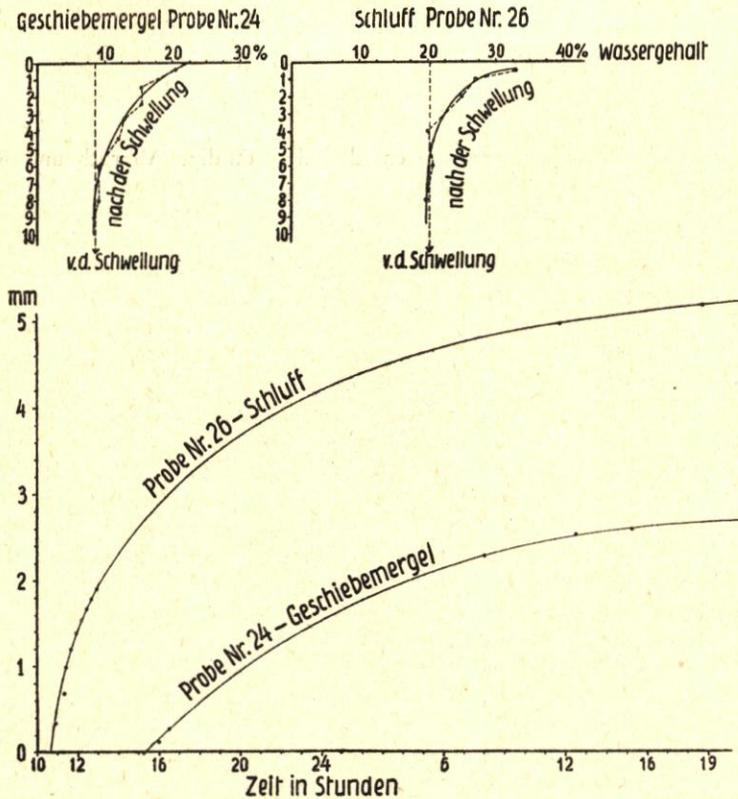


Abb. 11. Zeitlicher Verlauf der Schwellung des von Wasser überfluteten Geschiebemergels und Schluffes (unten) sowie Änderung des Wassergehaltes innerhalb der Bodenproben von Zentimeter zu Zentimeter (oben)

Neben der flächenhaften, tangentialen Abtragung des unmittelbar an die Uferlinie sich anschließenden Teiles des Meeres kommt es in der ufernahen Zone durch eine stärkere Erosionswirkung der Brandung, unterstützt durch die hydrostatische Druckwirkung in den spaltenreichen Schwächezonen des schollenartig zerstückelten Geschiebemergels, zur Herausbildung örtlich begrenzter submariner Kliffs von etwa einem halben Meter Höhe. Durch die Sogwirkung der rückströmenden Brandungswelle wird dabei das Kluftsystem des Geschiebemergels morphologisch besonders scharf markiert und hervorgehoben.

#### e) Der biologische Einfluß

Der biologische Einfluß auf die Abtragung des Steilufers ist nur gering. Es sei jedoch in diesem Zusammenhang auf die Mitwirkung des Menschen hingewiesen, soweit sich diese auf die Steinfischerei und Steinentnahme bezieht. Während die am Strand und in der ufernahen Zone vorkommenden großen Gesteinsblöcke als Wellenbrecher wirken und damit dem Steilufer einen gewissen Schutz bieten, bilden die auf der submarinen Abrasionsfläche liegenden Steine einen schützenden Panzer gegen die Erweichung und Abtragung des Geschiebemergels, womit die tangential Erosion der Plateauoberfläche weitgehend verhindert, zumindest aber

beträchtlich verzögert wird. Andererseits sei aber erwähnt, daß die in der Strandzone vorkommenden kleineren Geschiebe und Gerölle sehr leicht von der Brandung erfaßt werden und dabei, gegen die Uferwand geschleudert, aktiv die Abrasionswirkung der Brandung unterstützen und erhöhen.

#### 6. Zusammenfassung und Stellungnahme zu den geplanten Schutzmaßnahmen

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, daß der ständige Abbruch und Rückgang des Brodtener Ufers nicht als eine unmittelbare Folge der physikalischen Eigenschaften des Bodensmaterials anzusehen ist. Die Bestimmungen der Scherfestigkeit lassen erkennen, daß das Steilufer unter den gegebenen Bedingungen mit einem hohen Grad an Sicherheit als standfest angesprochen werden kann, trotz der geringen plastischen Eigenschaften und der verhältnismäßig hohen Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens. Von einem „inneren Zerfall“ der Küste, wie es die Hypothese von WASMUND (8) fordert, kann im Falle des Brodtener Ufers nicht gesprochen werden. Erst wenn durch wirksame Faktoren, zu denen insbesondere die örtlichen geologischen und hydrologischen Gegebenheiten gehören, die physikalischen Eigenschaften des Bodens sich ändern, sind die Voraussetzungen für den Steiluferrückgang erfüllt. Dabei ist durch die Schub- und Druckwirkung des vorrückenden Inlandeises auf den Untergrund ein stark zerstückelter Grundmoränenkomplex geschaffen worden, der Kluft-, Scher- und Absonderungsflächen aufweist, die mit etwa 50 Grad bis 80 Grad zur See hin einfallen. Dem Oberflächen-, Sicker- und Grundwasser sind damit Wege gewiesen, die zu Ausspülungen, Unterhöhungen, hydrostatischen Druckwirkungen und zu einer Verminderung der Kohäsion führen. Hinzu kommen die jahreszeitlich bedingten Erscheinungen des Spalten- und Bodenfrostes, die zu einer erheblichen Auflockerung des Bodengefüges und damit zu einem Abgleiten des Bodens Veranlassung geben. Die abgeflossenen und abgestürzten Bodenmassen werden durch den Küstenversatzstrom mehr oder weniger rasch fortgeräumt. Voraussetzungen hierfür sind sowohl die stark exponierte Lage des Brodtener Ufers innerhalb der Lübecker Bucht als auch durch Nordostwinde bedingte Wasserstandserhöhungen. Dabei kommt der Brandungswirkung am submarinen Grund erhöhte Bedeutung zu, durch die die Mittelwasserstrandlinie gegen das Ufer vorrückt. Diese Erscheinung ist für den Bestand des zum Schutz des Brodtener Ufers geplanten Bauwerks von ausschlaggebender Bedeutung. Auf Grund der vorliegenden Bohrungen kann damit gerechnet werden, daß auf der gesamten Uferstrecke der Baugrund aus Geschiebemergel besteht. Durch seinen niedrigen, nahe der Plastizitätsgrenze liegenden Wassergehalt besitzt er eine sehr feste Konsistenz, so daß der Baugrund als sehr gut anzusehen ist. Bei einer Belastung des Untergrundes durch eine Uferschutzmauer von etwa 2,0 m Breite und 3,0 m Höhe wäre bei einem geschätzten E-Wert von 400 bis 600 mit Setzungen von 3 bis 5 mm zu rechnen, die bereits während der Errichtung des Bauwerks auftreten. Somit wären gegen die Errichtung einer massiven Uferwand grundsätzlich keine Bedenken zu erheben. Es ist jedoch zu berücksichtigen, daß infolge der submarinen Abrasion der Brandung die vorrückende Mittelwasserstrandlinie den Fuß der Ufermauer im Laufe der Zeit bloßlegt, auskolkt und schließlich zum Einsturz bringt. Die gleichen Bedenken sind gegen die Errichtung eines aus flachgeböschtem Deckwerk mit wasserseitiger Spundwand bestehenden Uferwerks zu erheben, bei dem die Spundwände durch die Tieferlegung der Schorre in den Bereich der Unterspülung gelangen. In welchem Zeitraum diese Zerstörungen eintreten können, läßt sich jedoch nicht sagen, da genaue Beobachtungen über das Ausmaß der Brandungswirkungen am submarinen Grund fehlen.

### Schriftenverzeichnis

1. CASAGRANDE und FADUM: Notes on Soil Testing for Engineering Purposes. — Nr. 8, Graduate School of Engineering Harvard University 1940, übersetzt von P. Siedek, Selbstverlag der Bundesanstalt für Wasser-, Erd- und Grundbau, Hamburg 1949.
2. ENDELL, K.: Die Quellfähigkeit der Tone im Baugrund und ihre bautechnische Bedeutung. Die Bautechnik, H. 19, Berlin 1941.
3. GROSCHOFF, P.: Physikalische Bedingungen des Kliffrückganges an der Kieler und Lübecker Bucht. — Kieler Meeresforschungen 1, S. 335—342, Kiel 1936.
4. SCHULTZE, E. und MUHS, H.: Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten, Springer-Verlag, Berlin 1950.
5. TAYLOR, D. W.: Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley & Sons, II. Auflage, S. 459, New York 1949.
6. TERZAGHI, K. und PECK, R. B.: Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons, Inc., New York 1948.
7. TERZAGHI, K.: Theoretical Soil Mechanics, II. Auflage, John Wiley & Sons, Inc., New York 1944.
8. WASMUND, E.: Chemisch-physikalische Daten der Alttertiärtonne um Fehmarn und der ‚innere Küstenzerfall‘. Kieler Meeresforschungen 1, S. 243—263, Kiel 1936.

## Pollenanalytische Untersuchungen an der inneren Lübecker Bucht

Von Heinz Schmitz

Der Zweck der vorliegenden pollenanalytischen Untersuchungen war es, Transgressionskontakte und damit ehemalige Strandlinien in den Ablauf der postglazialen Waldgeschichte einzuordnen, um auf diese Weise nicht nur ihr relatives Alter festzulegen, sondern auch einen Anhaltspunkt für ihre absolute Zeitstellung zu erhalten. Dadurch sollte ein Einblick in die Entwicklungsgeschichte des heutigen Ostseestrandes an der inneren Lübecker Bucht gewonnen und für das Brodtener Ufer im speziellen die Frage beantwortet werden, seit wann es im Abbruch gelegen hat.

Die bearbeiteten Bohrungen, die mit Ausnahme der Handbohrungen jeweils bis zum Diluvium niedergebracht wurden, liegen vom Priwall im Südosten bis zu den Haffwiesen bei Haffkrug im Norden. Außerdem wurde ein handgebohrtes Profil aus dem Kurauer Moor, rund 10 km landeinwärts, 12 km nördlich Lübeck, zum Vergleich herangezogen. Die Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen — insbesondere fehlt noch das Nordufer des Hemmelsdorfer Sees —, aber doch bereits soweit fortgeschritten, daß eine erste Mitteilung der Ergebnisse gerechtfertigt ist.

Um einen bequemeren Vergleich der einzelnen Abschnitte der verschiedenen Profile zu erreichen und eine zeitliche Einordnung zu erleichtern, sind die Diagramme in Pollenzonen eingeteilt. Unter Berücksichtigung der bisher aus Schleswig-Holstein vorliegenden pollenanalytischen Literatur (zu ersehen bei FIRBAS [1]) hat sich gezeigt, daß es möglich ist, die von SCHÜTRUMPF (6) in Holstein für die spätglazialen und älteren postglazialen Schichten aufgestellte und von OVERBECK und SCHNEIDER (4) in Niedersachsen bis zur Gegenwart ausgebauten Zoneneinteilung ohne wesentliche Änderungen für ganz Schleswig-Holstein zu übernehmen.

Spätglaziale Zeiten sind von dem vorliegenden Material noch nicht bearbeitet worden, spielen auch für unsere Fragestellung keine Rolle. Die in Betracht kommenden Zonen sind von unten nach oben, so daß mit den ältesten begonnen wird, folgende:

### V. Vorwärmezeit. Präboreal. Birkenzeit.

Herrschaft der Birke mit Beteiligung der Kiefer in wechselnder Menge. Zunächst vereinzeltes Auftreten von Haselpollen (V a), gegen Ende des Abschnitts in geschlossener Kurve (V b), dann auch vereinzelte Eichen- und Ulmen-Pollen.

Diese Zone fällt archäologisch in das ältere Mesolithikum und liegt jedenfalls vor 7000 v. Chr.

### VI. Frühe Wärmezeit. Boreal. Kiefern-Haselzeit. 1. Teil.

Beginn mit der rationellen Pollengrenze der Hasel und der empirischen Pollengrenze<sup>1)</sup> des Eichenmischwaldes.

Teilweise fällt die Zonenanfangsgrenze etwa mit dem Schnittpunkt der fallenden Birkenkurve mit der steigenden Kiefernkurve zusammen, jedoch sind Kurvenschnittpunkte immer viel mehr von rein lokalen Verhältnissen abhängig als Pollengrenzen und daher für die Abgrenzung der Zonen ungeeignet.

Kiefernvorherrschaft mit *Pinus-Maximum*.

Haselvertretung ständig zunehmend.

Zeitstellung: ebenfalls noch älteres Mesolithikum, etwa um 7000 v. Chr.

<sup>1)</sup> Absolute Pollengrenze einer Art: Zeitpunkt des ersten Auftretens des Pollens dieser Holzart.  
Empirische Pollengrenze: Beginn der geschlossenen Kurve.  
Rationelle Pollengrenze: Beginn des Kurvenanstiegs.

## VII. Frühe Wärmezeit. Boreal. Kiefern-Haselzeit. 2. Teil.

Beginn mit dem raschen Anstieg der Haselkurve zum 1. Maximum. Bei bleibender Kieferndominanz unter den Baumarten 1. *Corylus*-Maximum<sup>2)</sup>.

Zunahme des Eichenmischwaldes (EMW), Erscheinen von Erle und Linde, geschlossene Kurven dieser beiden Bäume jedoch erst gegen Ende der Zone.

Zeitstellung: noch älteres Mesolithikum, etwa 6500—5500 v. Chr.

## VIII. Mittlere Wärmezeit. Atlantikum. Eichenmischwald-Haselzeit, Ulmen-Lindenphase.

Beginn mit der rationellen Pollengrenze der Erle, zugleich starker Anstieg des EMW, *Pinus* und *Corylus* fallend.

Zum Teil liegt etwa an der Abschnittsgrenze der Schnittpunkt der fallenden Kiefern- mit der steigenden EMW-Kurve.

Im Eichenmischwald sind Ulme und Linde stark beteiligt. Etwas später in Zone VIII erscheint die Esche in ziemlich geschlossener Kurve, gelangt aber nicht über geringe Prozentwerte hinaus.

Unterteilung in

VIII a mit 2. *Corylus*-Maximum und

VIII b geschieden von Unterabschnitt a durch *Corylus*-Minimum.

Mit Beginn von VIII b Erlenanstieg auf Kosten des EMW.

Innerhalb des EMW Eichen-Zunahme und leichter Rückgang von Ulme und Linde.

In VIII a bereits erstes Auftreten vereinzelter Buchen- und auch Hainbuchen-Pollen, ab VIII b schon kurze Kurven der Buche mit 2 bis 3 v. H., die aber wieder verschwinden. Eine solche Buchen-Kurzkurve liegt um die Unterabschnittsgrenze VIII a/VIII b, eine zweite am Ende der Zone bzw. um die Zonengrenze VIII b/IX.

Zeitstellung: jüngerer Mesolithikum, etwa 5500—3000 v. Chr.

## IX. Späte Wärmezeit. Subboreal. Eichenmischwald-Haselzeit, Eichenphase, 1. Teil.

Beginn mit starkem Abfall von *Ulmus* und *Tilia* im Eichenmischwald.

Zwischen Mitte und Ende dieser Zone liegt die empirische Pollengrenze der Buche. Gegen Ende der Zone Hasel-Maximum.

Zeitstellung: Neolithikum, etwa 3000—1800 v. Chr.

## X. Späte Wärmezeit. Subboreal. Eichenmischwaldzeit, Eichenphase, 2. Teil.

Beginn mit dem Abfall der Haselkurve zu geringen Werten.

Buche noch in sehr kleinen Anteilen.

Zeitstellung: Bronzezeit, etwa 1800—600 v. Chr.

## XI. Nachwärmezeit. Subatlantikum. Buchenzeit.

Beginn mit der empirischen Pollengrenze der Hainbuche und der rationellen Pollengrenze der Buche, wobei die rationelle Buchengrenze teilweise ein wenig später liegt, insbesondere in rasch gewachsenen Sedimenten, teilweise aber auch, vor allem im Nordosten des Landes (Ulsnis und Duvenstedt) etwas früher. Allerdings erreicht hier die Hainbuche sowieso keine geschlossen durchlaufende Kurve.

Der Beginn dieser Zone entspricht der Zeit des „Grenzhorizontes“ nach C. A. WEBER (8), d. h. der Grenze zwischen stärker zersetztem, älterem Hochmoortorf (Schwarztorf) und schwach zersetztem, jüngerem Hochmoortorf (Weißtorf).

<sup>2)</sup> Teilweise ist zur Zeit des 1. *Corylus*-Maximums in Schleswig-Holstein die Kiefer bereits im Abstieg, der Eichenmischwald in stärkerer Zunahme begriffen. Bei einigen Profilen bleibt zu prüfen, wieweit diese Erscheinung durch zu große Probenabstände bedingt ist, so daß bei ihnen vielleicht der eigentliche erste Haselgipfel gar nicht erfaßt ist und *Corylus*-Maximum 1 und 2 zusammenfließen. Im nördlichen Gebiet erfährt aber die Kiefer offenbar tatsächlich einen frühen Rückgang schon während des 1. Hasel-Maximums.

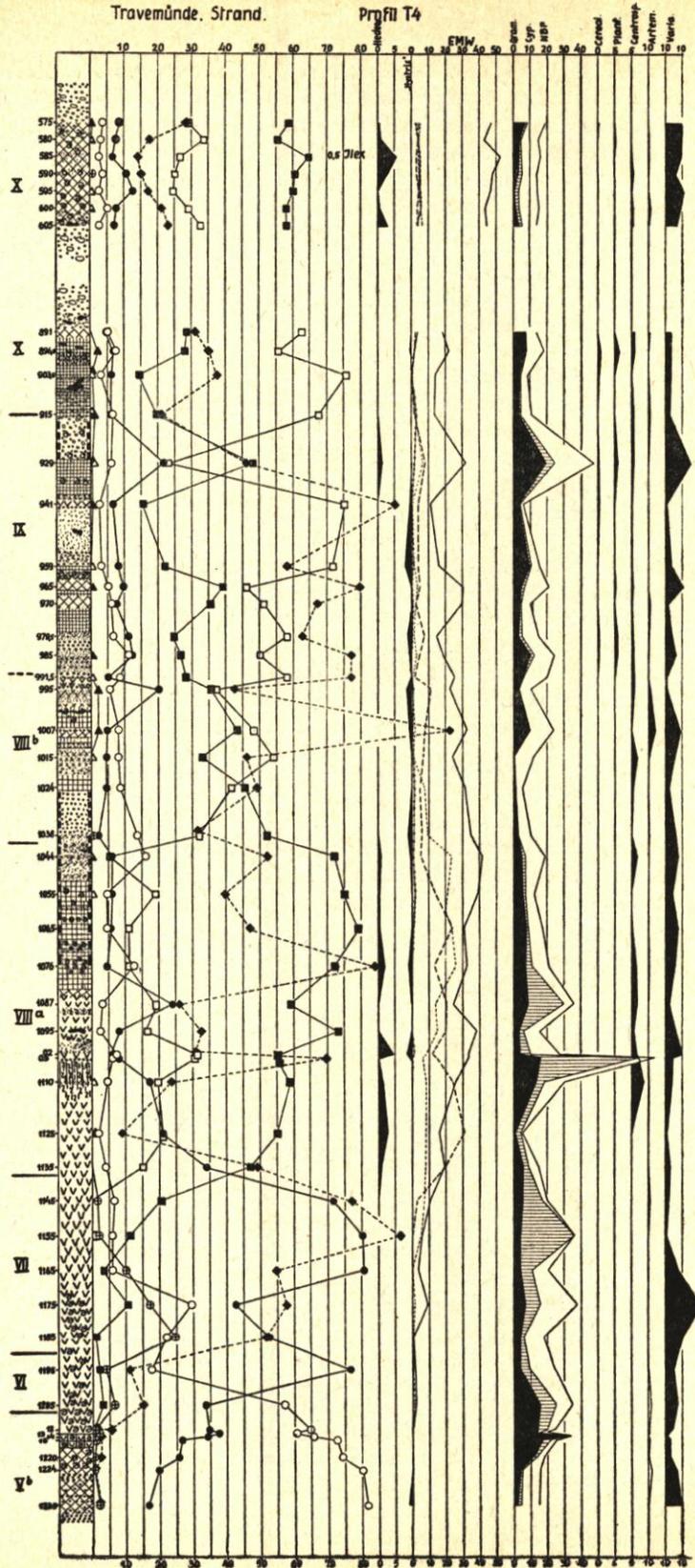


Abb. 1. Pollendiagramm T 4. Travemünde, Strand, etwa in Höhe der Villa Posschl. Meßsichtblatt Travemünde, Nr. 2031. Planzeigerwerte r 26 700 h 82 440. Oberfläche + 0,05 m NN. Transgressionskontakt bei — 10,83 m NN. Buchenkurve insofern nicht charakteristisch, als hier ihre Kurzkurve an der Zonengrenze VIII a/VIII b fehlt (vgl. Legende in Abb. 5, S. 41)

In Zone XI sind zwei Buchengipfel deutlich zu unterscheiden. Die Hainbuchenwerte bleiben ziemlich gering.

Ein näheres Eingehen auf Zone XI liegt außerhalb der derzeitigen Fragestellung und ist an anderer Stelle erfolgt (SCHMITZ [5]).

Es ist klar, daß sich nicht in jedem Falle auf den ersten Blick die Zonengrenzen festlegen lassen. Insbesondere ist die Bestimmung der Zonengrenze IX/X und zum Teil auch VI/VII manchmal nicht einfach, vor allem dann nicht, wenn die Schichten sehr eng zusammengedrängt sind. Es gilt stets, alle Merkmale zu berücksichtigen und gegeneinander abzuwägen, um rein lokale Einflüsse und örtliche Besonderheiten nach Möglichkeit auszuschalten.

Als Beispiel für die Waldgeschichte und die Zoneneinteilung ist das Diagramm T 4 von Travemünde, Strand, in Abbildung 1<sup>3)</sup> wiedergegeben und als Fortsetzung für die jüngsten Zonen das Diagramm Sch 11 von Scharbeutz in Abbildung 2. Es reicht aber nur bis zum ersten Buchengipfel einschließlich, die spätere Zeit ist noch nicht mit eingetragen.

Eine Übersicht der bearbeiteten Profile gibt Abbildung 4.

Soweit ein Nivellement vorliegt, sind die Profile in der Zeichnung auf NN bezogen, die Profile XI und VII sind entsprechend ihrer ungefähren Höhenlage eingeordnet, das Vergleichsprofil X aus dem Kurauer Moor ist bei rund 14 m Höhenlage über NN mit seiner Oberfläche in die NN-Linie eingetragen. In der Abbildung sind die Pollenzonen, soweit bisher untersucht, angegeben und ihre Grenzen durch gestrichelte Linien verbunden.

Eine Zusammenstellung der Tiefenlage der Transgressionspunkte und ihrer angenommenen Zeitstellung ergibt folgendes Bild (Abb. 4):

|               |           |                                  |
|---------------|-----------|----------------------------------|
| Profil P 1    | — 20,38 m | um 5300 v. Chr. <sup>4)</sup>    |
| Profil K 10   | — 13,89 m | um 4700 v. Chr.                  |
| Profil T 4    | — 10,83 m | um 4500 v. Chr.                  |
| Profil T 3    | — 8,94 m  | um 4500 v. Chr.                  |
| Profil Sch 11 | — 8,09 m  | um 4000 v. Chr.                  |
| Profil S 12   | — 7,95 m  | nicht feststellbar <sup>5)</sup> |

Es besteht also keine unbedingte Parallelität zwischen Tiefenlage und Zeitpunkt der Transgression. Es hängt jeweils von den örtlichen Bedingungen, die wir nicht kennen, ab, ob ein Profilpunkt sogleich transgrediert wird, wenn der Meeresspiegel die gleiche Höhenlage wie der Profilpunkt erreicht hat, oder ob die Transgression erst später erfolgt, wenn nämlich die Überflutung durch eine zwischengelagerte ältere Geländewelle oder einen Strandwall noch zurückgehalten wird. Wir haben es nicht mit einer Flachküste zu tun, an der die ansteigende See eine allmähliche und gleichmäßige Transgression hervorrufen kann, sondern mit einer Küste mit beweglichen Geländeformen, die schon auf kurze Entfernung erhebliche Unterschiede in der Transgressionsmöglichkeit bedingen können. Das bedeutet aber, daß wir die Transgressionstiefe an einem gegebenen Profil noch nicht ohne weiteres mit der Höhe des Meeresspiegels zu der betreffenden Zeit gleichsetzen dürfen. Es ist einerseits möglich, daß die See nur mit wenigen Zentimetern oder Dezimetern Wasserstand über die Transgressionsstelle eingebrochen ist, sie kann in einem anderen Falle aber auch gleich mit einigen Metern Wasserhöhe die Überflutung vollzogen haben. Solange wir die genauen Verhältnisse an jedem Transgressionskontakt nicht kennen, können wir hierüber nichts Sicheres feststellen. Erst die Untersuchung möglichst zahlreicher Kontakte auf engem Raum wird es uns erlauben, zuverlässigere Aussagen über die Beziehung der Tiefenlage des Kontaktes zur jeweiligen Höhe des Meeresspiegels zu machen.

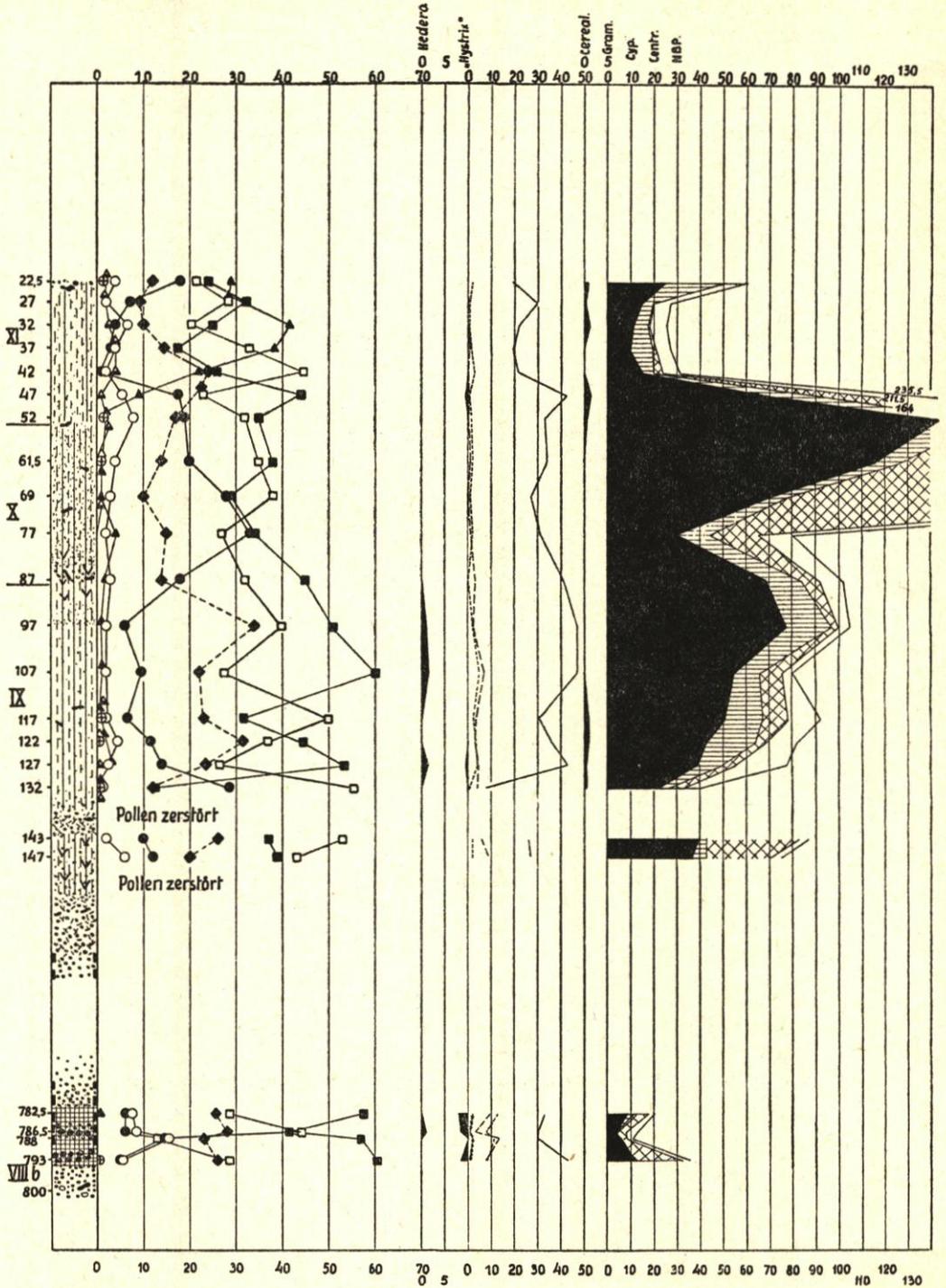
<sup>3)</sup> Legende zu den Darstellungen in Abbildung 5.

<sup>4)</sup> Die Zahlen sollen selbstverständlich keine Festlegung auf die Jahrhunderte sein. 5300 v. Chr. heißt also nur: kurz nach Beginn der mittleren Wärmezeit, deren Anfang auf 5500 v. Chr. angesetzt wird, und die Datierung der Transgression am Kühlbroketal auf 4700 v. Chr. bedeutet wieder nur: kurz vor der Transgression bei Travemünde, die auf ungefähr 4500 v. Chr. eingeschätzt wird.

<sup>5)</sup> Bei Profil S 12 wurde ein Eichenwaldboden transgrediert, aber keine organogenen Ablagerungen, daher ist eine Pollenanalyse nicht möglich.

Scharbeutz

Profil Sch 11



Wie verschieden die örtlichen Verhältnisse in nächster Nachbarschaft sein können, zeigt deutlich der Vergleich der beiden Travemünder Profile T 4 und T 3, von denen T 4 unmittelbar an der heutigen Wasserlinie und T 3 nur rund 90 m weiter landeinwärts unter dem Strandwall liegt. Trotz fast 2 m Niveauunterschied der Transgressionskontakte ist die Überflutung zur gleichen Zeit erfolgt. Eine irgendwie wesentliche Aufarbeitung oder Abtragung des liegenden Torfes hat bei der Transgression offenbar nicht stattgefunden.

In beiden Profilen sind über dem Geschiebemergel Sedimente eines Süßwasserbeckens festgestellt, bei dem zuletzt Kalkgytja unmittelbar von Bruchwaldforf, der in den untersten Schichten zur Zeit

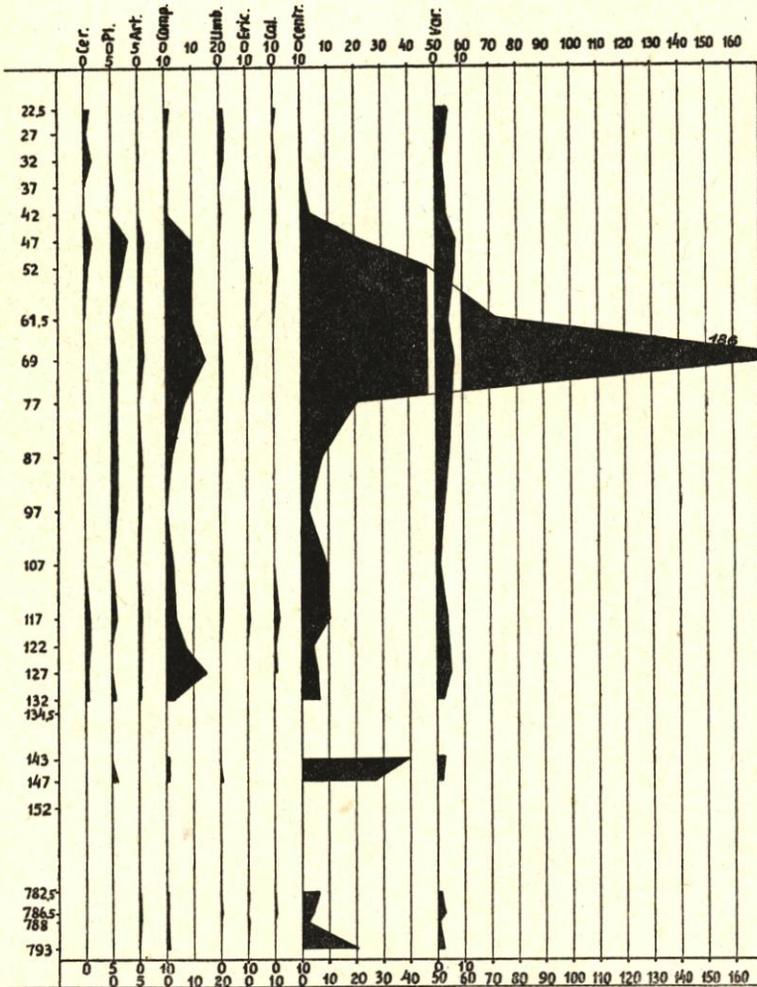


Abb. 3. Diagramm der Nichtbaumpollen von Profil Sch 11. Entsprechend Abbildung 2 (S. 38)

Abb. 2 (S. 38). Pollendiagramm Sch 11. Haffwiesen bei Scharbeutz, Nordende von Scharbeutz, etwa 250 m hinter dem Wilhelminenbad in Richtung Haffkrug, ungefähr 30 m westlich der Landstraße. Meßtischblatt Süsel, Nr. 1930. Planzeigerwerte r 18 440 h 89 630. Oberfläche + 0,13 m NN. Marine Sedimente (Spülsaum) ab - 8,09 m NN. Das wiedergegebene Profil reicht nur bis zum 1. Buchengipfel einschließlich.

seiner Entstehung noch ein sehr nasser Bruchwald mit viel offenen Wasserlachen gewesen ist, überlagert wird. Profil T 3 erweist sich durch die höhere Lage der Geschiebemergeloberkante (2,74 m höher als bei T 4), die geringere Dicke der Süßwassersedimente und die größere Mächtigkeit des Bruchwaldtorfes als weiter auf dem alten Uferand gelegen aus. Das ehemalige Süßwasserbecken muß aber auch seewärts durch eine Geländewelle abgeschlossen gewesen sein.

Wenn nun das seewärtige Ostufer des Gewässers nur 2 m höher gewesen ist als der Transgressionshorizont bei T 4, so ist es ohne weiteres verständlich, daß bei T 4 und T 3 die Überflutung zur gleichen Zeit stattgefunden hat, da sie ja erst einsetzen konnte, wenn die weiter außen gelegene Barriere überschwemmt wurde, d. h. also, wenn der Wasserspiegel

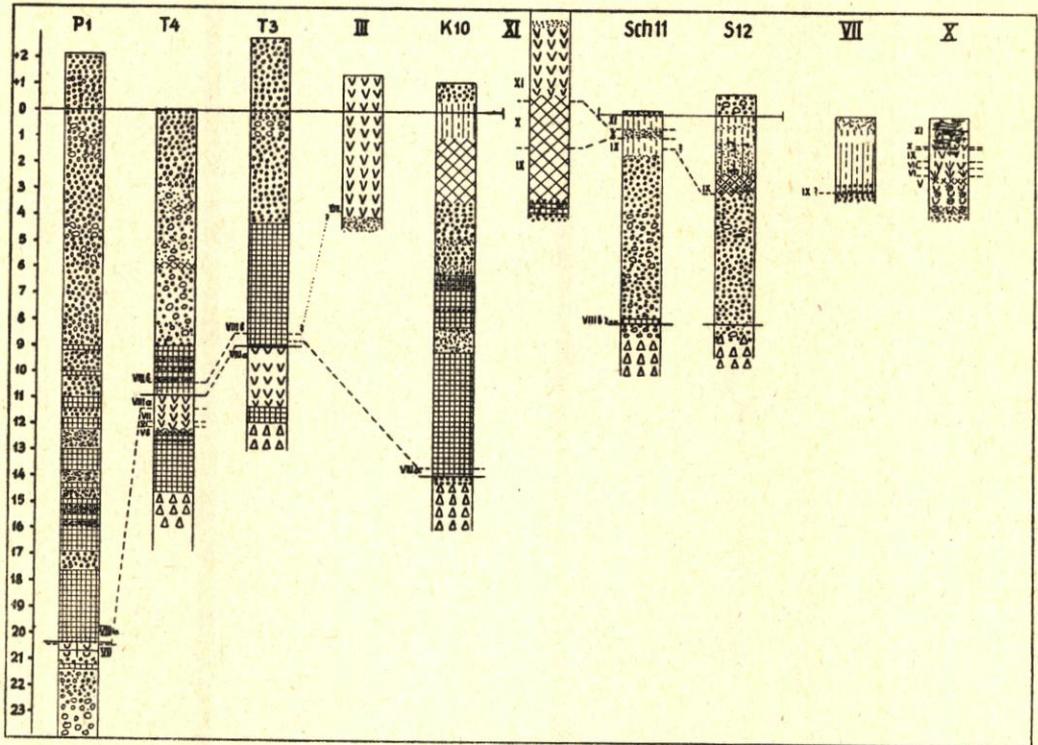


Abb. 4. Zusammenstellung der bisher ganz oder teilweise untersuchten Profile. Die Pollenzonen, soweit bis jetzt festgestellt, sind eingetragen und die einander entsprechenden Horizonte durch gestrichelte Linien verbunden. Die Transgressionskontakte sind durch eine ausgezogene Linie durch das Profil hindurch angegeben. Die Stratigraphie der Profile ist vereinfacht gezeichnet

mindestens 2 m über dem Niveau von T 4 stand. Die schon ab 30 cm vor dem Transgressionskontakt zeitweilig vorhandenen dünnen Schlicklagen in Profil T 4 sind die Auswirkungen von Sturmfluten, die bereits das Ostufer überspült haben.

In genau der gleichen Weise wie hier ein Seeufer kann auch eine andere Geländeerhöhung oder ein weiter draußen gelegener Strandwall wirken. Wird eine solche Barriere im Laufe der Transgression überflutet oder durchbrochen, so kann es in ihrem Hinterland durchaus zu einem plötzlichen Wasseranstieg von mehreren Metern kommen. Diese Überlegung zeigt aber auch, daß sich aus einem Transgressionspunkt immer nur auf die Zeit schließen läßt, zu der an dieser Stelle die Transgression erfolgt ist, nicht aber darauf, wann die Tiefenlinie dieses Transgressionskontaktes in einem weiteren Gebiet überschwemmt worden ist. Die ört-

lichen Verhältnisse sind sicher nicht auf einer längeren Küstenstrecke für die einzelne Tiefenlinie gleich und können daher von einem Punkt aus nicht verallgemeinert werden.

Ähnlich liegen die Dinge bei der zeitlichen Festlegung einer Strandwallbildung. Hinzu kommt, daß sich die Rückseite eines Strandwalles noch lange Zeit mit oder ohne Anstieg der Wasserhöhe in das Hinterland vorschieben kann und das insbesondere bei Meeresanstieg und Erhöhung des Strandwalles tun wird.

Sch 11 und S 12 sind Profile auf dem landseitigen Abfall des Strandwalles, können also nur ein Teilstück der Aufschüttung bringen. Dasselbe gilt in noch höherem Maße für K 10.

Bei S 13 an der Bckmündung bei Haffkrug ist es genau wie bei T 4 möglich, daß der Scheitelpunkt des Strandwalles etwas weiter landeinwärts gelegen hat und nicht mehr mit getroffen worden ist. Trotzdem läßt sich sagen, daß die Aufschüttung eines Strandwalles von fast

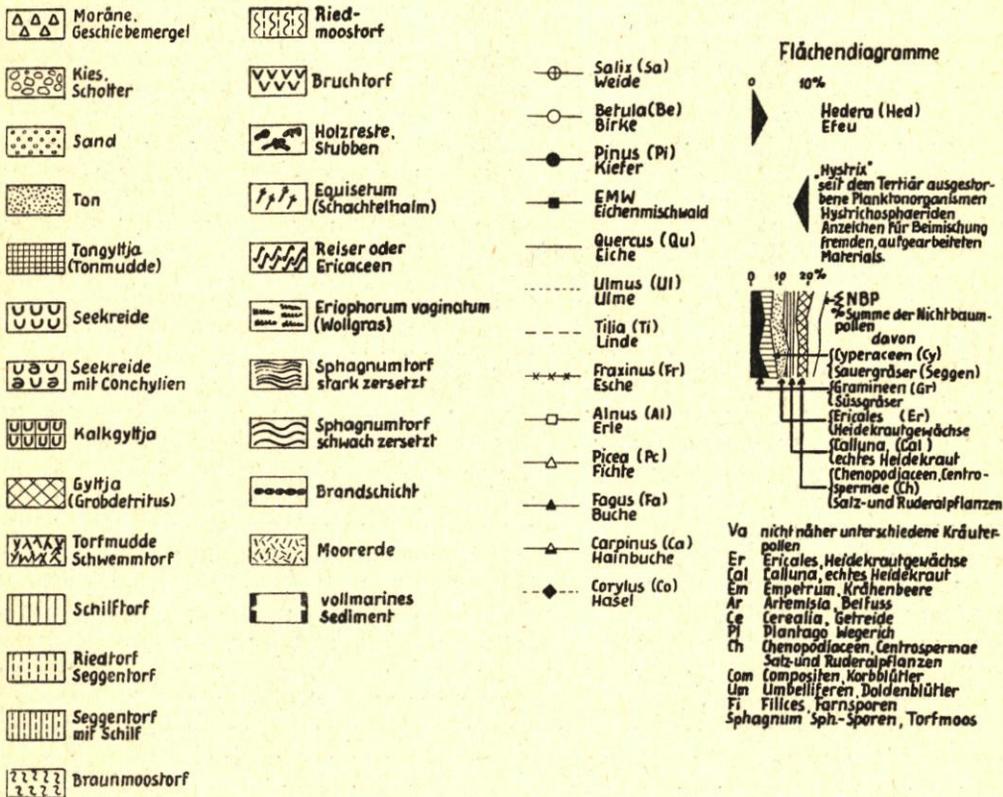


Abb. 5. Legende zu den Abbildungen 1 bis 4

9 m Höhe bei gleichbleibendem Wasserstand nicht zu erklären ist. Es muß während der Bildungszeit ein weiterer bedeutender Wasseranstieg vor sich gegangen sein. Dasselbe gilt auch für die Sandauflagerung am Priwall. Aus der Datierung der Strandwallbasis bei Profil T 4 läßt sich also schließen, daß auch nach 2000 v. Chr. noch eine erhebliche Niveauänderung des Meeres erfolgt ist.

Über das Ende der Strandwallbildung, die die Haffwiesen zwischen Scharbeutz und Haffkrug abschließt, lassen sich aus den dortigen Bohrungen Aussagen machen. Die Vermoorung hinter dem Strandwall hat sicherlich sehr schnell nach Abschürfung des Beckens der heutigen Haffwiesen begonnen, da ja landwärts des Strandwalles rasch ein Stau des Grund- und Oberflächenwassers eintreten mußte. In Profil Sch 11 und S 12 setzt die Vermoorung bzw. Verlandung zur gleichen Zeit, zwischen 3000 und 2500 v. Chr., ein. Zu dieser Zeit muß

also der Strandwall bereits soweit ausgebildet gewesen sein, daß er das Haffwiesengebiet abschloß, ohne daß selbstverständlich schon die heutige Höhe erreicht gewesen sein müßte und eine weitere Erhöhung und Verbreiterung damit ausgeschlossen wäre. Profil VII, etwas weiter vom Strandwallscheitel entfernt zwischen Sch 11 und S 12, weist allerdings den Torfbeginn erst um etwa 2000 v. Chr. auf, jedoch liegt der Torf auf einem späteren Spülsaum oder einer rückwärtigen Verbreiterung des Strandwalles.

In dem Flachmoortorf des oberen Profils Sch 11 sind an einigen Stellen Auswirkungen von Sturmfluten festzustellen: ein Spülsaum zwischen 142 bis 136 cm, eine dünne Tonschicht bei 97 bis 96,5 cm und schließlich ein starker toniger, fast muddeartig zersetzter Torf von etwas hellerer Farbe mit leicht violetter Schimmer in frischem Zustand zwischen 83 und 52 cm.

Der zuletzt genannte, sehr tonige Torfabschnitt, der fast genau der Pollenzone X entspricht, ist offensichtlich während einer lange Zeit anhaltenden Übertutung mit folgendem Brackwasserstadium gebildet worden. Wie das Diagramm der NBP (Abb. 3) deutlich zeigt, sind bald nach der Überflutung Salzwiesen mit massenhaft Salzpflanzen aus der Familie der Chenopodiaceen entstanden, die allmählich durch zunehmende Aussüßung wieder zurückgehen und schließlich ganz verschwinden. Der Erhaltungszustand der Pollen in diesem Teile des Profils ist schlecht, wie schon aus der sehr überhöhten Kurve des widerstandsfähigeren Kiefernpollens hervorgeht.

Wir können nun aber nicht die Flutmarken als Anzeiger des jeweiligen Standes des Meeresspiegels auswerten. Wenn sie auch noch, da unterhalb des heutigen Ostseespiegels liegend, in die Zeit des Meeresspiegelanstiegs fallen, so können wir doch nicht entscheiden, ob die Überflutung infolge Überlaufens über den Strandwall oder aber, was wahrscheinlicher ist, infolge Durchbrechens des Strandwalls bei einer großen Sturmflut geschehen ist. Wir können nur feststellen, daß sich ab 50 cm unter NN keine Merkmale einer Überschwemmung mehr finden bis — 5 cm NN, von wo ab sich Sand und Kulturboden bis zur heutigen Oberfläche auf den Torf auflagert, offenbar als rückwärtige Verbreiterung des Strandwalls. Nach der Centrospermenkurve zu urteilen waren die Salzwiesen etwa um die Zeit Chr. Geb. wieder verschwunden, d. h., bis dahin war die Aussüßung erfolgt.

Das Ende der Transgression läßt sich aus den Profilen nicht bestimmen, ebensowenig, ob die Transgression gleichmäßig verlaufen ist oder ob etwa nach der letzten Strandwallbildung ein zeitweiliger Stillstand oder gar eine vorübergehende Regression eingetreten ist. Im Gegensatz zu TAPPERS Ansicht ([7], S. 164) dürfen wir den Beginn der Vermoorung der hinter dem Strandwall liegenden Niederung nicht ohne weiteres als den Zeitpunkt der Erreichung des höchsten Wasserstandes und damit als Ende der Transgression ansehen. Wir wissen nicht, ob nicht außerhalb des Strandwalls ein weiteres Ansteigen des Meeresspiegels erfolgt ist, das sich in der abgeschlossenen Senke nicht unmittelbar bemerkbar machen konnte. Die Mächtigkeit des Seggentorfes weist schon auf einen Anstieg des Grundwassers hin, da es sich nicht um eine Verlandung einer aufgestauten Wasserfläche handelt. Die späteren Überflutungen könnten sehr wohl auch mit einem Anstieg der See zusammenhängen, indem bei einem höheren Wasserniveau Sturmfluten natürlich leichter katastrophale Folgen für das Hinterland zeitigen. Wenn wir also auch keine feste Entscheidung fällen können, wann der Höchststand der Transgression erreicht war, dürfen wir jedenfalls nicht folgern, daß mit Beginn der Vermoorung das Ende der Transgression festgelegt sei.

TAPPER nimmt etwa 2000 v. Chr. als das Ende der Strandverschiebung an und läßt seitdem die heutige Küstenlinie mit dem gleichen Meeresspiegel bestehen. Mir scheint gerade aus einigen seiner Profile hervorzugehen, daß noch nach 2000 v. Chr. ein Wasseranstieg stattgefunden hat. Bei seinen Diagrammen Dietrichsdorf-Land und Holnis-Drei, also der inneren Kieler Förde und der Flensburger Förde, fallen die Kontakte in die Zeit der Salzwiesen bei Scharbeutz, während die Transgression bei Dannau am Nordwestende des Oldenburger Grabens zeitlich etwa am Schluß des Salzwiesenstadiums bei Scharbeutz liegt<sup>9)</sup>. Auch die Befunde bei den Ausgrabungen in Alt-Lübeck (NEUGEBAUER [3]) deuten auf eine positive Strandverschiebung noch in jüngster Zeit hin.

Erst die weitere Untersuchung möglichst zahlreicher Transgressionskontakte kann uns über Ende oder Anhalten der Transgression bis in historische Zeiten Aufklärung verschaffen

<sup>9)</sup> Bei MIKKELSEN (2) findet sich bereits eine gleichsinnige Kritik der TAPPERSCHEN Arbeit.

und uns dann auch erlauben, den zeitlichen Verlauf der Transgression kurvenmäßig darzustellen.

Aus den weiter landeinwärts gelegenen Bohrungen ist in Profil III vom Travemünder Kurpark ein Grundwasseranstieg um etwa 5 m, in Profil XI aus dem oberen Kühlbroktal ein solcher von 5 bis 6 m abzulesen. Daß dieser Grundwasseranstieg bei Travemünde einige Zeit früher einsetzt als im Kühlbroktal, ist aus der verschiedenen Höhenlage leicht verständlich.

Speziell für das Brodtener Ufer läßt sich folgendes sagen:

Die erste festgestellte Transgression ist am Priwall etwa um 5300 v. Chr. auf — 20,38 m NN erfolgt. Es handelt sich bei dieser ersten Überflutung wohl im wesentlichen um den alten Travelauf und dessen nähere Umgebung. Ob und wie weit dabei bereits die Südostseite des alten Brodtener Kliffs betroffen worden ist, läßt sich an Hand der bisherigen Bohrungen noch nicht beurteilen. Der heutige Travemünder Strand ist auf mindestens 9 m Tiefe etwa um 4500 v. Chr. von der See erreicht worden, spätestens seit dieser Zeit, wahrscheinlich aber weiter seawärts schon früher, hat das Brodtener Kliff auf der Travemünder Seite in seiner ganzen Ausdehnung im Abbruch gestanden. Auf der Nordwestseite des Brodtener Ufers, am Ausgang des Kühlbroktales, aber fast 100 m hinter dem heutigen Strandwall, hat die Transgression auf 13,89 m Tiefe etwa um 4700 v. Chr. begonnen. Seit rund 4700 v. Chr. spätestens hat also das Brodtener Kliff auch auf seiner ganzen Nordwestseite im Abbruch gelegen.

#### Zusammenfassung

Die Zonengliederung der niedersächsischen Pollendiagramme läßt sich auf Schleswig-Holstein übertragen. Die Zonen und ihre Abgrenzung sind auf Seite 34/35 beschrieben.

Eine Zusammenstellung der Transgressionskontakte und ihrer Datierung ist auf Seite 37 gegeben.

Ein einzelnes Transgressionsprofil gestattet nur eine rein lokale Aussage, aber nicht eine Verallgemeinerung auf die gesamte Tiefenlinie. Auch kann Transgressionstiefe und damaliger Meeresspiegel nicht ohne weiteres gleichgesetzt werden. Für eine Datierung der Überflutung der einzelnen Tiefenlinien ist die Untersuchung möglichst zahlreicher Transgressionsstellen erforderlich.

Die Anlage des Strandwalls zwischen Scharbeutz und Haffkrug hat früher begonnen als diejenige bei Travemünde. Der Strandwall zwischen Scharbeutz und Haffkrug hatte zwischen 3000—2500 v. Chr. die Senke der heutigen Haffwiesen abgeschlossen.

Die Aufschüttung der Strandwälle bei Travemünde und vor den Haffwiesen und auch der Priwallnehrung war nur möglich bei steigendem Wasserstand.

Es liegen wesentliche Hinweise darauf vor, daß der Anstieg des Meeresspiegels noch nach 2000 v. Chr. angehalten und sich vielleicht bis in die jüngste Zeit ausgewirkt hat. Über etwaige Stillstands- oder Regressionsphasen läßt sich bisher nichts aussagen.

Spätestens seit etwa 4500 v. Chr. hat das Brodtener Ufer in seiner ganzen Ausdehnung im Abbruch gestanden.

#### Schriftenverzeichnis

1. FIRBAS, F.: Spät- und nacheiszeitliche Waldgeschichte Mitteleuropas nördlich der Alpen. Jena, 1949.
2. MIKKELSEN, V.: Praesto Fjord. The development of the post-glacial vegetation and a contribution to the history of the baltic sea. Dansk Bot. Arkiv (Res. Botanicae Danicae), Bd. 13, Nr. 5. 1949.
3. NEUGEBAUER, W.: Alt-Lübeck. Forsch. Geogr. Ges. u. Naturhist. Mus. in Lübeck. 2. Reihe, Heft 42. 1950.

4. OVERBECK, F. und SCHNEIDER, S.: (unter Mitwirkung von E. Borngässer und A. Buhmann), Mooruntersuchungen bei Lüneburg und bei Bremen und die Reliktnatur von *Betula nana* L. in Nordwestdeutschland. (Zur Geschichte der Moore, Marschen und Wälder Nordwestdeutschlands. VI.) Ztschr. f. Bot., Bd. 33. 1938.
5. SCHMITZ, H.: Die Zeitstellung der Buchenausbreitung in Schleswig-Holstein. Forstwiss. Centralbl. 70. 1951.
6. SCHÜTRUMPF, R.: Stratigraphisch-pollenanalytische Mooruntersuchungen im Dienste der Vorgeschichtsforschung. Praehist. Ztschr., Bd. 28/29. 1937/38.
7. TAPPER, E.: Meereshgeschichte der Kieler und Lübecker Bucht im Postglazial. Geol. Meere u. Binnengew., Bd. 4. 1940.
8. WEBER, C. A.: Grenzhorizont und älterer Sphagnumtorf. Abh. Naturwiss. Verein Bremen, 28, 1930.

# Sedimentpetrographische Untersuchungen an der Küste der inneren Lübecker Bucht

Von Wolfgang Otto

## I. Einleitung

Bei der Untersuchung des Küstenabbruchs am Brodtener Ufer wurde die Frage nach dem Verbleib des Abbruchmaterials einerseits, der Herkunft und Wanderung der Sande an der Küste der Lübecker Bucht andererseits gestellt. Zu ihrer Beantwortung wurden sedimentpetrographische Untersuchungen der Strandsande zwischen dem Sierksdorfer Kliff und Brodtener Ufer, vom Fuße beider Steilküsten selbst sowie zwischen dem Brodtener Ufer und Schwansee/Mecklenburg durchgeführt. Außerdem wurden Geschiebemergel-Proben der Kliffs von Sierksdorf und Brodten und von zwei kleineren Kliffs an der mecklenburgischen Küste untersucht. Am Brodtener Ufer im Geschiebemergel eingeschaltete Schmelzwassersande gelangten ebenfalls zur Untersuchung. Im Bereich zwischen dem Brodtener Ufer und dem Sierksdorfer Kliff erfolgten Geröllmessungen. Aus Abbildung 1 ist die Lage der Probenentnahme- und Geröllmeßpunkte ersichtlich<sup>1)</sup>.

Da die Möglichkeit besteht, daß die Strandsande entweder aus dem Untergrund der Ostsee oder von den Kliffs und ihren jeweils zugehörigen Abrasionsflächen geliefert werden, konnte die Fragestellung dahingehend eingengt werden, ob sich Abhängigkeiten in der Zusammensetzung dieser Sande von ihrer Entfernung vom möglichen Ursprungsort, dem Kliff, zeigen oder ob die Sande Hinweise für ihre Herkunft aus dem Untergrund der Ostsee erkennen lassen. Schließlich käme noch eine Herkunft des Materials sowohl von der See als auch von den Kliffs in Betracht.

## II. Die Untersuchungen an der Küste zwischen Brodtener Ufer und Sierksdorfer Kliff

### 1. Die Strandgerölle

Einen ersten Hinweis geben die Strandgerölle. Unmittelbar vor den Kliffs und in ihrer nächsten Nähe sind diese zahlreich und groß, mit zunehmender Entfernung werden sie kleiner, bis sie schließlich in einigen Kilometern Abstand von den Kliffs vollständig fehlen. Wiederholtes Freilegen des Strandes von Steinen an der gesamten Bäderküste machte Geröllmessungen am Strand mit Aussicht auf zuverlässige Ergebnisse unmöglich. Deshalb wurden bei Niedrigwasser die freiliegenden Gerölle dicht unterhalb der Mittelwasserlinie zur Messung verwandt. Im Abstand von 1 km wurden jeweils die kleinsten Durchmesser (nur > 10 mm) aller Gerölle festgestellt, die in einem Quadrat von 25 mal 25 cm enthalten waren.

An den Punkten wurden folgende Messungen durchgeführt:

| Geröllmeßpunkte:      | I  | II | III | IV  | V  | VI | VII | VIII | IX  |
|-----------------------|----|----|-----|-----|----|----|-----|------|-----|
| Anzahl der Messungen: | 54 | 75 | 80  | 100 | 10 | 33 | 61  | 90   | 120 |

Die Mittelwerte dieser Durchmesser sind in Abbildung 3, Figur A aufgetragen. Aus der Darstellung ist zu ersehen, wie die Geröllgröße mit zunehmender Entfernung von den Kliffs abnimmt. Vom Sierksdorfer Kliff her läßt die Kurve einen stetigen Abfall erkennen. Nach 3,2 km fehlen die Gerölle. Vom Brodtener Ufer reicht die Geröllführung bis km 4. Auch diese Kurve fällt ab, zeigt aber am Meßpunkt III einen erneuten Anstieg. Diese erneute Zunahme

<sup>1)</sup> Die Arbeit wurde im Geologischen Institut der Universität Kiel unter Anleitung von Herrn Prof. Dr. Weyl durchgeführt.

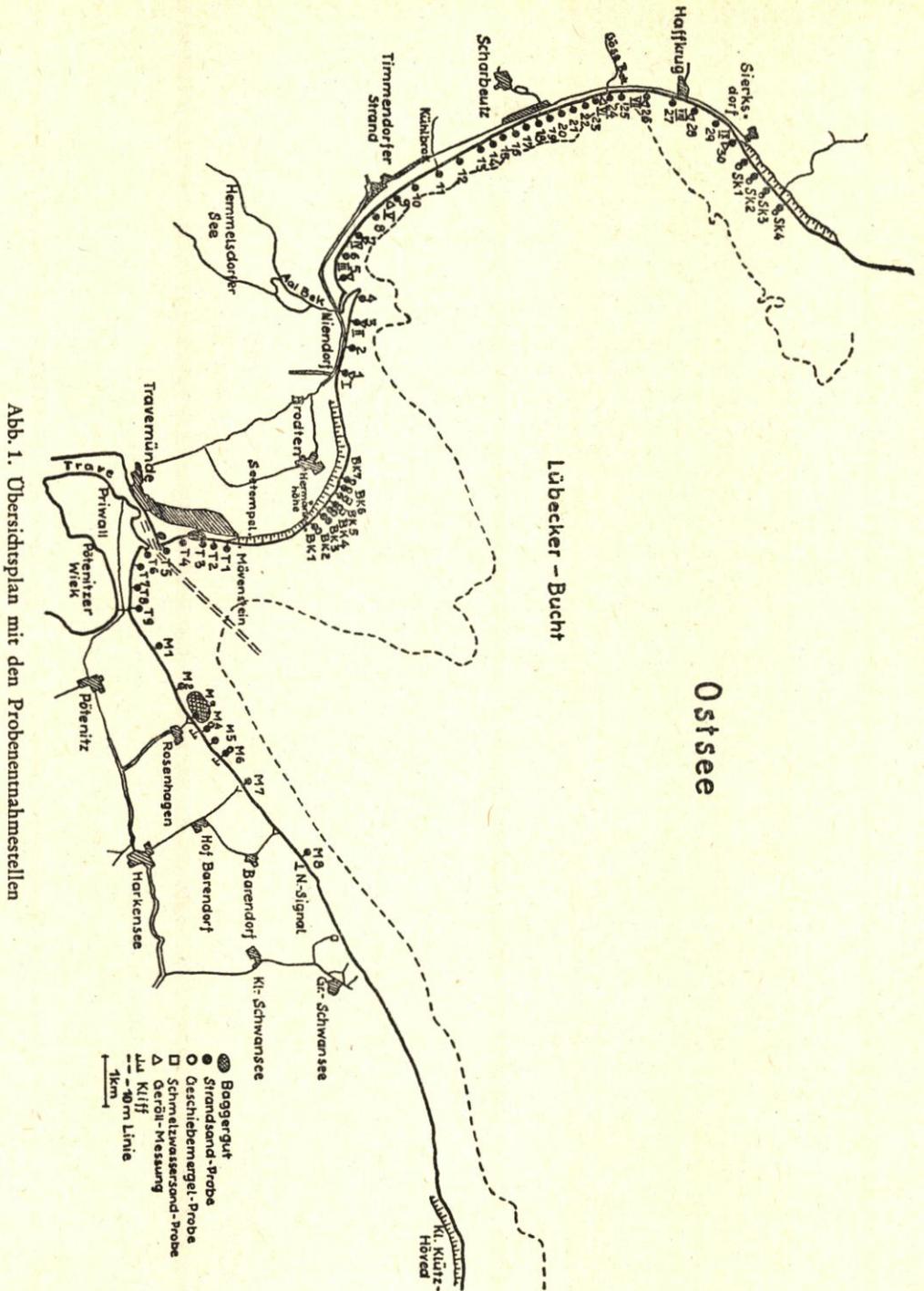


Abb. 1. Übersichtsplan mit den Probenentnahmestellen

der Geröllgröße dürfte auf einen Abrasionsbereich unmittelbar westlich des Niendorfer Hafens schließen lassen, worauf später auch die Mineralzusammensetzung der Sande hinweist.

Aus den Gerölmessungen ergibt sich:

1. Die Gerölle stammen von den Kliffs und wandern am Strand entlang, wobei sie nach ihrer Größe sortiert werden. Gleichzeitig werden sie bei ihrer Umlagerung abgeschliffen und verlieren an Größe.
2. Das Fehlen von Strandgeröllen in der Mittelzone des Strandes zwischen km 4 und 8,4 spricht dafür, daß eine Geröllzufuhr von See her offensichtlich nicht stattfindet.
3. Da Gerölle vom Kliff am Strand entlang verfrachtet werden, ist mit einem Sandtransport in gleicher Richtung zu rechnen.

## 2. Die Strandsande

### a) Untersuchungsmethode

Für die Untersuchung der Sande mußten geeignete Methoden entwickelt werden, die auf den Erfahrungen anderweitiger Sanduntersuchungen aufbauen. Hierzu wurden zunächst siebzehn Einzelproben in dem Abschnitt zwischen Brodtener Ufer und Sierksdorfer Kliff entnommen. Sie wurden folgenden Untersuchungen unterzogen:

1. Korngrößentrennung durch Sieben mit Siebsatz DIN 1171.
2. Bestimmung des Anteils schwerer Minerale vom spezifischen Gewicht  $> 2,9$ .
3. Optisch-mineralogische Untersuchung der schweren Minerale.

*Zu 1.:* Korngrößenbestimmung. Bei der Korngrößenbestimmung werden die Sande durch Sieben in folgende Fraktionen zerlegt:

- I.  $> 1,0$  mm, II.  $1,0-0,5$  mm, III.  $0,5-0,4$  mm, IV.  $0,4-0,3$  mm, V.  $0,3-0,2$  mm,  
VI.  $0,2-0,1$  mm, VII.  $< 0,1$  mm.

Die Ergebnisse werden kurvenmäßig in einer logarithmischen Summenlinie dargestellt, aus welcher die „mittlere Korngröße“<sup>2)</sup> des betreffenden Sandes gewonnen werden kann. Als „mittlere Korngröße“ wird derjenige Korndurchmesser bezeichnet, bei welchem die Summenlinie eines Sandes den Wert von 50 % der Gesamtzusammensetzung erreicht. Abbildung 2 zeigt die Darstellung der Summenlinie und die Ermittlung der „mittleren Korngröße“ am Beispiel der Sandprobe 1.

Mit Hilfe der „mittleren Korngröße“ ist es möglich, die Korngrößenverteilung eines Sandes durch einen einzigen Wert zu kennzeichnen und diesen Wert in Beziehung zu anderen aus der weiteren Untersuchung ermittelten Größen zu setzen.

*Zu 2.:* Bestimmung des Anteils der spezifisch schweren Minerale. Auf Grund der an anderen Sedimenten gewonnenen Erfahrungen ist es zweckmäßig, die Feinsandfraktion von  $0,2-0,1$  mm Durchmesser der Untersuchung zuzuführen. Aus 2 g des Feinsandes werden mittels Bromoform in einem Scheidetrichter die Schwerminerale mit einem spezifischen Gewicht  $> 2,9$  abgetrennt und ihr prozentualer Anteil durch Wägen bestimmt.

*Zu 3.:* Optisch-mineralogische Untersuchung der schweren Minerale. Da die spezifisch schweren Minerale sehr empfindlich auf Verwitterung und Transportauslese reagieren, versprach ihre nähere Untersuchung besonders wertvolle Hinweise auf Herkunft und Umlagerungsvorgänge der Sande. In der Voruntersuchung traten folgende Minerale für die Auswertung in hinreichender Menge auf:

|                         | mittl. spez. Gew. |
|-------------------------|-------------------|
| Erz, Magnetit . . . . . | 5,20              |
| Ilmenit . . . . .       | 4,75              |
| Granat . . . . .        | 3,75              |
| Hornblende . . . . .    | 3,25              |

<sup>2)</sup> „Median“ des angelsächsischen Schrifttums.

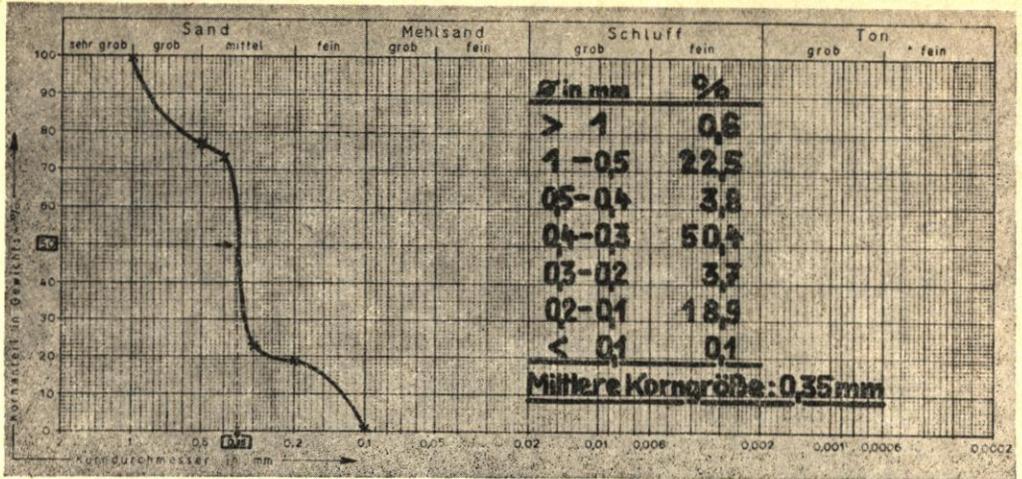


Abb. 2. Beispiel für die Ermittlung des Wertes der „Mittleren Korngröße“ (Sandprobe 1)

#### b) Untersuchungsergebnisse

Die Voruntersuchung ergab, daß die Zusammensetzung der Sande nach Korngröße und Mineralbestand in sehr deutlicher Abhängigkeit von der Entfernung von den beiden Kliffs steht, so daß die Hauptuntersuchung nach den oben gekennzeichneten Methoden durchgeführt werden konnte. Hierzu wurden Durchschnittsproben im Abstand von 0,5 bzw. 0,25 km entnommen. An jeder Entnahmestelle wurden 15 bis 25 Einzelproben von der Wasserlinie bis an das obere Ende des Strandes in einem Abstand von je 1 bis 1,5 m entnommen, gemischt und hieraus in der bei chemischen Gesteinsanalysen üblichen Methode des „Viertels“ die Ausgangssubstanz für Korngrößen- und Schwermineralbestimmung gewonnen.

Das Untersuchungsergebnis ist in Abbildung 3, Figur B und C, dargestellt. Figur B enthält in der ausgezogenen Kurve die Werte der „mittleren Korngröße“, in der gestrichelten Kurve den Gehalt an Schwermineralen. In der Darstellung wird deutlich, daß die Sande bis zu einer Entfernung von 5 km vom Brodtener Ufer verhältnismäßig grob sind und dann innerhalb eines Kilometers recht fein werden. Mit Annäherung an das Sierksdorfer Kliff nimmt die „mittlere Korngröße“ wieder zu, von km 8 bis 10,5 nur schwach und dann recht stark, im ganzen also erst in viel geringerer Entfernung vom Sierksdorfer Kliff als am Brodtener Ufer.

Der Gehalt an Schwermineralen schwankt mit Entfernung vom Brodtener Ufer zunächst erheblich; sehr schwermineralreiche Sande wechseln mit schwermineralarmen. Dies ist das Ergebnis zufälliger örtlicher Sonderungsvorgänge, die bis zur Bildung reiner Schwermineraleisen führen, wie man sie gerade in der Nähe des Brodtener Ufers vielfach beobachten kann. Ab km 6 bleibt der Gehalt an Schwermineralen konstant sehr niedrig; erst ab km 8 steigt er wieder langsam und ständig gegen das Sierksdorfer Kliff hin an.

Korngrößenverteilung und Schwermineralgehalt weisen darauf hin, daß die Sande von den Kliffs her am Strande bzw. vor dem Strande entlang wandern. Hierbei bleiben Körner größeren Gewichtes, also gröbere bzw. spezifisch schwerere, in der Nähe des Kliffs liegen, und nur die feinen und spezifisch leichten Sandkörner werden bis in den kliffernen, mittleren Strandabschnitt, km 6—8, verfrachtet. Während mit den Geröllen eine Belieferung des Strandwalls vom Brodtener Ufer bis km 4,0 und vom Sierksdorfer Kliff bis km 9,6 nachzuweisen war, lassen Kornverteilung der Sande und ihr Schwermineralgehalt den Einfluß der Kliffs bis km 6 bzw. 8 erkennen.

Zur weiteren Einengung der Liefergebiete können nun die Anteile der verschiedenen Schwerminerale an der Schwermineralfraktion des Feinsandes herangezogen werden. Sie sind in

Abbildung 3, Figur C, zur Darstellung gekommen; die einzelnen Werte wurden ebenfalls zu Kurven verbunden. Verwendung fanden die Anteile von Erz, Granat und Hornblende.

Die übrigen Schwerminerale wurden ebenfalls bestimmt, doch nicht dargestellt, da sich aus ihnen keine für die vorliegende Fragestellung wichtigen Schlüsse ziehen ließen.

Der Erzanteil wurde gesondert von den durchsichtigen Mineralen ausgezählt und in Prozenten zu deren Gesamtmenge dargestellt.

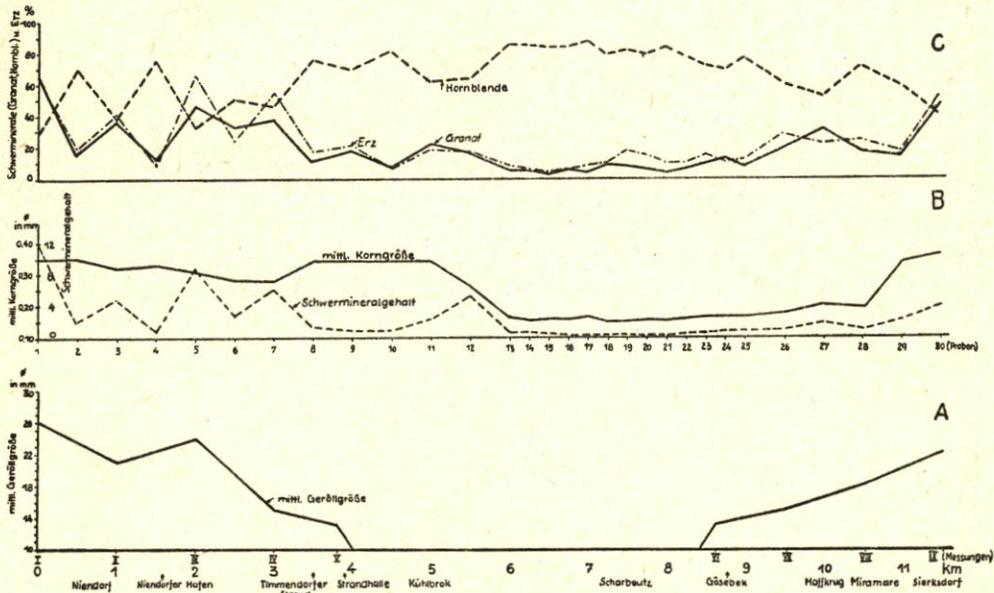


Abb. 3. Untersuchung der Strandsande und Geröllmessungen zwischen Brodtener und Sierksdorfer Kliff

Während im Geschiebemergel des Brodtener Kliffs, dem Ausgangsmaterial, die durchschnittlichen Anteile von Hornblende 62 %, Granat 19 % und von Erz 64 % betragen, machen sie in den Sanden unmittelbar am Fuße des Kliffs für Hornblende 49 %, Granat 36 % und für Erz 86 % aus. (Näheres hierüber ist unter Abschnitt IV zu ersehen.) Die Werte zeigen, daß in den Sanden die schweren Minerale Erz und Granat auf Kosten der leichteren Hornblende angereichert werden; Hornblende wird also stärker abtransportiert. Ihr Anteil ist jedoch durch die Materialnachlieferung aus dem Geschiebemergel noch verhältnismäßig hoch. In dem an das Brodtener Ufer anschließenden Strandabschnitt tritt zunächst die Hornblende gegenüber Erz und Granat stark zurück, da der unmittelbare Einfluß des Geschiebemergels fehlt. Im Bereich bis km 3 schwankt der Anteil der untersuchten Minerale Erz, Granat und Hornblende sehr stark. Erz und Granat variieren gleichsinnig, Hornblende gegensinnig. Die enge Beziehung von Granat zu Erz ist eine weit verbreitete Anreicherungserscheinung, die man am Strand in den Granat-Erz-Seifen beobachten kann. — Ab km 3 nehmen Erz und Granat sehr schnell ab, während nunmehr die Hornblende das weitaus überwiegende Mineral in der schweren Fraktion des Sandes darstellt. Sie erreicht bis über 80 % der durchsichtigen Minerale. Das Hornblende-Maximum liegt zwischen km 6 und 7, ihm entspricht ein Minimum an Granat und Erz. Ab km 7 ist mit Annäherung an das Sierksdorfer Kliff zunächst eine geringere, ab km 9 stärkere Zunahme des Erz-Granat-Anteils festzustellen, gleichzeitig ein Absinken der Hornblende. Unmittelbar vor dem Sierksdorfer Kliff werden die Verhältnisse wieder ähnlich denen der Sande unmittelbar vor dem Brodtener Ufer.

Die Schwerminerale lassen also auch wie die Korngröße eine sehr enge Abhängigkeit in ihrer Verteilung von der Entfernung von den Kliffs erkennen. Das bedeutet aber, daß im weit überwiegenden Maße mit einer Herkunft der Sande von diesen Kliffs zu rechnen ist und daß eine Materialzufuhr von der offenen See her nicht oder nur geringfügig stattfindet.

Der Einfluß des Brodtener Ufers läßt sich mit Hilfe der angewandten Untersuchungsmethoden bis in den Raum zwischen km 6 und 7 nachweisen, während der des Sierksdorfer Kliffs zwischen km 8 und 7 noch festzustellen ist.

Die Einflußgrenze beider Kliffs in der Materiallieferung etwa bei km 7 ist insofern interessant, als somit die Werte für die Verfrachtungsentfernungen der Sande denen der Gerölle proportional wären:

|                        |                        |   |                                |
|------------------------|------------------------|---|--------------------------------|
|                        | Verfrachtungsweg in km |   |                                |
|                        | für                    |   | für                            |
|                        | Gerölle:               | ≈ | Sande:                         |
| vom Brodtener Ufer     | $\frac{4,0}{3,2}$      |   | $\frac{6,4}{5,1} \approx 1,25$ |
| vom Sierksdorfer Kliff |                        |   |                                |

Bei km 2 spricht das erneute Ansteigen der im allgemeinen vom Brodtener Ufer her fallenden Kurven des Schwermineralgehaltes (Abb. 3, Fig. B) und des Granat- und Erzanteiles (Fig. C) ebenso wie die oben erwähnte Zunahme der mittleren Geröllgröße (Fig. A) für einen Abrasionsbereich westlich des Niendorfer Hafens.

### III. Die Untersuchungen an der Küste zwischen Brodtener Ufer und Schwansee/Mecklenburg

Die Untersuchungen wurden in diesem Bereich nach der gleichen Methode durchgeführt wie die im Abschnitt Brodten—Sierksdorf. An der mecklenburgischen Küste konnten die Proben nur in größeren Abständen entnommen werden. Von den beiden kleinen Kliffs, den einzigen bis Schwansee, gelangten auch Geschiebemergelproben zur Untersuchung. Das Kliff bei km 6 hat bei einer ungefähren Länge von 300 m eine maximale Höhe von 6 bis 7 m, das bei km 6,5 ist nur etwa 70 m lang und 4 bis 5 m hoch. — Die genauen Probenpunkte sind aus Abbildung 1 ersichtlich.

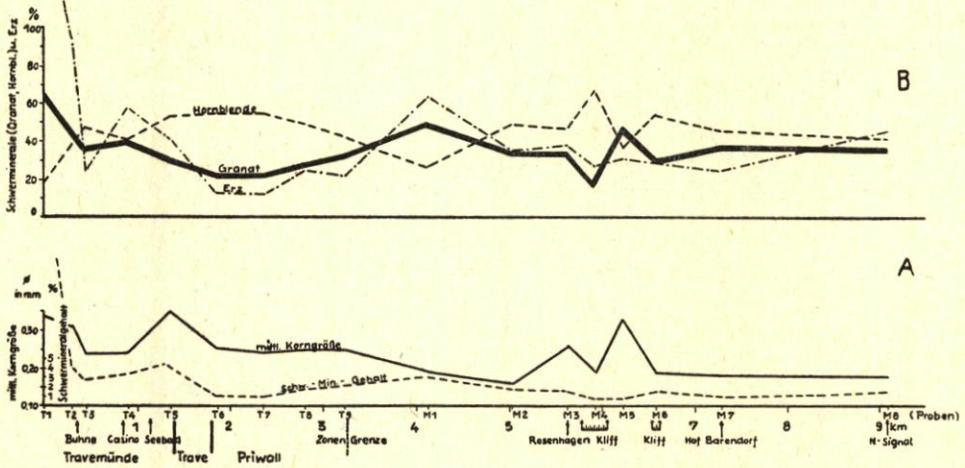


Abb. 4. Untersuchung der Strandsande zwischen Brodtener Kliff und Schwansee/Mecklenburg

Die Untersuchungsergebnisse sind in Abbildung 4 festgehalten. Figur A veranschaulicht die zu Kurven verbundenen Werte der „mittleren Korngröße“ und des Gehaltes an Schwermineralen. Die Korngröße nimmt vom Brodtener Ufer her stark ab, erreicht aber hart nördlich der Nordermole (Trave) wieder einen recht hohen Wert. Dann fällt die Kurve bis km 5 gleichmäßig ab, schwankt im Bereich der beiden Kliffs zwischen km 5 und 6,5 erheblich und hält sich dann bis zur Untersuchungsgrenze hin auf gleicher Höhe. Einen ähnlichen Verlauf

hat die Kurve für den Gehalt an Schwermineralen, dessen Wert im unmittelbaren Anschluß an das Brodtener Ufer mit 28 % sehr hoch liegt. (In diesem Abschnitt konnten reiche Granat-Erz-Seifen mit bis zu 97 % Schwermineralanteil in der Feinsandfraktion festgestellt werden.) — Nach einem sehr steilen Abfall der Schwermineralcurve zeigt sie ebenfalls vor der Nordermole einen erneuten Anstieg. Sie erreicht bei km 2,5 ihr Minimum und hält sich dann — abgesehen von den wenig höheren Werten zwischen km 3 und 5 — ohne die Schwankungen im Kliffbereich mitzumachen, auf etwa gleicher Höhe bis Schwansee mit einer kleinen ansteigenden Tendenz.

Mit Sicherheit geben „mittlere Korngröße“ und Schwermineralgehalt lediglich Auskunft über einen Transport der Sande vom Brodtener Ufer her bis zur Travemündung, eventuell noch bis vor den Priwall. Die hohen Werte beider Kurven vor der Nordermole (Probe T 5) dürften ihre Ursache in Aufspülungen von Baggergut in diesem Gebiet haben, die außerdem noch am Travemünder Strand zwischen den Proben T 3 und T 4 stattfanden.

Figur B gibt die Anteile an der Schwermineralfraktion des Feinsandes wieder. Auch hier variieren Granat und Hornblende gegensinnig, Granat und Erz gleichsinnig. Im unmittelbaren Anschluß an das Brodtener Ufer sind Granat und Erz gegenüber Hornblende stark vertreten, nehmen aber dann schnell zugunsten der Hornblende ab und erreichen am Priwall bei km 2 ihr Minimum, dem ein Maximum an Hornblende entspricht. Wie der oben erwähnte Gehalt an Schwermineralen lassen auch Granat und Erz im Bereich zwischen km 3 und 5 eine Zunahme erkennen. Ab km 5 halten sich die Werte für Granat ziemlich konstant zwischen 30 und 40 %, die für Hornblende zwischen 40 und 50 %; der Erzanteil geht dem des Granates parallel, steigt aber gegen Ende des untersuchten Abschnitts leicht an. Dieser Anstieg und die geringfügige Abnahme an Hornblende allein dürften kaum zu dem Schluß berechtigen, daß die Sande von der mecklenburgischen Steilküste bei Klütz-Höved in Richtung auf den Priwall wandern. Hierfür können eher die Schwankungen sämtlicher drei Schwerminerale im Bereich des Kliffs bei km 6,5 und 6 als Beweis herangezogen werden. Wenn den von Mecklenburg her anwandernden Sanden mit etwa 38 % Granat und 47 % Hornblende in der Feinsandfraktion bei Punkt M 6 aus dem Geschiebemergel des Kliffs Material mit 20 % Granat und 62 % Hornblende in der gleichen Fraktion zugeführt wird, muß zunächst an dieser Stelle der Gehalt an Granat im Strandsand sinken (31 %) und der an Hornblende steigen (55 %). Absolut betrachtet ist der Gehalt an Granat (natürlich ebenfalls an Hornblende) vom Kliff her erhöht worden. Dies tritt allerdings erst leewärts bei M 5 in Erscheinung, wo der unmittelbare Einfluß der Materialnachlieferung vom Kliff fehlt und infolge des schnelleren Hornblendeabtransportes der Granat angereichert wird. Durch erneute stärkere Sandzufuhr am Kliff M 4 aus dem Geschiebemergel (Granat 17 % und Hornblende 63 %) sinkt abermals der Granatgehalt und nimmt die Hornblende zu. In Richtung auf den Priwall tritt dann wiederum eine Granatanreicherung auf Kosten der Hornblende ein. Erst nach km 4 nimmt Granat ab und erreicht bei km 2 sein Minimum, dem ein Hornblende-Maximum entspricht.

Ein Transport des Abbruchmaterials von den mecklenburgischen Kliffs bis zum Priwall ist demnach wahrscheinlich. Den Einfluß des Brodtener Ufers bis km 2 zeigen die Untersuchungen mit Sicherheit. Ob und in welchem Maße Sande aus dem Untergrund der Ostsee zugeliefert werden, kann auf Grund der Untersuchungen mit Gewißheit nicht gesagt werden. Die ähnlichen Verhältnisse im Bereich Brodtener Ufer—Sierksdorfer Kliff sprechen allerdings dagegen. — Es sei noch darauf hingewiesen, daß zwischen km 4 und 5 die Schüttstelle für Baggergut vom Bau des ehemaligen U-Boot-Hafens Travemünde liegt. Diese Schüttungen und Aufspülungen von Baggergut im Bereich zwischen Brodtener Ufer und Schwansee wirkten sich auf die Untersuchungen störend aus. — Um Endgültiges über die Verhältnisse der Sandwanderungen an der mecklenburgischen Küste und am Priwall aussagen zu können, müßten noch Proben zwischen Schwansee und den Kliffs von Klütz-Höved untersucht werden.

## IV. Die Untersuchungen an den Kliffs

Von den untersuchten Kliffs werden in tabellarischer Übersicht die Korngrößenverteilung, der Schwermineralgehalt sowie dessen Zusammensetzung für die Geschiebemergel- und Schmelzwassersand-Proben und für die Sande am Fuße der Kliffs aufgeführt.

## 1. Brodtener Ufer

## a) Geschiebemergel:

| Probe:                       | Korngr.-Verteilung: | Schwermineralgehalt: | Erz:      | Hornbl.:      | Granat:      |
|------------------------------|---------------------|----------------------|-----------|---------------|--------------|
| BK 1                         | I—V 18,9 %          | 0,6 %                | 65 %      | 65 %          | 12 %         |
|                              | VI 10,3             |                      |           |               |              |
|                              | VII 70,8            |                      |           |               |              |
| BK 2                         | I—V 19,5 %          | 0,7                  | 47        | 67            | 19           |
|                              | VI 11,5             |                      |           |               |              |
|                              | VII 69,0            |                      |           |               |              |
| BK 3                         | I—V 19,2 %          | 1,6                  | 78        | 70            | 13           |
|                              | VI 10,9             |                      |           |               |              |
|                              | VII 69,9            |                      |           |               |              |
| BK 4                         | I—V 3,4 %           | 0,8                  | 67        | 62            | 17           |
|                              | VI 3,6              |                      |           |               |              |
|                              | VII 93,0            |                      |           |               |              |
| BK 5                         | I—V 19,0 %          | 0,8                  | 78        | 62            | 20           |
|                              | VI 13,2             |                      |           |               |              |
|                              | VII 67,8            |                      |           |               |              |
| BK 6                         | I—V 21,9 %          | 0,8                  | 66        | 57            | 27           |
|                              | VI 12,2             |                      |           |               |              |
|                              | VII 65,9            |                      |           |               |              |
| BK 7                         | I—V 14,8 %          | 0,8                  | 47        | 54            | 26           |
|                              | VI 8,8              |                      |           |               |              |
|                              | VII 76,4            |                      |           |               |              |
| Geschiebemergel-Mittelwerte: |                     | 0,9<br>Schwermin.    | 64<br>Erz | 62<br>Hornbl. | 19<br>Granat |

## b) Schmelzwassersand:

| Probe:                         | Korngr.-Verteilung: | „m. Korngr.“: | Schwermineralgehalt: | Erz:      | Hornbl.:      | Granat:      |
|--------------------------------|---------------------|---------------|----------------------|-----------|---------------|--------------|
| BK 4                           | I—V 18,0 %          | 0,10 mm       | 0,4 %                | 26 %      | 62 %          | 18 %         |
|                                | VI 33,7             |               |                      |           |               |              |
|                                | VII 48,3            |               |                      |           |               |              |
| BK 5                           | I—V 35,3 %          | 0,13 mm       | 0,5                  | 29        | 73            | 13           |
|                                | VI 43,0             |               |                      |           |               |              |
|                                | VII 21,7            |               |                      |           |               |              |
| Schmelzwassersand-Mittelwerte: |                     |               | 0,5<br>Schwermin.    | 28<br>Erz | 67<br>Hornbl. | 16<br>Granat |

## c) Strandsand vom Fuß des Kliffs:

| Probe:                             | „mittl. Korngr.“: | Schwermineralgehalt: | Erz:  | Hornbl.: | Granat: |
|------------------------------------|-------------------|----------------------|-------|----------|---------|
|                                    |                   | der Fraktion VI      |       |          |         |
| BK 1                               | 0,77 mm           | 2,7 %                | 116 % | 51 %     | 30 %    |
| BK 2                               | 0,58              | 5,0                  | 185   | 37       | 46      |
| BK 3                               | 0,34              | 1,8                  | 52    | 63       | 18      |
| BK 4                               | 0,51              | 4,8                  | 58    | 32       | 51      |
| BK 5                               | 0,37              | 0,9                  | 57    | 72       | 21      |
| BK 6                               | 0,34              | 1,6                  | 42    | 60       | 26      |
| BK 7                               | 0,34              | 9,6                  | 92    | 27       | 58      |
| Mittelwerte der Sande vom Kliffuß: |                   | 3,8                  | 86    | 49       | 36      |

| 2. Sierksdorfer Kliff        |                     |        | a) Geschiebemergel:  |      |          |         |
|------------------------------|---------------------|--------|----------------------|------|----------|---------|
| Probe:                       | Korngr.-Verteilung: |        | Schwermineralgehalt: | Erz: | Hornbl.: | Granat: |
| SK 1                         | I—V                 | 15,4 % | 0,7 %                | 53 % | 61 %     | 21 %    |
|                              | VI                  | 16,9   |                      |      |          |         |
|                              | VII                 | 67,7   |                      |      |          |         |
| SK 2                         | I—V                 | 13,4 % | 0,7                  | 40   | 62       | 22      |
|                              | VI                  | 17,0   |                      |      |          |         |
|                              | VII                 | 69,6   |                      |      |          |         |
| SK 3                         | I—V                 | 14,8 % | 0,5                  | 50   | 61       | 20      |
|                              | VI                  | 22,7   |                      |      |          |         |
|                              | VII                 | 62,5   |                      |      |          |         |
| SK 4                         | I—V                 | 16,6 % | 0,7                  | 72   | 63       | 23      |
|                              | VI                  | 18,2   |                      |      |          |         |
|                              | VII                 | 65,2   |                      |      |          |         |
| Geschiebemergel-Mittelwerte: |                     |        | 0,7                  | 54   | 62       | 22      |
|                              |                     |        | Schwermin.           | Erz  | Hornbl.  | Granat  |

## b) Strandsand vom Fuß des Kliffs:

| Probe:                             | „mittl. Korngr.“: | Schwermineralgehalt: | Erz:            | Hornbl.: | Granat: |
|------------------------------------|-------------------|----------------------|-----------------|----------|---------|
|                                    |                   |                      | der Fraktion VI |          |         |
| SK 1                               | 0,33 mm           | 2,9 %                | 48 %            | 56 %     | 33 %    |
| SK 2                               | 0,34              | 3,2                  | 34              | 64       | 26      |
| SK 3                               | 0,36              | 1,4                  | 29              | 79       | 15      |
| SK 4                               | 0,34              | 2,0                  | 36              | 59       | 28      |
| Mittelwerte der Sande vom Kliffuß: |                   | 2,4                  | 37              | 64       | 26      |

## 3. Kliffs an der mecklenburgischen Küste

|                              |                     |        | Geschiebemergel:     |      |          |         |
|------------------------------|---------------------|--------|----------------------|------|----------|---------|
| Probe:                       | Korngr.-Verteilung: |        | Schwermineralgehalt: | Erz: | Hornbl.: | Granat: |
| M 4                          | I—V                 | 15,4 % | 0,8 %                | 67 % | 63 %     | 17 %    |
|                              | VI                  | 18,1   |                      |      |          |         |
|                              | VII                 | 66,5   |                      |      |          |         |
| M 6                          | I—V                 | 15,5 % | 0,7                  | 51   | 62       | 20      |
|                              | VI                  | 17,9   |                      |      |          |         |
|                              | VII                 | 66,6   |                      |      |          |         |
| Geschiebemergel-Mittelwerte: |                     |        | 0,8                  | 59   | 62       | 19      |
|                              |                     |        | Schwermin.           | Erz  | Hornbl.  | Granat  |

Die Untersuchung der Geschiebemergel zeigt, daß alle Proben in ihrer Korngrößenverteilung, im Schwermineralanteil und dessen Zusammensetzung (Erz, Granat, Hornblende) der Feinsandfraktion (VI = 0,2—0,1 mm) untereinander recht ähnlich sind. Im Durchschnitt besteht der Geschiebemergel an der gesamten Küste der inneren Lübecker Bucht als Lieferant für die Strandsande zu 30 % aus Material > 0,1 mm. In der Feinsandfraktion enthält er durchschnittlich 0,8 % Schwerminerale; im Mittel sind Erz zu 59 %, Hornblende zu 62 % und Granat zu 20 % vertreten.

Die am Brodtener Ufer untersuchten Schmelzwassersande sind im Gehalt an Hornblende und Granat (67 % bzw. 16 %) dem Geschiebemergel sehr ähnlich. Der Erzanteil ist allerdings mit nur 28 % bedeutend geringer.

Die Strandsande am Fuße der Kliffs sind in ihrer Schwermineralzusammensetzung infolge von Umlagerungsvorgängen nicht einheitlich. — Am Brodtener Ufer lassen sie gegenüber dem Geschiebemergel eine Anreicherung der schwereren Minerale Erz und Granat auf Kosten der leichteren Hornblende erkennen.

## V. Zusammenfassung

Sedimentpetrographische Untersuchungen an der Küste der inneren Lübecker Bucht ergaben, daß die Strandsande vom Brodtener Ufer, vom Sierksdorfer Kliff und von den Kliffs an der mecklenburgischen Küste bzw. von deren submarinen Abrasionsflächen stammen.

Am Strandwall zwischen Sierksdorf und Niendorf ließ sich Sandlieferung vom Sierksdorfer Kliff auf eine Entfernung von 4,5 km bis Scharbeutz, vom Brodtener Ufer auf eine Entfernung von 7 km ebenfalls bis Scharbeutz nachweisen.

Im Gebiet östlich des Brodtener Ufers reicht der Einfluß des Brodtener Ufers bis in eine Entfernung von 2 km an das Westende des Priwall. Die Strandsande östlich des Priwall werden mit großer Wahrscheinlichkeit von der mecklenburgischen Küste geliefert.

Für Sandzufuhr aus dem Untergrund der Ostsee gaben die Untersuchungen keine Hinweise. Diese Feststellung stimmt mit dem Ergebnis der Seegrundkartierung (Ruck [7]) überein.

## Schriftenverzeichnis

1. CHUDOBA, K.: Mikroskopische Charakteristik der gesteinsbildenden Mineralien. Freiburg i. Brsg. 1932.
2. v. ENGELHARDT, W.: Über die Schwermineralsande der Ostseeküste zwischen Warnemünde und Darßerort und ihre Bildung durch die Brandung. Ztschr. f. angew. Min., Bd. I, H. 1.
3. FRIEDRICH, P.: Das Brodtener Ufer bei Travemünde. Lübeckische Blätter, Jg. 1901.
4. KRUMBEIN, W. C. und PETTIJOHN, F. J.: Manual of Sedimentary Petrography. New York 1938.
5. MILNER, H. B.: Sedimentary Petrography. London 1940.
6. PETTIJOHN, F. J.: Sedimentary Rocks. New York 1949.
7. RUCK, K. W.: Seegrundkartierung der Lübecker Bucht. Unveröffentlichter Bericht beim Wasser- und Schiffsamt Lübeck 1950 (vergl. Aufsatz in diesem Heft).
8. SCHEIDHAUER, W.: Gravitative Auslesevorgänge bei der Sedimentation von Sanden. „Chemie der Erde“, Bd. 12, Heft 4, 1939.
9. SINDOWSKI, K. H.: Korngrößen- und Schwermineralverteilung in rezenten Strandsanden der mecklenburgischen Ostseeküste. Zentralblatt f. Min. etc., Abt. A, Nr. 5, 1938.
10. STEINERT, H.: Schwermineralien und Stratigraphie der diluvialen Geschiebemergel Schleswig-Holsteins. Diss. Kiel 1948.
11. WEYL, R.: Marine Erz-Granat-Seifen der schleswig-holsteinischen Küsten und ihre Regelmäßigkeiten in der Korngrößen- und Mineralverteilung. Ztschr. f. Geschiebeforsch. u. Flachlandsgeol., Bd. 13, H. 2, 1937.
12. WEYL, R.: Möglichkeiten und Grenzen der Schwermineraluntersuchungen als Methode der Geologie. Forsch. u. Fortschr., 26. Jg., Nr. 11/12, 1950.
13. ZANDER, R.: Die rezenten Änderungen der mecklenburgischen Küste. Beih. Mitt. Geogr. Ges. Rostock, Nr. 1, 1934.

## Karten

- Meßtischblatt 1930, Süsel  
Meßtischblatt 2030, Schwartau  
Meßtischblatt 2031, Travemünde

## Seegrundkartierung der Lübecker Bucht

Von Klaus-Wolfgang Ruck

Für die Klärung der Frage, wo das Abbruchmaterial vom Brodtener Ufer lagert, ob es in die See hinausgeführt oder am Strande sedimentiert wird, wurde eine Seegrundkartierung der Lübecker Bucht durchgeführt. Es sollte dabei die Grenze der Sand- und Schlickverteilung erfaßt und festgelegt werden.

Daher wurden mit einem van VEENSchen Bodengreifer 406 Grundproben an Bord eines Dampfers gehoben und dort auf Fein-, Mittel- und Grobsand angesprochen. Auf eine Korngrößenbestimmung mittels Siebsatz konnte verzichtet werden.

Es ergab sich, daß der in der Lübecker Bucht an der Küste sich entlangziehende Sandstreifen nur von verhältnismäßig geringer Breite (Abb. 1) ist. Zwischen Travemünde und Neustadt stößt das Sandgebiet an drei Stellen zungenartig vor, und zwar vor Sierksdorf (3 km), Timmendorfer Strand (4 km) und am stärksten vor Brodten (6 km). Schwache Verbreiterungen befinden sich auf der Höhe von Albersdorf und Dahmeshöved. Die Sandzungen liegen auf Untiefen, die der Küste vorgelagert sind. Zur Bestimmung der Sandmächtigkeit wurden zwischen Niendorf und Travemünde als Ergänzung zu den Greiferproben einige Unterwasserbohrungen niedergebracht.

Danach liegt auf der submarinen Abrasionsfläche vor Brodten und vor dem Timmendorfer Strand nur ein verhältnismäßig dünner Sandschleier. Größere Sandmächtigkeiten sind in Küstennähe vor den Strandwällen anzutreffen. In der Neustädter Bucht wurden am Ansatzpunkt der Abrasionsfläche westlich des Brodtener Ufers Sandmächtigkeiten von mehreren Metern festgestellt. Für die Traveflanke des Steinriffs liegen keine Bohrungen in unmittelbarer Küstennähe vor. Vermutlich ist hier die Sandmächtigkeit etwas geringer und nimmt vor dem Priwall wieder zu.

Der Schlick stellt in frischem Zustand einen zähflüssigen, mehr oder weniger nach Schwefelwasserstoff riechenden Schlamm dar, der sich aus einer organischen und einer anorganischen Komponente zusammensetzt. Läßt man ihn trocknen, erkennt man den in Wirklichkeit mehlsandigen bis schluffigen Charakter dieses Sediments. In den obersten Teilen ist er bräunlich (Oxydationszone), darunter fast schwarz. An mehreren Proben wurde beobachtet, daß unter einer schwarzen Schicht von 300 bis 400 mm Stärke ein grauer Schlick liegt. In der grauen Region nahm der Gehalt an Mehlsand und Schluff zu. Diese Merkmale weisen darauf hin, daß der Schlick in der Lübecker Bucht nur eine verhältnismäßig geringe Mächtigkeit haben kann. Abweichend davon verhält sich die Schlickzunge vor Neustadt. Bei sehr starkem Schwefelwasserstoff-Geruch, der auf größere organische Beimengungen schließen läßt, wird er unter der bräunlichen Oberfläche hellgrau bis hellgrün. Der Schlick oder Mudd hat sein Hauptverbreitungsgebiet in der Lübecker Bucht in einer Wassertiefe von 20 m und mehr, tritt aber an einzelnen Stellen, z. B. bei Pelzerhaken, schon bei 6,50 m Tiefe auf. Ein kleines Schlickgebiet vor dem Priwall ist auf ein Baggerloch zurückzuführen.

Die Überschneidungszone von Schlick und Sand ist in der inneren Bucht am schmalsten ausgebildet und nimmt nach der offenen See hin an Breite zu. Am klarsten fällt dies an der Küstenstrecke von Neustadt bis Dahmeshöved auf. In dem Teil der Bucht, der durch den Pelzerhaken geschützt wird, fehlt die Überschneidungszone; bei Dahmeshöved hat sie eine Breite von etwa einer halben Seemeile.

Eine Materialsortierung nach Korngrößen war einwandfrei festzustellen. Dicht vor den Steilufeln liegen die größten Fraktionen, mit zunehmender Entfernung und Tiefe wird das Material feiner. Außerdem tritt eine Korngrößenabnahme von den Steilufeln entlang der Küste auf. So wurden die feinsten Sandfraktionen der unmittelbaren Küstenregion bei Scharbeutz, vor dem Priwall und bei Pelzerhaken, also in den Gebieten zwischen den Steilufeln erfaßt.

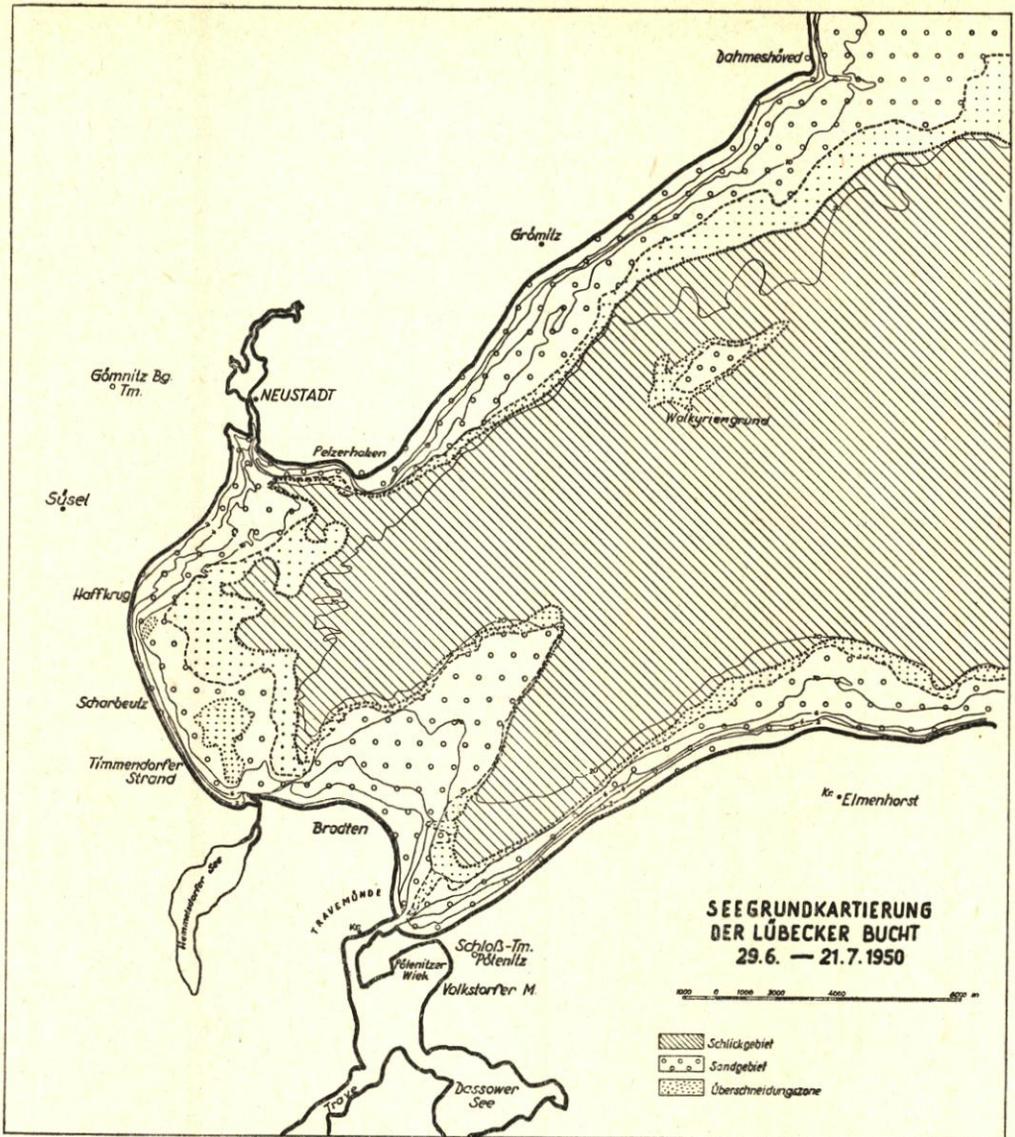


Abb. 1.

Im einzelnen zeigt das Sandgebiet noch einen Wechsel zwischen Zonen mit feinem und Zonen mit grobem Material, der von der Neigung des Meeresbodens abhängt. Das feine Material liegt auf relativ steilen Hängen, während das grobe Material auf Hängen mit flachem Gefälle anzutreffen ist.

Der in der Lübecker Bucht gefundene Boden stammt fast ausschließlich von der Küste selbst und vom ufernahen Seegrund. Das dort aufgearbeitete schwere Material wird, wie die Untersuchung des Wolkryengrundes anschaulich ergab, schon nach kurzer Wanderung wieder abgelagert. In den tieferen Zonen ist die Wirkung der Wellen zu schwach, um den Schlick zu lösen und fortzubewegen. Diese Gebiete, die den größten Raum der Lübecker Bucht einnehmen, fallen als Materiallieferanten daher praktisch aus. Die anorganischen

Bestandteile des Schlicks sondern sich während der Abrasion aus, die organischen dagegen liefert fast ausschließlich das Meer selbst.

Die Grenze der Einwirkung der Wellen auf den Grund dürfte mit der durchschnittlichen Wassertiefe der Schlick-Sandgrenze zusammenfallen, also in der Lübecker Bucht bis etwa 15 bis 16 m reichen. Es kommen hierfür überwiegend die küstennahen Teile in Frage. Stärkere Strömungen treten ebenfalls nur in der Küstenzone auf. Die Hauptmaterialverfrachtung geht in den Sturmperioden vor sich, da in dieser Zeit die mobilisierenden und verfrachtenden Kräfte naturgemäß am stärksten sind und die größte Reichweite haben. In der Lübecker Bucht ist also außer der küstenparallelen Verfrachtung nur eine seewärts gerichtete mit abnehmender Komponente der Korngrößen vorhanden.

Die in der Lübecker Bucht gelegene Bank Walkyriengrund ist nach PRATJE (2) und JARKE (1) als küstenferne Sandanhäufungszone zu verstehen. Das Sandgebiet des Walkyriengrundes gliedert sich in ähnliche Zonen wie die Strandregion. Auf der Bank liegt eine durch Auswaschung entstandene Geröllzone. An diese Geröllzone schließt sich ein Gebiet mit buntem Grobsand und Feinkies an. Dann folgt eine Zone Feinsand, die mit zunehmender Tiefe schlickig wird. Es handelt sich bei dem um die Geröllzone liegenden Material um aus der Auswaschungszone mobilisierte Sande, die dann, wie bei der küstennahen Sandzone, während ihrer Verfrachtung einer Korngrößensortierung unterworfen wurden und in verschiedenen Zonen zur Ablagerung kamen. Die Korngrößenverteilung zeigt, daß eine Untiefe wie der Walkyriengrund kein Material an den Küstenstrand hat abgeben können.

Die Schlick-Sandgrenze hat auch hier eine Überschneidungszone, die an den Längsseiten der Bank ziemlich schmal ist, während sie sich an den Querseiten breiter ausbilden konnte. An der Nordostseite springt sie weit über das in der Seekarte eingezeichnete Gebiet der Bank vor, bis auf fast 22 m Wassertiefe. Nach JARKE liegen die Hauptabsatzgebiete des von den Bankkuppen zur Tiefe hin abwandernden Sandes auf den Ostflanken. Die Ursache wird in den häufigeren westlichen Winden gesehen. Die breite Überschneidungszone an der Südwestseite erklärt sich aus der geringeren Wassertiefe. Das Material dieser küstenfernen Sandanhäufungszone dürfte im wesentlichen von dem Walkyriengrund selbst stammen. Eine zusätzliche episodische Belieferung gelegentlich stärkerer Stürme aus der Küstenzone, wie PRATJE annehmen möchte, kommt meines Erachtens nur für sehr feinkörniges Material in Frage.

### Schriftenverzeichnis

1. JARKE, J.: Die Unterschiede in der Sedimentation vor der Ost- und Westküste Schleswig-Holsteins. Dissertation, Kiel, 1948 (nicht veröffentlicht).
2. PRATJE, O.: Die Sedimentation in der südlichen Ostsee. Annalen d. Hydrographie LXVII, 1939.
3. Atlas der Bodenbeschaffenheit des Meeres, 4. Lieferung, südliche Ostsee, bearbeitet von der Deutschen Seewarte, 1940—44.

# Studien an den Flanken des Brodtener Ufers

Von Hans Spethmann

Die Erkenntnis, daß sich in unseren Gegenden gegenwärtig noch eine Landsenkung vollziehen mag, jedoch nur langsam im Laufe von Jahrhunderten, ist zum Verständnis der Küste bei Travemünde von hoher Bedeutung. Dabei gehen aber gerade am Brodtener Ufer die Erscheinungen immer wieder verloren, die sich in diesem Zusammenhang auswirken, weil es ständig im Abbruch liegt. Demgegenüber bieten der Priwall und die Niederung nordwärts vom Hemmelsdorfer See die Möglichkeit, zu neuen Gesichtspunkten zu gelangen.

## 1. Der Werdegang des Priwall

Der Priwall, der sich als flache Sandbarre vor die Mündung der Trave legt, verkörpert nicht nur ein derart einfaches und einheitliches Gebilde, wie es auf den ersten Blick hin erscheinen mag, bei dem wir nichts davon ahnen, daß in seiner Mitte ein Kern festen Geschiebemergels steckt. REHDER (6) hat ihn bereits 1890 vermutet, als er den zweiten Band des Werkes „Die Freie und Hansestadt Lübeck, ein Beitrag zur Deutschen Landeskunde“ verfaßte (S. 454 und namentlich S. 431). Er schließt aus einer Stromspaltung der Trave, für die gewisse Anzeichen vorliegen, auf den festen Kern. FRIEDRICH (5) wies dann 1917 an Hand einer neuen Bohrung tatsächlich einen festen Kern von Geschiebemergel inmitten des Priwall nach und veröffentlichte das Ergebnis in seinem Buch über „Die Grundwasserverhältnisse der Stadt Lübeck und ihrer Umgebung“, ein Ergebnis, das bis 1950 überhaupt nicht beachtet wurde. Südlich der ehemaligen Ferienkolonie ragt bis 9,50 m unter NN eine Kuppe von Geschiebemergel empor, die noch gut 2 m von Spatsanden diluvialen Alters bedeckt wird. Sie besagt, daß sich in dieser Gegend des südlichen Priwall eine Insel erhob, als das Wasser noch 9 m tiefer stand, also bereits in einer Zeit, in der Salzwasser in das Beltseebecken eingebrochen war.

Demnach war die breite Wasserfläche der Pötenitzer Wiek ursprünglich zweigeteilt. Drei weitere Bohrungen, die um Kriegsbeginn nahe der genannten Stelle bis 100 m hinuntergingen, bestätigen diese Tatsache.

Die ehemalige Insel muß das Wasser der Trave in die Gegend von Alt-Travemünde gelenkt haben. Von hier aus ergoß sich der Fluß in das Meer, wobei seine Mündung offenbar am Leuchtenfeld lag und hier versandete. Das nimmt auch REHDER (7) an.

In diesem Zusammenhang dürfte nunmehr klar werden, warum die nacheiszeitlichen Ablagerungen gerade bei Alt-Travemünde bis zu 30 m unter NN hinabreichen, wie FRIEDRICH (3) in einer Reihe von Bohrungen feststellte. Der Querschnitt der Trave war eingengt. Auf der einen Seite faßte der Kern des Priwall die Wassermassen ein, und auf der anderen weisen Bohrungen der jüngsten Zeit gleich einwärts beim Sportplatz schon 2 m unter NN einen harten eiszeitlichen Lehm auf und weiter abwärts eine ältere Bohrung beim Warmbad unfern der Wurzel der Nordermole bei 5,40 m Geschiebemergel, der beim nahen Kurhaus fast die Oberfläche erreicht und sich dann am Kalvarienberg heraushebt.

Wenn das Wasser der Trave die Enge zwischen Priwallkern und dem Geschiebemergel auf der Travemünder Seite passierte, mußte es erfahrungsgemäß stärker in die Tiefe arbeiten, wozu noch das Hin- und Herfluten, namentlich bei Stürmen, beitrug. Derart entstand hier das typische Bild einer „Strömungsrinne“, wie wir sie bei ähnlichen Situationen vielfach an der Ostsee antreffen.

Aus dem Rahmen der Tiefe von 30 m fällt jedoch gegenüber der Vorderreihe ein Loch heraus, das FRIEDRICH (3) dort bei der Villa Potente unfern des Kohlenhofs bis gut 50 m unter Mittelwasser nachwies und das seither nochmals festgestellt wurde. Es hat viel Kopfzerbrechen verursacht. Zuerst wurde es als eine subglaziale Auskolkung angesprochen und dann mit Hilfe von Toteis erklärt, das hier beim Schwinden des Inlandeises steckengeblieben

sei. Im vorliegenden Falle scheint mir jedoch eine dritte Erklärung gerade in Verbindung mit der Strömungsrinne näher zu liegen, nämlich der Durchbruch des hier gar nicht so tiefen Grundwassers. Unter dem festen Kern des Priwall steht ein Stockwerk bei 50 m unter NN an\*).

Der feste Kern unter dem Priwall hat naturgemäß nicht nur die Mündung der Trave, sondern den gesamten Aufbau des Priwall überhaupt stärker beeinflusst. Wenn FRIEDRICH (2) die Ansicht vertrat, der Priwall sei namentlich an der Seeseite vom Brodtener Ufer her aufgeschüttet, so hat REHDER (7) bereits 1898 unter Erwähnung einer Reihe von Einzelheiten darauf hingewiesen, er sei von der Mecklenburgischen Küste her entstanden. Ich selber neigte bis 1910 der FRIEDRICHschen Ansicht zu, schrieb aber seit 1912, daß die Lage der Travemündung an der Westseite des Priwall auf Anlandungen hinweise, die von Osten geschehen.

Diese Ansicht schließt nicht aus, daß die See zeitweise den schmalen Hals des Priwall durchbrach und der Priwall abermals, wie wir es bereits bei seiner frühesten geologischen Formung kennenlernten, eine Insel wurde, wenn auch in einem anderen Sinne.

Eine eingehende Untersuchung ergab, daß die älteste historische Urkunde von 1226 den Priwall unzweideutig als Insel aufführt. Dann nennen ihn zwei von 1247 und 1253 eine Örtlichkeit. Nunmehr aber bezeichnen sie ihn, mit einer Ausnahme von 1306, fortlaufend 1286, 1300, 1307, 1311 und 1318 als Insel, wobei zuletzt geradezu von einem festen Begriff die Rede ist. In der folgenden Zeit aber, 1332 und 1377, wird dem Priwall eine geographische oder andere Bezeichnung nicht mehr beigelegt.

Nachdem sich der Durchbruch am Hals des Priwall im Laufe des 14. Jahrhunderts offenbar für immer so weit geschlossen hatte, daß nicht mehr von einer Insel Priwall die Rede ist, stand die Natur nicht still. An der Seeseite schob sich der Strand, wenn auch langsam, weiter vor, nach REHDER (7) mutmaßlich in hundert Jahren um je 10 m. Diese natürlichen Vorgänge treten jedoch gegenüber den künstlichen seit der Jahrhundertwende in den Hintergrund. Zunächst wurde die Seeseite nördlich der Landstraße mit Baggersand kräftig aufgehöhht. Weiter draußen sank vor der Mecklenburgischen Küste an einer „Schüttstelle“, die auch die Seekarten verzeichneten, jahraus, jahrein viel Baggergut in Klappschuten auf den Boden des Meeres. Dann kamen große Aufspülungen gegen Süden, die östlich von Schlichtings Werft einsetzten. Vor ihnen wuchs eine marschartige Niederung auf, die ein noch heute gut sichtbarer Damm gegen Überflutungen abzusperren sucht. Als aber in den dreißiger Jahren in diesem Winkel eine Flugzeugwerft erstand, geschahen abermals hohe Aufschüttungen.

Alle diese Eingriffe von Menschenhand veränderten im Laufe weniger Jahrzehnte Gestalt und Gesicht des Priwall, aber auch die Zusammensetzung seines Erdreichs derart grundlegend, daß kaum ein Quadratmeter unberührt blieb, und der Eindruck einer schmalen und niedrigen Nehrung, wie er bis 1900 bestand, für immer verloren ging.

Auch an dem neuen Gebilde gestaltet das Wasser die Umrisse des Landes. Die Ostsee legt abermals Anwachsstreifen auf Anwachsstreifen vor das Nordufer. Die Pötenitzer Wiek arbeitet ein kleines Kliff hinein und schiebt nach Osten einen Haken vor, wozu eine kreisende Bewegung beiträgt, die in der Wiek umläuft und die auch oberhalb von Stülper Huk jeweils in den ostseitigen Buchten der Untertrave zu erkennen ist und dort den Untergrund umgestaltet, wie z. B. viele hundert Peilungen in der Großen Holzwiek lehren. Im Dassower See spielen sich ebenfalls ständig Veränderungen ab.

## 2. Die Strandwälle nördlich vom Hemmelsdorfer See

Mit der geschichtlichen Entwicklung des Priwall, des Travemünder Strandes und der Plate vermögen wir den Rückgang des Brodtener Ufers in seinen Einzelzügen jedoch noch

\*) Derartige Durchbrüche von Grundwasser sind in der Gegend von Lübeck mehrfach nachweisbar, nicht nur an Hand von Bohrungen, die bei der Altenfähre niedergingen, sondern wir erlebten im Dezember 1900 beim Aushub des Kuhlenskampkais tatsächlich einen derartigen Durchbruch, der mit großer Vehemenz eine Decke von 4 m Geschiebemergel durchstieß und von so starker Kraft war, daß sich das Loch monatelang nicht verstopfen ließ und noch heute Reparaturen an der dortigen Kaimauer verursacht.

nicht aufzuhellen. Diese erkunden wir erst, wenn wir auch die Ostseite des Brodtener Ufers studieren. Ehe wir uns aber dorthin begeben, wandern wir zum Pelzerhaken, der uns einen lehrreichen Wink gibt.

Vor seine Außenufer legt sich eine breite Sandmasse, die sich zur See hin scharf abhebt. Sie wandert nach Westen und verkörpert dabei eine von der Strömung des Wassers bestimmte „Triftfläche“, die nach Südwesten mit ihrem natürlichen Aufschüttungswinkel in Gestalt einer „Triftböschung“ abfällt.

Auch vor der Westzone des Brodtener Steinriffs ist nördlich von Niendorf eine solche Triftböschung erkennbar und lenkt unsere Aufmerksamkeit darauf, daß wir die heutigen Tiefenlinien nicht ohne weiteres als Ergebnis einer Abtragung des Steinriffs ansehen dürfen, so in unserem Falle nicht etwa die von 20 m.

Demgegenüber fehlen auf der Ostseite des Steinriffs Triftfläche und Triftböschung oder sind nur schwach entwickelt. Hier greift in den Prozeß einer ruhigeren Ablagerung das Mündungswasser der Trave hinein, das seeauswärts und landeinwärts hin- und herflutet und ausgleichend wirkt und neben Zufuhren, die von der See kommen mögen, die einst sicher vorhandenen tieferen Flächen mit Sinkstoffen auffüllt und dabei die feineren Züge des Bodens einebnet.

Die näheren Einzelheiten zeigen uns die bislang nicht wahrgenommenen zahlreichen Strandwälle nördlich des Hemmelsdorfer Sees. Sie sind allerdings nicht leicht aufzufinden, weil sie teils im Busch, teils in moorigen Niederungen stecken und oft auch recht flach sind. Aber ihre Zusammensetzung aus Strandsand und mitunter auch aus Strandkies mit recht ansehnlichen Geröllen und mit Lagen von Seegras dazwischen, wie sie sich bis nahe zum Hemmelsdorfer See finden, bezeugt zweifelsfrei ihre Herkunft aus der See.

Es liegt hier am Ufer der Ostsee eine der großartigsten Strandwall-Landschaften von der Weichsel bis zur dänischen Grenze vor, die nur in der Swinemündung ihresgleichen hat, wie wir dank KEILHACKS Forschungen beurteilen können. Die älteren Strandwälle stammen dabei von der Westseite her, zuerst vom Wohld, dann von der Kammer und dann von dem wenig beachteten „Hang“, der sich in gleicher Länge nordwärts an die Kammer anschließt, bis die große Niederung bis Haffkrug hinauf beginnt. Ein Teil des Materials rührt auch unmittelbar aus der See her, die bei Nordwind, aber auch bei Südwind infolge eines am Ufer entlanglaufenden Soges zwischen zwei größeren Untiefen gegen das Ufer anläuft und hier in kurzen Abständen von ungefähr 20 m „Auflandespitzen“ von Sanden auswirft, die von den „Wanderspitzen“, den Spitzen von Sanden und Kiesen, die parallel dem Ufer wandern, scharf zu unterscheiden sind.

Die von Norden heranwandernden Strandwälle schützten das dahinterliegende, größtenteils aus Geschiebemergel aufgebaute Land, so daß es mit Ausnahme einer Strecke im Nordwesten vom heutigen Hemmelsdorfer See nicht zur Ausbildung ansehnlicher Kliffs kam. Demgegenüber muß die Ostseite zunächst längere Zeit dem Brandungsprall des offenen Wassers ausgesetzt gewesen sein, wie dort die ansehnlichen scharfen, jetzt aber toten Kliffs ankünden, obwohl auch hier ältere Strandwälle nicht fehlen.

Beim Rückgang des Brodtener Ufers scheint es dann nach einer gewissen Zeit zu einem Stillstand in den Ablagerungen gekommen zu sein, woraufhin von beiden Seiten her die Andrift von Strandmaterial ziemlich plötzlich wieder kräftig zunahm und sich in zum Teil erstaunlich breiten Placken vor die älteren Strandwälle legte, bis schließlich die Bogen flacher und flacher wurden und in den heutigen Küstenverlauf zwischen Timmendorf und Niendorf übergingen, jedoch unter mancherlei Abänderungen. Im großen und ganzen lag die Trennungslinie zwischen den östlichen und westlichen Strandwällen in der Achse des heutigen Tatergrabens.

Bei der Verlandung blieb lange Zeit die große Schilfzone frei, die uns in der Gegend der Dwerbek nahe dem Ostrand der Niederung begegnet. Hier sorgt noch heute die Aalbek für die Entwässerung des Hemmelsdorfer Sees, während der Tatergraben ihm Wasser zu-trägt. Die Mündung der Aalbek war schon vor dem Bau des Niendorfer Hafens deutlich

nach Westen verschleppt. Das kleine begradigte Gerinne weist an seinem Unterlauf mehrere Altwasser auf.

Die Untersuchungen des Verfassers sind in diesem Gebiet noch nicht abgeschlossen, aber vier bedeutsame Tatsachen schälen sich nach dem Forschungsstand vom Mai 1951 schon heraus. Erstens: Der Rückgang des Steilufers an der Küste, sowohl am Wohld, an der Kammer und am Hang als auch am Brodtener Ufer, setzte sich nicht ununterbrochen fort, sondern zeigt einen Hiatus, eine Störung, die wahrscheinlich mit der von TAPFER (11) nachgewiesenen zeitweisen Verlangsamung der Landsenkung zusammenhängt.

Zweitens liegen ebenso wie am Pelzerhaken auch am Hemmeldorfer See die älteren Strandwälle beträchtlich tiefer als die jüngeren, was nicht ausschließlich auf eine nachträgliche Abtragung zurückgehen kann, sondern auch in diesem Falle ein Hinweis sein dürfte, daß die Senkung des Landes, von der angegebenen Unterbrechung abgesehen, sich seit dem Ablagern der älteren Strandwälle, wenn auch langsam, so doch ständig fortsetzt.

Drittens tritt an Hand der neuen Ergebnisse ein Gebilde zutage, das in Form und Inhalt aufs lebhafteste an den Priwall östlich Travemünde erinnert und in kleinem Ausmaß in der Tat einen zweiten Priwall darstellt, nur daß jenseits von Travemünde gewisse feinere Züge nicht mehr zu erkennen sind. Dort, wo sich heute das Warmbad von Niendorf erhebt und wo bis zur Sturmflut von 1872 ein alter Bauernhof stand, setzt im Anschluß an das Brodtener Ufer der Hals zu einer Niederung ein, die sich über den Niendorfer Hafen hinzieht, sich nach Süden aber über den dortigen Loopgraben, d. h. Laufgraben, hinaus jenem hohen Ufer nähert, das ostwärts so markant emporsteigt.

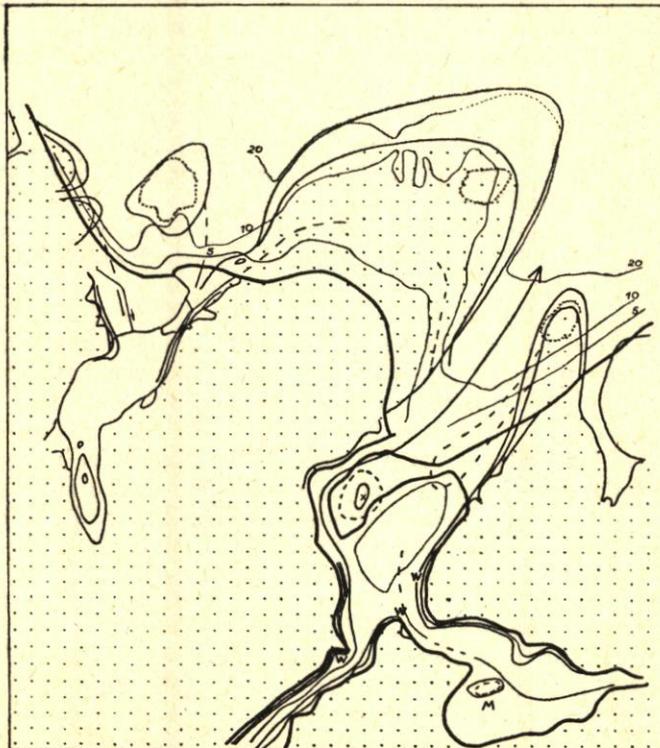
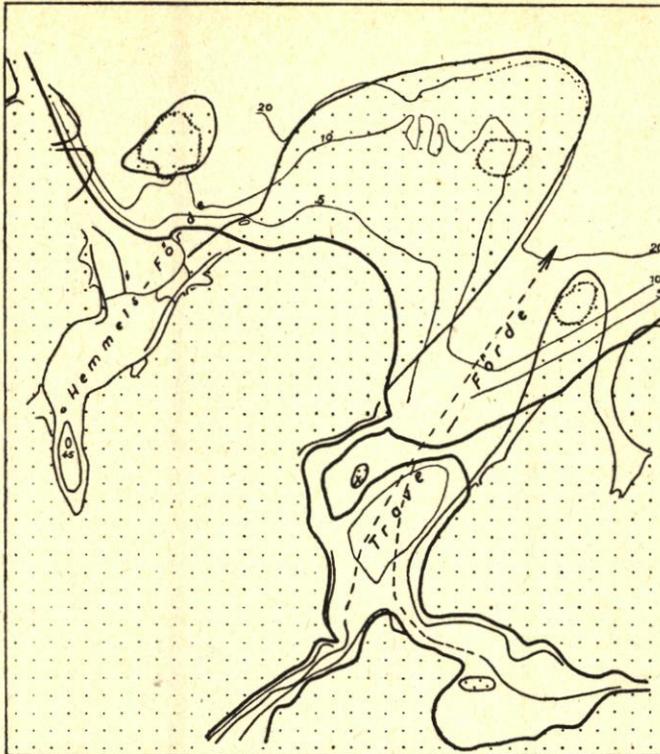
Viertens baut sich vor Niendorf gegenwärtig einer der größten Strandwälle der Lübecker Bucht vor unsern Augen auf. Er setzt am Kliff des Brodtener Ufers bereits dort ein, wo östlich des Brodtener Weges im letzten Krieg der Reichsarbeitsdienst einige buhnenartige Anlagen schuf. Von hier aus erstreckt er sich bis fast zum Niendorfer Hafen auf 3,5 km ununterbrochen dahin, so daß der Verfasser ihn im vergangenen Herbst bei einem tiefen Stand des Wassers in seiner ganzen Länge abwandern konnte, wobei er teilweise trocken lag. Aber auch bei höherem Wasserstand zeichnet er sich an dem Brandungsgischt deutlich ab. Einstweilen gleicht er einer Nehrung, die einen schmalen Wasserstreifen abschnürt, bis auch dieser eines Tages versandet ist.

Dieser Vorgang ist für die Zukunft des Brodtener Ufers von größter Bedeutung. Schon heute erfreut sich das Kliff, so weit es hinter ihm liegt, einer dichteren Bewachung, die einigen Jahrzehnten standhielt und die nur ab und zu durch Rutschungen gestört wird, während sich vor dem Niendorfer Strand eine breitere Sandzone aufbaut.

Schließlich werfen die Strandwälle nördlich des Hemmeldorfer Sees ein Licht auf die Entstehung des Priwall. Er ist weit verwickelter aufgebaut, als es seine heutige Gestalt vermuten läßt.

Sein erster Ansatzpunkt scheint mit der Untiefe hinter dem „Zögen“ zusammenzuhängen, die der Ausmündung jener Niederung vorgelagert ist, die der Harkenbach vom Deipsee her durchmißt. Je weiter diese Untiefe einer Abtragung unterlag, um so mehr Material wanderte nach Südwesten. Mengenmäßig trat es aber hinter jenem zurück, das der Küstenversatz entlang dem mecklenburgischen Ufer von der „Wendseite“ her, wie die Fischer diesen Küstenstreifen seit jeher nennen, ebenfalls nach Südwesten trug. Ein Haken schob sich nunmehr dort vor, wo die Küste zur heutigen Pötenitzer Wiek zurückspringt, und schwang sich dabei zuerst gewiß zu jener Insel hinüber, die wir als festen Kern des Priwall kennenlernten, auch wenn sie schon stärker abgetragen war.

Wir überblicken noch nicht, wie weit und in welcher Form die Insel selber Material zum Aufbau des Priwall beisteuerte, bis schließlich der Augenblick erreicht war, daß die Sande der mecklenburgischen Küste über sie hinaus in die Siechenbucht hinein gelangten, wo wir sie in Bohrungen noch nachweisen können. Dabei verfeinerte sich das Material von Osten nach Westen. Nahe der mecklenburgischen Grenze liegen bezeichnenderweise die Kiesgruben, weiter zur Mitte des Priwall finden wir nur selten einmal einige Steinchen, und in der Siechenbucht stoßen wir auf feine Sande.



Die Materialmengen, die vom mecklenburgischen Ufer heranfrachteten, lagerten sich dabei größtenteils, wie zahlreiche Bohrungen belegen, auf den feinen Sinkstoffen ab, die das Litorinameer niedergeschlagen hatte, so daß der Priwall, soweit er aus Sand besteht, sich gleich einem großen Küstenhaken auf Bildungen von Mudde und Moor legt (Abb. 1—4).

In dieser Hinsicht bietet eine andere Stelle der Lübecker Bucht, die Einfahrt in den Neustädter Hafen, ein Gegenstück, das in seiner Erkundung an den Ostseeufern einzigartig sein dürfte. Eine dichte Folge von Bohrprofilen zeigt ungemein anschaulich, wie sich von der nördlichen Einfahrtecke ein Haken über Wasser und unter Wasser ebenfalls auf Mudde und Moor vorschiebt und dabei den weichen Untergrund mit seinem Gewicht zusammendrückt, so daß er stellenweise seitwärts ausweicht, was vielleicht auch hier und da am Priwall der Fall war.

### 3. Die rechnermäßige Erfassung des Küstenrückgangs

Wenn nunmehr versucht wird, zahlenmäßig den Rückgang des Brodter Ufers zu erfassen, so soll dabei nicht der übliche Weg eingeschlagen werden, indem der jährliche

Abb. 1 (oben). Der Rückgang des Brodter Ufers in seiner Auswirkung auf die Flanken. 1. Phase

Abb. 2 (unten). Der Rückgang des Brodter Ufers in seiner Auswirkung auf die Flanken. 2. Phase

Rückgang an den einzelnen Uferstücken berechnet wird. Es wird vielmehr danach getrachtet, die Flächen und die Mengen zu ermitteln, die der Rückgang noch ergreifen wird.

Es wurde zunächst versucht, auf der Landseite des Brodtener Ufers die noch mögliche Abtragung abzuschätzen, wobei, wie auch bei den Berechnungen für die See-seite, ein Maßstab 1:20 000 der Feldermethode mit Quadraten von 20 mm Seitenlänge benutzt wurde. Einmal wurde dabei zwischen dem Ostende von Niendorf und dem Seetempel ein flacher Bogen gezogen, bis zu dem mutmaßlich der Rückschnitt erfolgen wird, dann aber zwischen beiden Punkten eine gerade Linie, die als äußerste in Betracht kommt. Die derart umgrenzte Fläche schwankt zwischen 2,048 km<sup>2</sup> und 2,672 km<sup>2</sup>. Da mit einem Totlaufen der Brandung zu rechnen ist, dürfen wir wohl 2 km<sup>2</sup> als noch „mögliche“ Abtragungsfläche in Rechnung stellen.

Dann wurde die seewärtige Fläche in drei Zonen gegliedert, zwischen 20 m und 10 m Tiefe, zwischen 10 m und 5 m Tiefe und zwischen 5 m Tiefe und dem Strand. Es war dabei klar, daß der Verlauf der 20-m-Isobathe teilweise konstruktiv unsicher ist, da eine Arbeitskarte 1:20 000 und eine andere 1:10 000 zugrunde gelegt

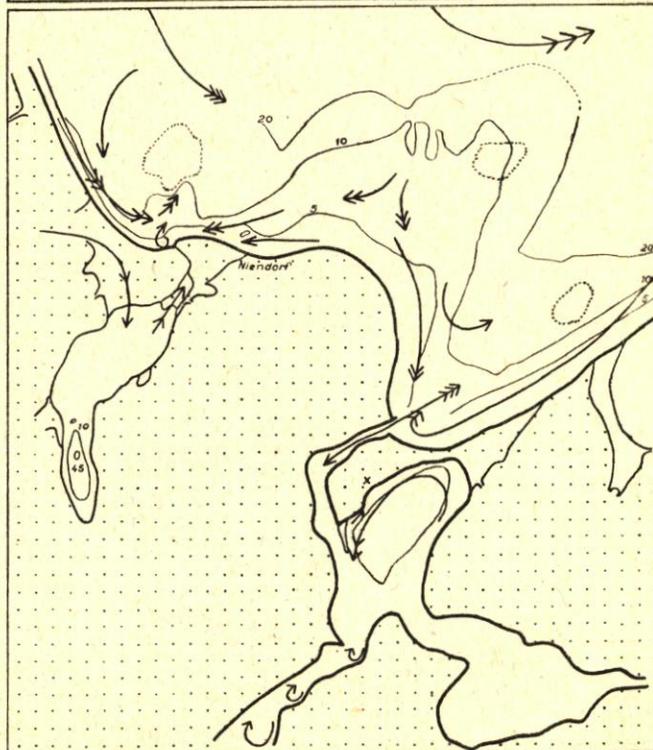
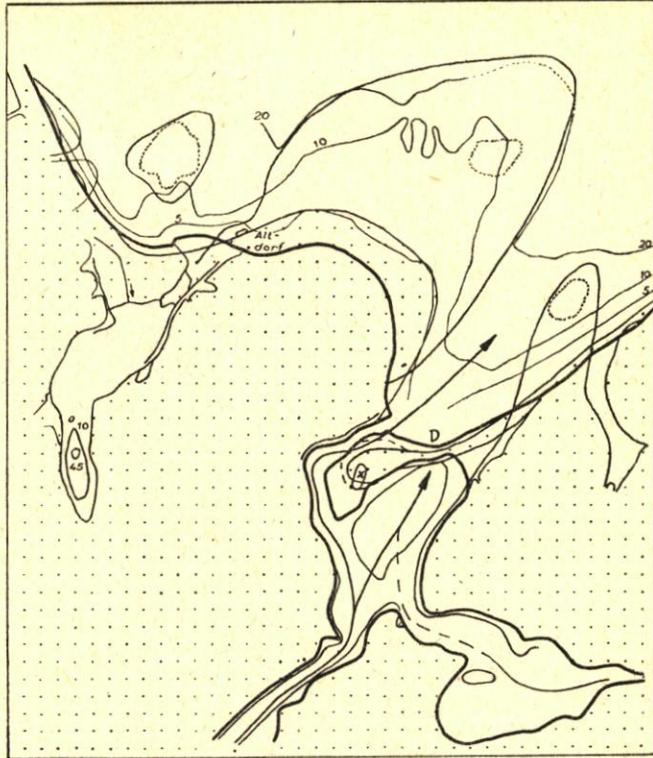


Abb. 3 (oben). Der Rückgang des Brodtener Ufers in seiner Auswirkung auf die Flanken. 3. Phase

Abb. 4 (unten). Der Rückgang des Brodtener Ufers in seiner Auswirkung auf die Flanken. 4. Phase

werden mußte, die überdies nicht annähernd aneinander schließen, dann aber auch, weil sich die Isobathen seit dem Rückgang des Ufers in einer Umgestaltung befinden, und ferner weil das Steinriff sich über die Steinrifftonne hinaus nach Niendorf zu noch etwa 3 km fortsetzt.

Unter diesem Gesichtswinkel ergaben sich 11,088 km<sup>2</sup> als abgetragen zwischen 20 m und 10 m, 10,704 km<sup>2</sup> zwischen 10 m und 5 m und 3,888 km<sup>2</sup> zwischen 5 m und dem Strand.

Demnach hat die See von der 20-m-Isobathe an bis zum Strand 25,680 km<sup>2</sup>, also rund 25,7 km<sup>2</sup> Fläche, fortgenommen. Demgegenüber wird sie in Zukunft mit 2 km<sup>2</sup> nur noch ein Dreizehntel fortnehmen können.

Ferner wurde eine Berechnung nach der Masse angestellt. Bei der Zone, die noch abgetragen wird, wurde eine durchschnittliche Landhöhe von 15 m zugrunde gelegt. Je nachdem, wie weit die Abtragung bis zum Meeresspiegel zurückschneidet, ergibt sich ein Wert von 0,031 km<sup>3</sup> bis 0,040 km<sup>3</sup>. Dabei wurde eine Abtragung bis zum Meeresspiegel in dem Gedanken eingesetzt, daß ein Teil noch eine Schrägung unter Wasser und der Rest wahrscheinlich eine Schrägung über Wasser zeitigen wird. Seewärts wurde ebenfalls eine mittlere Landhöhe von 15 m angenommen. Stellenweise mag sie, wie bei Fallum, niedriger gewesen sein. Andererseits ragte die Gegend der Hermannshöhe mit 20 m wohl auch seewärts vor, und ferner lehrt ein Vergleich mit der entsprechenden Zone auf der Mecklenburger Seite, daß das Land vielleicht stellenweise sogar anstieg und seine Höhe über 15 m lag.

Für die drei seewärtigen Zonen wurde dann bei der Zone von 20 m bis 10 m Tiefe eine mittlere Tiefe von 15 m zugrunde gelegt, bei der Zone zwischen 10 m und 5 m Tiefe eine von 7,5 m und bei der Zone von 5 m Tiefe bis zum Strand eine von 2,5 m. Nunmehr ergab sich ein Abtrag in der ersten Seezone 0,332 km<sup>3</sup>, in der zweiten Seezone 0,240 km<sup>3</sup> und in der dritten Seezone 0,068 km<sup>3</sup>. Insgesamt beläuft sich demnach die abgetragene Masse auf 0,640 km<sup>3</sup>. Noch abzutragen sind, roh gerechnet, ein Zwanzigstel an Masse, während es an Fläche ein Dreizehntel war.

Berechnen wir nunmehr die Beträge, die für den Schutz des Brodtener Ufers aufzuwenden sind, so gliedern sie sich in eine einmalige Ausgabe für die Errichtung von Schutzbauten und in laufende Ausgaben zur Unterhaltung dieser Schutzbauten und für den Kapitaldienst.

Die Kosten eines Deckwerks, das nach gewissenhafter technischer und wissenschaftlicher Überprüfung den bestmöglichen Schutz zu gewähren scheint, belaufen sich nach Regierungsbaurat PETERSEN, dem derzeitigen Leiter der „Untersuchungsstelle Brodtener Ufer“, auf 6 bis 7 Millionen DM, wobei sich die Berechnung auf den Stand der Preise von 1950 bezieht. Berücksichtigt man das seitherige weitere Ansteigen der Preise und verschiedene andere Faktoren, so glauben wir mit Fug und Recht 8 Millionen DM als bescheidenes Minimum einsetzen zu können. Sie werden für zwei Quadratkilometer aufgewandt, so daß auf 1 qm mindestens 4,— DM entfallen, auf einen Hektar demnach 40 000,— DM. Bei den alljährlich laufenden Ausgaben in Höhe von 300 000,— DM ergeben sich dazu für den Quadratmeter noch 0,15 DM und demnach je Hektar alljährlich 1500,— DM.

Diese Zahlen bekunden ohne weiteren Kommentar, ein wie gewaltiger Betrag zum Schutz je Hektar Land einwärts vom Brodtener Ufer erforderlich ist, ein Betrag, der weit über den Ertragswert und den Verkaufspreis je Hektar hinausgeht.

Bei allen diesen Berechnungen blieb außer Ansatz, daß das Deckwerk bestimmt ab und zu in größerem Umfang zu reparieren ist, nicht nur, weil sich der „Vorsand“ abbaut und somit die Brandung schärfer arbeitet, sondern weil sich sicherlich auch wieder einmal eine schwerere Sturmflut einstellen wird.

Vor allem aber droht noch eine andere Gefahr. Mit dem Bau des Deckwerks wird sich die Sandzufuhr nach Travemünde und auch nach Niendorf vermindern und eines Tages aufhören und dann nach küstenmorphologischen Erfahrungen dort zwangsweise sogar eine Sandabtragung einsetzen. Der Strand von Niendorf geht auf jenen schmalen Streifen zurück, wie er ihn um die Jahrhundertwende aufwies, und in Travemünde wird er allmählich wieder nur wenig über die Strandpromenade hinausreichen, wie es bei deren Bau der Fall war. Andererseits wandert von der Mecklenburger Küste mehr Sand heran, weil das Gleichgewicht gestört

ist. Ein „Neuer Priwall“ wächst an den heutigen heran, versandet aber die Plate und damit die Fahrrinne nach Travemünde hinauf.

Schließlich aber geht mit einem Deckwerk um das Brodtener Ufer für zahlreiche Besucher ein Anziehungspunkt erster Ordnung verloren. Seine landschaftliche Schönheit wäre dahin, das menschliche Auge sieht nichts mehr von der ungebändigten Natur der westlichen Ostsee.

Gegenüber einem Deckwerk hat es seit Beginn des Jahrhunderts noch eine Reihe anderer Vorschläge gegeben. FRIEDRICH (2) trat seit 1901 mit Nachdruck für den Ausbau von Bühnen ein, schränkte aber seine Auffassungen auf Grund neuer Tatsachen nach knapp einem Jahrzehnt wesentlich ein. REHDER (7) erachtete einen Seedamm vor dem Seetempel als ein gutes Mittel, wenigstens eine weitere Versandung der Plate zu verhindern. SÖHRMANN (8) errichtete nördlich vom Seetempel ein kleines Parallelwerk in Gestalt eines Steindammes, der später etwas verbessert wurde, und Baurat DALSTEIN (1) plante 1947, diesen Damm technisch zu verbessern und weiter um das Ufer vorzustrecken. Schließlich befaßte sich eine andere Gruppe von Projekten mit der Verlängerung und Verstärkung der Molen an der Mündung der Trave, wobei 1937 sogar eine zweite Nordermole vorgeschlagen wurde.

## 10. Einige praktische Vorschläge

Der Verfasser — als Nicht-Techniker — macht einige praktische Vorschläge, weil er seit einem halben Jahrhundert die Erfahrungen kennt, die bei den verschiedenen Bauten gesammelt wurden. Wenn er dabei zugleich die gegenwärtig so schlechte allgemeine Finanzlage berücksichtigt, so sind es rein persönliche und dazu unabhängige Vorschläge, die niemandem zuliebe oder zuleide geschehen.

Sieben Vorschläge haben sich dem Verfasser vom Priwall bis nach Niendorf hin immer wieder aufgedrängt:

1. Der erste Vorschlag geht dahin, dafür zu sorgen, daß der Söhrmann-Damm in seiner heutigen Bauweise, aber verstärkt durch einen leichten Unterbau im Sinne von Dalstein, erhalten bleibt und bei Zerstörungen jeweils erneuert und auch noch etwas verlängert wird. Damit wäre nordwärts vom Seetempel ein Strand fernab vom Getriebe eines modernen Seebades geschaffen und andererseits ein Wandern des Sandes zur Travemünder Promenade nicht abgeschnitten, sondern nur vorübergehend verlangsamt.

2. Der zweite Vorschlag sieht vor, in ähnlicher Weise an der Niendorfer Flanke des Brodtener Ufers vorzugehen, und zwar vom Ende der dortigen Promenade bis etwas über den ersten Weg hinaus, der von dem noch bewachsenen Brodtener Ufer nach dem Dorf Brodten abzweigt.

3. Man sollte alle Bestrebungen, die flache Bucht zwischen dem Ende der Travemünder Promenade und dem Möwenstein mit Hilfe eines Bühnenfeldes aufzusanden, unterstützen und beschleunigen. Damit wäre jenem Teil der Bevölkerung, der eine Abgabe für die Benutzung des Travemünder Strandes zu zahlen nicht in der Lage ist, dort ein weitaus erfreulicheres Badeleben ermöglicht, als es heute der Fall ist.

4. Durch eine kritische Untersuchung technischer und wissenschaftlicher Art ist zu prüfen, ob es ratsam ist, die Nordermole zu verstärken und zu verlängern. Ehe hier etwas unternommen wird, ist eine sorgfältige Planung unter Auswertung aller vorliegenden Erfahrungen erforderlich.

5. Den Stumpf der Südermole sollte man durch ein Leitwerk verlängern ähnlich, wie es schon REHDER (7) vorgeschlagen hat.

6. Der anderen Flanke des Brodtener Ufers entsprechend ist ein Umbau des Niendorfer Hafens vorzunehmen, der durch seine seewärts erfolgten Verlängerungen der Gefahr ausgesetzt ist, von der Ostseite her weiter zu versanden, auf seiner Westseite aber einen gefährlichen Wirbel begünstigt, der bei gewissen Winden die Einfahrt und Ausfahrt sehr erschwert und zugleich die Küste angreift und ins Land vorstößt.

7. Der siebente und letzte Vorschlag aber geht dahin, auf der weitaus größten Strecke des Brodtener Ufers nichts zu unternehmen, sondern es dem Abbruch zu überlassen. Selbst ein Deckwerk verspricht keinen Schutz für die Ewigkeit und ist überdies im Hinblick auf den Wert des Bodens wie auch auf die notwendigen Finanzmittel in einem auf Jahre verarmten Deutschland nicht vertretbar. Außerdem wäre die landschaftliche Schönheit des Brodtener Ufers für lange Zeit dahin.

#### Schriftenverzeichnis

1. DALSTEIN, W.: Schutz des Brodtener Ufers. Denkschrift vom 7. Mai 1947 an das Bauamt Lübeck. Handschrift.
2. FRIEDRICH, P.: Das Brodtener Ufer bei Travemünde, sein Rückgang und seine Erhaltung. Lübeckische Blätter 1901.
3. FRIEDRICH, P. u. HEIDEN, H.: Die lübeckischen Litorinabildungen. Mitt. Geogr. Ges. u. Naturhist. Museum Lübeck, Heft 20, 1905.
4. FRIEDRICH, P. u. HEIDEN, H.: Die Litorina- und Prälitorinabildungen unter dem Priwall bei Travemünde. Ebenda, Heft 25, 1912.
5. FRIEDRICH, P. u. HEIDEN, H.: Die Grundwasserverhältnisse der Stadt Lübeck. Lübeck 1917.
6. REHDER, P.: Die Gewässer im ganzen Umfange des Niederschlagsgebietes der Trave, unter besonderer Berücksichtigung der schiffahrtlichen Verhältnisse. Zweiter Teil des Werkes: Die Freie und Hansestadt Lübeck, ein Beitrag zur deutschen Landeskunde. Lübeck 1890. (Gedruckt, aber nicht erschienen und bis auf wenige Exemplare vernichtet.)
7. REHDER, P.: Bericht vom 28. Dezember 1898 an die Baudeputation über die Vertiefung der Trave auf 7,50 m. Drucksache 1899 Nr. 13 a.
8. SÖHRMANN, F.: Eingabe an die Hansestadt Lübeck vom 22. Dezember 1945. Handschrift.
9. SPETHMANN, H.: Geomorphologische Forschungen an den Flanken des Brodtener Ufers. Januar 1951. In 14 Exemplaren vervielfältigt.
10. SPETHMANN, H.: Forschungen im innersten Winkel der südwestlichen Ostsee. Forschungen Geogr. Ges. u. Naturhist. Museum Lübeck. Im Erscheinen.
11. TAPPER, E.: Meereshgeschichte der Kieler und der Lübecker Bucht im Postglazial. Geologie der Meere und Binnengewässer, Bd. 4, Heft 2, 1940.

# Hohe Wasserstände in der Lübecker Bucht von 1885 bis 1949

Von Erich Stark

Die fast alljährlich in der Lübecker Bucht auftretenden Hochwasser mit ihren Überschwemmungen und zum Teil erheblichen Schäden gaben Veranlassung, eine Aufstellung über alle in Lübeck aufgetretenen Hochwasser nach Dauer, Häufigkeit und Hochwasser verursachenden Wetterlagen für einen möglichst langen Zeitraum anzufertigen.

Als Hochwasser soll jeder Wasserstand bezeichnet werden, der höher als + 80 bis + 90 cm NN liegt, da dann schon die Überflutung einiger tiefer gelegener Straßenteile Lübecks stattfindet. Die Wasserstände von mehr als + 50 cm NN in Lübeck benetzen bereits den Fuß des Brodtener Ufers und sind deshalb von Bedeutung. Aus der vollständigen Beobachtungsreihe vom Pegel Staatswerft in Lübeck seit 1883 wurde die Dauer der Wasserstände von + 50 bis + 59 cm NN, + 60 bis + 69 cm NN usw. auf halbe Stunden ausgezählt und nach Monaten und Jahren zusammengestellt. An Hand dieser Unterlagen erfolgte beim Meteorologischen Amt für Nordwestdeutschland in Hamburg ein Vergleich mit den im täglichen Wetterbericht veröffentlichten Wetterkarten.

Die Bearbeitung der Hochwasserwetterlagen führte über die lokalen Winde zu der Betrachtung der Windverhältnisse in der gesamten Ostsee, des Kattegats und des Skagerraks. Zeitlich waren oft die Windverhältnisse der voraufgegangenen Tage entscheidend, um die Ursache der hohen Wasserstände im Untersuchungsgebiet zu erklären.

Länger anhaltende und starke Nordostwinde verursachen das Ansteigen des Wasserspiegels in der Lübecker Bucht. Diese Winde entstehen dann, wenn über Skandinavien ein Hochdruckgebiet und über Süd- bzw. Mitteleuropa ein Tiefdruckgebiet mit entsprechend starkem Gradienten liegt. Von der Stärke des Gradienten und der mehr oder weniger schnellen Verlagerung der Druckzentren ist die Höhe und die Dauer des hohen Wasserstandes abhängig. So haben sogenannte Vb-Lagen<sup>1)</sup> mit starkem Gradienten<sup>2)</sup>, die stets eine langsame Wetterentwicklung zeigen, Hochwasser von besonders langer Dauer zur Folge. Als Beispiel sei der Sturm vom 24. bis 27. 3. 1898 angeführt (Abb. 1 B).

Um einen Überblick über den Anteil der einzelnen Wetterlagen an den Häufigkeiten zu bekommen, wurden diese nach den drei Hochwasser verursachenden Wetterlagen geordnet. Unter A sind alle Wetterlagen eingereiht, bei denen ein Tiefdruckgebiet durch die südliche Ostsee oder deren angrenzenden Bereich zieht, also meist eine ziemlich schnelle Wetterentwicklung vorhanden ist (Hauptzugbahnen der Zyklonen III und IV). Unter B werden diejenigen Wetterlagen mit langsamer Entwicklung, bei denen ein Hochdruckgebiet im Norden und ein Tiefdruckgebiet im Süden der Lübecker Bucht liegt, verstanden. C weist Wetterlagen mit einem Tiefdruckgebiet im Norden bzw. im Nordosten und einem Hochdruckgebiet im Südwesten oder Westen der Lübecker Bucht auf (Hauptzugbahnen der Zyklonen I und II). Hierzu wurden auch die Wetterlagen gezählt, die als reine Südwest- oder Westwetterlagen anzusehen sind und bei denen der Wasserstand in Lübeck durch Zurückfluten des im Osten angestauten Wassers anstieg. In Grenzfällen zwischen A- und C-Wetterlagen wurde so verfahren, daß nördliche Winde mit einer Westkomponente in der westlichen Ostsee zu den A-Wetterlagen und nördliche Winde mit einer Ostkomponente in der westlichen Ostsee zu den C-Wetterlagen gezählt wurden.

Wie Tabelle 3<sup>3)</sup> erkennen läßt, wurden die meisten hohen Wasserstände durch die unter A gezählten Wetterlagen verursacht, während die unter B und C gezählten Wetterlagen beide

<sup>1)</sup> Vb-Lage = Zugstraße der Tiefdruckgebiete, die von der nördlichen Adria über Ungarn, Polen zum Ostseeraum ziehen.

<sup>2)</sup> Gradient = Luftdruckgefälle des Barometerstandes in Millimetern auf einer Strecke von 111 km, senkrecht zu den Isobaren gemessen.

<sup>3)</sup> Das umfangreiche Tabellenwerk befindet sich im Archiv des Wasser- und Schiffsamtes in Lübeck, Musterbahn 19.

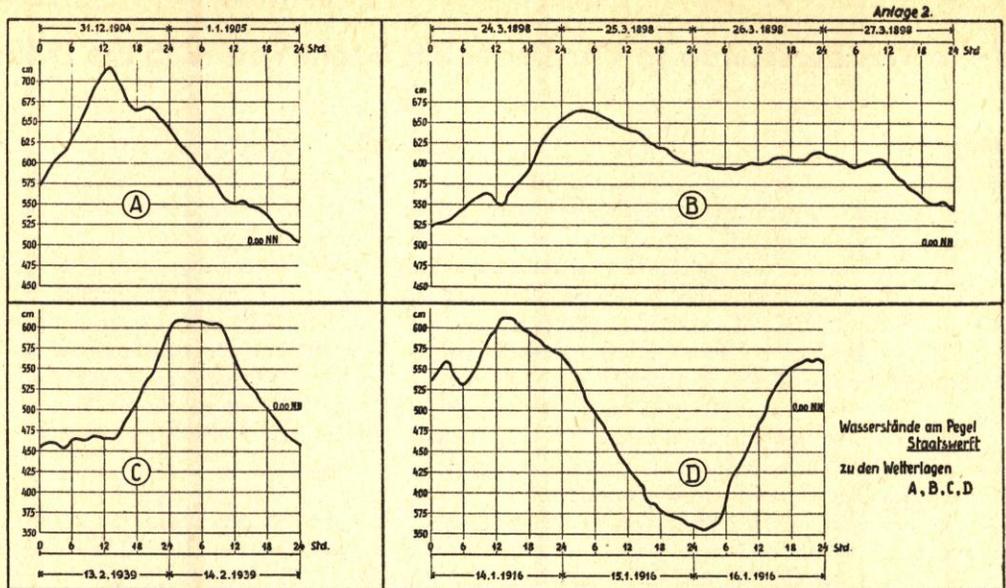


Abb. 1.

gleich stark beteiligt waren. Bei den Wasserständen + 50 bis + 60 cm NN steht C an weit-aus erster Stelle, während bei Wasserständen ab mehr als + 60 cm NN schon die unter A gezählten Wetterlagen führend sind und die C-Wetterlagen bei Wasserständen von mehr als + 100 cm NN auch hinter den B-Wetterlagen zurückstehen.

Vergleicht man die Häufigkeiten der einzelnen Monate, dann ist bei der A-Wetterlage der Dezember führend, während die Monate Januar, November, März und Oktober etwa gleich stark beteiligt sind. In der Zeit von April bis August einschließlich sind die hohen Wasserstände in erster Linie durch die B-Wetterlage hervorgerufen worden, während die C-Wetterlage im Februar und September an erster Stelle steht. Einzelheiten über die Dauer hoher Wasserstände werden in Tabelle 4 mitgeteilt.

#### Zusammenfassung

1. Die hohen Wasserstände der Lübecker Bucht sind niemals von den augenblicklichen und örtlichen Windverhältnissen, sondern von denen der gesamten Ostsee abhängig.
2. Hochwasser tritt in der Lübecker Bucht bei folgenden Wetterlagen auf:
  - a) bei einem Hochdruckgebiet über Skandinavien und einem Tiefdruckgebiet über Mittel- bzw. Südeuropa;
  - b) wenn ein kräftiges Tief von Westen über die Odermündung in östlicher Richtung abzieht und
  - c) auch dann, wenn ein kräftiges Tiefdruckgebiet über Nordskandinavien sich nach Osten verlagert und der Wind auf der Rückseite eines solchen Tiefs in der östlichen Ostsee mit Sturmesstärke aus nordöstlicher Richtung weht, während er in der westlichen Ostsee wohl etwas abflaut, aber seine Richtung im wesentlichen aus West bis Nordwest beibehält.
3. Extreme Hochwasser sind zu erwarten, wenn ein kräftiges Tiefdruckgebiet über die Odermündung nach Osten zieht. Hochwasser von sehr langer Dauer treten bei Vb- oder Vb-ähnlichen Wetterlagen auf.
4. Der am Abbruch des Brodtener Ufers beteiligte Wasserstand von z. B. + 1,00 m NN hat in den letzten 65 Jahren rund 600 Stunden den Fuß des Kliffs benetzt.
5. In den Sommermonaten Juni, Juli und August steigt das höchste Hochwasser im allgemeinen nicht über + 70 bis + 80 cm NN.

# Strömungsverhältnisse in der Lübecker Bucht

Von Günter Dietrich und Hartwig Weidemann

## Inhalt

|  |    |
|--|----|
| 1. Aufgabenstellung . . . . .  | 69 |
| 2. Das Untersuchungsprogramm und seine Durchführung . . . . .                                      | 71 |
| 3. Die Strömungsverhältnisse bei ausgewählten Windlagen  |    |
| a) bei östlichen Winden . . . . .  | 74 |
| b) bei westlichen Winden . . . . .   | 78 |
| 4. Die Strömungsverhältnisse in der Travemündung . . . . .   | 83 |
| 5. Zusammenfassung und Bemerkungen zu den Strömungsverhältnissen<br>in der Brandungszone . . . . . | 85 |

## 1. Aufgabenstellung

Die Aufgabe bestand in der Ermittlung der Strömungsverhältnisse in der Lübecker Bucht im allgemeinen und ihres Anteils an den Abtragungsvorgängen vor dem Brodtener Ufer zwischen Niendorf und Travemünde im besonderen. Der zweite Teil dieser Aufgabe mit seinen hohen Anforderungen an direkte Strommessungen in See entsprang unmittelbar den Bedürfnissen des Wasserbaus. Zusammen mit anderen Untersuchungen der natürlichen Verhältnisse galt es zu klären, mit welchen Mitteln die Küste vor den abtragenden Kräften wirksam geschützt werden kann.

Die vorliegende spezielle Aufgabe erschien nicht lösbar, ohne daß versucht wurde, die Strömungsvorgänge vor dem Brodtener Ufer in einen größeren Zusammenhang mit den Verhältnissen in der Lübecker Bucht zu bringen. Aber auch bei der Einbeziehung der Lübecker Bucht in die Betrachtung kann nur eine Teillösung der Fragestellung erwartet werden, da die Vorgänge in der Brandungszone durch Messungen nicht erfassbar waren. Die geeigneten meßtechnischen Voraussetzungen fehlen dafür. Gerade diesen Vorgängen muß aber eine übertragende Bedeutung zugesprochen werden, sowohl wegen der zerstörenden, als auch wegen der transportierenden Kräfte, die mit ihnen verbunden sind. Sie finden im folgenden kurz Erwähnung, soweit man aus allgemeingültigen Ergebnissen neuerer Brandungsuntersuchungen Aussagen über die Verhältnisse in der Lübecker Bucht machen kann.

Das Meßprogramm befaßte sich ausschließlich mit der Ermittlung der Strömungsverhältnisse der Lübecker Bucht außerhalb der Brandungszone. Auch diese Aufgabe stellte umfangreiche Anforderungen an die Messungen, die sich aus der allgemeinen Natur der Strömungen in der Lübecker Bucht ergaben.

Bei einer Gesamtküstenlänge von 69 km von Dahmeshöved im Norden über Neustadt und Travemünde bis Klützhöved im Osten und bei einer Gesamtbreite der Öffnung zwischen Dahmeshöved und Klützhöved von 21 km stellt die Lübecker Bucht einen Teil der Mecklenburger Bucht dar. Diese Randstellung kommt auch in den Strömungsverhältnissen zum Ausdruck. Sie wird deutlich, wenn man die großräumigen Strömungsverhältnisse an der Oberfläche zwischen Kattegat und eigentlicher Ostsee betrachtet. In den beiden Karten in Abbildung 1 nach G. DIETRICH (2) sind die Oberflächenströmungen bei Ost- und Westwinden Stärke 6 gegenübergestellt, die sich auf Tagesmittel des Windes und der Oberflächenströmung beziehen. Der Anteil windbedingter Gefällsströmungen ist bei den höheren Stromgeschwindigkeiten entscheidend beteiligt. Er ist durch die geographische Lage besonders begünstigt, dadurch daß Kattegat, Sund und Beltsee das Ostende des Skagerraks mit dem Westende der eigentlichen Ostsee verbinden. Der gleiche Wind ruft entgegengesetzte Stauwirkung im östlichen Skagerrak und im westlichen Teil der eigentlichen Ostsee hervor. Westliche Winde zum Beispiel erzeugen

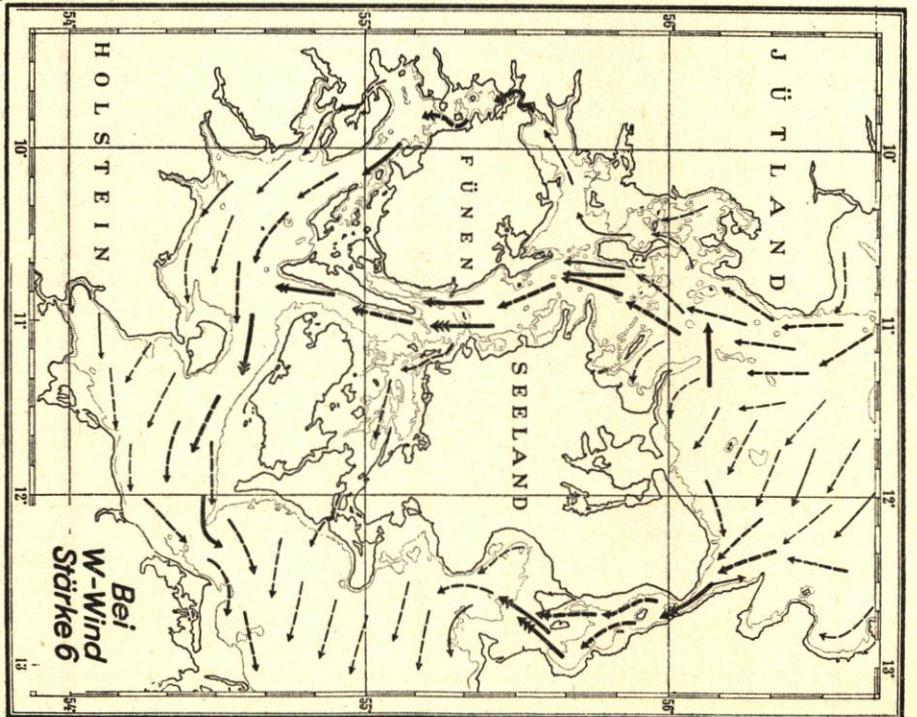
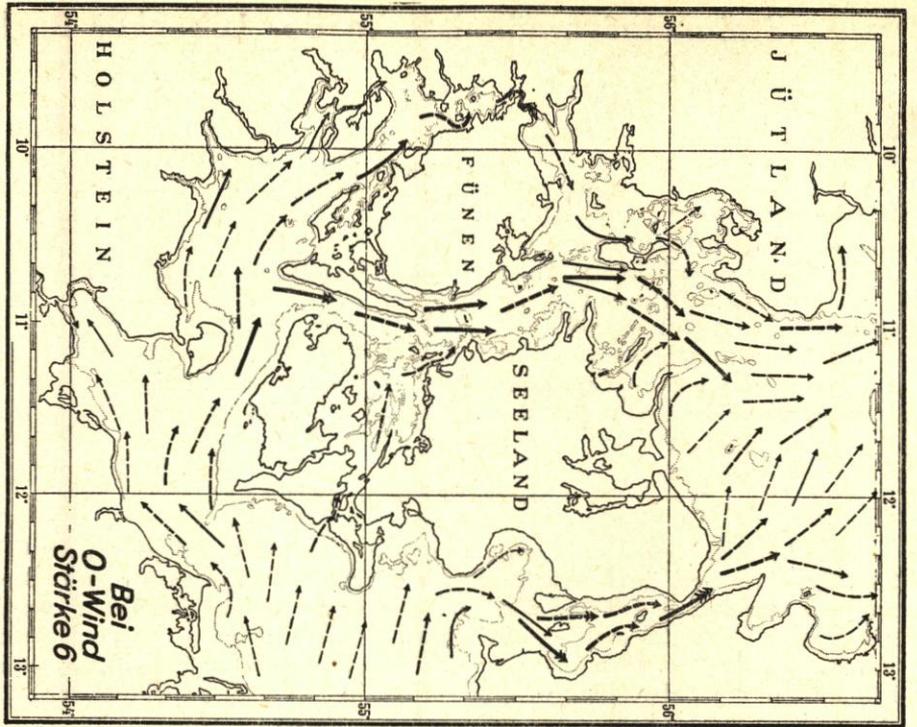


Abb. 1. Oberflächenströmungen in der Beltsee bei Ostwind und bei Westwind Stärke 6 (nach G. DIERICH, 1951)

Strom- und Windangaben beziehen sich auf Tagesmittelwerte, die Windangaben außerdem auf die mittlere Luftbewegung im Meeresniveau im Gebiet mit den Grenzen Skagen—Kopenhagen—Fehmarn—Blaavandshuk

Stromgeschwindigkeit in cm/Std  
(für 10 m unter Wasseroberfläche)

Häufigkeit des Stromrichtung in %  
(anzusehen nach nicht auf Beobachtungen)

|   |           |   |                    |
|---|-----------|---|--------------------|
| ← | < 0,2     | ← | > 75               |
| ← | 0,2 - 0,5 | ← | 50 - 75            |
| ← | 0,5 - 1,0 | ← | 25 - 50            |
| ← | 1,0 - 1,5 | ← | 10 m Referenzlinie |
| ← | 1,5 - 2,0 |   |                    |
| ← | > 2,0     |   |                    |

eine Erhöhung des Wasserstandes im östlichen Skagerrak, aber eine Erniedrigung im westlichen Teil der Ostsee, begünstigen damit ein großes Spiegelgefälle zwischen Skagerrak und Ostsee und demzufolge einen starken Oberflächenstrom durch die Durchlässe der Beltsee in Richtung auf die Ostsee. In engem Zusammenhang mit den Änderungen des Spiegelgefälles zwischen beiden Seegebieten, die mit den Änderungen von Richtung und Stärke des Windes auftreten, unterliegt auch der Durchstrom Schwankungen in der Geschwindigkeit und Wechsel in der Richtung. Es sind auch andere Anteile in den beobachteten Oberflächenströmungen enthalten, wie Gezeitenströme, Strömungen im Zusammenhang mit Eigenschwingungen einzelner Seegebiete oder der ganzen Ostsee, Triftströmungen oder Strömungen, die aus dem unterschiedlichen Dichteaufbau der Wassermassen folgen. Sie spielen aber gegenüber den windbedingten Gefällsströmungen zwischen Kattegat und Ostsee eine untergeordnete Rolle. Dies gilt naturgemäß nur für die Durchlässe und ihre Verbindungsstücke, es gilt nicht für die randlichen Buchten. Zu diesen Buchten gehört aber die Lübecker Bucht.

Nur gelegentlich nimmt die Lübecker Bucht mittelbaren Anteil an den Vorgängen des Durchstromes zwischen Fehmarn-Belt und Gedser-Enge. Dies tritt dann ein, wenn bei langanhaltendem Ein- bzw. Ausstrom der eigentlichen Ostsee salzreiches Kattegatwasser oder salzarmes Ostseewasser sich in den oberen Wasserschichten bis in die innere Lübecker Bucht ausbreitet. Für die Entwicklung der Strömungen selbst werden jene Anteile entscheidend, denen für die Wasserbewegung in den Durchlässen der Beltsee und ihren Verbindungsstücken nur zweitrangige Bedeutung zukommt. Abgesehen vom periodischen Gezeitenstrom sind auch diese Anteile in den gemessenen Strömungen mittelbar oder unmittelbar vorwiegend vom Winde abhängig. Eine Behandlung der Strömungsverhältnisse in der Lübecker Bucht setzte deshalb voraus, daß die Messungen bei verschiedenen Windlagen erfolgten. Hierin lagen die besonderen äußeren Schwierigkeiten des Untersuchungsprogramms, das sich nicht kurzfristig auf eine Auswahl von Wetterlagen abstellen ließ. Mehrfache Wiederholungen bzw. Dauer-messungen waren notwendig, um wenigstens eine gewisse Anzahl von Wetterlagen zu erfassen. Im folgenden machen es Raumgründe erforderlich, unter ihnen eine enge Auswahl zu treffen. Wir beschränken uns hauptsächlich auf die Beobachtungen bei östlichen und westlichen Winden. Diese Begrenzung erscheint insofern begründet, als damit die Gegensätze in den Stromverhältnissen bei auflandigen und ablandigen Winden in der Lübecker Bucht zur Darstellung gelangen.

## 2. Das Untersuchungsprogramm und seine Durchführung

Keine einzelne ozeanographische Meßmethode gestattet, die Mannigfaltigkeit der Strömungsvorgänge in ausreichender Vollständigkeit zu erfassen, besonders nicht im vorliegenden Seegebiet bei der zu erwartenden Veränderlichkeit der Strömungen. Erst aus der gegenseitigen Ergänzung der Ergebnisse nach verschiedenen Untersuchungsmethoden, die nebeneinander zur Anwendung gebracht wurden, konnte man hoffen, dem Untersuchungsziel näher zu kommen. Es handelte sich um folgende Methoden, die zur Anwendung gelangten:

- I. Abgrenzung der Wasserkörper nach Temperatur und Salzgehalt und Verfolgung ihrer Ausbreitung durch wiederholte Messungen in ein- bis dreitägigen Abständen innerhalb eines festgelegten Stationsnetzes.
- II. Messungen der Strömungen innerhalb des gleichen Stationsnetzes mit dem Stromkreuz an der Oberfläche und in Bodennähe.
- III. Messungen der vertikalen Stromverteilung vom verankerten Schiff an ausgewählten Punkten über einen längeren Zeitraum. Zugrunde gelegt wurden 48 Stunden bei Verwendung des bifilar aufgehängten Strommessers nach H. RAUSCHELBACH (9).
- IV. Dauerstrommessungen in einer Tiefe an ausgewählten Punkten über mehrere Wochen. Hierfür wurden drei Schaufelradstrommesser verwendet.

V. Wasserstandsregistrierungen mit Schreibpegeln an der Küste, zeitweilig ergänzt durch einen Hochseepegel in der Öffnung der Lübecker Bucht zur Mecklenburger Bucht.

Drei Schaufelradstrommesser, einen Bifilar-Strommesser nach Rauschelbach, einen Hochseepegel nach Rauschelbach und die Registrierpegel stellte das Deutsche Hydrographische Institut zur Verfügung. Die Messungen, die unter die Punkte I—III fallen, erfolgten mit dem Forschungskutter „Südfall“ vom Institut für Meereskunde der Universität Kiel unter der Leitung von H. WEIDEMANN, der auch die Bearbeitung ausführte. Messungen und Bearbeitung zu Punkt IV unterstanden G. DIETRICH. Das Auslegen und Aufnehmen der Geräte wurde mit dem Tonnenleger „Bussard“ vom Wasser- und Schiffsamt Kiel im Rahmen seiner Betonungsarbeiten durchgeführt. Die Betreuung der Küstenpegel zum Punkt V unterstand M. PETERSEN, die des Hochseepegels G. DIETRICH. Über die Ergebnisse der Bearbeitung der Wasserstandsänderungen berichtet W. HANSEN (3) in einer gesonderten Untersuchung. Auf den Programmpunkt V wird deshalb im folgenden nicht weiter eingegangen.

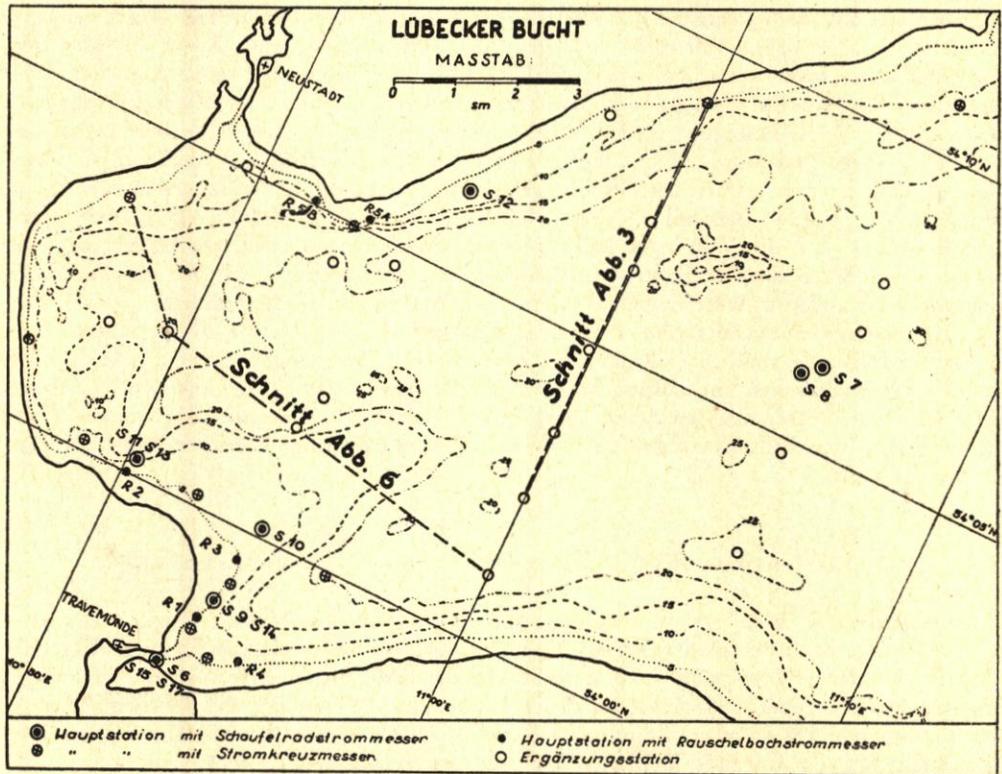


Abb. 2. Verteilung der Meßstellen in der Lübecker Bucht

- I ○ für Wasserkörperbestimmung aus Temperatur- und Salzgehaltsschichtung
- II ⊕ zusätzlich zu I für Stromstichproben mit Stromkreuz
- III ● R1—R5 für Bestimmung vertikaler Stromverteilung mit Rauschelbach-Strommesser
- IV ⊙ S6—S17 für Dauerstrommessungen mit Schaufelradstrommessern
- Verlauf der Vertikalschnitte in Abb. 3 und 6  
Tiefen in m

Die Verteilung der Meßstellen zu den einzelnen Programmpunkten ist aus Abbildung 2 zu ersehen. Tabelle 1 enthält zur Ergänzung die Positionen und Meßzeiten zu den Programmpunkten I—IV.

Tabelle 1

Meßzeiten und Positionen der ausgeführten Beobachtungen in der Lübecker Bucht zu den Programmpunkten I—IV im Jahre 1950

| Programmpunkte  | Meßzeit               |               | Wiederholungen            |               |                          |
|---|-----------------------|---------------|---------------------------|---------------|--------------------------|
| I. Wasserkörper   | 5. 2.—21. 2.          |               | 6 mal mit 12—19 Stationen |               |                          |
| (Temperatur- u.   | 27. 4.—12. 5.         |               | 8 " " 12—19 "             |               |                          |
| Salzgehaltsverteilung)  | 22. 7.— 7. 8.         |               | 6 " " 15—20 "             |               |                          |
| II. Strom-Stichproben   | 5. 2.—21. 2.          |               | 6 " " 9—13 "              |               |                          |
| (Stromkreuz)  | 27. 4.—12. 5.         |               | 8 " " 9—14 "              |               |                          |
|   | Meß-<br>stelle<br>Nr. | $\varphi$ (N) | $\lambda$ (E)             | Meßzeit       | Meßtiefen<br>m           |
| III. Vertikale<br>Stromverteilung<br>(Rauschelbach-<br>strommesser) | R1                    | 53°58.5'      | 10°53.6'                  | 23. 7.—25. 7. | 0.5—2.5—4.5<br>0.5—3.5—6 |
|   | R2                    | 54°00.1'      | 10°50.2'                  | 26. 7.—28. 7. | 0.5—2.5—4.5              |
|   | R3                    | 53°59.6'      | 10°53.8'                  | 29. 7.—31. 7. | 0.5—2.5—4.5              |
|   | R4                    | 53°58.2'      | 10°54.9'                  | 1. 8.— 3. 8.  | 0.5—2.5—5.5              |
|   | R5a                   | 54°05.2'      | 10°53.4'                  | 4. 8.         | 0.5—2.5—5.5              |
|   | b                     | 54°05.1'      | 10°51.5'                  | 4. 8.— 6. 8.  | 0.5—2.5—5.5              |
|   |                       |               |                           |               | über Grund, unt. Obfl.   |
| IV. Dauerstrom-<br>messungen<br>(Schaufelrad-<br>strommesser)       | S6                    | 53°57'50"     | 10°53'05"                 | 22. 3.— 4. 4. | 3 5                      |
|   | S7                    | 54°06'06"     | 11°05'30"                 | " " " "       | 3 19.5                   |
|   | S8                    | 54°05'57"     | 11°05'09"                 | " " " "       | 17.5 5                   |
|   | S9                    | 53°58'54"     | 10°54'00"                 | 5. 4.— 6. 4.  | 3 4.5                    |
|   | S10                   | 54°00'09"     | 10°53'48"                 | 5. 4.—18. 4.  | 3 5.0                    |
|   | S11                   | 54°00'12"     | 10°50'21"                 | " " " "       | 3 4.0                    |
|   | S12                   | 54°06'18"     | 10°55'18"                 | 19. 4.— 3. 5. | 3 3.5                    |
|   | S13                   | 54°00'12"     | 10°50'21"                 | " " " "       | 3 4.0                    |
|   | S14                   | 53°58'54"     | 10°54'00"                 | " " " "       | 3 5.0                    |
|   | S15                   | 53°57'50"     | 10°53'05"                 | 3. 5.— 4. 5.  | 2.5 5.0                  |
|   | S17                   | 53°57'50"     | 10°53'05"                 | " " " "       | 5 1.0                    |

Zu der Durchführung der Programmpunkte I bis IV sei ergänzend bemerkt:

I. Die Lage der Stationen (vgl. Abb. 2) war so gewählt, daß in einer eintägigen Rundfahrt alle hydrographisch wichtigen Punkte einmal berührt wurden. Auf allen Stationen wurden Salzgehalt und Temperatur in Tiefenstufen von 5 zu 5 m bestimmt; der unterste Meßpunkt lag jeweils etwa 1 m über Grund. Die einzelnen Rundfahrten folgten einander in Abständen von 1 bis 2 Tagen (bzw. 3 Tagen während der 3. Meßreihe).

II. Auf den küstennahen Stationen dieses Netzes (Wassertiefe 6—8 m) und einigen ausgewählten Stationen im mittleren Teil der Lübecker Bucht (Wassertiefe 20—25 m) wurden außerdem auf jeder Rundfahrt kurze Strömungsmessungen mit Stromkreuzen gemacht. Zu diesem Zweck wurden vom Heck des verankerten Schiffes aus zwei Stromkreuze ausgesetzt, deren Treibkörper bei dem einen unmittelbar unter der Oberfläche, bei dem zweiten in 4 bis 6 m Tiefe (1—2 m über Grund) standen. Mit Hilfe von Logleinen, die an den Tragebojen befestigt waren, wurden die Längen gemessen, die in bestimmten Zeiträumen ausgelaufen waren. Die Richtung der Bojen wurde in dem Augenblick bestimmt, in dem das Schiff in seine Ausgangslage zurückgeschwoit war. Zur Kontrolle der Ausgangslage wurde zu Beginn der Messung ein Lot am Heck geworfen und erst dann gepeilt, wenn die Lotleine wieder senkrecht stand.

Diese einfache Meßmethode, die auch auf den Feuerschiffen in ähnlicher Weise üblich ist, ergibt recht zuverlässige Werte; lediglich der Bodenstrommessung kann ein gewisser Fehler da-

durch anhaften, daß bei großen Differenzen zwischen Oberflächen- und Bodenstrom die Schwimboje des Tiefenkreuzes durch den Oberflächenstrom etwas mitgeschleppt wird.

III. Auf fünf jedesmal 48-stündigen Dauerstationen (vgl. Abb. 2) wurden die vertikale Stromverteilung und ihre zeitlichen Schwankungen näher untersucht. Zu diesem Zwecke wurde ein elektrisch registrierender Bifilar-Strommesser nach RAUSCHELBACH (Beschreibung s. RAUSCHELBACH [9]) je 20 Minuten an der Oberfläche, in mittlerer Tiefe (2—3 m) und dicht über Grund (4—6 m) ausgebracht, so daß in jeder Stunde in allen drei Tiefenstufen Richtung und Geschwindigkeit beobachtet werden konnten. Zur Ergänzung wurde gleichzeitig auch die Änderung der thermohalinen Schichtung verfolgt.

IV. Schaufelradstrommesser bildeten eine nützliche Ergänzung zu den Programmpunkten I bis III. Darüber hinaus boten sie durch ununterbrochene Registrierung bei jeder Wetterlage die Möglichkeit, die Strömungsverhältnisse auch bei Sturm zu erfassen, wenn die anderen Methoden von Bord eines Schiffes zwangsläufig undurchführbar waren. Die Arbeitsweise dieser Geräte, von denen drei Stück gleichzeitig zur Messung an verschiedenen Punkten herangezogen wurden, ist von J. JOSEPH (5) beschrieben. Mit Ausnahme der Meßstellen in der Travemündung und in der Öffnung der Lübecker Bucht zur Mecklenburger Bucht wurden die Geräte auf etwa 7 m Wassertiefe ausgelegt. Sie standen 3 m über Grund. Geringere Meßtiefen mußten aus Sicherheitsgründen für das auslegende Schiff und für die Geräte gemieden werden. Die Geräte lagen damit ohne Ausnahme außerhalb der Brandungszone. Sie haben sich über die Dauer der Meßzeit vom 22. 3. bis 4. 5. 1950 auch in diesem Meßprogramm vorzüglich bewährt. Besonders aus den Ergebnissen der Registrierungen bei Sturmwetterlagen lassen sich Anhaltspunkte dafür erwarten, wie weit die beobachteten Strömungen mit morphologisch wirksamen Kräften verbunden sein können.

### 3. Strömungsverhältnisse bei ausgewählten Windlagen

In der Lübecker Bucht sind im allgemeinen zwei verschiedene Wasserkörper vorhanden, die sich hinsichtlich ihrer Dichte unterscheiden:

1. Salzarmes und daher verhältnismäßig leichtes Wasser in der oberflächennahen Deckschicht mit vorwiegend 10 bis 15 ‰ Salzgehalt. Die Beimischung von Ostseewasser ist an diesen niedrigen Salzgehalten entscheidend beteiligt.
  2. Salzreiches und daher verhältnismäßig schweres Wasser in der bodennahen Schicht mit Salzgehalten um 20 bis 25 ‰, dessen Herkunftsgebiet im Kattegat zu suchen ist.
- Beide Wasserarten sind durch eine Sprungschicht voneinander getrennt, die je nach Jahreszeit und Wetterlage mehr oder weniger scharf ausgebildet ist. Sie liegt überwiegend in 15 bis 20 m Tiefe. Die vertikale Mächtigkeit der Deckschicht ist damit wesentlich größer als die der salzreichen Unterschicht; denn für diese bleiben bei den größten Tiefen von 25 m in der Lübecker Bucht im allgemeinen nur wenige Meter übrig.

Eine horizontale Lagerung der beiden Wasserarten beobachtet man nur bei ruhigen Wetterlagen. Stärkere Winde wirken sich deutlich auf die Verlagerung der Sprungschicht aus und damit auch auf die Verbreitung der Wasserarten. Aber ihr Einfluß bleibt nicht auf diese Wirkung beschränkt. Die Wassermengen der beiden Wasserarten innerhalb der Lübecker Bucht wechseln je nach den Strömungsverhältnissen in der Öffnung der Lübecker Bucht zur Mecklenburger Bucht. Wenn also die horizontale Ausbreitung der Wasserkörper aus den Beobachtungen der Salzgehaltsverteilung abgeleitet werden soll, muß stets beachtet werden, daß neben den Wirkungen von Verlagerungen in horizontaler Richtung auch solche in vertikaler Richtung auftreten.

#### a) Strömungsverhältnisse bei östlichen Winden

Einen Überblick über die Wirkung von östlichen Winden auf die Verteilung der Wasserarten vermitteln die vier Vertikalschnitte vom 4., 6., 8. und 10. 5. 1950 in Abbildung 3. Der Verlauf der Schnitte ist aus Abbildung 2 zu ersehen.

Zu Beginn der Nordostlage (4. 5., oberster Schnitt Abb. 3) ist die Schichtung der Bucht noch normal, d. h. an der Oberfläche 12 bis 13 ‰ Salzgehalt. Im Nordteil zeigt sich jedoch bereits eine Erniedrigung an der Oberfläche auf unter 11 ‰. Am 6. 5. hat sich diese Entwicklung weiter fortgesetzt; der Einschub salzarmen Wassers mit Salzgehalten unter 10 ‰ hat sich wesentlich verbreitert und dabei die Sprungschicht im gesamten Querschnitt der Bucht um etwa

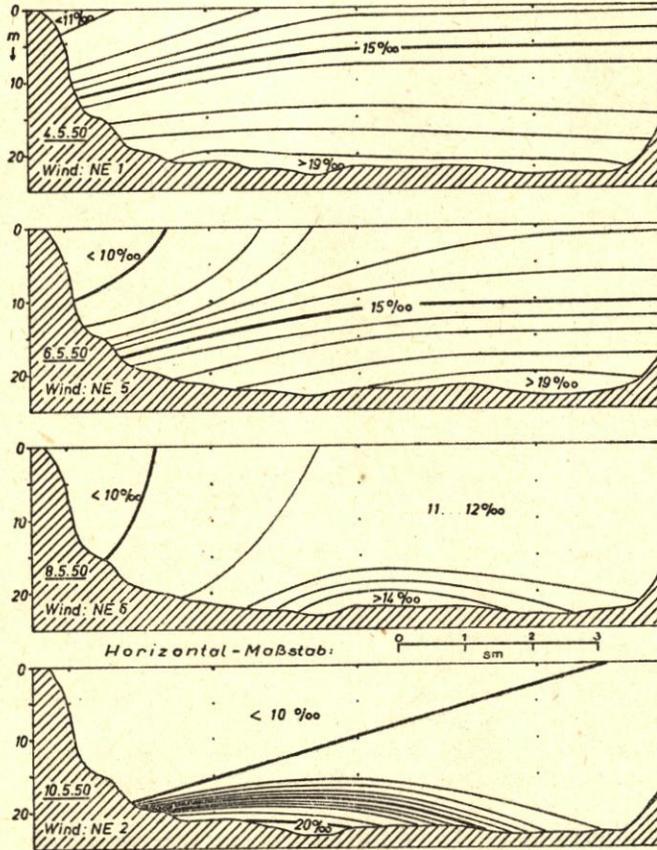


Abb. 3. Beispiel für die Salzgehaltsschichtung und ihren zeitlichen Ablauf in der Lübecker Bucht bei östlichen Winden vom 4.—10. 5. 1950  
Verlauf der Schnitte s. Abb. 2

- A. Bei Beginn einer Nordostwindlage am 4. 5. 1950
- B. Im weiteren Verlauf dieser Nordostwindlage am 6. 5. 1950
- C. Bei dem Höhepunkt dieser Nordostwindlage am 8. 5. 1950
- D. Nach Abflauen dieser Nordostwindlage am 10. 5. 1950

5 m gesenkt. Auf dem Höhepunkt der Nordostlage am 8. 5. ist praktisch die ganze Bucht von salzarmem Wasser (10—12 ‰) ausgefüllt; das Tiefenwasser ist bis auf einen geringen Rest mit über 14 ‰ Salzgehalt völlig verdrängt. Am 10. 5. schließlich ist die Ausfüllung der oberen Schichten weiter fortgeschritten, und der Salzgehalt ist überall unter 11 ‰, zu einem großen Teil sogar unter 10 ‰. In der Bodenschicht jedoch dringt bei nachlassendem Anstau bereits wieder salzreiches Wasser von etwa 20 ‰ ein, das durch eine außerordentlich scharfe Sprungschicht von der Oberschicht getrennt ist.

Wie schon aus diesen Schnitten hervorgeht, erfolgt die Ausbreitung des salzarmen Ostseewassers nicht gleichförmig über die ganze Breite der Lübecker Bucht. Die in Abbildung 4 dargestellten Ergebnisse der Oberflächenmessungen erlauben einen Einblick in den zeitlichen Ablauf an der Oberfläche.

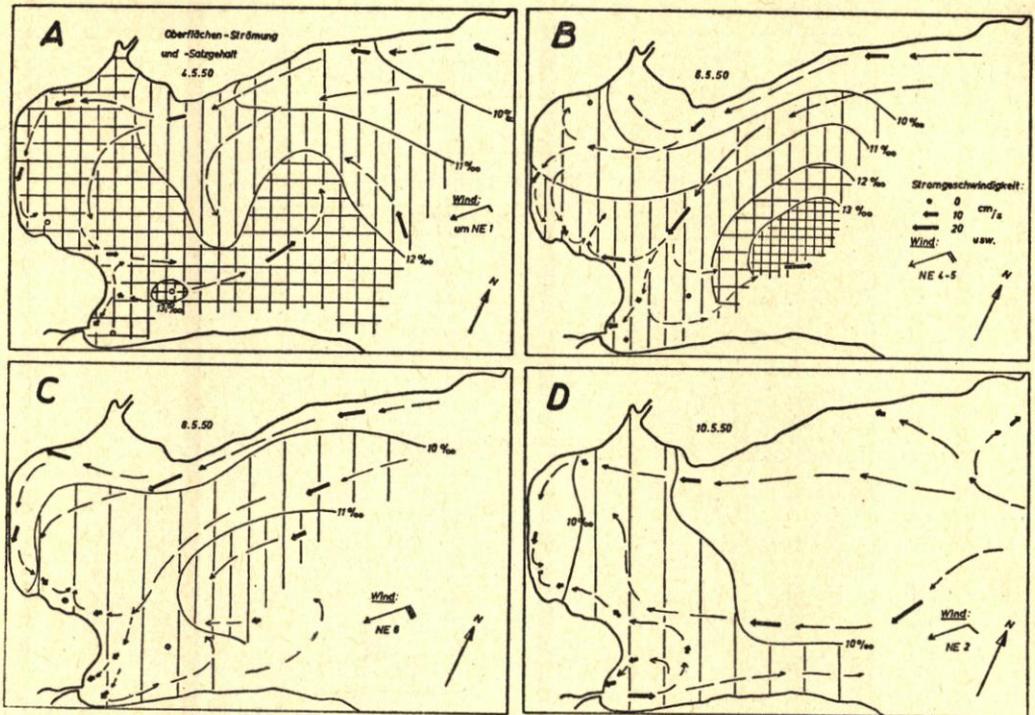


Abb. 4. Beispiel für die Ausbreitung der Wasserkörper bei östlichen Winden vom 4.—10. 5. 1950  
Verteilung des Salzgehalts an der Oberfläche in ‰ und Schema der Ausbreitung der Wassermassen mit Ergebnissen der Stromkreuzmessungen

In den Karten der Abbildung 4 sind für die gleichen Tage wie in Abbildung 3 (4. bis 10. 5. 1950) die Verteilung des oberflächensalzgehaltes und die oberflächenströmung wiedergegeben. Die Dichte der Schraffur deutet die Größe des oberflächensalzgehaltes an (weiß: unter 10 ‰, dichteste Schraffur: über 13 ‰). Die dicken Pfeile stellen die Ergebnisse der oberflächenstromkreuzmessungen dar, wobei die Länge des Schaftes ein Maß für die Stromgeschwindigkeit ist. Die dünnen gestrichelten Pfeile sollen den Gesamtcharakter der Wasserbewegung nach Rückschlüssen aus Stromkreuzmessungen und Salzgehaltsverteilung verdeutlichen.

Der Einstrom erfolgt vornehmlich längs der nördlichen Begrenzung der Lübecker Bucht; die Ergebnisse der Stromkreuzmessungen und die Verlagerung der 10 ‰-Isohaline sprechen deutlich dafür. Dem steht an den beiden ersten Tagen in der südlichen Hälfte der Bucht ein kräftiger Ausstrom gegenüber. Ferner fallen in den drei Karten für den 6., 8. und 10. 5. zwei Erscheinungen in der Ausbreitung der Wassermassen auf, die sich in ähnlicher Weise wiederholen: einmal die Gabelung der Strömung vor der Mitte des Brodtener Ufers, ferner eine Konvergenz zwischen dem nördlichen Zweig dieser Gabelung und der an der Küste Haffkrug—Scharbeutz nach Süden setzenden Strömung.

Die Ausbreitung der Wasserarten an der Oberfläche, wie sie sich aus dem Salzgehalt und dazu aus Stichproben von Strommessungen mit dem Stromkreuz ergeben, deuten im ganzen gesehen darauf hin, daß sich bei östlichen Winden eine Wasserbewegung einstellt, die die

Lübecker Bucht entgegen dem Uhrzeigersinn umkreist. Eine Divergenz vor dem Steinriff und eine Konvergenz bei Niendorf scheint darin eingeschlossen. Dauerstrommessungen ergaben die Möglichkeit, dieses Bild zu kontrollieren und durch quantitative Angaben von Richtung und Geschwindigkeit an einzelnen Punkten zu erweitern.

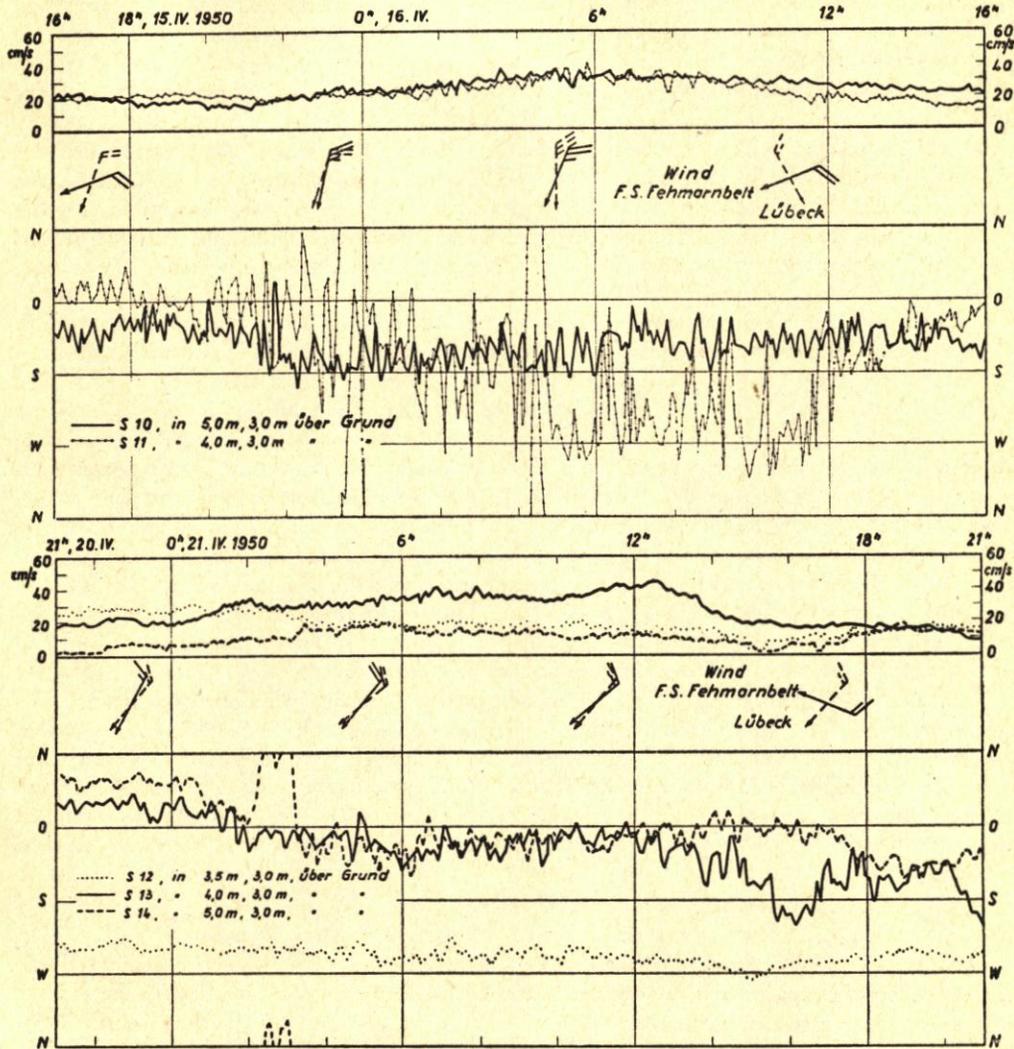


Abb. 5. Beispiele für den Strömungsverlauf nach Dauerstrommessungen in einer einzigen Tiefe bei östlichen Winden

- A. Nördlich und westlich des Brodtener Ufers auf den Meßstellen S 10 und S 11 vom 15. 4. 16<sup>h</sup> bis 16. 4. 16<sup>h</sup>, 1950  
 B. Bei Pelzerhaken und westlich und östlich des Brodtener Ufers auf den Meßstellen S 12, S 13 und S 14 vom 20. 4. 21<sup>h</sup> bis 21. 4. 21<sup>h</sup>, 1950

Lage der Meßstellen s. Tab. 1 und Abb. 2

In Abbildung 5 sind zwei Ausschnitte über je 24 Stunden aus den Ergebnissen der Dauerstrommessungen mit Schaufelrädern wiedergegeben. Leider fielen in die Meßperiode keine stürmischen Ostwindlagen, so daß sich die Beispiele nur auf mäßige und frische östliche bis nördliche Winde beziehen. Die Windangaben stützen sich auf die Terminbeobachtungen auf dem

Feuerschiff Fehmarnbelt und der Wetterwarte Lübeck, also auf Beobachtungen nördlich und südlich des Untersuchungsgebietes. Die Windverhältnisse sind auf beiden Beobachtungsstellen angenähert die gleichen, so daß der Mangel an Windbeobachtungen über dem Seegebiet nicht ins Gewicht fällt. Die Angaben der Windstärken in Beaufort in den Abbildungen geschieht durch die übliche Form der Befiederung der Windpfeile. Jede lange Fieder bedeutet zwei Beaufortstärken. Die Stromgeschwindigkeiten sind in cm/sec aufgetragen, gestützt auf die Registrierungen in Abständen von fünf Minuten. Unterhalb von 8 bis 10 cm/sec Strom springen die Meßgeräte nicht an. Die Stromrichtung ist rechtweisend aufgetragen, wohin der Strom fließt.

Nach Abbildung 5 B wurde auf der Meßstelle S 12 nordöstlich von Pelzerhaken bei mäßigen Winden aus NO, Stärke 3—4, ein recht beständiger Einstrom nach WSW in die innere Lübecker Bucht beobachtet. Er verlief parallel zur Küste mit Geschwindigkeiten, die 30 cm/sec nicht überschritten. Westlich und östlich des Brodtener Ufers auf den Meßstellen S 13 und S 14 war die vorherrschende Stromrichtung O bis SO, wobei im Westen 45 cm/sec, im Osten 20 cm/sec nicht überschritten wurden. Im Westen vor Niendorf war die Stromrichtung parallel zur Küste, während sie im Osten quer über die Travemünder Bucht verlief.

Einen Ausschnitt aus den Ergebnissen von Dauerstrommessungen bei frischen Winden um NO bis Stärke 5 bis 6 enthält Abbildung 5 A, und zwar für zwei Meßpunkte westlich und nördlich des Brodtener Ufers. Die Geschwindigkeiten stiegen mit auffrischenden Winden in beiden Teilen auf 40 cm/sec. Die starke Streuung in den Stromrichtungen nach der Registrierung dürfte nicht der Wirklichkeit entsprechen. Die verschwommenen Bilder auf dem Registrierfilm deuten auf starke Bewegung der Kompaßrose im Schaufelradstrommesser, was sehr wahrscheinlich eine Wirkung der Bewegungen des ganzen Gerätes in den Segangs- und Dünungswellen ist. Gerade vor dem Brodtener Ufer steht bei nordöstlichen Winden ein kräftiger See-gang, der in 4 bis 5 m unter der Oberfläche noch nicht abgeklungen sein kann. Die Wasserbewegungen setzten auf der Meßstelle S 10 in die Travemünder Bucht. Auf S 11 ist trotz der starken Richtungsschwankung deutlich zu erkennen, daß der Strom umsprang von O bis SO auf SW bis W und nach Abflauen des Windes wieder zurückdrehte.

Auf allen fünf Meßstellen überwogen bei mäßigen und frischen Winden aus östlichen Richtungen, wie sie in den Ausschnitten der Abbildung 5, aber auch in anderen Fällen, erfaßt wurden, Bewegungen, die die Lübecker Bucht entgegen dem Uhrzeigersinn umkreisten. Westlich des Brodtener Ufers kamen Ausnahmen vor, indem eine Stromumkehr auftrat. Dieses Bild deckt sich mit dem, was aus der Ausbreitung der Wasserkörper und den Stromkreuzmessungen erschlossen wurde. Leider fehlen Beobachtungen der vertikalen Stromverteilung bei östlichen Winden.

#### b) Strömungsverhältnisse bei westlichen Winden

Das statistische Überwiegen der westlichen Winde in unserem Gebiet ist bedingt durch die Häufigkeit der zyklonalen Wetterlagen. Im Vergleich zu den Ostwindlagen, die infolge ihres meist antizyklonalen Charakters eine relativ große Beständigkeit zeigen, ist die Zeitdauer der einzelnen Westwindlagen im allgemeinen kürzer, wobei die Windrichtung zwischen S und NW zu schwanken pflegt. Für die Strömungsverhältnisse bedeutet das, daß sich nur selten der Einfluß eines in Richtung und Stärke über längere Zeit konstanten westlichen Windes feststellen läßt. In den Messungen der Programmpunkte I bis III wurden solche Westwindlagen von längerer Dauer nicht erfaßt. Westwindlagen von kurzer Zeitdauer zeigten ein recht uneinheitliches Bild: der Einfluß der vorangegangenen Wetterlage auf die Verteilung der Wassermassen verschiedener Herkunft ließ sich nicht in allen Fällen eindeutig von dem Einfluß der jeweils herrschenden Wetterlage trennen. An dieser Stelle wird ein Beispiel angeführt, das den Einfluß des herrschenden Windes deutlich zeigt.

In Abbildung 6 ist eine Lage mit kräftig auffrischendem WNW-Wind in zwei Schnitten dargestellt. Die Schnitte verlaufen etwa parallel zur Windrichtung von Sierksdorf an der Neustädter Bucht über den äußeren Teil des Stein-Riffs bis zu einem Punkt etwa 2 sm nördlich

von Groß Schwansee in Mecklenburg (vgl. Abb. 2). Im ersten Schnitt (22. 7.) erkennt man bei noch ruhigem Wetter eine als normal zu bezeichnende Schichtung: an der Oberfläche etwa 12 bis 13 ‰, eine breite Übergangsschicht zwischen 7 und 18 m Tiefe und eine Bodenschicht mit

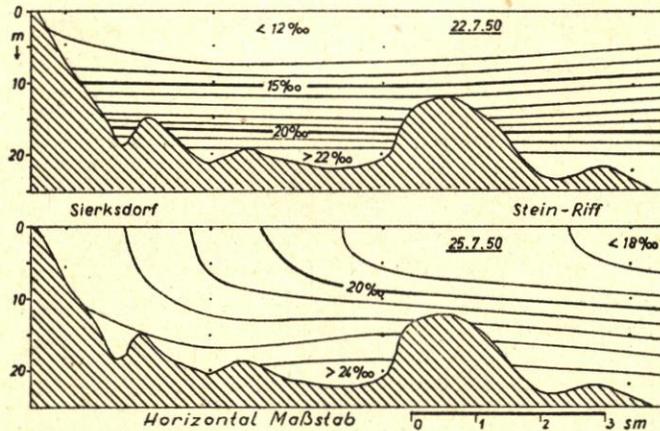


Abb. 6. Beispiel für die Salzgehaltsschichtung und ihren zeitlichen Ablauf in der Lübecker Bucht bei westlichen Winden

Verlauf der Schnitte s. Abb. 2

- A. Bei Beginn einer Westwindlage am 22. 7. 1950  
 B. Bei dem Höhepunkt dieser Westwindlage am 25. 7. 1950

über 22 ‰. Am 24. 7. frischte der Wind aus West auf zeitweise Stärke 7 bis 8 auf und drehte am 25. 7. (zweiter Schnitt) auf WNW bei Stärke 6 im Mittel. Das salzarme Oberflächenwasser wurde dadurch aus der gesamten Bucht hinausgetrieben. Die Folge war, daß an der Leeküste das Tiefenwasser an die Oberfläche emporstieg. Während an der Oberfläche die Strömung überall etwa in Windrichtung setzte, muß also am Boden ein nicht unerheblicher Strom auf die Leeküste zu geherrscht haben, leider liegen für dieses Beispiel keine direkten Strommessungen vor. Im Salzgehaltsschnitt erkennt man, daß das Bodenwasser vom 22. 7. mit 22 ‰ am 25. 7. in der Neustädter Bucht als Oberflächenwasser auftrat, und daß als Ersatz des alten Bodenwassers ein stärker salzhaltiges mit über 24 ‰ einströmte.

In Abbildung 7 ist zur Ergänzung der Vertikalschnitte die Salzgehaltsverteilung an der Oberfläche für die gleichen Tage dargestellt; leider fehlen an diesen Tagen die Stromkreuzstichproben, da es sich um Rundfahrten zwischen je zwei der 48stündigen Dauerstationen handelte. Den geringen horizontalen Unterschieden am 22. 7. steht das außerordentlich starke Salzgehaltsgefälle am 25. 7. gegenüber, das fast genau parallel zur Windrichtung verläuft. Die Wirkung des Auftriebseffektes auf die Salzgehaltsverteilung ist auch an den Leeküsten bei Travemünde und zwischen Pelzerhaken und Grömitz zu erkennen, wenn auch nicht so kräftig wie in der Neustädter Bucht.

Aus den Ergebnissen der Dauerstrommessungen mit Schaufelrädern werden drei Ausschnitte von je 24 Stunden in Abbildung 8 wiedergegeben. Abgesehen von dem Fall bei mäßigen westlichen Winden in Abbildung 8 A konnten in 8 B und 8 C stürmische Westlagen ausgesucht werden mit Windstärken bis 8 Beaufort.

Auf den Meßstellen S 7 und S 8 wurde der Strom in Oberflächen- und Bodennähe in der offenen Lübecker Bucht bei 22 m Wassertiefe registriert. Die Geschwindigkeiten erreichten in der Oberflächennähe 20 cm/sec, in Bodennähe blieben sie unter 8 bis 10 cm/sec. Das Meßrad geriet überhaupt nicht in Umdrehungen. Im Ablauf der Stromrichtungen über die 24 Stunden, die in Abbildung 8 A dargestellt sind, erscheint bemerkenswert, daß die Wasserbewegung in Oberflächennähe angenähert in Richtung des Windes lief, bevorzugt ein wenig im Uhrzeigersinn von der Windrichtung abgelenkt. Die Richtungsänderungen in Bodennähe zeigen an, daß

Bewegungen vorhanden waren, die aber gering blieben und nicht ausreichten, um das Meßrad zu drehen. Ferner ist zu beachten, daß die Bewegungsrichtungen in Oberflächen- und Bodennähe einen großen Winkel einschlossen, der zwischen 90 Grad und 180 Grad schwankte. In

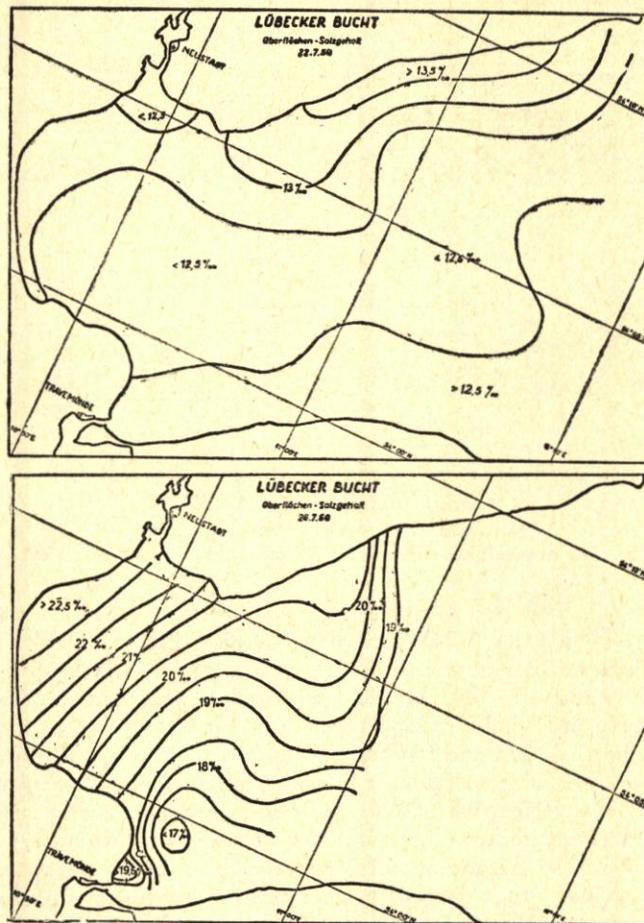


Abb. 7. Beispiel für die Ausbreitung der Wasserkörper bei westlichen Winden vom 22.—25. 7. 1950  
Verteilung des Salzgehalts an der Oberfläche in ‰

der Deckschicht überwog die Ausstrom-, in der Unterschicht die Einstromrichtung in die Lübecker Bucht. Das ist derselbe vertikale Stromaufbau, der aus der Ausbreitung der Wasserarten nach den Vertikalschnitten in Abbildung 6 qualitativ erschlossen wurde.

Wenn man die Ergebnisse der Strommessungen in den Ausschnitten in Abbildung 8 B und C überblickt, dann ist auffallend, daß auf allen Meßstellen trotz der hohen Windstärken die Stromgeschwindigkeiten verhältnismäßig klein bleiben. Auf S 10 und S 11 nördlich und westlich des Brodtener Ufers waren sie unter 22 cm/sec, bei S 13 und S 14 westlich und östlich des Brodtener Ufers unter 15 cm/sec, wobei sie im letzten Fall nur selten meßbar waren und 8 bis 10 cm/sec überstiegen. Nur bei S 12 nordöstlich von Pelzerhaken wurden 30 cm/sec erreicht. Die Strömungen erfolgten vornehmlich parallel in östlicher Richtung, d. h. in der Ausstromrichtung aus der Lübecker Bucht. In der Umgebung des Brodtener Ufers traten aber auf allen Meßstellen wiederholt schnelle Richtungswechsel auf. Sie können darin begründet

sein, daß eine starke vertikale Stromschichtung auch in Küstennähe vorhanden ist, so daß das Meßinstrument zeitweise in die Strömung der Oberschicht, zeitweise in einen entgegengesetzt laufenden Strom der Unterschicht geriet. Es kann sich aber auch um einen Richtungswechsel der Strömungen über die ganze Wassersäule handeln.

Die Frage, ob eine vertikale Änderung in der Stromrichtung auf dem Flachwasser in Strandnähe überhaupt auftritt, können unter anderem die Ergebnisse der Strommessungen mit dem Bifilar-Strommesser beantworten. Hierbei wurden ausgesprochene Westwindlagen erfaßt, von denen Ausschnitte über 24 Stunden in Abbildung 9 von zwei Meßstellen wiedergegeben werden.

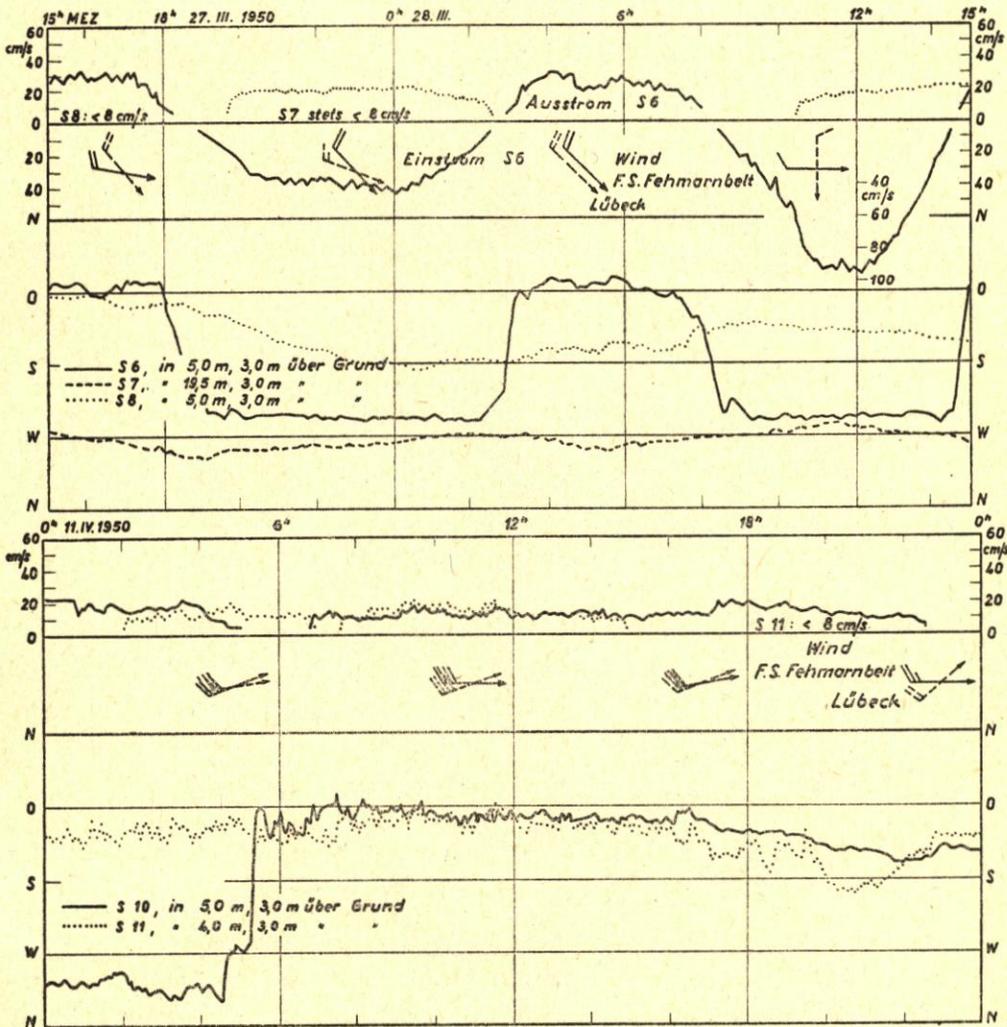
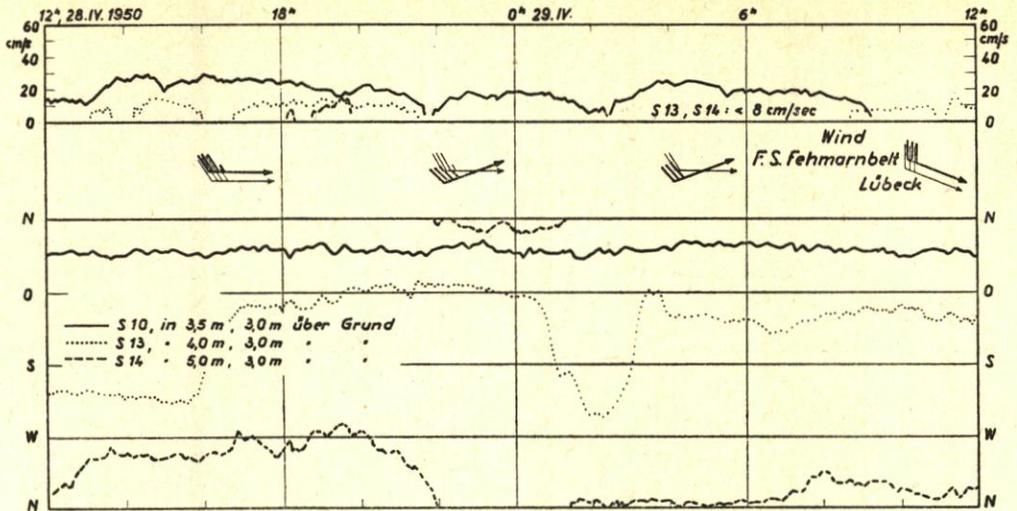


Abb. 8. Beispiele für den Strömungsverlauf nach Dauerstrommessungen in einer einzigen Tiefe bei westlichen Winden

- A. In der Lübecker Bucht und in der Travemündung auf den Meßstellen S7, S8 und S6 vom 27. 3. 15h bis 28. 3. 17h, 1950
- B. Nördlich und westlich des Brodtener Ufers auf den Meßstellen S10 und S11 am 11. 4. 0h bis 12. 4. 0h, 1950



C. Bei Pelzerhaken und westlich und östlich des Brodtener Ufers auf den Meßstellen S 12, S 13 und S 14 vom 28. 4. 12<sup>h</sup> bis 29. 4. 12<sup>h</sup>, 1950

Lage der Meßstellen s. Tab. 1 und Abb. 2

Die erste Meßstelle (Abb. 9 A) lag vor Niendorf (vgl. Abb. 2) auf etwa 5 m Wassertiefe. Die Meßstiefen waren 0,5 bis 2,5 und 4,5 m, charakterisieren also den Oberflächen-, Mittel- und Bodenstrom. Die Messung begann am 26. 7., unmittelbar im Anschluß an die in Abbildung 6/7 dargestellte extreme Westlage des 25. 7. mit ihren starken Auftriebserscheinungen in der Neustädter Bucht. Bei noch anhaltendem, jedoch etwas abgeflautem Wind aus NW bis W zeigte sich am 26. 7. bald nach 9 Uhr ein rasches Ansteigen der Geschwindigkeit des in allen Tiefen nach Osten gerichteten Stromes, wobei der Oberflächenstrom zwischen 10 und 13 Uhr Beträge von 55 bis über 60 cm/sec erreichte. Der Bodenstrom setzte während der gleichen Zeit nur mit

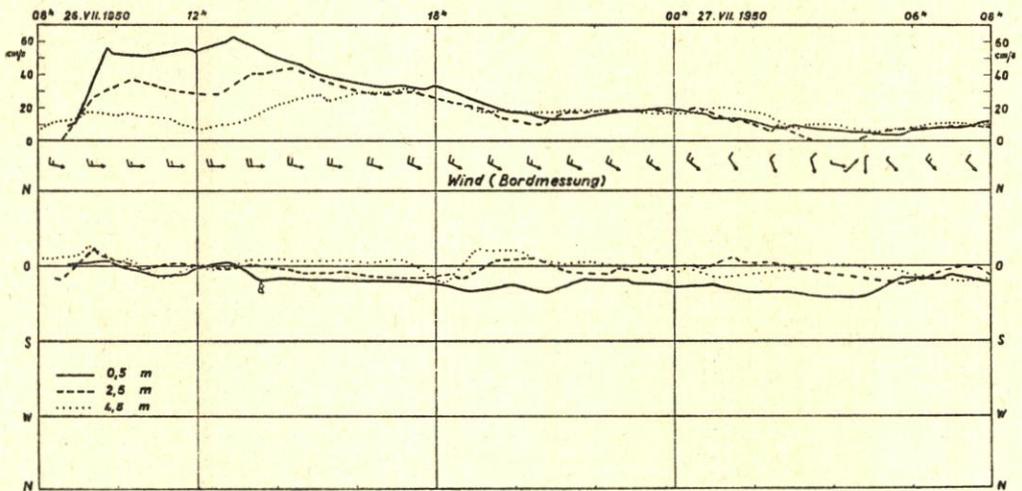
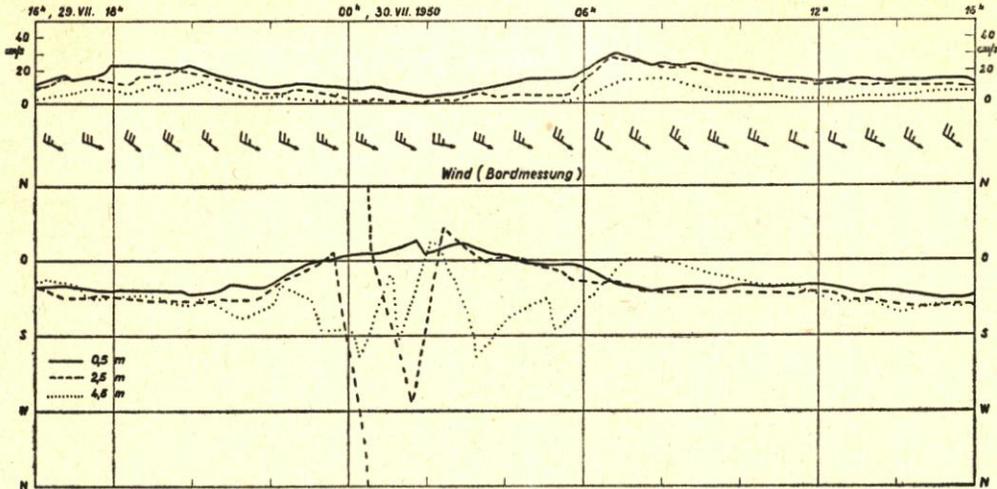


Abb. 9. Beispiele für den Strömungsverlauf in verschiedenen Tiefen bei westlichen Winden

A. Westlich des Brodtener Ufers auf der Meßstelle R 2 vom 26. 7. 8<sup>h</sup> bis 27. 7. 8<sup>h</sup>, 1950



B. Nördlich des Brodtener Ufers auf der Meßstelle R 3 vom 29. 7. 16<sup>h</sup> bis 30. 7. 16<sup>h</sup>, 1950  
Lage der Meßstellen s. Tab. 1 und Abb. 2

etwa 10 bis 20 cm/sec, der Mittelstrom hielt sich mit etwa 30 bis 40 cm/sec in der Mitte. Von 13 Uhr bis gegen 20 Uhr begann die Oberflächengeschwindigkeit langsam wieder abzusinken bis etwa 20 cm/sec, Mittel- und Bodenstrom dagegen stiegen noch weiter an und erreichten ab 16 Uhr den Wert des Oberflächenstromes, um von da an mit ihm gleichzeitig langsam abzunehmen. In der Periode zwischen 20 Uhr und 2 Uhr (27. 7.) zeigte zeitweise der Bodenstrom höhere Werte als Oberfläche und Mitte. Von 2 bis 8 Uhr ging in allen Tiefen bei weiter abflauendem Wind die Geschwindigkeit auf 10 cm/sec und weniger zurück.

Die während dieser 24 Stunden in der Ostströmung aufgetretenen Richtungsschwankungen waren relativ geringfügig; die allgemeine Tendenz zeigte beim Oberflächenstrom die größte Südkomponente (im Mittel 110—120 Grad), beim Bodenstrom dagegen eine fast reine Ostrichtung (mit geringen nördlichen Komponenten, 80—90 Grad). Da die Richtung der benachbarten Küstenstrecke etwa 95 Grad betrug, bedeutet das, daß die Oberflächenströmung eine aufländige Komponente (Einfluß der Oberflächen-Winddrift), der Bodenstrom eine geringe abländige Komponente enthielt (Abfluß der oberflächlich angestauten Wassermassen).

Bei der zweiten Meßstelle R 3 (Abb. 9 B) vor der Mitte des Brodtener Ufers auf ebenfalls 5 m Wassertiefe (mit den gleichen Meßtiefen wie in der zeitlich vorangegangenen erwähnten Meßstelle R 2) herrschten wiederum frische nordwestliche Winde (mit Stärke 5—6 im Mittel). Der Stromgeschwindigkeitsverlauf war hier jedoch wesentlich ruhiger: an der Oberfläche wurden zwei Maxima von 25 bis 30 cm/sec, am Boden nur 10 bis 15 cm/sec beobachtet, dazwischen zeitweise fast Stromstille. Bei der Richtungsangabe ist deutlich zu erkennen, daß zu den Zeiten der Geschwindigkeitsmaxima (29. 7., 18—20 Uhr und 30. 7., 6—10 Uhr) die Stromrichtung in allen Tiefen parallel zur Küste und mit dem Winde nach Südosten (110—130 Grad) setzte; lediglich während des zweiten Maximums hatte der Bodenstrom eine abländige östlichere Komponente (90—110 Grad).

#### 4. Strömungsverhältnisse in der Travemündung

Die Strömungsverhältnisse in der Travemündung und ihrer nächsten Umgebung nehmen eine Sonderstellung ein. Es ist nicht allein der Einfluß des Oberwassers der Trave, der dabei eine Rolle spielt; auch schnell wechselnde Spiegelgefälle, die zeitweise große Werte erreichen, tragen dazu bei.

Ein Längsschnitt des Salzgehalts verdeutlicht die starke Schichtung, die hier auftritt (Abb. 10). Dazu ist zu bemerken, daß die vertikale Salzgehaltzunahme nur unzureichend bei Beobachtungsabständen von 4 m erfaßt wird. Der Übergang von dem salzarmen Travewasser zu dem salzreichen Wasser aus der Lübecker Bucht, die hier übereinander liegen, dürfte im allgemeinen noch ausgeprägter sein.

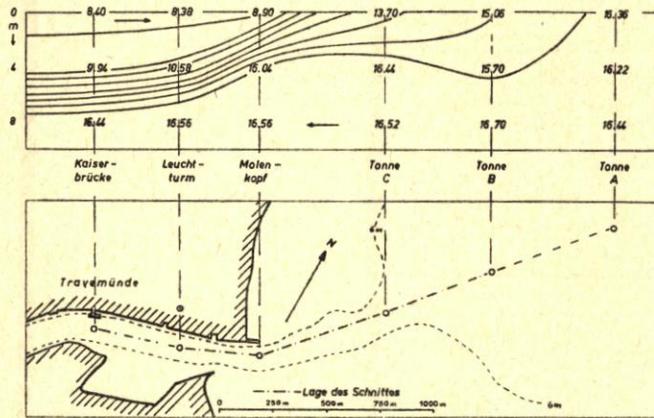


Abb. 10. Beispiel für die Salzgehaltsschichtung in der Travemündung (aufgenommen am 17. 2. 1950)

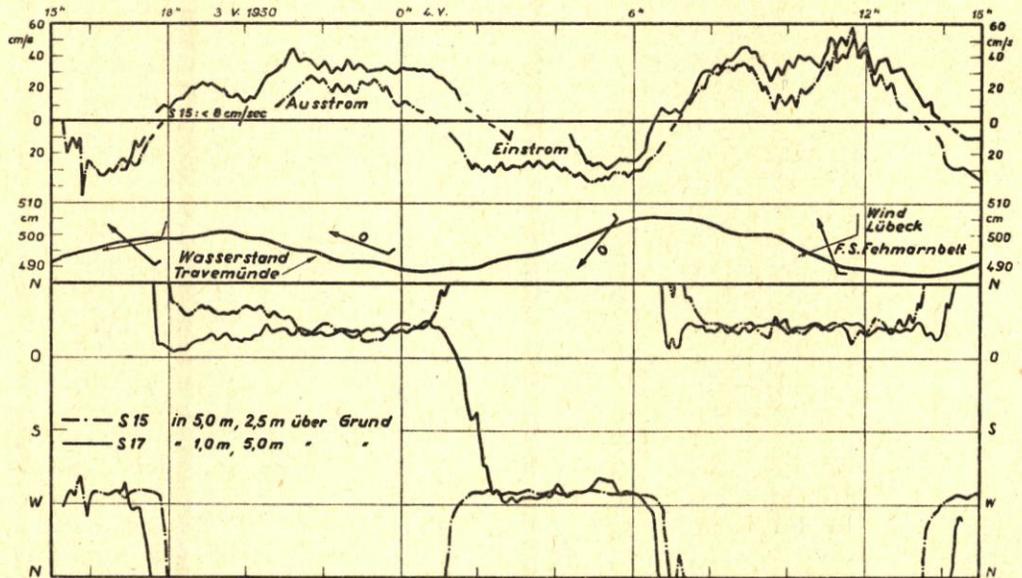


Abb. 11. Beispiel für den Strömungsverlauf nach Dauerstrommessungen mit Schaufelradstrommessern in der Travemündung in Oberflächennähe und in Bodennähe

Messstellen S 15 und S 17 vom 3. 5. 15<sup>h</sup> bis 4. 5. 15<sup>h</sup>, 1950  
Lage der Messstellen s. Tab. 1 und Abb. 2

Die Bedeutung der Gefällsströmungen in der Travemündung kommt in Abbildung 8 A und Abbildung 11 nach Dauerstrommessungen mit Schaufelradstrommessern zum Ausdruck. Die Messstellen S 6, S 15 und S 17 lagen in der engsten Stelle der Travemündung querab vom

neuen Lotsenhafen. Richtung und Geschwindigkeit wiesen einen regelmäßigen Wechsel von Ein- und Ausstrom mit Gezeitenstromcharakter auf. Diese Feststellung mag auf den ersten Blick überraschen, da die Gezeiten im ganzen Seegebiet der Ostsee verschwindend klein sind. Der mittlere Springtidenhub der Lübecker Bucht beträgt nur 11 cm. Die Wasserstandskurve von Travemünde ist in Abbildung 11 mit aufgenommen. Aber es bleibt zu beachten, daß die Travemündung nur einen geringen Querschnitt besitzt. Sie nimmt die Stellung einer Düse zwischen zwei Wasserbehältern ein, nämlich zwischen der Lübecker Bucht auf der einen Seite und den haffartigen Gebieten der Pötenitzer Wiek und des Dassower Sees sowie dem Unterlauf der Trave mit seinem Seencharakter auf der anderen Seite. Die Wasserstandsschwankungen gehen in erster Linie von der Lübecker Bucht aus, sei es in Form von Stauerscheinungen, Eigenschwingungen einzelner Seegebiete oder der ganzen Ostsee oder in Form von Gezeiten. Bei der Anpassung der Wasserstände der ausgedehnten inneren Gebiete an die der Lübecker Bucht müssen beträchtliche Wassermengen durch die Travemündung geschoben werden, die bei der Enge der Mündung zu erheblichen Geschwindigkeiten Anlaß geben. Spitzengeschwindigkeiten bis 95 cm/sec wurden gemessen (Abb. 8 A), zugleich die höchsten Werte, die während der ganzen Meßperiode festgestellt wurden. Diese Werte sind aber nicht allein durch die Gezeiten bewirkt, sondern hierbei sind noch Wasserstandsschwankungen anderer Natur beteiligt, worauf W. HANSEN (3) näher eingeht.

Verhältnismäßig rein kommt der Gezeitenstromcharakter der Bewegungen bei sehr ruhiger Wetterlage zum Ausdruck (Abb. 11). In dem Zeitabschnitt, der dargestellt ist, wurde mit zwei Schaufelradstrommessern gleichzeitig registriert, mit einem in Oberflächennähe, mit dem anderen in Bodennähe. Hiernach scheint in Oberflächennähe eine beständige Stromkomponente in Richtung des Ausstroms aus der Trave den Stromschwankungen überlagert zu sein. Sie betrug etwa 10 bis 20 cm/sec und läßt sich als Oberwasser der Trave deuten. Kurze Schwankungen traten außerdem in den Strömungen auf, die im Wasserstand nicht spürbar waren. Die Reaktionen der Wasserbewegungen auf Schwankungen des Spiegelgefälles sind eben viel eher meßbar als das Gefälle selbst.

##### 5. Zusammenfassung und Bemerkungen zu den Strömungsverhältnissen innerhalb der Brandungszone

Eine Wiedergabe und eine Diskussion der gesamten Meßergebnisse ist aus Raumgründen nicht möglich. Sie sind im vorliegenden Fall auch entbehrlich, da es vor allem galt, einen Überblick über die stärkeren Strömungen zu bekommen, um beurteilen zu können, wie weit ihnen erodierende und wie weit ihnen transportierende Kräfte zugeschrieben werden können. Die vorliegende Auswahl beschränkt sich vor allem auf anhaltende östliche und westliche Winde mit höheren Windstärken. Das mag einseitig erscheinen, ermöglicht aber die Verhältnisse bei auflandigen und ablandigen Winden zu übersehen, d. h. gewissermaßen in den Grenzfällen. Dazwischen liegen vielerlei Übergänge und lokale Abwandlungen in den Strömungsverhältnissen, die unter anderen äußeren Bedingungen auftreten können.

Bei östlichen Winden überwiegt an der Oberfläche Einstrom für den größten Teil der Bucht. Nur auf der Südseite von der inneren Neustädter Bucht längs des Brodtener Ufers und der Mecklenburger Küste herrscht Ausstrom in östliche Richtung vor. Dieser Ausstrom überquert zum großen Teil die Travemünder Bucht an ihrer Öffnung, ohne bis zur Travemündung vorzudringen. Im Verhältnis zu anderen Windlagen gesehen, erreichen die Stromgeschwindigkeiten nach Dauerstrommessungen in Küstennähe außerhalb der Brandungszone ihre Höchstwerte im allgemeinen bei östlichen Winden.

Bei westlichen Winden, wenn sie lange genug wehen, so daß sich angenähert stationäre Verhältnisse einstellen können, überwiegt auf allen Meßstellen in Oberflächennähe außerhalb der Travemündung Ausstrom in östlichen Richtungen, bei Pelzerhaken sowohl wie am Brodtener Ufer. Die abtransportierten Wassermassen werden durch Kompensationsbewegungen in der Tiefe ergänzt. Die starke Stromschichtung besonders bei westlichen Winden nach den

Beobachtungen mit dem Bifilar-Strommesser, der Auftrieb des kalten, salzreichen Wassers in der inneren Neustädter Bucht und die Ergebnisse der Dauerstrommessungen in der Öffnung der Lübecker Bucht zur Mecklenburger Bucht beweisen dies. Die Stromgeschwindigkeiten bei westlichen Winden bleiben selbst bei Sturm auf allen Meßstellen wesentlich kleiner als bei frischen östlichen Winden.

In der engen Travemündung treten starke Stromschwankungen auf. Geringe Wasserstandsschwankungen der Lübecker Bucht, die regelmäßig mit den Gezeiten, mit den Eigenschwingungen einzelner Meeresgebiete und mit dem wechselnden Windstau verbunden sind, reichen aus, kräftige Ausgleichsströmungen mit den ausgedehnten Seen oberhalb der Travemündung einzuleiten.

Die Tabelle 2 enthält die beobachteten Spitzengeschwindigkeiten und die dabei auftretenden Richtungen.

**Tabelle 2**  
Beobachtete Spitzengeschwindigkeiten auf den Meßstellen  
in der Lübecker Bucht

S: Schaufelradstrommessungen

R: Messungen mit dem Rauschelbach-Strommesser vom „Südfall“

| Gebiet und Meßstelle        | $v_{\max}$<br>cm/sec | Meßtiefe üb. Grund<br>in m | Bem. z. Stromrichtung<br>bei Spitzen |
|-----------------------------|----------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| <b>Travemündung</b>         |                      |                            |                                      |
| S 6                         | 95                   | 3                          | Ein- und Ausstrom                    |
| S 15                        | 60                   | 2,5                        | " " "                                |
| S 16                        | 60                   | 5                          | " " "                                |
| <b>Travemünder Bucht</b>    |                      |                            |                                      |
| S 14                        | 25                   | 3                          | O—SO                                 |
| R 4                         | 25                   | 1                          | NO                                   |
| R 1                         | 15                   | 1 → Obfl.                  | SW                                   |
| <b>Stein-Riff</b>           |                      |                            |                                      |
| S 10                        | 40                   | 3                          | SO                                   |
| R 3                         | 15 (30)              | 1 (Obfl.)                  | SO                                   |
| S 11 + S 13                 | 45                   | 3                          | O, selten SW                         |
| R 2                         | 30 (60)              | 1 (Obfl.)                  | O                                    |
| <b>Pelzerhaken</b>          |                      |                            |                                      |
| S 12                        | 45                   | 3                          | SW, auch NO                          |
| R 5a                        | 20 (40)              | 1 (Obfl.)                  | SW                                   |
| <b>Mitte Lübecker Bucht</b> |                      |                            |                                      |
| S 8                         | 40                   | 17,5                       | (NW, veränderlich)                   |
| S 7                         | <11                  | 3                          | ONO und W                            |

Die Werte unterliegen natürlich ganz den Zufälligkeiten der Beobachtungszeit und sind daher nicht allgemein gültig. Aber die Zeiträume der Dauermessungen über mehrere Wochen mit verschiedenen Sturmlagen geben doch einen wichtigen Anhalt. In Bodennähe bis zu Tiefen von 10 bis 15 m, aber außerhalb der Brandungszone, dürften unter Berücksichtigung der Geschwindigkeitsabnahme zwischen 3 m über Grund und dem Boden die Strömungen nur in seltenen Fällen und dann nur kurzfristig 30 cm/sec überschreiten. Ausgenommen davon ist die Travemündung an ihrer engsten Stelle, in der wesentlich höhere Geschwindigkeiten auftreten.

Zieht man die Ergebnisse neuerer Untersuchungen über die Erosionsfähigkeit strömenden Wassers heran (F. HJULSTRÖM [4]), so ergibt sich daraus, daß wenigstens 25 cm/sec bei einem Korndurchmesser von 0,5 mm notwendig sind, um den Boden anzugreifen. Mit kleineren und größeren Korndurchmessern steigen die Grenzgeschwindigkeiten an, und zwar auf 50 cm/sec

bei Korndurchmessern von 0,03 mm bzw. 2,5 mm. Die Strömungen in der Lübecker Bucht werden demnach nur selten und dann nur in geringen Tiefen schwach aktiv in die Erosion eingreifen. Entscheidend hierfür sind die Vorgänge innerhalb der Brandungszone. Den Strömungen außerhalb kommt fast ausschließlich nur Bedeutung für den Transport der Schwebstoffe zu, die in der Brandungszone vom Wasser aufgenommen worden sind. Als morphologisch wirksam müssen die wechselnden, aber zeitweise starken Strömungen in der Travenmündung angesehen werden. Sie dürften zu der natürlichen Offenhaltung des Fahrwassers entscheidend beitragen.

Wenn auch mit den verfügbaren Geräten keine Messungen der Wasserbewegungen in der Brandungszone vorgenommen werden konnten, so erlauben doch einige grundsätzliche Untersuchungen dieses Problems, die in letzter Zeit in den USA durchgeführt wurden, einige Rückschlüsse auf die Vorgänge in der Lübecker Bucht. Zusammenfassend läßt sich aus den mannigfaltigen Teilergebnissen, die aus Messungen an der kalifornischen Küste, aus Modellversuchen in dortigen Laboratorien und aus energetischen und hydrodynamischen Überlegungen gewonnen wurden (J. A. PUTNAM, W. H. MUNK, M. A. TRAYLOR [8]; W. H. MUNK [6, 7]; F. P. SHEPARD, D. L. IMMAN [11]; TH. SAVILLE [10]), folgender Überblick geben: Die auflaufenden Seegangs- und Dünungswellen, besonders die überbrechenden Brandungswellen sind mit einem landwärts gerichteten Wassertransport verbunden. Damit führen sie zu einem Anstau des Wassers, der zur Entstehung einer seewärts gerichteten Brandungsrückströmung beiträgt. Als Unterströmung ist sie wohl bekannt. Sie verteilt sich an offenen Küsten verhältnismäßig gleichmäßig längs der Uferzone, kann aber auch zusätzlich streifenförmig gebündelt auftreten (*rip current*). Außerdem ist zu beachten, daß bei auflaufenden Brandungswellen, deren Käme einen Winkel mit der Küstenlinie bilden, nicht sämtliche Energie in den Brechern vernichtet bzw. an den Küsten reflektiert wird, sondern daß ein Teil in die Bewegungsenergie einer küstenparallelen Brandungslängsströmung (*longshore current*) übergeführt wird. Diese Längsströmung erreicht beachtliche Geschwindigkeiten und ist daher entscheidend für den Sandtransport und damit für die Strandversetzung.

Unter der Annahme einer geradlinigen Küste, einer gleichmäßigen Bodenneigung und von langgestreckten Kämmen der auflaufenden Wellen geben J. A. PUTNAM, W. H. MUNK und M. A. TRAYLOR (8) folgende Beziehung für die Geschwindigkeit  $v$  der Brandungslängsströmung an:

$$v = K \sqrt[3]{\frac{m \cdot H^2}{T} \sin 2\alpha},$$

Darin bedeuten  $H$  und  $T$  Höhe und Periode der brandenden Welle,  $m$  das Gefälle des Bodens in der Brandungszone,  $\alpha$  den Winkel der Brandungswellen mit der geradlinigen Küste und  $K$  einen Reibungsbeiwert, der von der Bodenrauhigkeit abhängt. Die vier Größen unter der Wurzel sind meßbar;  $K$  stellt einen Beiwert dar, der unter gegebenen Strandverhältnissen angenähert konstant ist.

In der Lübecker Bucht sind die Voraussetzungen für eine Anwendung der angeführten Beziehung nicht ausreichend erfüllt, um zuverlässige Angaben über die Geschwindigkeiten der Brandungslängsströmung machen zu können. Es ist noch eine wesentliche Vertiefung unserer Kenntnisse von den Vorgängen in der Brandungszone notwendig. Es läßt sich lediglich eine rohe Überschlagsrechnung anstellen, um eine Vorstellung über die Größenordnung der küstenparallelen Brandungslängsströmung zu vermitteln. Nach umfangreichen Seegangsmessungen auf dem Feuerschiff Fehmarnbelt von H. BRAUER (1) ist bei Windstärke 7 die Wellenhöhe  $H = 1.4$  m, dazu gehört die Wellenperiode  $T = 4.5$  sec; die Strandneigung wird mit 0.03 angesetzt,  $\alpha = 10$  Grad angenommen;  $K = 8.0$  gilt angenähert für Sandstrand. Daraus ergibt sich  $v = 1.3$  m/sec. Das ist ein Vielfaches der gemessenen Stromgeschwindigkeiten außerhalb der Brandungszone bei Sturm. Die Richtung der Brandungslängsströmung ist durch die Fortpflanzungsrichtung der Wellen bestimmt. Sie verläuft in Richtung auf die Öffnung des spitzen Winkels, den die Kammlinie der Wellen und die Strandlinie einschließen.

In einer Hinsicht sind die Verhältnisse in der Brandungslängsströmung in der Lübecker Bucht einfach. Dies gibt Veranlassung dazu, trotz der Bedenken gegen die Anwendung der Ergebnisse, die unter sehr vereinfachenden Voraussetzungen in neuester Zeit gewonnen wurden, gewisse Folgerungen zu ziehen. Hohe Brandungswellen und damit große Geschwindigkeiten der Brandungslängsströmung können in der Lübecker Bucht nur bei einer Hauptwindrichtung auftreten, nämlich bei NO, wenn Seegang und Dünung der freien Ostsee und der Mecklenburger Bucht Zutritt in die Lübecker Bucht haben. Die Wellenkämme sind angenähert quer zur Windrichtung angeordnet. Zwar erfahren die Wellen bei abnehmender Tiefe eine Beugung zum Strande hin, solange aber die unbeeinflussten Kämme nicht zufällig schon in offener See küstenparallel waren, bleibt trotz der Beugung ein gewisser Winkel zwischen dem Kamm der Brandungswelle und der Küstenlinie erhalten. Legt man diese einfachen Zusammenhänge zugrunde, so läßt sich schematisch die Verteilung der Richtung der Brandungslängsströmung angeben, und zwar für den Fall der hier für hohe Stromgeschwindigkeiten entscheidenden

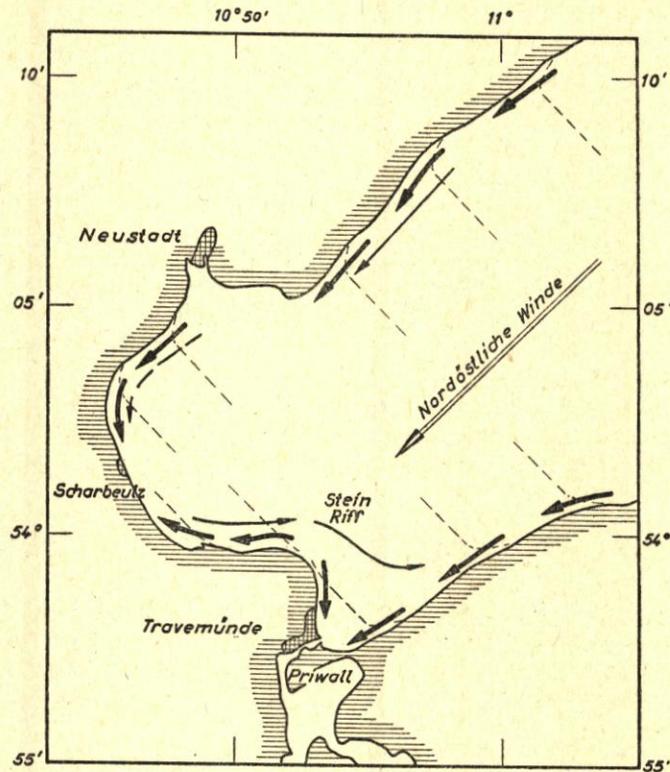


Abb. 12. Überblick über die vorherrschende Richtung der bodennahen Strömungen in Strandnähe der Lübecker Bucht bei nordöstlichen Winden

- ← Brandungslängsströmung
- ← Küstenströmung außerhalb der Brandungszone
- Wellenkämme, schematisch

Nordostwinde. Die vorherrschenden Richtungen der küstennahen Strömung außerhalb der Brandungszone für Nordostwindlagen sind nach den oben besprochenen Strommessungen übersehbar. Beide sind schematisch in Abbildung 12 zusammengefaßt. Es ergeben sich zwei Konvergenzen der Brandungslängsströmung, eine in der Neustädter Bucht in der Gegend von Scharbeutz, die andere in der Travemünder Bucht vor dem Priwall, ferner eine Divergenz auf dem Stein-Riff. Indem die küstennahe Strömung bei Nordostwinden bevorzugt die Bucht

entgegen dem Uhrzeigersinn umläuft, wirkt sie zum Teil in derselben Richtung wie die Brandungslängsströmung, zum Teil auch entgegen. In der Travemünder Bucht überquert sie die Bucht, ohne bis zum Travemünder Strand nach Süden vorzudringen.

Bei anderen Windrichtungen werden sich andere Richtungen in der Brandungslängsströmung ausbilden, deren Geschwindigkeiten aber verhältnismäßig gering bleiben müssen. Teils sind die Winde ablandig, dann tritt kein nennenswerter Seegang auf, teils haben sie zwar eine auflandige Komponente, aber dieser fehlt es an genügendem Seeraum zur vollen Ausbildung des Seegangs und zur Entwicklung einer Dünung. Einzig bei nordöstlichen Winden können größere Wellenhöhen erreicht werden, die die Voraussetzung von stärkeren Brandungslängsströmungen sind. Das schematische Strombild in Abbildung 12 stellt nicht den häufigsten Fall dar — anhaltende nordöstliche Winde sind verhältnismäßig selten. Es gibt auch keine Geschwindigkeiten der Strömungen an; dafür fehlen die Beobachtungsgrundlagen. Es gilt aber für diejenige Windlage, bei der im Vergleich zu allen anderen bei gleicher Windstärke die höchsten Stromgeschwindigkeiten zu erwarten sind, in der Brandungslängsströmung sowohl als auch in der küstennahen Strömung außerhalb der Brandungszone. Von dieser skizzierten Lage ist anzunehmen, daß sie sich entscheidend für die vorherrschende Richtung des Materialtransportes auswirkt. Ihre Bedeutung für morphologische Vorgänge bleibt aber auf einen verhältnismäßig schmalen Küstenstreifen beschränkt, dessen Wassertiefen kleiner als 10 bis 15 m sind.

#### Schriftenverzeichnis

1. BRAUER, H.: Messungen und Beobachtungen des Seegangs beim Feuerschiff Fehmarnbelt. Deutsche Luftfahrtforschung. Mitt. Nr. 579. 1939.
2. DIETRICH, G.: Oberflächenströmungen im Kattegat, im Sund und in der Beltsee. Dtsch. Hydr. Z., Bd. 4, S. 129—150. 1951.
3. HANSEN, W.: Hydrographische Untersuchungen in der Lübecker Bucht. Die Küste, H. 2, S. 90, 1952.
4. HJULSTRÖM, F.: Transportation of detritus by moving waters. In P. D. Trask: Recent marine sediments. Amer. Assoc. Petrol. Geol., S. 5—31. 1939.
5. JOSEPH, J.: Meereskundliche Meßgeräte. Naturforschung und Medizin in Deutschland 1939—46 (Fiat-Berichte), Geophysik, Teil II, S. 178—214. 1948.
6. MUNK, W. H.: The solitary wave theory and its application to surf problems. New York Acad. Sci. Vol. 51, S. 376—424. 1949.
7. MUNK, W. H.: Surf beats. Transac. Amer. Geophys. Un. Vol. 30, S. 849—854. 1949.
8. PUTNAM, J. A., W. H. MUNK, M. A. TRAYLOR: The prediction of longshore currents. Transac. Amer. Geophys. Un. Vol. 30, S. 337—345. 1949.
9. RAUSCHELBACH, H.: Beschreibung eines bifilar aufgehängten, an Bord elektrisch registrierenden Strommessers. Ann. Hydr. u. marit. Met., März-Beiheft 1929.
10. SAVILLE, TH.: Model study of sand transport along an infinitely long, straight beach. Transac. Amer. Geophys. Un. Vol. 31, S. 555—565. 1950.
11. SHEPARD, F. P., D. L. INMAN: Nearshore water circulation related to bottom topography and wave refraction. Transac. Amer. Geophys. Un. Vol. 31, S. 196—212. 1950.

## Hydrographische Untersuchungen in der Lübecker Bucht\*)

Von Walter Hansen

In der Lübecker Bucht findet am Brodtener Ufer Abbruch statt. Auf Veranlassung der Wasserbaubehörden wurden umfangreiche Untersuchungen in diesem Seegebiet durchgeführt, deren Ergebnisse dem Wasserbau als Hilfsmittel und Unterlagen bei der Erörterung der praktisch zu treffenden baulichen Maßnahmen dienen. Für die Ozeanographie ergab sich in diesem Rahmen folgende Fragestellung: Welche ozeanographischen Faktoren sind für die Küstengestaltung in der Lübecker Bucht, vornehmlich am Brodtener Ufer, mittelbar oder unmittelbar von Bedeutung und welche Wirkung üben sie aus?

Da Wasserbewegung Voraussetzung für den Transport des Meeresboden und den Strand aufbauenden Materials ist und es sehr schwierig ist, diesen Geschiebetransport zu messen, liegt es nahe, Beziehungen zwischen Wasser- und Bodenmaterialtransport heranzuziehen. Nun gehen aber die Meinungen über die Form dieser Beziehungen zur Zeit noch auseinander; sowohl die Form dieser Gleichungen als auch die in diesen auftretenden Beiwerte, Kennziffern usw., sind nicht hinreichend genau festgelegt, und eine quantitative Auswertung bereitet Schwierigkeiten. Wesentlich ist aber, daß der Transport erst bei Erreichen einer ganz bestimmten Mindestgeschwindigkeit einsetzt; die Geschwindigkeit, bei der das transportierte Material wieder zur Ablagerung kommt, liegt etwas niedriger als die vorgenannte Geschwindigkeit, oder anders ausgedrückt: Erosion erfolgt bei höherer Geschwindigkeit als Sedimentation (2). Diese Grenzgeschwindigkeit ist einigermaßen sicher bekannt in ihrer Abhängigkeit von der Korngröße. Auf Grund dieses Sachverhalts läßt sich für Gebiete, in denen die Stromgeschwindigkeit bekannt ist, angeben, ob überhaupt Bodenmaterial transportiert wird oder nicht.

Voraussetzung für derartige Untersuchungen ist, daß die Stromgeschwindigkeit bekannt ist. Da nur die während der Arbeiten in der Lübecker Bucht neben den Temperatur- und Salzgehaltsbeobachtungen gesammelten Strombeobachtungen allein einen Einblick in die Vorgänge bei speziellen Wetterlagen liefern, war von Anfang an vorgesehen, diese Beobachtungen durch allgemeine Untersuchungen der Wasserbewegung zu ergänzen. Außerdem sollte die Wasserstandsänderung in die Untersuchung einbezogen werden. Zwischen Wasserstand oder Gefälle einerseits und Stromgeschwindigkeit andererseits bestehen Beziehungen, die aus den hydrodynamischen Gleichungen abgeleitet werden und die es ermöglichen, aus dem Gefälle quantitative Angaben über die Stromgeschwindigkeit zu gewinnen. Neuere Ergebnisse der dynamischen Meereskunde gestatten es bei weitgehender Ausnutzung der in den hydrodynamischen Gleichungen gegebenen Zusammenhänge zwischen Strom und Wasserstand und deren Ableitungen, wenn die wirksamen Kräfte bekannt sind, mit einem Minimum an Beobachtungen die örtliche Verteilung der Bewegungsvorgänge zu ermitteln. Ist etwa die an der Oberfläche eines abgeschlossenen Meeresgebietes wirkende tangential Schubkraft des Windes bekannt, dann können der Triftstrom und der Windstau ermittelt werden.

Im einzelnen wirken folgende Kräfte und Einflüsse auf die Wassermassen der Lübecker Bucht: Der Wind erzeugt über die tangential Schubkraft auf die Meeresoberfläche Triftstrom und Windstau. Außerdem steht mit dem winderzeugten Seegang eine mit der Entfernung von der Oberfläche rasch abnehmende Horizontalbewegung in Zusammenhang. Weiterhin ist der Einfluß der Gezeiten- und der nicht sehr selten auftretenden Eigenschwingungen zu untersuchen. Endlich bedingt die Dichteschichtung eine Bewegung. Es kommt nun darauf an, festzustellen, welche Beträge die Stromgeschwindigkeit maximal annehmen kann und welche Wasserstandsänderungen in Verbindung damit auftreten können.

\*) In einer ausführlicheren unveröffentlichten Untersuchung sind die Bewegungsvorgänge in der Lübecker Bucht behandelt worden, die vorliegende Arbeit stellt eine Zusammenfassung derselben dar.

Die Ursachen der Bewegung in der Lübecker Bucht liegen nicht in allen Fällen dortselbst, sondern die Erscheinungen sind zum Teil bedingt durch eine Fernwirkung. Es wird zweckmäßig unterschieden zwischen den örtlich wirkenden Kräften und denjenigen, die sich mittelbar bemerkbar machen. Ganz allgemein kann gesagt werden, daß die Änderungen des Wasserstandes und der Stromgeschwindigkeit um so geringer sind, je kleiner die Fläche des abgeschlossenen Meeresgebietes ist. Steht das Meeresgebiet mit einem anderen ausgedehnteren in Verbindung, dann wird durch Ein- und Ausstrom über die Grenzlinie zwischen den beiden Meeresteilen der kleinere Teil in den Einflußbereich des größeren einbezogen. In der Lübecker Bucht ist als Abgrenzung gegen die Mecklenburger Bucht die Linie Groß Klützhöved—Dahmeshöved gewählt worden. Hydrodynamische Vorgänge in der Ostsee machen sich auf dieser Grenzlinie als Ein- und Ausstrom in die Lübecker Bucht bemerkbar.

Ebenso wie die Fläche als solche eine Rolle spielt, ist auch die Gestalt des Gebietes von Bedeutung. In einer offenen, wenig gegliederten Bucht, wie der Lübecker Bucht, die nahezu rechteckig ist, ist nicht zu erwarten, daß die Ein- und Ausstromgeschwindigkeiten dem Betrage nach gebietsmäßig sehr stark variieren. Lediglich das Gebiet der Travemündung macht eine Ausnahme insofern, als die seenartigen Erweiterungen der Trave oberhalb der Mündung relativ große Wassermassen aufzunehmen vermögen, die den schmalen Flußteil bei Travemünde, der wie eine Düse wirkt, mit beträchtlicher Geschwindigkeit durchströmen. Die vorstehenden Überlegungen zeigen, daß bereits aus der geographischen Lage und Gestalt des Meeresgebietes ein Überblick über die Bewegungsvorgänge erhalten werden kann.

Im folgenden werden die wirksamen Kräfte in ihrer Wirkung auf die Bewegung im einzelnen behandelt.

Die physikalischen Grundlagen für die quantitative Ermittlung der Wasserstände und der Strömungen aus dem Windfeld sind in einer früheren Arbeit behandelt worden (1). Die dort mitgeteilten Gleichungen liefern für verschiedene Windfelder die Gestalt der Meeresoberfläche und die Strömungen. Mit Hilfe der dort mitgeteilten Gleichungen ist zunächst festgestellt worden, daß die unmittelbar auf die Wassermassen der Lübecker Bucht wirkende Schubkraft des Windes nur geringe örtliche Gefälle und Stromgeschwindigkeiten hervorzubringen in der Lage ist. Als Anhaltspunkt sei eine aus Beobachtungen vom freien Meer abgeleitete Beziehung zwischen Wind  $W$  und Stromgeschwindigkeit  $v$  für mittlere Breiten mitgeteilt:

$$v = 0,0144 \cdot W,$$

mit deren Hilfe die folgenden Werte ermittelt sind:

|                             |      |      |      |      |      |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|
| Windgeschwindigkeit m/sec:  | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   |
| Stromgeschwindigkeit m/sec: | 0,14 | 0,22 | 0,29 | 0,36 | 0,43 |

Selbst bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten von 30 m/sec ist die Oberflächenstromgeschwindigkeit noch kleiner als 0,5 m/sec. Hier interessiert in erster Linie die Geschwindigkeit in Bodennähe, diese ist aber nur ein Bruchteil des Oberflächenwertes; maximal kann mit dem dritten Teil gerechnet werden, auf jeden Fall ist dann die Geschwindigkeit so klein, daß keine Erosion am Boden stattfindet. Bei geringeren Windgeschwindigkeiten wird erst recht kein Transport erfolgen. Der durch den örtlichen Wind in der Lübecker Bucht erzeugte Stau erreicht ebenfalls keine beträchtlichen Werte, wie folgende Zusammenstellung zeigt, die für eine Buchtlänge von 30 km und eine Tiefe von 20 m gilt:

|                            |   |     |     |      |
|----------------------------|---|-----|-----|------|
| Windgeschwindigkeit m/sec: | 5 | 10  | 20  | 30   |
| Stau cm:                   |   | 2,4 | 9,5 | 21,6 |

Es ist sicher, daß die bei heftigen, orkanartigen Stürmen in der Lübecker Bucht auftretenden Erhöhungen, die mehr als 3 m erreichen können, nicht durch den örtlichen Wind in der Lübecker Bucht bedingt sein können. Während der Sturmflut von 1872 trat in der Ostsee ein Windstau von 3,5 m auf. In derartigen Fällen findet ein Einstrom über die Grenzlinie Dahmeshöved—Groß Klützhöved statt. Die während dieses Einstroms auftretenden Geschwindigkeiten können aus der Geschwindigkeit des Steigens des Wasserstandes ermittelt werden; es ist die Einstromgeschwindigkeit im Eingang zur Lübecker Bucht gleich dem durch den Querschnitt dividierten Produkt aus der Oberfläche und der Steiggeschwindigkeit. Diese erreichte bei der obengenannten Sturmflut von 1872 bei mehr als 30 m/sec Windgeschwindigkeit einen Betrag

von 0,21 m/Std. Im Winter und Frühjahr 1950, wo Stauhöhen von weniger als 1 m beobachtet wurden, war die maximale Steiggeschwindigkeit nur 0,06 m/Std.

Die folgende Tabelle gibt einen Einblick in den Zusammenhang zwischen Steig- und Einstromgeschwindigkeit.

|                          |      |      |      |             |
|--------------------------|------|------|------|-------------|
| Steiggeschwindigkeit:    | 0,05 | 0,10 | 0,15 | 0,20 m/Std. |
| Einstromgeschwindigkeit: | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,08 m/sec  |

Auch hieraus ist wiederum zu ersehen, daß bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten die Stromgeschwindigkeiten im Eingang zur Lübecker Bucht und in dieser nur Beträge annehmen, die nicht ausreichen, um einen Transport von Bodenmaterial in Gang zu bringen. Angemerkt sei, daß die in der Ostsee auftretenden Steiggeschwindigkeiten wesentlich kleiner sind als diejenigen, die im Zusammenhang mit den Gezeiten in der Deutschen Bucht beobachtet werden.

In der ausführlichen unveröffentlichten Darstellung ist für ausgewählte Windfelder und Ein- und Ausstromfälle die zugehörige Gestalt der Meeresoberfläche und die Stromgeschwindigkeit in der Lübecker Bucht ermittelt worden. In allen Fällen hat sich gezeigt, daß die örtlichen Unterschiede im Wasserstand und die Beträge der Stromgeschwindigkeit in der offenen Lübecker Bucht nur gering sind und daß diese Faktoren nicht die Ursache nennenswerten Bodenmaterialtransportes sein werden.

Außer dem winderzeugten Triftstrom und Windstau kann der Seegang eine Rolle spielen. Aber auch hier läßt sich abschätzen, daß die in der offenen Lübecker Bucht auf Tiefen von etwa 20 m auftretenden, durch den Seegang bedingten horizontalen Wasserbewegungen am Boden so weit abgeklungen sind, daß kein Materialtransport zu erwarten ist. Erst in den Flachwassergebieten, vor allem dort, wo Brandung auftritt, wird das Bodenmaterial aufgehoben und durch die in Verbindung mit den Wellen auftretenden Strömungen in Küstenrichtung transportiert. Diese Strömungen können Beträge bis zu 1 m/sec annehmen. Die Tiefe, in der der Seegang wirksam wird, hängt von den Dimensionen des Seegangs ab; in der Lübecker Bucht wird das größenordnungsmäßig der Küstenstreifen von 0 bis 10 m Tiefe sein.

Wenn auch die Gezeiten in der Ostsee im Vergleich zur Nordsee nicht so stark hervortreten, so sind doch die dadurch bedingten Wasserstandsschwankungen, insbesondere in der Lübecker Bucht, klar erkennbar, vornehmlich bei ruhigen Wetterlagen. Sowohl in Lübeck als auch in Travemünde überwiegen die Halbtagsgezeiten, die Hauptmond tide  $M_2$  erreicht Amplituden von 4 bis 5 cm. Daß die Unterschiede im Wasserstand, bedingt durch die Gezeiten, nicht groß werden können, ergibt sich bereits aus dem vorstehend Gesagten.

Aus den Größenabmessungen für die Lübecker Bucht und dem dort auftretenden Tidenhub kann eine Abschätzung für die mittlere Gezeitenstromgeschwindigkeit gewonnen werden. Es ergibt sich ein Wert von weniger als 1 cm/sec, zu dem wiederum ein sehr geringes Spiegelgefälle von weniger als  $10^{-7}$  und daraus für die Gesamtlänge der Lübecker Bucht von 30 km einen Niveauunterschied von noch nicht  $\frac{1}{2}$  cm folgt. Danach sind in der offenen Bucht die Gezeiten praktisch ohne Bedeutung. In der Travemündung liegen die Verhältnisse allerdings anders. Der schmale Flußteil bei Travemünde verbindet die ausgedehnteren seeartigen Erweiterungen der Trave mit der Bucht, und diese seeartigen Erweiterungen spielen die Rolle von Spülbecken, so daß die durch die Travemündung im Gezeitenrhythmus ein- und ausströmenden Wassermassen wie in einer Düse zusammengedrückt werden und die Geschwindigkeit Beträge von über 1 m/sec erreichen kann.

Neben den Gezeiten sind die in der Ostsee auftretenden Eigenschwingungen zu erwähnen, die auch in der Lübecker Bucht beobachtet werden. Die Perioden dieser Eigenschwingung hängen von der Gestalt und von der Tiefe des Meeresteiles ab, in dem sie auftreten. Da die Ostsee in ihrer Gesamtheit sehr reich gegliedert ist, geraten nicht nur die Wassermassen der Ostsee insgesamt in Schwingungen, sondern auch einzelne Teile dieses Meeres, vornehmlich mehr oder weniger abgeschlossene Buchten, können zu selbständigen Schwingungen angeregt werden, die in den anderen Teilen der Ostsee nicht bemerkbar sind. So kann z. B. in der Lübecker Bucht eine Eigenschwingung auftreten, die einen Knoten etwa auf der Linie Dahmeshöved—Groß Klützhöved besitzt. Die Periode dieser Schwingung beträgt rund 2 Stunden 20 Minuten. Eine solche Schwingung wurde am 2. 4. und 22. 4. 1950 beobachtet; an sich sind

diese Schwingungen recht häufig. Am ausgeprägtesten werden die durch diese Schwingungen bedingten Wasserstandsänderungen in der Neustädter Bucht festgestellt.

Neben diesen kurzfristigen Eigenschwingungen, die auf die Lübecker Bucht beschränkt sind, werden hier Schwingungen beobachtet, die Periodendauern bis zu 24 Stunden oder mehr besitzen. Diese sind als Schwingungen ausgedehnterer Wassermassen zu verstehen, und zwar kommen hierfür Teile der Ostsee oder die gesamte Ostsee in Frage. Für den Teil der Ostsee vom Fehmarnbelt bis in den Bottnischen und Finnischen Meerbusen ergibt sich als längste Schwingungsdauer 39 Stunden.

Für die Ostsee ohne Bottnischen Meerbusen werden folgende Schwingungsdauern erhalten:

|                           |            |             |                        |
|---------------------------|------------|-------------|------------------------|
|                           | einknotige | zweiknotige | dreiknotige Schwingung |
| Periodendauer in Stunden: | 28         | 18          | 11                     |

wobei nach den üblichen Verfahren für eindimensionale Kanäle gerechnet wurde (3). Ganz grob ergibt sich aus der Länge  $l = 1500$  km und einer mittleren Tiefe von 50 m für die Ostsee eine Dauer der Grundschwingung von 37 Stunden, die sich dem oben angegebenen Wert recht gut nähert. Dieses ist ein Beispiel dafür, daß selbst in der recht kompliziert gestalteten Ostsee die einfache Schwingungsformel für den rechteckigen Kanal eine durchaus brauchbare Näherung liefert.

Ganz allgemein gilt: Je ausgedehnter und je flacher die schwingende Wassermasse ist, desto länger wird die Dauer der einknotigen Schwingung. Die Amplituden dieser können insbesondere im Finnischen Meerbusen Werte bis zu einem Meter und mehr erreichen. Diese Eigenschwingungen können durch den Wind oder durch Luftdruckänderungen angefacht werden.

Da die Wassermassen in der Lübecker Bucht Salzgehaltsunterschiede aufweisen, kann der Einfluß des Windes an der Salzgehaltsverteilung festgestellt werden. In den großen Tiefen ist salzreiches Wasser, in den oberflächennahen Schichten salzarmes Wasser vorhanden. Bei Winden aus westlichen Richtungen, die die Oberflächenwassermassen aus der Bucht hinaustransportieren, steigt das salzreiche Bodenwasser vor der Küste auf und füllt hier auch die oberflächennahen Schichten aus. Bei Winden aus östlichen Richtungen wird das salzärmere Oberflächenwasser in die Bucht hineingetrieben und die salzreiche Bodenschicht nach See zu verlagert, so daß in den inneren Teilen der Lübecker Bucht nahezu homogener Salzgehalt von der Oberfläche bis zum Boden bei derartigen Wetterlagen beobachtet wird.

Insgesamt ergibt sich folgendes Bild der Bewegungsvorgänge in der Lübecker Bucht: In der freien Bucht sind die örtlichen Unterschiede des Wasserstandes und damit auch die Stromgeschwindigkeit, insbesondere in Bodennähe, nur gering; im allgemeinen wird kein Materialtransport stattfinden. In einem schmalen Küstenstreifen wird durch Seegang und vor allem durch die Brandung das Bodenmaterial in Bewegung gesetzt und durch die in diesem Bereich auftretende Küstenströmung küstenparallel oder auch durch den dem Triftstrom entgegengerichteten Bodenstrom seewärts transportiert. Wenn das Bodenmaterial seewärts verlagert wird, dann ist aber zu erwarten, daß sehr bald die Geschwindigkeit so weit absinkt, daß das mitgeschleppte Material wieder abgesetzt wird. Die insbesondere auch für den Wasserbau bedeutungsvollen ozeanographischen Vorgänge und morphologischen Veränderungen sind demnach auf einen relativ schmalen Küstenstreifen beschränkt, außerhalb desselben passiert praktisch nichts mehr; selbst wenn der Wasserstand in der Lübecker Bucht um Meter ansteigt, so ist die damit verbundene Einstromgeschwindigkeit sogar bei den heftigsten bisher beobachteten Sturmfluten so gering, daß nicht mit Materialtransport gerechnet werden darf.

Wesentlich anders liegen die Dinge in denjenigen Meeresgebieten, in denen die Gezeiten eine Rolle spielen; hier können auch auf tieferem Wasser Bewegungen in horizontaler und vertikaler Richtung auftreten, und selbst in Bodennähe sind noch Stromgeschwindigkeiten möglich, die einen Materialtransport bedingen. Während der Triftstrom eine rasche Abnahme von der Oberfläche bis zum Boden erfährt, besitzt der Gezeitenstrom eine nahezu konstante Geschwindigkeit von der Oberfläche bis in Bodennähe. Hinzu kommt noch, daß etwa die in der Deutschen Bucht auftretenden Gezeitenströme jedenfalls partiell wesentlich höhere Beiträge der Geschwindigkeit erreichen, als selbst die bei hohen Windgeschwindigkeiten auftretenden

den Triftströme. Dementsprechend ist in Gezeitengebieten auch nicht die Zone morphologischer Veränderungen auf einen schmalen Küstenstreifen beschränkt, sondern erstreckt sich über das gesamte Meeresgebiet.

Daraus ergibt sich für meereskundliche Untersuchungen, die im Hinblick auf wasserbauliche Maßnahmen im Küstenbereich angestellt werden, die Folgerung, daß in den Seegebieten, in denen die Gezeiten ohne Bedeutung sind, die Arbeiten auf einen relativ schmalen Küstenstreifen konzentriert werden können, in Gezeitengebieten dagegen sollten die Untersuchungen auf ein möglichst umfassendes Meeresgebiet ausgedehnt werden.

Zusammenfassend gilt folgendes: Wasserstandsänderungen der Lübecker Bucht über 0,5 m bis zu einigen Metern kommen nur dann vor, wenn entsprechende Wassermassen in die Bucht ein- oder aus der Bucht ausströmen. Die hierbei auftretenden Stromgeschwindigkeiten bleiben gering (maximal 20 cm/sec). Das zeigen sowohl die Beobachtungen als auch die dynamischen Untersuchungen. Diese Erscheinung, daß nämlich bei erheblichen Wasserstandsänderungen die Stromgeschwindigkeit von derselben Größenordnung ist wie die, die bei den Wasserstandsänderungen geringen Ausmaßes auftreten, mag zunächst befremden, wird aber sofort verständlich, wenn den obigen Überlegungen entsprechend beobachtet wird, daß für die Stromgeschwindigkeiten nicht die Wasserstände, sondern die Gefälle entscheidend sind. Beobachtung und Theorie haben gezeigt, daß dieses Gefälle bei Wasserstandsänderung von absolut geringem Ausmaß ebenso groß und größer werden kann, als das bei absolut großen Änderungen auftretende Gefälle.

Es erscheint dementsprechend grundsätzlich unzumutbar, etwa einzelne Wasserstands- und Strombeobachtungen in Beziehung zur Wetterlage zu bringen und Zusammenhängen zwischen diesen Größen nachzuspüren. Aus diesem Grunde wurden in der vorliegenden Untersuchung die Beobachtungen nach hydrodynamischen Gesichtspunkten behandelt.

#### Schriftenverzeichnis

1. HANSEN, W.: Beobachtungen des Windstaus und Triftstroms im Modellkanal. Dtsch. Hydrogr. Z. Bd. 4, H. 3, S. 81—91, 1951.
2. SVERDRUP, JOHNSON, FLEMING: The Oceans. 3. Aufl., New York, 1949.
3. THORADE, H.: Probleme der Wasserwellen. Probleme der Kosmischen Physik. Bd. XIII u. XIV. Hamburg 1931.

## Die Pflanzenwelt des Brodtener Ufers

Von Willi Christiansen und Hans Purps

Wenn auch die Dreiteilung des Brodtener Ufers: Vorstrand, Steilküste, Oberkante, zunächst in die Augen fällt, so ist doch eine Zweiteilung: Totes Kliff, Lebendes Kliff, besser begründet, da es die dynamischen Verhältnisse der drei genannten Streifen zum Ausdruck bringt.

Der bei weitem größte Teil des Brodtener Ufers ist ein lebendes Kliff. Nur der an Travemünde angrenzende Teil ist wirklich zur Ruhe gekommen und kann als totes Kliff bezeichnet werden. Selbst die stark mit Sträuchern bestandenen Strecken (z. B. beim Seetempel) unterliegen einem, wenn auch weniger offenkundigen Abbruch, sind also nicht „tot“.

An der Umgestaltung, und zwar in erster Linie Abtragung des Brodtener Ufers, sind zwei Kräftegruppen tätig. Das Meer greift von außen an, zerreißt und zerreibt sowohl abgestürzte als auch stehende Moränenmassen der Steilküste und führte sie zum größten Teile fort. Innere Kräfte, insbesondere die Wasserführung, zerklüften das Gestein und stürzen und spülen es herab. Da indessen das Meer die herabgestürzten Massen schnell fortzuschaffen pflegt, kommt es an dem lebenden Kliff nirgends zur Bildung eines Schuttkegels, der bis an die Oberkante reicht, und auch der Vorstrand kann sich niemals aufhöhen.

Infolgedessen kann der aus Sand gebildete Vorstrand sich niemals begrünen. Die sich einfindenden Pflanzenbestände kommen fast nie über ein Initialstadium hinaus. Am besten haben sie sich im Schutze des Söhrmandammes entwickeln können. Hier finden sich kleine Gruppen in der „Tomatenzone“ (Strandmeldengesellschaften, *Atriplicetum litoralis*) mit Strandmelde (*Atriplex litoralis*), Meerstrandkamille (*Matricaria maritima*) und anderen einjährigen Arten. Ackerunkräuter mischen sich diesen wenigen eigentlichen Strandpflanzen bei. Einzelne stehende Pflanzen vom Meersenf (*Cakile maritima*), Strandsoda (*Salsola kali*) und andere werden meist schon im Laufe des Sommers bei kleineren Hochwassern vernichtet. Es sind daher auch die Ausbreitungseinheiten der eigentlichen Strandpflanzen wohl nur in geringer Menge vorhanden. — An den Söhrmandamm lehnt sich auch ein Fragment eines Brackwasserröhrichts (*Scirpetum maritimi*) an, dessen Rhizome aber schon vom Wasser teilweise freigelegt worden sind. Die Strandhafengesellschaften (*Elymion arenariae*) kommen ebenfalls nicht über die ersten Anfänge hinaus. Kleine Fragmente findet man hin und wieder an den Schuttkegeln am Fuße des Kliffs angelehnt (mit *Ammophila arenaria* und *Elymus arenarius*).

Ähnlich artenarm ist der Bewuchs des lebenden Kliffs, doch ist der Anteil an eigentlichen Strandpflanzen noch geringer. Rein theoretisch kann man das lebende Kliff in ein Kliff mit geringem und mit reichlichem Bewuchs unterteilen; doch sind diese beiden Formen naturgemäß durch zahlreiche Zwischenformen miteinander verbunden. Am lebenden Kliff lassen sich zwei bis drei Horizontalstreifen erkennen, deren Breite durch den Abbau des Kliffs bedingt ist. Von der anstehenden Steilwand lösen sich Massen ab, die sich als Schuttkegel an seinem Fuße ablagern, bis sie vom Meere fortgeführt werden. Da sie meist nur ein geringes Alter erreichen, pflegt auch der Bewuchs nur recht lückenhaft zu sein. Er ist in erster Linie aus Arten gebildet, die von der Oberkante stammen. Ackerunkräuter nehmen daher den breitesten Raum ein. Daneben finden sich Arten der Grünlanddecke, die die Oberkante bildet. So kann man z. B. dichte Bestände des Ackersens (*Sinapis arvensis*) finden; daneben steht der Acker-Gauchheil (*Anagallis phoenicea*) in fast reinen Beständen. Es sind fast ausschließlich einjährige Arten, die die Erstbesiedlung ausmachen. Mehrjährige Arten (Knaulgras — *Dactylis glomerata*, Rotschwengel — *Festuca rubra* u. a. Gräser) bilden kleine Horste; besonders aber Huflattich (*Tussilago farfara*) fehlt fast nie. An eigentlichen Strandpflanzen unter den Kräutern sah ich auf der ganzen Strecke nur wenige Stücke der Strand-Milchdistel — (*Sonchus paluster*). Die Ausbreitungseinheiten der Strandarten müssen in horizontaler Richtung aus größeren Entfernungen herbeigeführt werden; dazu ist aber viel mehr Zeit erforderlich, als bei dem

schnellen Wechsel des Substrats zur Verfügung steht. Es bleibt daher fast nur die Besiedlungsmöglichkeit von oben her. Aus der Lockerheit des Bewuchses und der Herkunft der Besiedler läßt sich die stete Jugendlichkeit des Substrats, also der schnelle Abbau des Schuttkegels, erkennen.

Eine besondere Eigenart innerhalb der Schuttkegelbildungen stellen die feuchten Nischen dar. Sie entstehen, wo an Orten reichlichen Wasseraustritts größere Teile aus dem oberen Steilhang ins Fließen, Gleiten oder Stürzen geraten und etwa horizontale Plattformen herausbilden. Der Boden ist stets durchnäßt, und dementsprechend finden sich auf ihm Feuchtigkeitszeiger an. In erster Linie sind es wieder einjährige Ackerunkräuter; Krötenbinse (*Juncus bufonius*) und Sumpf-Ruhrkraut (*Gnaphalium uliginosum*) finden sich bald ein. Etwas später erscheinen ausdauernde Arten: Flatterbinse (*Juncus effusus*), Sumpfdistel (*Cirsium palustre*), Sumpfziest (*Stachys palustris*) und andere.

Dieses Nacheinander kann man an den verschiedenen nebeneinander liegenden Zuständen erkennen. Nur selten aber kommt es zur Entwicklung von Dauerzuständen, in denen sich Holzgewächse einstellen (siehe unten).

In den meisten Fällen wird die Pflanzendecke der feuchten Nischen nach einer oder zwei Vegetationsperioden wieder zerstört, indem sie entweder von unten her angenagt und fortgeschwemmt oder von oben her mit neuen Erdmassen überdeckt wird.

Die oberhalb des Schuttkegels in verschiedener Breite anstehende Steilwand ist äußerst vegetationsarm. Dennoch lassen sich an ihr zwei Zonen erkennen. Die untere Zone entbehrt in typischer Ausbildung jeglicher höheren Pflanze. Mitunter lassen sich grüne horizontale Streifen erkennen; diese deuten Wasseraustritte an, auf denen sich Grünalgen und Moosvorkeime ansiedeln. Nur wo Unebenheiten in der fast senkrechten Abbruchwand von oben abstürzende Teile der Ackerkrume mit Pflanzenwuchs festgehalten haben, kann man eine Blütenpflanze finden. — Dagegen zeigt der obere, der Oberkante nahe stehende Teil der Steilküste, eine eigenartige Besiedlung mit Blütenpflanzen: aus den Wurzeln und Wurzelstöcken mancher Arten der Oberkante treiben an der Abbruchstelle grüne Sprosse hervor. Diese Fähigkeit, neue Sprosse zu bilden, kommt natürlich nicht allen Arten und nicht einmal allen ausdauernden Arten zu. Insbesondere ist es der Huflattich (*Tussilago farfara*), der diese Fähigkeit in hervorragender Weise besitzt und daher die Oberkante mit seinen Blättern dicht überzieht. Daneben stehen Ackerwinde (*Convolvulus arvensis*), Ackerdistel (*Cirsium arvense*), Gemeines Johanniskraut (*Hypericum perforatum*) und andere. Der Bewuchs auch der Steilkante des lebenden Kliffs deutet stets Jugendlichkeit, also fortdauernden Abbruch, an.

An der Oberkante des Brodtener Ufers entlang führt ein Fußweg. Zwischen ihm und der Kante bildet sich eine eigenartige Pflanzengesellschaft aus, wenn genügend Zeit vorhanden ist: die Rainfarn-Hochstaudenflur. Am Brodtener Ufer aber hat sie an keiner Stelle Zeit zu einer typischen Ausbildung gefunden. Der Rainfarn (*Tanacetum vulgare*) selber ist nur spärlich vorhanden, neben ihm stehen einzelne Pflanzen der Flockenblume (*Centaurea jacea*), des Beifußes (*Artemisia vulgaris*) und die vorhin erwähnten Stauden, die ihre Wurzeln tief in den Lehm Boden hinabgesenkt haben und an der Abbruchkante neue Sprosse bilden. Zur Hauptsache aber wird dieser Streifen mit Gräsern besiedelt: Knautgras (*Dactylis glomerata*), Rotschwingel (*Festuca rubra*) u. a. Daneben stehen Arten, die anzeigen, daß vor einem oder zwei Jahren der Fußweg auf diesem Streifen entlang ging, wie Breitwegerich (*Plantago major*), Vogelknöterich (*Polygonum aviculare*), Strahllose Kamille (*Matricaria matricarioides*). Also auch hier deutet die Pflanzendecke ständigen Abbruch an. Wo der Angriff des Meeres weniger stark ist, und daher der Abbruch weniger schnell vor sich geht, wird der Vegetationsdecke mehr Zeit gelassen, sich weiter zu entwickeln. Das ist namentlich im Schutze des Söhrmann-Dammes möglich gewesen. Hier hat sich daher ein geschlossener Strauchbestand vom Vorstrand bis zur Oberkante hinauf ausbilden können. An der Artenzusammensetzung läßt sich erkennen, daß dieser Bewuchs nicht urwüchsig ist, denn neben einheimischen Arten, wie Schwarzdorn (*Prunus spinosa*), Weißdorn (*Crataegus spec.*), Rosen (*Rosa spec.*), Weiden (*Salix spec.*) und besonders Stranddorn (*Hippophaes rhamnoides*), stehen fremde, besonders

die falsche Akazie (*Robinia pseudoacacia*). Es ist also mindestens ein Teil dieser Sträucher gepflanzt worden, doch läßt sich nicht feststellen, ob die Bepflanzung unmittelbar am Hang erfolgt ist oder ob die Sträucher auf der Oberkante gepflanzt und nachträglich heruntergerutscht sind. Auf alle Fälle aber erfüllen sie ihre Aufgabe leidlich gut, denn ein Abbruch der Steilkante findet hier zur Zeit nur in sehr geringem Maße statt. Dies ist um so beachtenswerter, als das Meer am Fuße des Schuttkegels streckenweise ein Sekundärkliff gebildet hat, dessen weitere Ausbildung man durch Steinpackungen abzuwehren versucht hat. Die Steine aber sind durch Zweige und Wurzeln der Sträucher, die über sie hinwegrutschen, fast verdeckt. Der bebuchte Hang ist noch so steil, daß man annehmen darf, daß er den durch das Substrat bedingten natürlichen Neigungswinkel nicht erreicht hat. Ohne den Schutz durch die Sträucher würden die inneren Zerfallkräfte einen viel stärkeren Abbau verursachen. An einer besonders gefährdeten Stelle (neben der Treppe) scheint eine Staude einen wirksamen Schutz zu bilden. Es ist der Staudenholunder (*Sambucus ebulus*), dessen dichtes Wurzelstockgeflecht den Boden festhält. Er ist allerdings eben wegen dieses Wurzelstockgeflechtes und zugleich wegen des tiefen Schattens, den sein dichtes Laubwerk hervorruft, sehr unduldsam, so daß unter ihm keine anderen Kräuter hochkommen; aber er erfüllt seine Aufgabe eben auch allein.

Einzelne Sträucher und Strauchgruppen stehen auch an anderen Stellen des Brodtener Ufers, und namentlich an der Nordflanke, also nach Niendorf hin, findet sich dichteres Gebüsch. Allenthalben aber läßt sich feststellen, daß wenigstens die älteren Holzgewächse nicht an ihrem jetzigen Ort aufgewachsen, sondern von der Oberkante herabgeglitten sind. Nur junge Holzgewächse haben genügend Zeit gehabt, sich zu entwickeln. Doch auch sie rutschen allmählich tiefer herab, bis sie am Fuße des Kliffs angelangt sind, wo das Erdreich von ihren Wurzeln durch das Meer fortgespült wird, bis sie selber den Fluten zum Opfer fallen. Es läßt sich also feststellen, daß ein Strauchbewuchs das Ufer nicht vor dem Abbruch bewahren kann, wenn nicht ein genügend hoher Strand den Kliffuß schützt.

Ein Strauch verdient wegen seiner Widerstandsfähigkeit besonderer Beachtung, der Stranddorn (*Hippophaes rhamnoides*). Selbst auf den ganz jungen Schuttkegeln findet man Sämlinge, offenbar haben Vögel die Samen ausgesät. Altern diese Schuttkegel, so können die Sträucher zu einem dichten, weit verzweigten Gebüsch heranwachsen. Selbst eine starke Überdeckung mit neuen Schuttmassen vertragen sie sehr gut; wenn auch nur noch eine kleine Zweigspitze hervorlugt, treibt der Strauch doch immer wieder von neuem. Er ist daher wie keine zweite Art für die Festlegung des Hanges geeignet. Allerdings scheint er nicht besonders widerstandsfähig gegen Salz zu sein. Wenn er am Kliffuß steht und seine Wurzeln vom Meerwasser entblößt und umspült werden, kränkelt er und ist weniger gut belaubt. Es ist daher wohl kein Zufall, daß er im Schutze des Söhrmann-Dammes nicht zu unterst steht, sondern durch einen Saum von Weiden ersetzt wird.

Ein „totes“, also in Ruhe befindliches Kliff befindet sich nur an der Südflanke, also in der Nähe von Travemünde. Hier ist der Sandvorstrand so hoch, daß er nur bei ausnahmsweise hoher Flut überspült wird, und auch dann scheint die Gewalt der Wellen so gebrochen zu sein, daß sie das Kliff nicht mehr annagt. Der Vorstrand ist hier mit einer dichten Pflanzendecke überzogen, die einer Abtragung einen erheblichen Widerstand zu bieten vermag. An der Außenkante dieses hohen Sand-Vorstrandes bemerkt man allerdings ein kleines Sekundärkliff, das anzeigt, daß auch dichtbewachsener Vorstrand nicht unbedingt vor Abbruch schützt. Sollte der hohe Vorstrand einst aufgezehrt sein, wird der Hang selber angegriffen werden.

Zur Zeit aber liegt dieser Hang in einem Neigungswinkel, der wohl seinem Nährboden entspricht und auch von inneren Zerstörungskräften nicht mehr angegriffen wird. Es mögen die auf ihm und der Oberkante stehenden Buchen gepflanzt worden sein, die Krautschicht aber, die der eines Buchenwaldes entspricht, ist auf natürliche Weise entstanden.

Aus den bisherigen Ausführungen geht hervor, welche Wirkungen biologische Maßnahmen in bezug auf den Abbruch des Brodtener Ufers haben können, und zwar sowohl ohne gleichzeitige technische Eingriffe als auch mit solchen verschiedener Art. Es ist gezeigt worden, daß

der Abbruch von der Beschaffenheit des Vorstrandes abhängig ist. Ohne technische Hilfsmaßnahmen aber erhöht sich der Sandstrand nicht, da auch der aus dem Geschiebemergel anfallende Sand fortgeführt wird. Da aber auch die Ausbreitungseinheiten der Strandpflanzen sich nicht oder doch nur ausnahmsweise absetzen können, kann sich selbst in ruhigen Jahreszeiten keine schützende Vegetation entwickeln. Es müßte daher, falls durch technische Maßnahmen ein Sandvorstrand geschaffen würde, dieser mit Strandpflanzen besät (mit Arten der „Tomatenzone“) oder bepflanzt (mit Strandhafer) werden. Dadurch würde der Abbruch zwar nicht verhindert, aber doch verzögert werden.

Wenn der Klifffuß ungeschützt bleibt, dürfte es zwecklos sein, den Hang künstlich zu besiedeln. Selbst wenn durch umfangreiche technische Bauten ein Abbau des Kliffs durch das Meer verhindert wird, würden die inneren Abbaukräfte noch lange Zeit am Kliff arbeiten. Eine künstliche Begrünung würde erst dann zum Ziele führen, wenn eine Beruhigung eingetreten ist. Es wäre denkbar, diesen Zustand durch Abschrägung der Steilküste sofort herbeizuführen. Wenn auf natürlichem Wege (nach Einbau eines Schutzes des Klifffußes oder nach künstlicher Abtragung) dem stärksten Abbau gewehrt ist, dann kann der weitere Abbau in hervorragender Weise durch eine Pflanzendecke verhindert oder doch bis auf ein erträgliches Maß verzögert werden. Dann müssen folgende Arten, deren Auswahl sich aus der Beobachtung am heutigen Kliff ergeben hat, angesät werden. An Gräsern kämen daher in erster Linie in Betracht:

Knauelgras (*Dactylis glomerata*)  
 Rotschwingel (*Festuca rubra*)  
 Franz. Raygras (*Arrhenatherum elatius*)  
 Quecke (*Agropyron repens*).

Ferner an Stauden:

Gem. Beifuß (*Artemisia vulgaris*)  
 Löwenzahn (*Taraxacum officinale*)  
 Rainfarn (*Chrysanthemum vulgare*)  
 Gem. Flockenblume (*Centaurea jacea*)  
 Schafgarbe (*Achillea millefolium*)  
 Weißklee (*Trifolium repens*).

Ihrer Pflicht als Beschützer der Bodenoberfläche werden sie durch ihre Wurzelform nachzukommen in der Lage sein, sowohl oberirdisch durch die Staudenform als auch unterirdisch durch ein sich gut verfilzendes Wurzelwerk.

Die wichtigste Festigung des Hanges aber müssen Holzgewächse leisten.

Es wurde am Brodtener Ufer wie auch an ähnlichen anderen Abbruchufern und ruhigen Steilufern eine nicht geringe Anzahl gut gedeihender Gehölzarten beobachtet.

Sträucher:

Schwarzdorn (*Prunus spinosa*)  
 Stranddorn (*Hippophaes rhamnoides*)  
 Feldahorn (*Acer campestre*)  
 Weißdorn (*Crataegus*)  
 Hasel (*Corylus avellana*)  
 Vogelbeere (*Sorbus aucuparia*)  
 Rosen (*Rosa spec.*)  
 Weiden (*Salix spec.*) u. a.

Wo stärkerer Wasseraustritt eine natürliche Nischenbildung hervorruft, müßte man diese eher fördern als hindern, da gerade sie als schön empfunden wird. Wenn sich die entsprechenden Pflanzengesellschaften nicht selber ansiedeln, müßte man z. B. den Riesenschachtelhalm (*Equisetum maximum*), die Weisse Pestwurz (*Petasites albus*) und andere schöne Stauden, die andere Steilküsten der schleswig-holsteinischen Ostsee zieren, anpflanzen.

Wenn es technisch durchführbar ist, das Ufer so stark abzuschrägen, daß die inneren Abbaukräfte überhaupt unwirksam werden, dann würde bis an den Kliffuß ein Buchenwald mit seinem Vorgehölz den ganzen Hang besiedeln können oder er könnte bis unten hin der landwirtschaftlichen Nutzung zugeführt werden. Dann aber wäre die gigantische Schönheit des Brodtener Ufers, um derentwillen jährlich Tausende von Menschen es aufsuchen, verloren.

### Schriftenverzeichnis

1. CHRISTIANSEN, A.: Botanisch-geologische Bilder vom Kieler Ostseestrande. In: Führer durch die Ausstellung d. dtsh. Lehrervers., Kiel, 1914.
2. CHRISTIANSEN, A., Werner u. Willi: Flora von Kiel. S. 34 ff.: Steilküste. Kiel, 1922.
3. PREUSS, H.: Die Vegetationsverhältnisse der deutschen Ostseeküste. In: Schr. Naturf. Ges. Danzig, 1911.
4. REINKE, Johs.: Botanisch-geologische Streifzüge an den Küsten des Herzogtums Schleswig. In: Wiss. Meeresunters. d. Komm. z. wiss. Unters. d. dtsh. Meere, Kiel, 1903.
5. TÜXEN, R.: Die Pflanzengesellschaften Nordwestdeutschlands. Hannover, 1947.
6. WARMING, E.: Dansk Plantevaekst. Kopenhagen, 1906—1907.

**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 vorzunehmen<sup>1)</sup>. 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,

<sup>1)</sup> An der Westküste Schleswig-Holsteins wurde im Jahre 1934 mit der Durchführung eines großzügig 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 ausinandergelassenen 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.

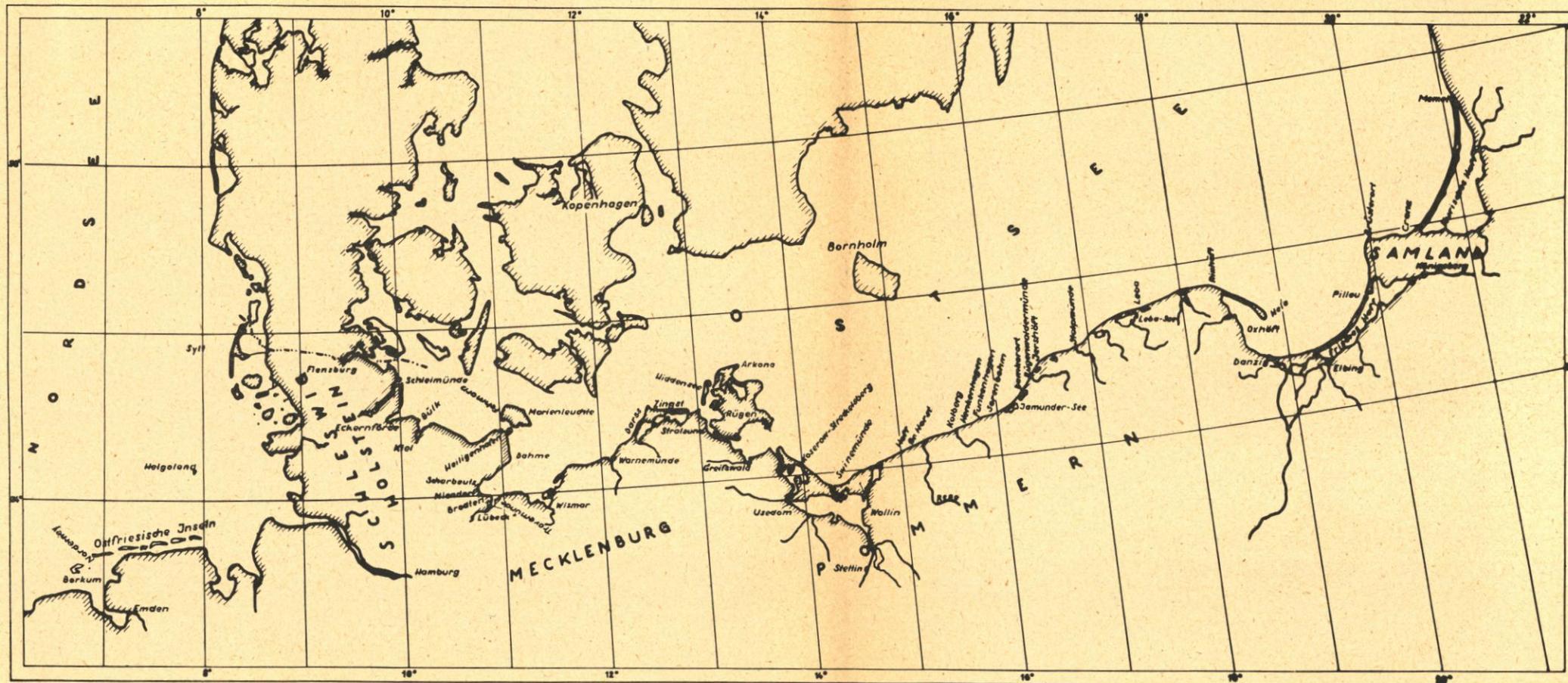


Abb. 1. Die deutsche Ostseeküste vom Samland bis Schleswig-Holstein

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      |                         |
| Kraxteppen                                   |               |       |              | 0,50      |                         |
| Palmnicken                                   |               |       |              | 0,50      |                         |
| Hubnicken                                    |               |       |              | 0,50      |                         |
| Sorgenauer 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<br>km | m/Jahr | m <sup>2</sup> /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 m<sup>2</sup> Abbruchfläche, d. h. einen Uferrückgang von 0,64 m/Jahr, ergaben. ZANDER kam nach Auswertung von Vermessungen auf 115 km Abbruchküste und 36 110 m<sup>2</sup> 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  $\pm 17$  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  |
| <u>zus. rund 24,4 ha</u>            |           |

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<br>km | Abbruch-<br>länge*)<br>km | Abbruch-<br>fläche<br>qm | mittl. Rückg.<br>d. Abbruch-<br>länge<br>m | jährl. Rückg.<br>d. Abbruch-<br>länge<br>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<br>km | Abbruch-<br>länge*)<br>km | Abbruch-<br>fläche<br>qm | mittl. Rückg.<br>d. Abbruch-<br>länge<br>m | jährl. Rückg.<br>d. Abbruch-<br>länge<br>m | F**)<br>± 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<br>berechn. Abbruchfl.  | 83,0              | 47,4                      | 783 000                  | 16,5                                       | 0,22                                       | 17              |
| Steilufer ohne<br>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)]<sup>2)</sup>. 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).

<sup>2)</sup> 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<br>m <sup>2</sup> | Länge<br>m | Brd.jl<br>Breite<br>m |      |
| 1    | Heidahl         | 1760                     | 178        | 9,9                   | 0,41                     | 1433       | 195                   | 7,35                     | 0,56       | 205                   | 3,72                     | 0,26       | -                     | -                        | -          | -                     | -                        | -          | -                     |      |
| 2    | V Uferkoppel    | 1758                     | 138        | 12,74                 | 0,53                     | 932        | 121                   | 7,70                     | 0,59       | 624                   | 109                      | 5,72       | 0,38                  | -                        | -          | -                     | 4002                     | 190        | 21,06                 | 0,37 |
| 3    | Saalkampfabrede | 1278                     | 105        | 12,17                 | 0,51                     | 942        | 119                   | 7,92                     | 0,61       | 834                   | 124                      | 6,72       | 0,45                  | 560                      | 127        | 1,30                  | 3314                     | 125        | 26,51                 | 0,29 |
| 4    | Ahrenlande      | 3695                     | 344        | 11,3                  | 0,47                     | 3155       | 330                   | 9,56                     | 0,74       | 1345                  | 325                      | 4,14       | 0,28                  | 3055                     | 315        | 9,70                  | 12606                    | 330        | 38,20                 | 0,53 |
| 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                 | 10341                    | 185        | 55,90                 | 0,78 |
| 6    | Hundskoppel     | 1580                     | 62         | 25,5                  | 1,06                     | 893        | 65                    | 13,73                    | 1,06       | 450                   | 70                       | 6,43       | 0,43                  | 680                      | 70         | 9,70                  | 3818                     | 65         | 59,74                 | 0,81 |
| 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                 | 17783                    | 300        | 59,94                 | 0,83 |
| 8    | Hochhorst       | 4360                     | 212        | 20,6                  | 0,86                     | 2688       | 205                   | 13,11                    | 1,01       | 2117                  | 205                      | 10,33      | 0,69                  | 2280                     | 205        | 11,12                 | 12301                    | 205        | 60,98                 | 0,85 |
| 9    | Hakensee        | 3262                     | 178        | 18,3                  | 0,76                     | 2133       | 185                   | 11,53                    | 0,89       | 1636                  | 185                      | 8,84       | 0,59                  | 1910                     | 185        | 10,32                 | 9691                     | 185        | 52,38                 | 0,73 |
| 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                  | 4953                     | 120        | 41,28                 | 0,57 |
| 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                  | 9413                     | 280        | 33,61                 | 0,47 |
| 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                  | 3638                     | 120        | 30,31                 | 0,42 |
| 13   | Ölkoppel        | 987                      | 90         | 11,0                  | 0,46                     | 1110       | 115                   | 9,65                     | 0,74       | 763                   | 115                      | 6,63       | 0,44                  | 440                      | 125        | 3,52                  | 3580                     | 110        | 32,54                 | 0,45 |
| 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                  | 3392                     | 95         | 35,70                 | 0,50 |
| 15   | Voskoppel       | 2000                     | 197        | 10,6                  | 0,43                     | 904        | 200                   | 4,52                     | 0,35       | 966                   | 200                      | 4,85       | 0,32                  | 1920                     | 200        | 9,60                  | 6335                     | 200        | 31,68                 | 0,44 |
| 16   | Wieskoppel      | 697                      | 206        | 3,3                   | 0,14                     | 729        | 205                   | 3,56                     | 0,27       | 1340                  | 205                      | 6,54       | 0,44                  | 1650                     | 205        | 8,05                  | 4878                     | 205        | 23,90                 | 0,33 |
| 17   | Mühlkamp        | 1762                     | 345        | 5,1                   | 0,21                     | 592        | 350                   | 1,69                     | 0,13       | 661                   | 350                      | 1,89       | 0,13                  | 395                      | 350        | 1,15                  | 3893                     | 350        | 11,12                 | 0,15 |
| 18   | Herrkamp        | 1530                     | 195        | 7,8                   | 0,33                     | 587        | 195                   | 3,01                     | 0,23       | 450                   | 195                      | 2,31       | 0,15                  | 240                      | 195        | 1,23                  | 3940                     | 195        | 17,13                 | 0,24 |
| 19   | I Uferkoppel    | 2236                     | 233        | 9,6                   | 0,40                     | 498        | 240                   | 2,03                     | 0,16       | 468                   | 240                      | 1,95       | 0,13                  | 655                      | 240        | 2,73                  | 4049                     | 240        | 16,87                 | 0,23 |
| 20   | Hävenkamp       | -                        | -          | -                     | -                        | 872        | 260                   | 3,35                     | 0,26       | 300                   | 260                      | 1,15       | 0,08                  | 456                      | 260        | 1,75                  | 1768                     | 260        | 6,88                  | 0,10 |
|      |                 | 46497                    | 3627       | 12,8                  | 0,53                     | 27614      | 3220                  | 7,04                     | 0,54       | 20741                 | 3858                     | 5,40       | 0,36                  | 22736                    | 3507       | 6,48                  | 9706                     | 3507       | 2,77                  | 0,46 |
|      |                 | Kontrolle: Mittel Sp. 6  |            | 0,56                  | Kontrolle: Mittel Sp. 10 |            | 0,58                  | Kontrolle: Mittel Sp. 18 |            | 0,48                  | Kontrolle: Mittel Sp. 22 |            | 0,46                  | Kontrolle: Mittel Sp. 25 |            | 0,48                  | Kontrolle: Mittel Sp. 26 |            | 0,48                  |      |
|      |                 | 46497                    | -          | 12,8                  | 0,53                     | 27614      | -                     | 7,0                      | 0,54       | 20741                 | -                        | 5,40       | 0,36                  | 22736                    | -          | 6,48                  | 9706                     | -          | 2,77                  | 0,46 |

Tabelle 4

Tabelle 4 gibt weiter zu erkennen, daß die jährlichen Rückgangswerte in verschiedenen Zeitabschnitten voneinander abweichen. Ob der Rückgang von Steilufnern „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.

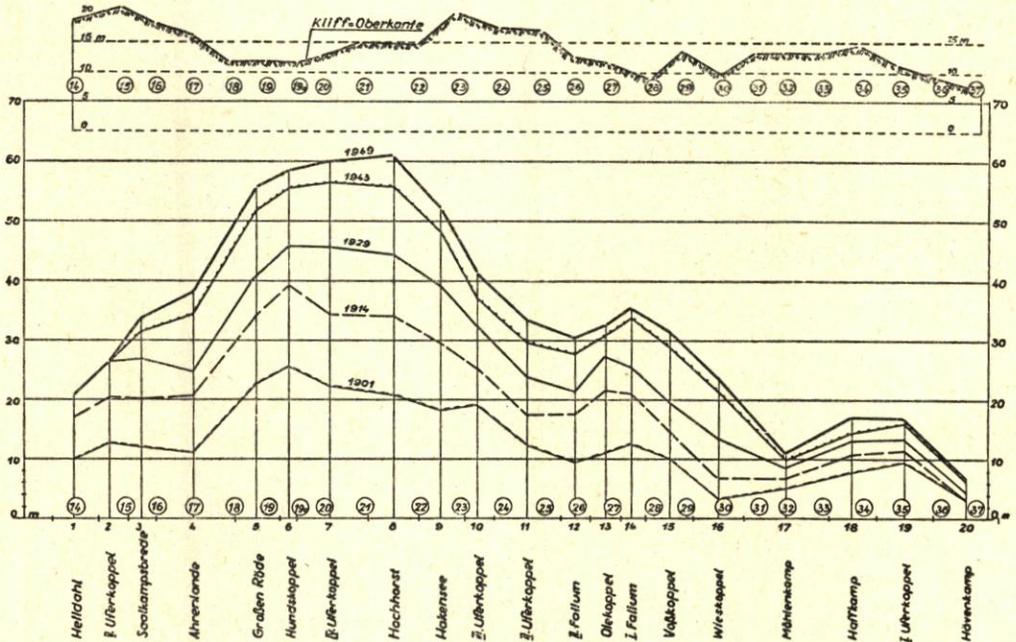


Abb. 2. Der Rückgang des Brodtener Ufers von 1877 bis 1949

An einigen Küstenstrecken wird der Abbruch von Steilufnern 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 seawärtige Verschiebung der Mittelwasserlinie<sup>3)</sup> 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

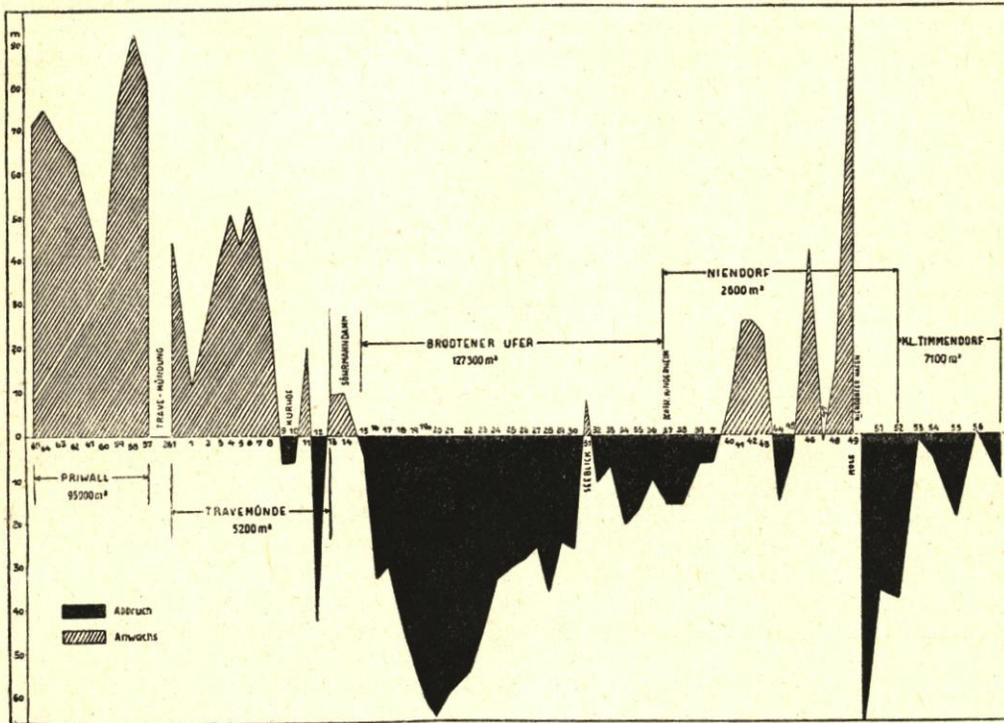


Abb. 3. Abbruch und Anwachs zwischen dem Priwall und Kl.-Timmendorf von 1877 bis 1949

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.

<sup>3)</sup> 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 Steilufem 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 Gesschiebemergelwand mit freigelegter Abrasionsplatte am Fuße des Kliffs



Abb. 5 (rechts). Brodtener Ufer, 10. Oktober 1949. Regelloser Verlauf der Kluftspalten

\*) Sämtliche Aufnahmen vom Verfasser.

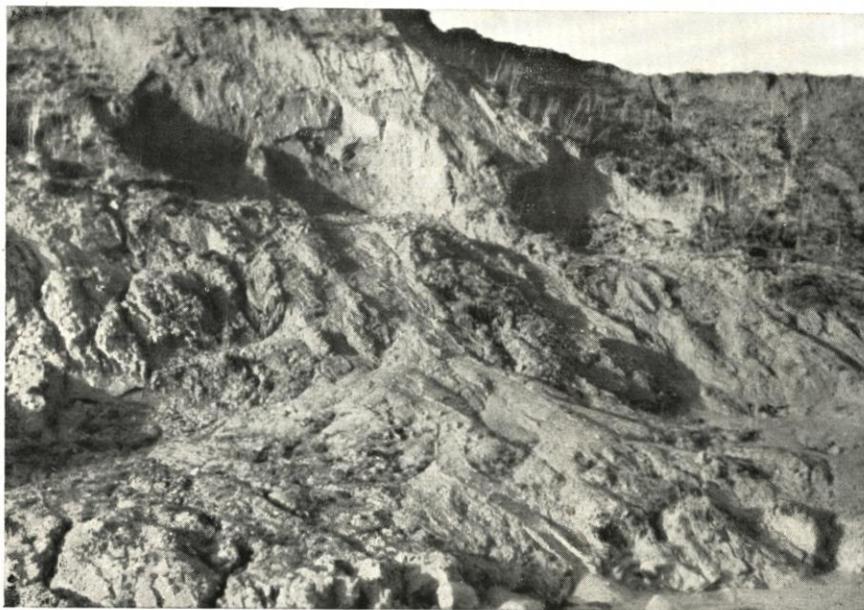


Abb. 6. Brodtener Ufer, 6. Dezember 1949.  
Frische Schlammströme vor der Koppel Ahrenlande als Folge  
intensiven Grundwasseraustritts



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 Steilufers 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)<br>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 12<sup>00</sup> 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.

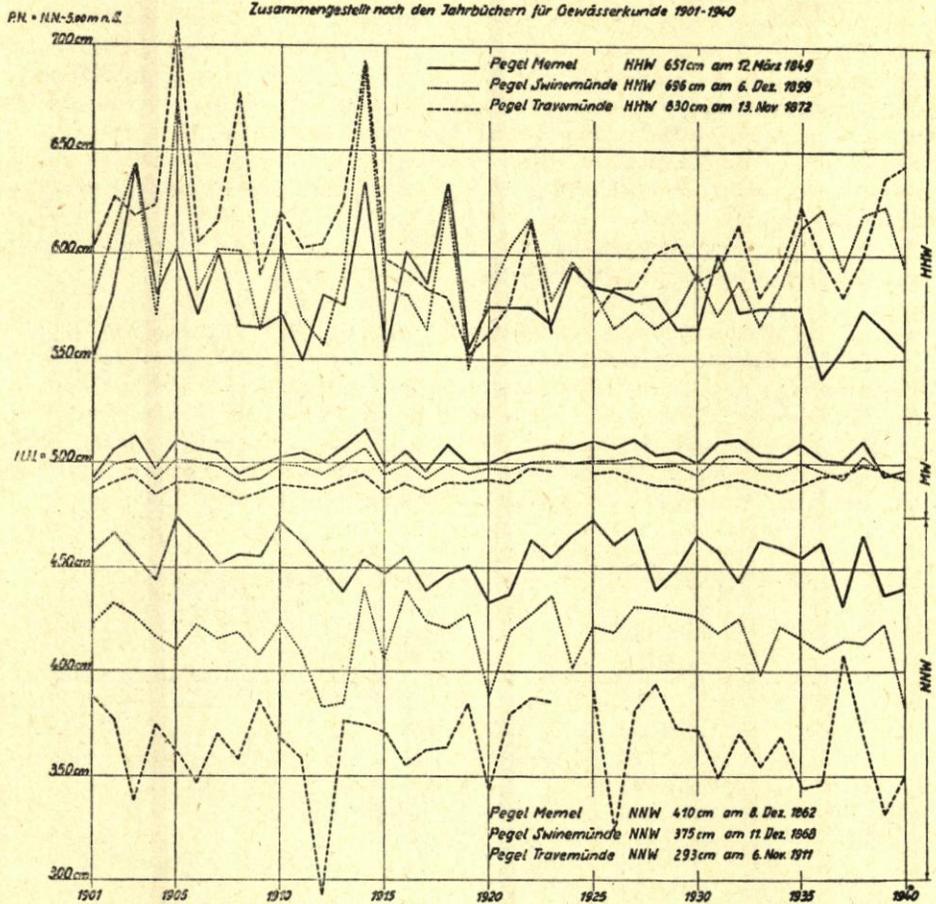


Abb. 10.

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 Ostsee<sup>4)</sup>

|            | 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    |

<sup>4)</sup> 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)<sup>5)</sup> 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

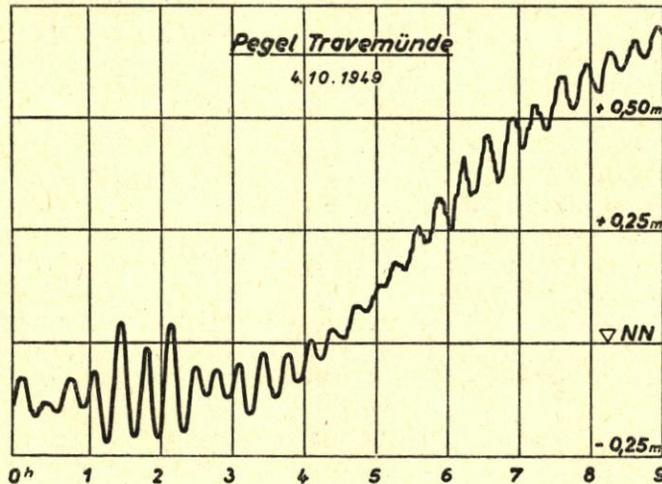


Abb. 11. „Seiches“ am Pegel Travemünde, überlagert durch drei Nebenschwingungen je Stunde

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 Zoll<sup>6)</sup>).

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

<sup>6)</sup> 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 12<sup>00</sup> Uhr für das Abflußjahr 1950 zu vergleichen. Trotz der mehr und mehr eingeführten Schreibpegel blieb es bei der Regelung von 1845, die 12<sup>00</sup>-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<br>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<br>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                        | "           |
|      |              | Aarösend   | 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.

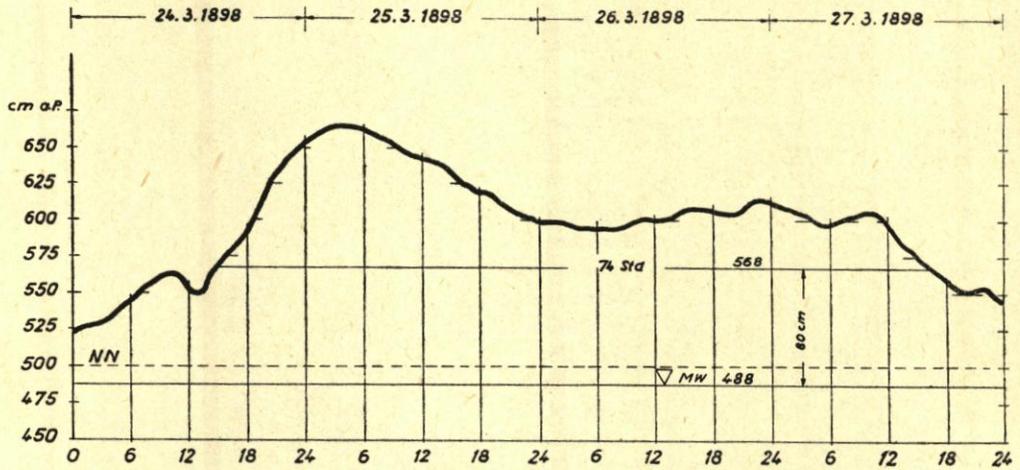


Abb. 12. Hochwasser 1898 am Pegel Staatswerft Lübeck

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 MW<sup>7)</sup>. 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

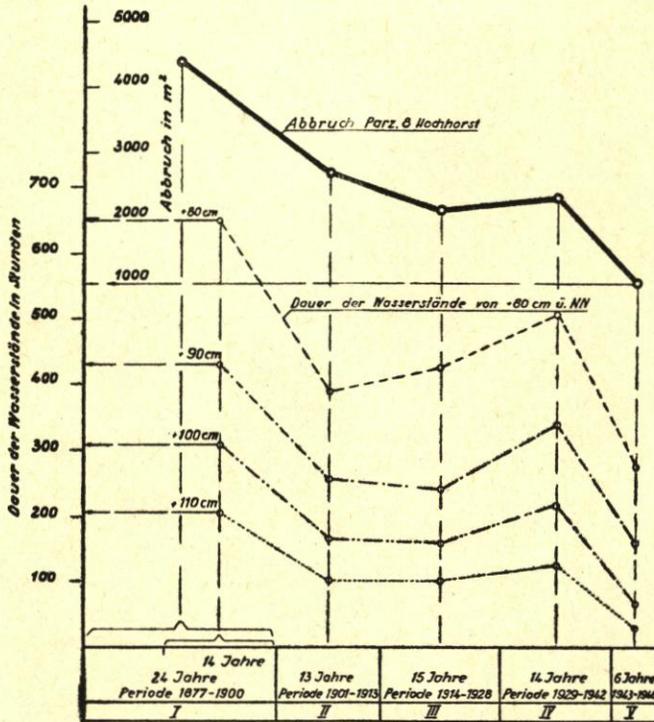


Abb. 13. Uferabbruch in Beziehung zur Dauer hoher Wasserstände

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

<sup>7)</sup> 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 Travekorrektur 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 m<sup>3</sup> Boden abgetragen wurden. Der Jahresverlust an Boden aus dem Brodtener Steilufer betrug dagegen für die Zeit von 1877 bis 1949 durchschnittlich rund 24 100 m<sup>3</sup>, d. h. hier überwiegen die Bodenmassen aus dem Steilufer.

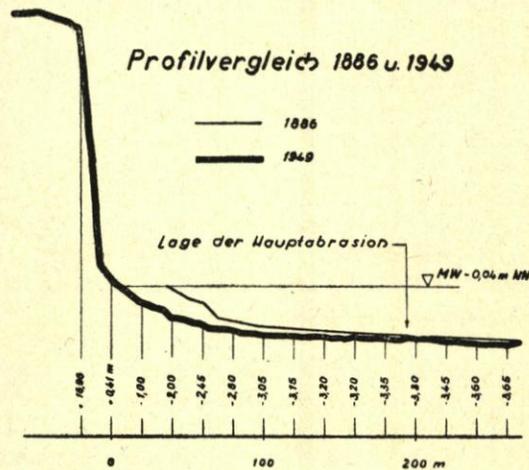


Abb. 14. Ausschnitt aus einem Profilvergleich am Brodtener Ufer

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-

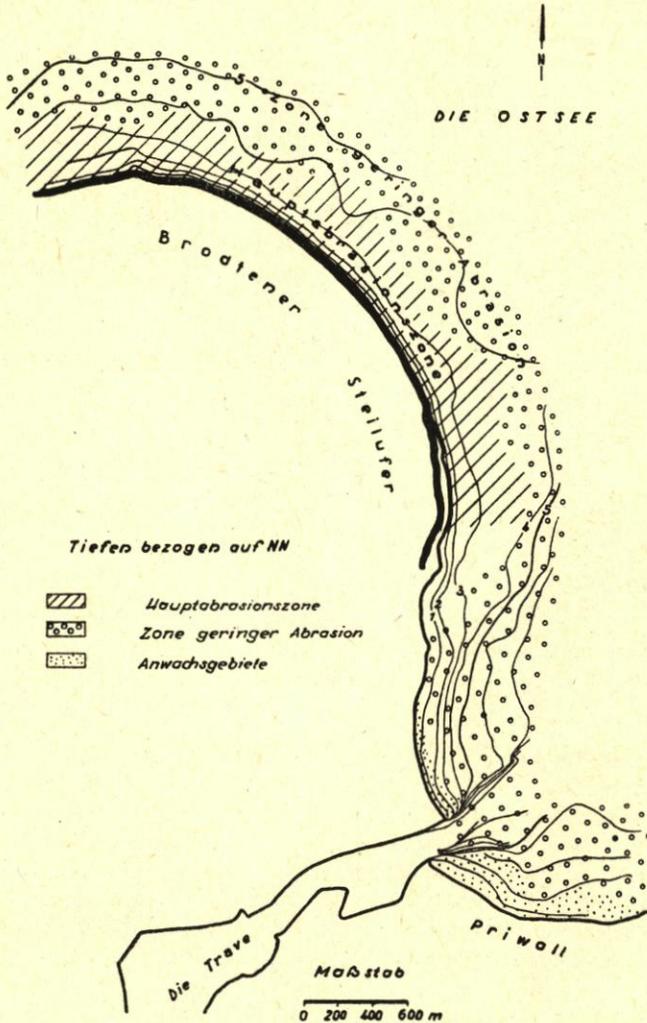
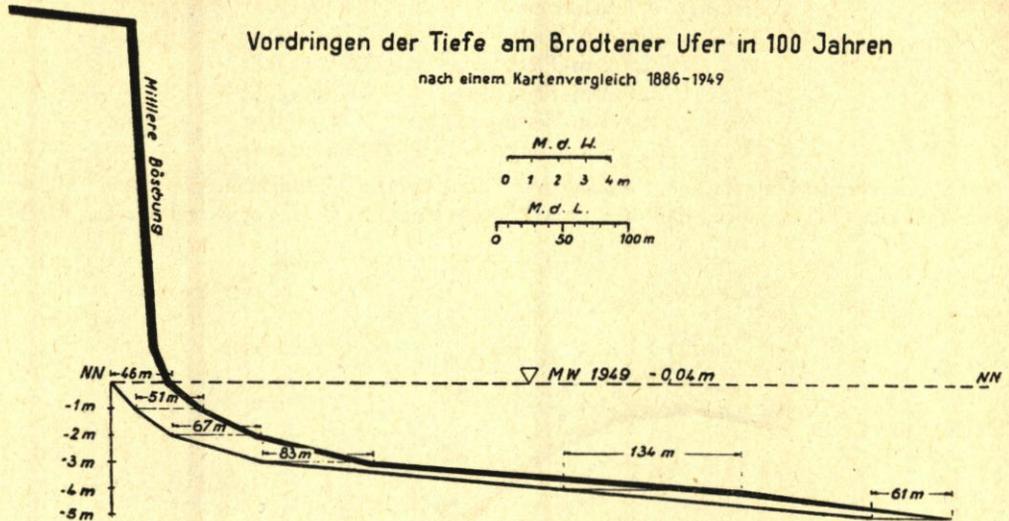


Abb. 15. Abrasionsgebiete Priwall — Brodten

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.



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 m<sup>3</sup>/Jahr zu 13 500 m<sup>3</sup>/Jahr. Es entfallen von dem gesamten Abtrag (37 600 m<sup>3</sup>/Jahr) etwa 30 v. H. bis 35 v. H. = rund 11 000 bis 13 000 m<sup>3</sup>/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 Steilufeln 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 m<sup>3</sup> 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 Damme 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.

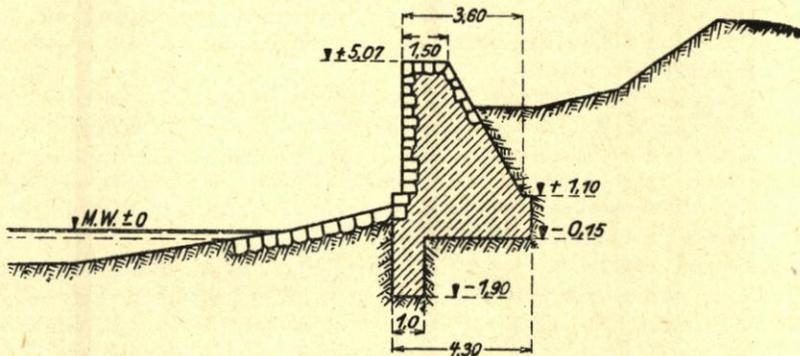


Abb. 25. Ufermauer vor Marienleuchte auf Fehmarn (aus HEISER 1927)

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 erkaupte Erfahrungen gebracht. Die Mauern

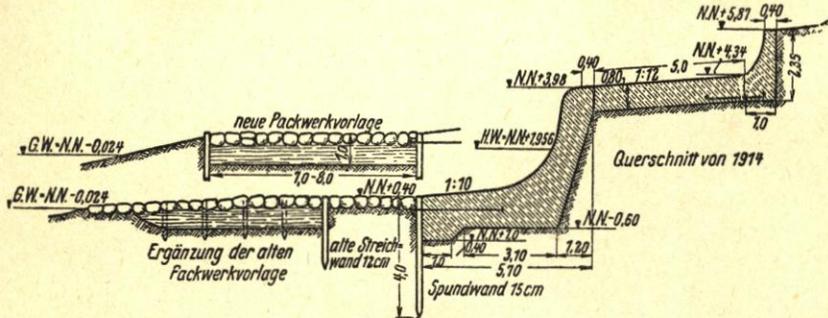


Abb. 26. Ufermauer am Streckelsberg (aus HEISER 1927)

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.

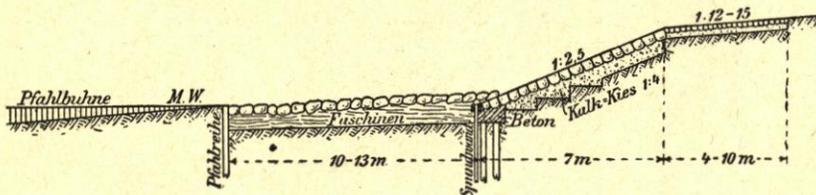


Abb. 27. Ufersicherung bei Heiligendamm (aus GERHARDT [1900])

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

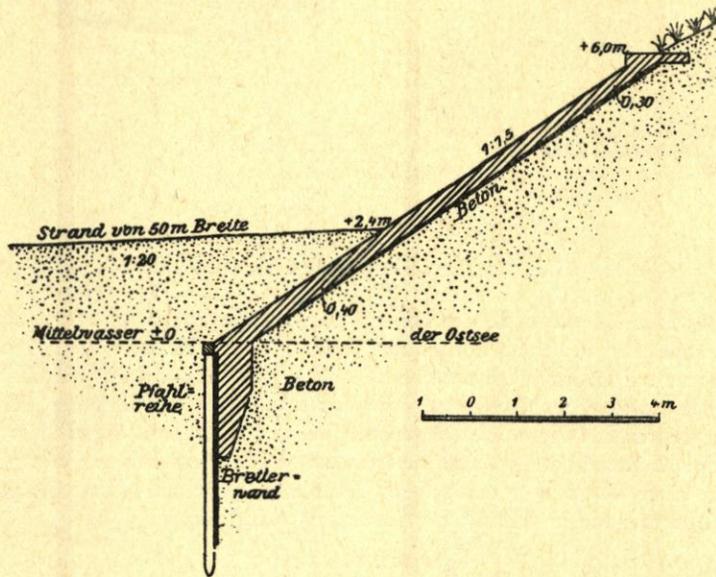


Abb. 28. Ufersicherung bei Heringsdorf (aus GERHARDT 1900)

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 überleitet 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-

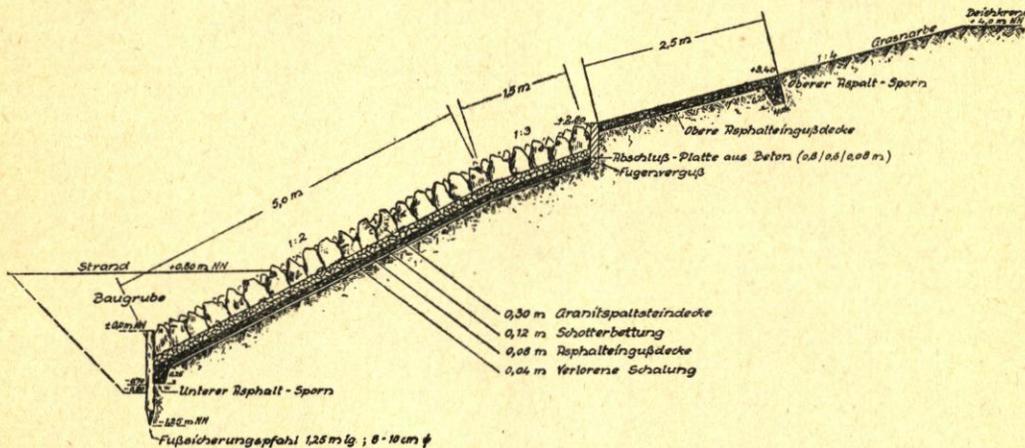


Abb. 29. Uferdeckwerk zur Sicherung des Ostseedeiches vor der Probstei (aus FINK 1951)

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.

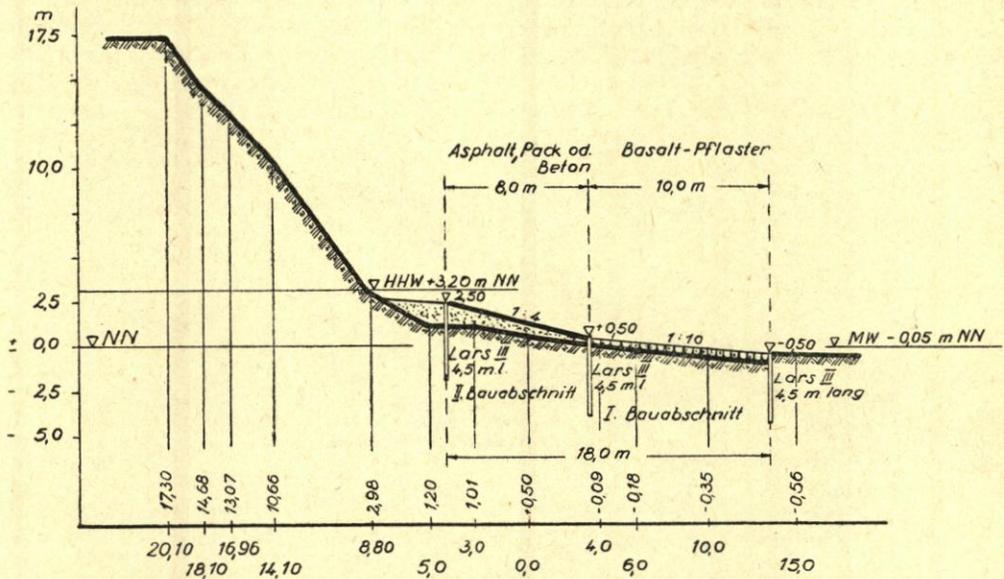


Abb. 30. Entwurf eines Deckwerks für die Sicherung des Brotener Ufers bei Travemünde 1950

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 Stein-schüttungen 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 Buhnenlänge 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 Abschragung der Streichlinie  $\geq 6$  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 Buhnenfeldes 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  $90^\circ$  zum Strand, sondern leicht geneigt gegen die vorherrschende Nord-Südströmung hergestellt wurden“ (Abb. 31). „Die Oberkante steigt wie

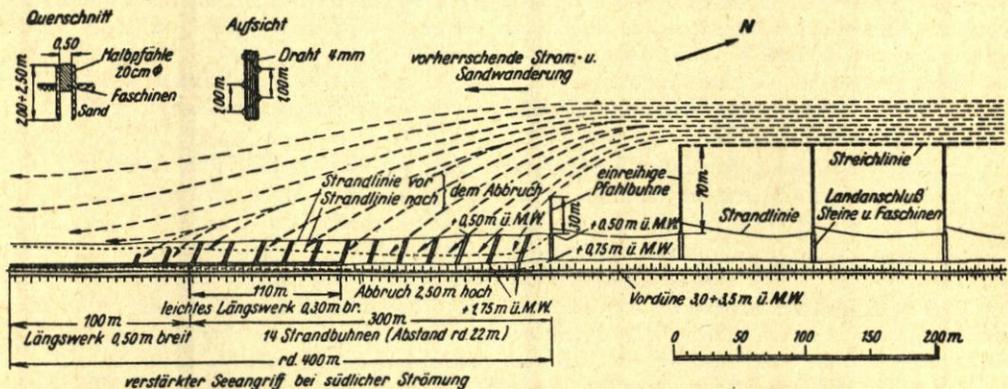


Abb. 31. Sicherung des Strandes in Lee eines Buhnenfeldes (aus POPPE 1942)

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—Behrendsdorf, 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

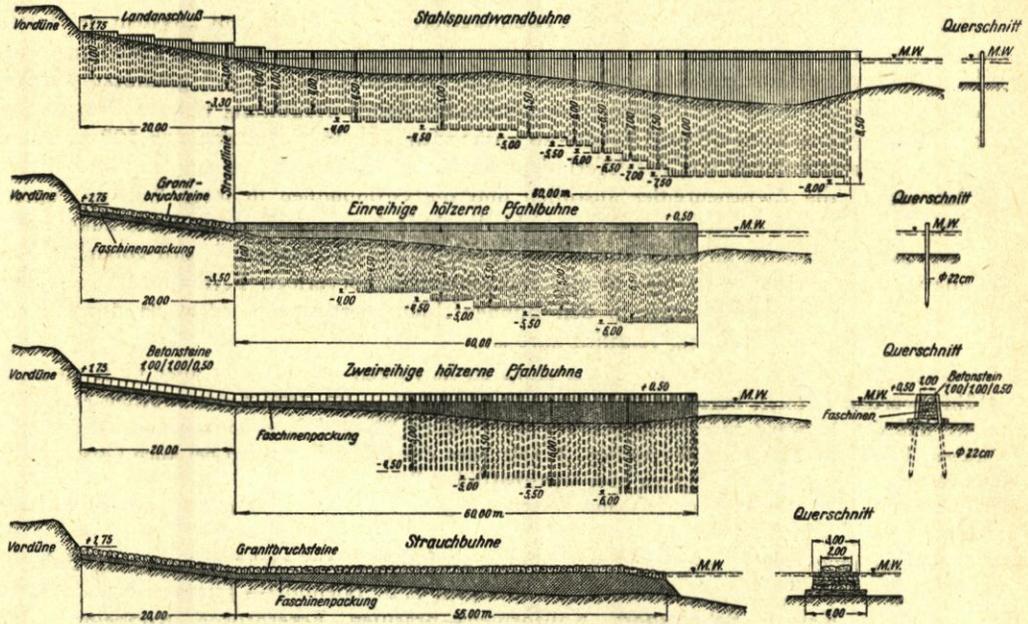


Abb. 32. Ostseebuhnen (aus POPPE 1942)

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 M.W. 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  $-20\text{cm}$  MW



Ab. 36. Wie vor

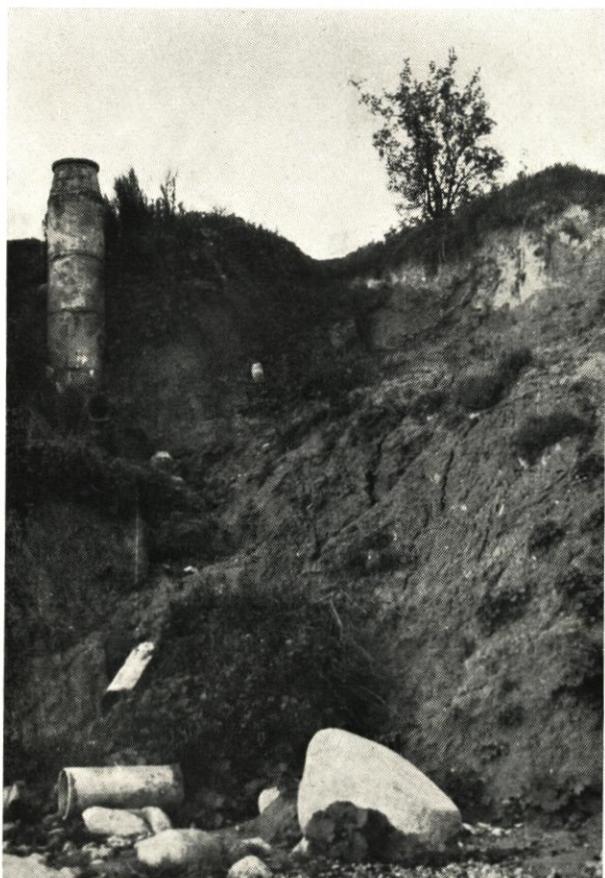


Abb. 37. Am Brodtener Ufer frei stehender Dränschacht, 29. September 1950



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

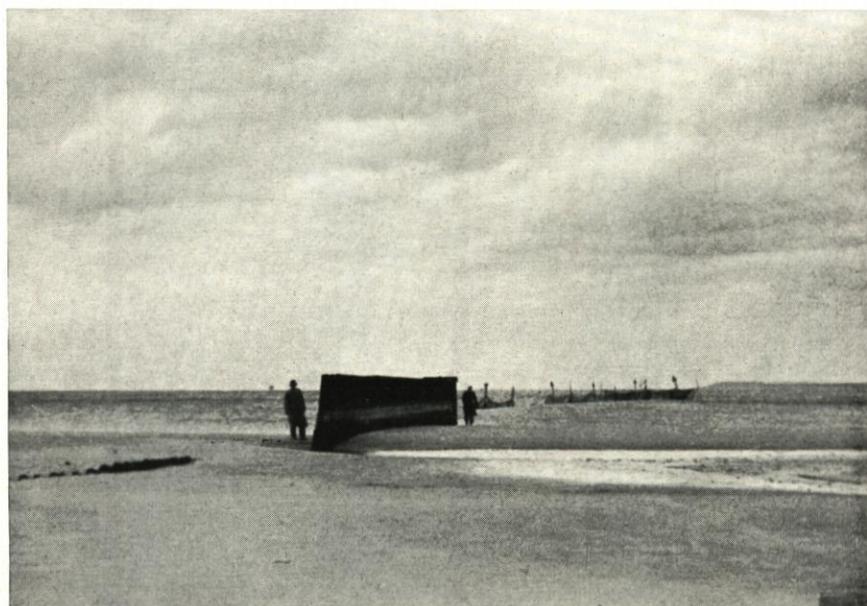


Abb. 39. Die gleiche Bühne wie auf Abb. 38. Seeseitiger Teil, Mittelstück abgebaut

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 Bühnengruppe 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-drunen<sup>8)</sup>.

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 Buhnenbau 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 <sup>9)</sup>           | 300.— bis 400.— DM  |
| f) Stahlbetonbuhne                                     | 100.— bis 400.— DM. |

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

<sup>9)</sup> 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 Brodtener 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 mit<sup>10)</sup>. 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-

<sup>10)</sup> 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 <sup>2</sup> |
| 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 Watten abfließen und machen sie für die Herstellung von Landgewinnungswerken verhältnismäßig gut zugänglich.

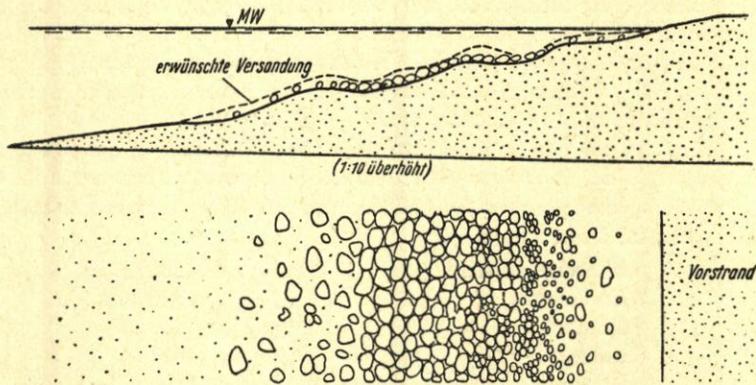


Abb. 41. Flächenschutzpackung vor einer sandigen Flachküste  
(aus WASMUND 1940)

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 Flächenschutz 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).

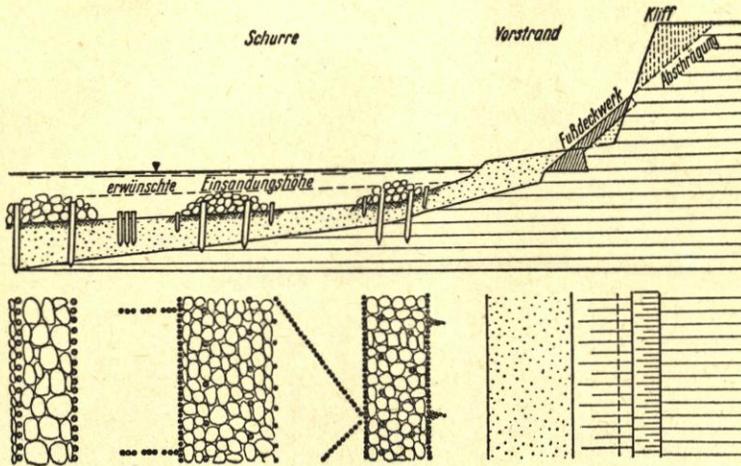


Abb. 42. Unterwasser-Schutzfalle (Grundschwelle) vor einem Steilufer mit schmalen Strande (aus WASMUND 1940)

- 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 m<sup>3</sup> 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  $30 \times 50$  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.

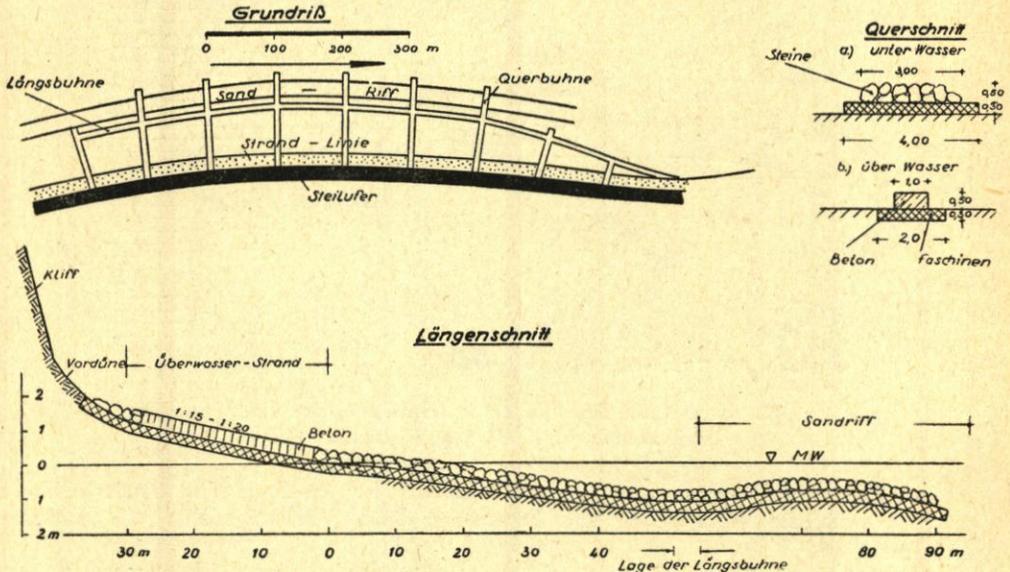


Abb. 43. Prinzip-Skizze für flächenhaften Uferschutz

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 Querbuhrnen dürfte gleich der Entfernung des Riffs von der Uferlinie sein.

Zweck des Buhnensystems soll sein:

- den trockenen Strand allmählich zu verbreitern und zu erhöhen, sowie günstige Voraussetzungen für den Dünenbau zu schaffen,
- 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 Geschiebemergelrücken 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)<sup>11)</sup>, 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.

<sup>11)</sup> 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

# Die Veränderungen im Steilufer und in der Strandterrasse des Naturschutzgebietes Stoltera bei Warnemünde

Von Erhard Köster

Das einige Kilometer westlich von Warnemünde gelegene Naturschutzgebiet der Stoltera zeichnet sich durch ein diluviales Steilufer mit Stauchungserscheinungen aus. Seine Ablagerungen gehören dem pommerischen Stadium der Weichseleiszeit an. Das Ufer gestattet ein Studium dieser Ablagerungen, deren Lagerungserscheinungen der diluvialgeologischen, und deren Uferveränderungen der geographischen Forschung wertvoll sind.

Aus diesem Grunde wurden von Professor E. GEINITZ dort fast fünf Jahrzehnte lang Beobachtungen angestellt, deren Ergebnisse in verschiedenen Arbeiten veröffentlicht worden sind [(2) 1885, (3) 1903, (4) 1907, (5) 1913, (6) 1914]. Vierzig Jahre nach der letzten Aufmessung vom Jahre 1907 hatte der Verfasser Gelegenheit zu einer neuen Profilaufmessung, durch die die Uferabbrüche und die Veränderungen des Strandes ermittelt werden konnten.

## Die Strandzone

Die Stoltera (Abb. 1) leidet unter starker Küstenversetzung, deren Stärke und Richtung vom Wind abhängt. Die Küste der Stoltera verläuft teils N75°W und teils N65°O (alter Teilung). Die auf sie einwirkenden Winde verteilen sich wie folgt:

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| nach HARTNACK [(8), S. 60]   |            |
| und ZANDER [(15), S. 12]     |            |
| W                            | 18,3 v. H. |
| NW                           | 10,2 v. H. |
| N                            | 6,2 v. H.  |
| NO                           | 10,0 v. H. |
| O                            | 9,0 v. H.  |
| } zusammen 28,5 v. H.        |            |
| } zusammen 19,0 v. H.        |            |
| nach KANNENBERG [(9), S. 10] |            |
| W                            | 19,8 v. H. |
| NW                           | 13,0 v. H. |
| N                            | 6,1 v. H.  |
| NO                           | 7,2 v. H.  |
| O                            | 13,0 v. H. |
| } zusammen 32,8 v. H.        |            |
| } zusammen 20,2 v. H.        |            |

Durch die mehr aus W als aus O kommenden Winde muß also eine Versetzung nach O erfolgen. Diese Sandwanderung findet sowohl an der Küste als auch in den ihr vorliegenden Sandriffen statt [KÖSTER (10)].

Die Küstenversetzung dem Strandschutz dienstbar zu machen, war Aufgabe der 1889 begonnenen Bühnenbauten, von denen zwischen Warnemünde und dem westlichen Teil der Stoltera achtundvierzig in einem Abstand von 100 Metern errichtet wurden. Diese Einrichtungen erfüllten insofern ihren Zweck, als sie an ihrer Westseite einen Teil des wandernden Sandes auffingen und dadurch den Strand stellenweise vergrößerten. Dieser Sandfang war so stark, daß die Neubildung der Düne bei Warnemünde langsamer als bisher vor sich ging [GEINITZ (4) 1907, S. 4]. Da die Instandhaltung der Bühnen jedoch große Kosten verursachte, wurde sie 1918 eingestellt.

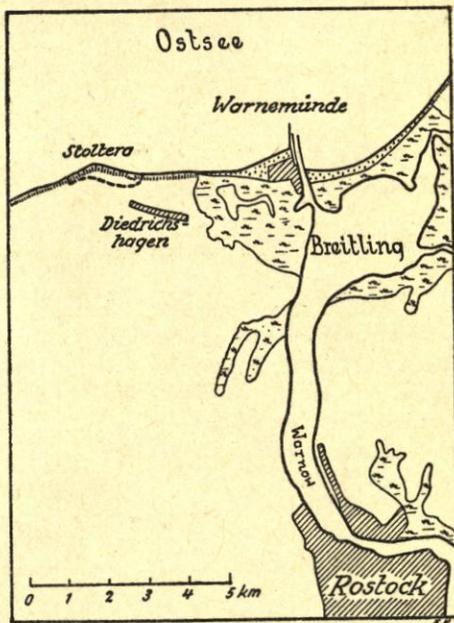


Abb. 1. Lageplan

Die Küstenversetzung dem Strandschutz dienstbar zu machen, war Aufgabe der 1889 begonnenen Bühnenbauten, von denen zwischen Warnemünde und dem westlichen Teil der Stoltera achtundvierzig in einem Abstand von 100 Metern errichtet wurden. Diese Einrichtungen erfüllten insofern ihren Zweck, als sie an ihrer Westseite einen Teil des wandernden Sandes auffingen und dadurch den Strand stellenweise vergrößerten. Dieser Sandfang war so stark, daß die Neubildung der Düne bei Warnemünde langsamer als bisher vor sich ging [GEINITZ (4) 1907, S. 4]. Da die Instandhaltung der Bühnen jedoch große Kosten verursachte, wurde sie 1918 eingestellt.

Die Veränderungen des Strandes zwischen 1907 und 1947 zeigt Tabelle 1.

Tabelle 1

| Strandbreite  | 1907    | 1947 <sup>1)</sup> | Veränderung |
|---------------|---------|--------------------|-------------|
| bei Buhne 28  | 32,5 m  | 20,0 m             | — 12,5 m    |
| 29            | 47,0    | 18,0               | — 29,0      |
| 30            | 32,0    | 16,0               | — 16,0      |
| 31            | 24,0    | 12,0               | — 12,0      |
| 32            | 14,5    | 11,0               | — 3,5       |
| 34            | 10,5    | 4,0                | — 6,5       |
| 35            | 16,0    | 6,0                | — 10,0      |
| 36            | 2,5     | 3,0                | + 0,5       |
| Stein 0       | 19,0    | 26,0               | + 7,0       |
| Buhne 39      | 14,0    | 12,0               | — 2,0       |
| 40            | 14,0    | 8,0                | — 6,0       |
| 41            | 10,0    | 8,0                | — 2,0       |
| 42            | 7,0     | 13,0               | + 6,0       |
| Stein V       | 13,0    | 15,0               | + 2,0       |
| Buhne 46      | 13,0    | 18,0               | + 5,0       |
| Durchschnitt: | 17,93 m | 12,67 m            | — 5,2 m     |

Der Strand ist von der Durchschnittsbreite von 17,9 Metern auf 12,7 Meter gefallen, während GEINITZ [(4) 1907, S. 4] glaubte, eine Verbreiterung feststellen zu können.

#### Die Uferabbrüche

Uferabbrüche an Steilufeln diluvialen und alluvialen Ursprungs werden durch verschiedene Faktoren verursacht. Diese sind:

Klima und Grundwasser,  
Pflanze, Tier und Mensch und  
Einwirkung des Meeres.

Das Meer hat den größten Anteil an der Zerstörung des Steilufers. Die Stärke der Abbrüche hängt ab von der Standfestigkeit des Ufers. Diese ist bei diluvialen und alluvialen Ablagerungen im Anschnitt nicht groß. Das Aufbaumaterial der Stoltera besteht aus diluvialen Geschiebemergel mit zwischen- und aufgelagertem diluvialen Sand, Kies, Ton und aufliegendem Lehm. Im Waldgebiet trägt das Diluvium eine Decke von alluvialen Flug-sand (Abb. 2).

Das Klima beeinflusst das Kliff in seiner äußeren Schicht durch Temperaturveränderungen, die im Sommer durch Austrocknen (Trockenrisse, Aufblättern), im Winter durch Gefrieren verschieden durchfeuchteter Schichten Änderungen und Lockerungen im Gefüge hervorrufen.

Die Niederschläge verursachen Auswaschungen (Regenrinnen) oder bringen den stark mit Wasser gesättigten Mergel zum Abrutschen. Die Feuchtigkeit dringt in die Klüfte und Fugen des Mergels ein (Netz von Roststreifen) und lockert den Zusammenhang des Gefüges. Sein Zerfall wird oft beschleunigt durch einen der anderen mitwirkenden Faktoren. Festigkeit und Frostempfindlichkeit des Mergels sind vom Wasseraufnahmevermögen und dieses von der Korngrößenzusammensetzung abhängig.

<sup>1)</sup> Die Messung vom Jahre 1947 erfolgte im August bei Normalwasser. Über die Wasserverhältnisse gelegentlich der Messung vom Jahre 1907 war nichts zu ermitteln.

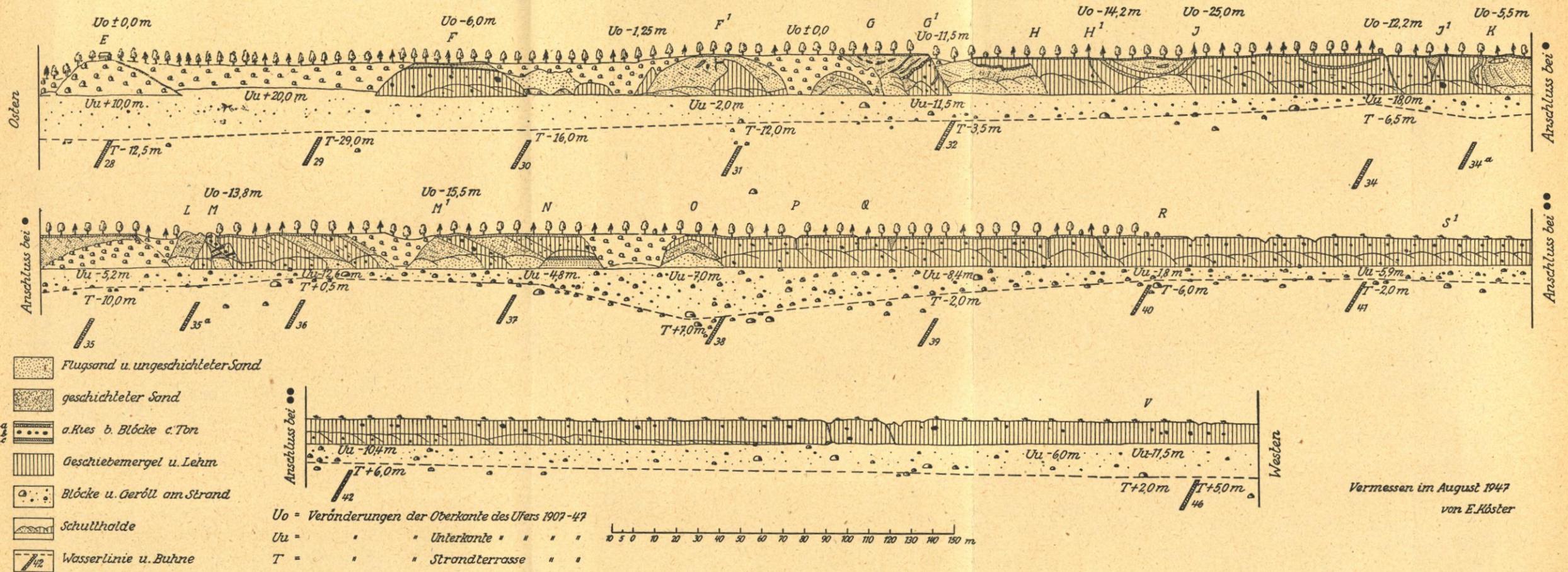


Abb. 2. Profil, Ufer- und Strandveränderungen der Stoltera bei Warnemünde

Die Durchsättigung des Bodens mit Wasser erfolgt besonders dort, wo Grundwasser zwischen Mergel und Sand zu Tage tritt oder wo Dränausläufe nicht durch Auslaufkästen gesichert sind, deren Mündungen über den Fuß des Kliffs hinausragen sollten (H<sup>1</sup>, M, zwischen Ru.S<sup>1</sup>, östl. v. V).

Die Deflationswirkung des Windes ist besonders an den Sandbändern erkennbar (Kliff G<sup>1</sup>, H<sup>1</sup>, K, M). Bei westlichen oder östlichen Winden verstärkt sich diese Wirkung durch Mitführen von Feinsanden. Stärker leidet der aufliegende Flugsand unter dem Wind. Er wird unter der feinen Humusschicht am Klifftrand herausgeblasen (zwischen F u. R).

Die Gefahr des Bodenwassers wird im größten Teil der Stoltera herabgemindert durch den vorhandenen Wald, der einen Teil des Wassers bindet.

Diese Vorgänge, soweit der Mensch sie nicht verursacht, sind von Wasmund als „innerer Küstenzerfall“ bezeichnet worden [Wasmund (14), S. 260, Groschopf (7), S. 339]. Da bei diesem Zerfall das Niederschlags- und Bodenwasser der Hauptfaktor ist, glaubt von Bülow [(1), S. 77], daß er in den Kulturländern eine Folge der Entwaldung ist.

Die Pflanzendecke bietet im allgemeinen einen Schutz, da die verfilzte Humusdecke das flächenhafte Verlagern des Flugsandes verhindert. Jedoch verursacht das Entwurzeln von Bäumen bei Stürmen ein Bloßlegen kleinerer Flächen. Ist es in der Nähe des Uferandes erfolgt, bilden sich Nischen im Kliff. Man könnte diese Abbrüche verhindern, indem man die in der Randzone wachsenden Bäume beizeiten abschlägt.

Der Einfluß der Tierwelt auf das Ufer ist ebenfalls nur gering. Durch Mäuse, Kaninchen und Uferschwalben erfolgt eine unwesentliche Lockerung des Sandes. Größer ist der vom Menschen angerichtete Schaden, der sich hauptsächlich auf die Sandvorkommen erstreckt. Hier wird durch Beklettern der Wand — namentlich im Sommer und in der Nähe der Badeorte — oft viel Abbruch hervorgerufen (F<sup>1</sup>, G<sup>1</sup>, H<sup>1</sup>—J, K—L).

Diese Veränderungen, soweit der Mensch daran unbeteiligt ist, bilden einen normalen Vorgang, dem jedes Steilufer mit zu steilem Böschungswinkel unterworfen ist. Der Vorgang würde sich fortsetzen, bis sein Endzustand, nämlich der Bewuchs einer naturgemäßen Böschung erreicht ist. Damit würde auch der Küstenzerfall aufhören [v. Bülow (1), S. 77].

Dieser Zustand kann jedoch nicht erreicht werden, weil das Hochwasser

1. durch Wegräumen der Schutthalde den Böschungswinkel verändert,
2. an den durch den inneren Küstenzerfall zerrütteten Stellen das Ufer immer wieder von neuem zerstört.

Der Zeitraum zwischen zwei Sturmfluten bestimmt das Bild des Steilufers auf dem Wege zur Schaffung seiner naturgemäßen Form. Seinen Endzustand — das sogenannte tote Kliff [Plewe (12), S. 3—4] — erreicht es nur selten auf längere Zeit. Der Sanddornbewuchs zwischen Buhne 30 und 31, der 1884 schon teilweise und 1907 vollständig das Ufer bedeckte und die Sturmfluten von 1887, 1905, 1908, 1913 und 1914 überstand, ist der Sturmflut vom März 1949 zum Opfer gefallen. Die bewachsenen Ufer bei Buhne 35 und zwischen 36 und 37, die sich seit 1914 gebildet hatten, wurden 1949 ebenfalls vernichtet.

Eine Unterteilung des Küstenstreifens der Stoltera nach seiner Lage zu den auftretenden Winden führte zu keinen brauchbaren Abbruchswerten. Daher wurde das Ufer nach der Widerstandsfähigkeit seines Bodens eingeteilt. Diese Einteilung ergab folgende Durchschnittsabbrüche (Durchschnitt von 40 Jahren):

|                            |                                     |                            |        |
|----------------------------|-------------------------------------|----------------------------|--------|
| 1. Strecke von Buhne 27—32 | Geschiebemergel                     | Oberkante                  | 0,04 m |
|                            |                                     | Fuß                        | 0,05 m |
| 2. Strecke von Buhne 32—38 | Schichtenstörungszone <sup>2)</sup> | Oberkante                  | 0,32 m |
|                            |                                     | Fuß                        | 0,25 m |
| 3. Strecke von Buhne 38—46 | Geschiebemergel                     | Oberkante keine Ermittlung |        |
|                            |                                     | Fuß                        | 0,19 m |

<sup>2)</sup> Mit Schichtenstörungszone wurde der Abschnitt bezeichnet, der infolge diluvialer Stauchungsvorgänge in seiner Struktur von der gleichmäßigen Ablagerung der Grundmoräne abweicht!

Die Zusammenstellung zeigt, daß die Abbrüche in der Störungszone besonders groß sind. Sie werden aber nicht verursacht durch Stürme aus dem Westen; gegen diese Winde liegt die Zone verhältnismäßig geschützt. Hauptzerstörer des Ufers sind die Nord- und Nordoststürme, denen West- und Nordwestwinde vorangingen. Die letzteren treiben Wasser aus dem Skagerrak in die Ostsee, die ersteren stauen dieses Wasser und werfen es gegen die Süd- und Südwestküste [HARTNACK (8), S. 69, KRÜGER (11), S. 35]. Diese Sturmfluten greifen die Küste frontal an und zerstören das Ufer vorwiegend dort, wo es infolge ungleicher Bodenzusammensetzung und Lagerungsstörungen dazu prädestiniert ist.

Der Uferrückgang der Stoltera, soweit sich die Angaben von ZANDER [(15), S. 44] mit der vorgenommenen Aufmessung koordinieren ließen, ist seit 1778 in Tabelle 2 für den Jahresdurchschnitt dargestellt.

Tabelle 2

| Zeitspanne | Jahre | Wilhelms-<br>höhe<br>E<br>m | 100 m<br>östl.<br>der<br>Ecke<br>m | Ecke<br>bei<br>0<br>m | R<br>m | Wald-<br>grenze<br>m | 400 m<br>westl.<br>der<br>Ecke<br>m | V<br>m | Durch-<br>schnitt<br>im Jahr<br>m |
|------------|-------|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------|--------|----------------------|-------------------------------------|--------|-----------------------------------|
| 1778—1932  | 154   | 0,10                        | 0,50                               | 0,42                  | —      | 0,59                 | 0,50                                | —      | 0,38                              |
| 1778—1874  | 96    | 0,02                        | 0,65                               | 0,37                  | —      | 0,31                 | 0,34                                | —      | 0,36                              |
| 1874—1907  | 33    | 0,30                        | —                                  | 0,70                  | —      | 1,70                 | 1,03                                | —      | 0,60                              |
| 1907—1932  | 25    | 0,12                        | 0,60                               | 0,24                  | —      | 0,24                 | 0,40                                | —      | 0,23                              |
| ?          | 20    | —                           | —                                  | —                     | —      | —                    | —                                   | 0,12   | 0,12                              |
| ?          | 29    | —                           | —                                  | —                     | 0,10   | —                    | —                                   | —      | 0,10                              |
| 1907—1947  | 40    | 0,00                        | 0,39                               | 0,18                  | 0,04   | 0,09                 | 0,26                                | 0,15   | 0,21                              |

Der Gesamtdurchschnitt beträgt nach ZANDER 0,31 m. Die durchgeführte letzte Messung hat ergeben, daß der durchschnittliche Jahresrückgang im Gebiet des östlichen Geschiebemergels 0,05 m, im Gebiet der Schichtenstörung 0,29 m und im Gebiet des westlichen Geschiebemergels 0,19 m beträgt.

### Einzelergebnisse

Der Gesamtdurchschnitt aller in der Tabelle 3 aufgeführten Abbrüche beträgt im Jahr 0,21 m, sowohl für die Oberkanten als auch für die Fußpunkte.

Die in Tabelle 3 angewandten Abkürzungen haben folgende Bedeutung: aS = alluvialer Flugsand, dS = diluvialer, geschichteter Sand, Mg = Geschiebemergel. Untereinander geschrieben  $\frac{M}{S}$  bedeuten sie das Vorkommen dieser Bodenarten in vertikaler Richtung, nebeneinander geschrieben S/Mg bedeuten sie das Vorkommen dieser Bodenarten horizontal auf engem Raum.

Der errechnete Jahresdurchschnitt ist insofern unzuverlässig, als der Küstenverlust hauptsächlich durch aperiodische Vorgänge verursacht wird. Die sturmflutarmen Perioden erbringen ein anderes Bild. Diese Zahlen haben also nur einen Wert, wenn sie auf längere Zeiträume angewandt werden.

Tabelle 3

| Punkt          | bei Buhne | Höhe<br>m | Bodenzusammen-<br>setzung   | Veränderungen der |                 | Jahres-<br>durchschnitt<br>m |
|----------------|-----------|-----------|-----------------------------|-------------------|-----------------|------------------------------|
|                |           |           |                             | Oberkante<br>m    | Unterkante<br>m |                              |
| D <sup>1</sup> | 27        | —         | $\frac{aS}{Mg}$             | unverändert       | —               | 0,00                         |
| E              | 28        | 13,5      | Mg                          | unverändert       | + 10            | —                            |
| —              | 29        | —         | dS                          |                   | + 20            | —                            |
| F              | 29/30     | 16,0      | $\frac{aS}{dS}$<br>Mg       | — 6,0             |                 | 0,15                         |
| —              | 30/31     | 15,0      | $\frac{aS}{dS}$<br>Mg       | — 1,25            |                 | 0,03                         |
| F <sup>1</sup> | 31        | 16,5      | $\frac{aS}{dS/Mg}$          |                   | — 2,0           | 0,05                         |
| —              | 31/32     | —         | $\frac{aS}{dS}$             | unverändert       |                 | 0,00                         |
| G <sup>1</sup> | 32        | 17,0      | $\frac{aS}{Mg}$             | — 11,5            | — 11,5          | { 0,29<br>0,29               |
| H <sup>1</sup> | 32/33     | 17,0      | $\frac{aS}{dS Mg}$          | — 14,2            |                 | 0,36                         |
| J              | 33/34     | 17,0      | $\frac{aS}{Mg}$<br>dS<br>Mg | — 25,0            |                 | 0,63                         |
| —              | 34        | 17,0      | $\frac{aS}{Mg}$             | — 12,2            | — 18,0          | 0,31<br>0,45                 |
| K              | 34/35     | 17,0      | $\frac{aS}{dS/Mg}$          | — 5,5             |                 | 0,14                         |
| —              | 35        |           | $\frac{aS}{dS}$             |                   | — 5,2           | 0,13                         |
| L              | 35a       | —         | dS                          | — 2,4             |                 | 0,06                         |
| M              | 35a       | 15,0      | $\frac{Mg}{dS}$<br>Mg       | — 13,8            |                 | 0,34                         |
| —              | 36        | 17,0      | $\frac{aS}{dS}$<br>Mg       |                   | — 12,6          | 0,31                         |
| M <sup>1</sup> | 36/37     | 16,0      | $\frac{aS}{dS/Mg}$          | — 15,5            |                 | 0,39                         |
| N              | 37        | 15,5      | $\frac{aS}{Mg}$             |                   | — 4,8           | 0,12                         |
| O              | 38        | 15,0      | $\frac{aS}{Mg}$<br>dS       |                   | — 7,0           | 0,18                         |
| —              | 39        | 14,0      | $\frac{aS}{Mg}$             |                   | — 8,4           | 0,21                         |
| R              | 40        | 13,6      | $\frac{aS}{Mg}$             |                   | — 1,8           | 0,04                         |
| —              | 41        | 13,0      | Mg                          |                   | — 5,9           | 0,15                         |
| —              | 42        | 12,0      | Mg                          |                   | — 10,4          | 0,26                         |
| V              | 45/46     | 8,5       | Mg                          |                   | — 6,0           | 0,15                         |
| —              | 46        | 8,0       | Mg                          |                   | — 11,5          | 0,29                         |

### Schriftenverzeichnis

1. BÜLOW, K. v.: Poel, eine geologische und bodenkundliche Inselstudie. Mitt. Meckl. Geol. Landesanst. H. 47, N. F. 12, Rostock 1938.
2. GEINITZ, E.: VII. Beitrag zur Geologie Mecklenburgs: Das Abbruchufer der Stoltera bei Warnemünde. Arch. Ver. d. Freunde d. Naturgesch. Meckl. Nr. 39, Rostock 1885.
3. GEINITZ, E.: Der Landverlust der mecklenburgischen Küste. Mitt. Meckl. Geol. Landesanst. H. XV, Rostock 1903.
4. GEINITZ, E.: Die Stoltera bei Warnemünde. Mitt. Meckl. Geol. Landesanst. H. XIX, Rostock 1907.
5. GEINITZ, E.: Das Diluvialproblem der Stoltera. Arch. Ver. d. Freunde d. Naturgesch. Meckl. Nr. 67, Rostock 1913.
6. GEINITZ, E.: Die Sturmflut vom 30. Dezember 1913 in ihrer Einwirkung auf die mecklenburgische Küste. Mitt. Meckl. Geol. Landesanst. H. XXVII, Rostock 1914.
7. GROSCOPF, P.: Physikalische Bedingungen des Kliffrückganges an der Kieler und Lübecker Bucht. Kieler Meeresforsch. Bd. 1, S. 335—342, Kiel 1936.
8. HARTNACK, W.: Die Küste Hinterpommerns. II. Beih. z. 43./44. Jb. Geogr. Ges. Greifswald 1926.
9. KANNENBERG, E. G.: Die Steilufer der Schleswig-Holsteinischen Ostseeküste. Schr. Geogr. Inst. Univ. Kiel, Bd. XIV, H. 1, Kiel 1951.
10. KÖSTER, E.: Die mecklenburgische Ostseeküste von Travemünde bis zum Darss. Geogr. Rdsch. H. 10, Braunschweig 1952 u. Forts. 1953.
11. KRÜGER, G.: Über Sturmfluten an den deutschen Küsten der westlichen Ostsee. Diss. Greifswald 1910.
12. PLEWE, E.: Küste und Meeresboden der Tromper Wiek (Rügen). Geol. d. Meere u. Binnengew. Bd. 4, S. 1—41, Berlin 1940.
13. REINHARD, H.: Die Sturmflut am 1. und 2. März 1949 an der mecklenburgischen Ostseeküste. Ztschr. Meteorol. Bd. 3, H. 7, S. 209—218, Potsdam 1949.
14. WASMUND, E.: Chemisch-physikalische Daten der Alttertiärtonne um Fehmarn und der „Innere Küstenzerfall“. Kieler Meeresforsch. Bd. 1, S. 243—263, Kiel 1936.
15. ZANDER, R.: Die rezenten Änderungen der Mecklenburgischen Küste. Beih. Mitt. Geogr. Ges. Rostock, H. 1, Rostock 1934.



