

Maßnahmen zur Verminderung der Erosionswirkung an der offenen Küste.

Von Dr.-Ing. Egon Leppik, Regierungs- und Baurat i. R. in Hamburg.

Die Behandlung der Frage des Küstenschutzes ist mit der vorliegenden Formulierung beschränkt. In allgemeiner Fassung ist diese Frage auf dem XV. Internationalen Schiffahrtskongreß 1931 behandelt worden; „Verteidigung der Küsten gegen das Meer an Küsten mit und ohne vorwiegende Sinkstoffführung“. Die vorliegende Fragestellung hebt die Erosionswirkung hervor und begrenzt die Behandlung der Frage auf die offenen Küsten. Ein Schutz gegen Abbruch, der nicht unmittelbar durch Erosion hervorgerufen ist, steht eigentlich außerhalb des Rahmens vorliegenden Berichtes. Andererseits kann aber eine Erosion auch mittelbar durch eine Verminderung der Breite der küstennahen Sandanhäufungszone die Küsten gefährden. Darum sind die Verhältnisse sowohl an Steil- als auch an Flachküsten in Betracht zu ziehen, jedoch unter besonderer Berücksichtigung der die Erosion verursachenden Tiefenströmung.

Unter offenen Küsten sind nicht nur Ozeanküsten, sondern auch solche der Rand- und Binnenmeere zu verstehen. Auszuschließen sind aber Küsten im Schutze vorgelagerter Inseln und in Buchten.

Bei der Behandlung der Frage ist von den Kräften kosmischen und meteorologischen Ursprungs (Gezeiten und Luftbewegung), durch welche die Wasserbewegung an den Küsten hervorgerufen wird, auszugehen, wozu noch die durch die physikalischen Eigenschaften hervorgerufenen Strömungen (Dichte-) kommen. Die aktiven Kräfte wirken sich auf die Gestaltung der Küste aus, wobei deren Widerstand von dem Verlauf der Küstenlinie und von dem Bestande der Küste bedingt ist. Alle diese Einflüsse werden überlagert von den geologischen Vorgängen, welche sich in einer Hebung oder Senkung der Küste äußern.

In Anbetracht der Verschiedenheit der Verhältnisse sind die Nordsee- und Ostseeküste gesondert behandelt worden.

I. Die Naturvorgänge an der Ostfriesischen Küste.

An der deutschen Nordseeküste sind die Verhältnisse der ostfriesischen Küste in den letzten Jahrzehnten eingehend untersucht worden. Im folgenden werden daher die Naturvorgänge in diesem Küstenabschnitt besonders beschrieben.

Die Küsten der Nordsee werden vorwiegend durch die Gezeitenströmungen beherrscht; dazu kommen die Windströmungen, insbesondere bei Sturmfluten. Da die ostfriesische Küste bis in größere Tiefen aus feinen Sanden aufgebaut ist, ist sie den Einwirkungen der Naturkräfte besonders stark ausgesetzt. Die Entwicklung der ostfriesischen Küste begann mit dem Rückgang des Eises der letzten Eiszeit und setzt sich bis in die Gegenwart fort. Die geologische und vorge-

schichtliche Entwicklung ist von Backhaus (1) eingehend beschrieben worden. Am Rande des der Marsch vorgelagerten Watts entstanden die ostfriesischen Inseln, die sich aus Sandbänken zu Düneninseln entwickelten, an Breite und Länge zunahmen und sich langsam nach Osten verschoben. Diese Inseln bilden den natürlichen Schutz der anschließenden Watt- und Marschflächen. In der offenen See vor der ostfriesischen Inselküste ist die Flutwelle in östlicher bis südöstlicher Richtung schräg gegen die Küste gerichtet. Die Ebbe-strömung verläuft in entgegengesetzter Richtung, tiefere Rinnen bildend. Durch die zwischen den einzelnen Düneninseln gelegenen Seegaten wird der Flutraum des zwischen den Inseln und der Festlandküste gelegenen Wattengebietes bei Flut durch die einströmenden Wassermengen gefüllt, bei Ebbe wieder entleert. Da bei diesen Vorgängen durch die verhältnismäßig engen Seegaten beträchtliche Wassermengen ein- und ausströmen, entwickeln sich in ihnen Stromgeschwindigkeiten von erheblicher Stärke. Im Zusammenwirken von Wellenschlag und Strömungen treten daher in den Seegaten die Veränderungen der Stromrinnen, der Sandbänke und der Inselküsten in besonders deutlicher Weise in Erscheinung. Die Gliederung und Lage der Rinnensysteme und der Sandbänke ist hierbei abhängig von der Größe und Flächengestaltung des zu jedem Seegat gehörenden Wattengebietes (Vgl. Gay und Walter (3)). Vor der ostfriesischen Küste haben sich zwei Hauptformen der Seegaten ausgebildet:

1. Im Norderneyer Seegat und in der Wichter Ehe (zwischen Norderney und Baltrum) ist der Hauptebestrom gegen die Westenden von Norderney und Baltrum gerichtet, weil der westliche Teil des zugehörigen Wattengebietes den östlichen Teil überwiegt (Abb. 1).

2. In der Akkumer Ehe (zwischen Baltrum und Langeoog) und der Otzumer Balje (zwischen Langeoog und Spiekeroog) ist infolge des Überwiegens des östlichen Teiles des Wattengebietes der Hauptebestrom zunächst nach NNW gerichtet, so daß die Stromrinnen von den Westenden der Inseln (Langeoog und Spiekeroog) absetzen. Durch diese Erscheinungen wird im wesentlichen die Lage der tiefen Stromrinnen in den Seegaten bedingt, so daß die West- und Nordwestenden der Inseln Norderney und Baltrum der Erosionswirkung ausgesetzt sind, während die Westenden der Inseln Langeoog und Spiekeroog Sandzufuhren erhalten.

Bei Sturmfluten durchströmen größere Wassermassen die schmalen Rinnen zwischen den Inseln, das Wasser an den Marschküsten aufstauend. Fällt der größte Windstau in die Zeit der Flut, verstärken sich beide Strömungen, während die Ebbeströmung entgegengesetzt gerichtet ist.

Die Auswirkungen außergewöhnlicher Sturmfluten bilden Wendepunkte in der Entwicklung der ostfriesischen Küste. An der Emsmündung lag zu Beginn unserer Zeitwende die Großinsel Burchana (Bant), zu deren Bestand Borkum, Juist, Memert, Buise und zum Teil Norderney gehörten. Die Insel umfaßte auch die Oster-Ems. Die Insel wurde wahrscheinlich durch die Sturmfluten der Jahre 1170 und 1362 in Stücke zerrissen. Nach Aufteilung der Insel Bant bahnten sich die Fluten einen Weg zum Festland; sie erweiterten die Stromrinne der Osterems und brachen stellenweise in das Festland (Dollart im Jahre 1370). Große Verheerungen richtete an der ostfriesischen Küste die Petriflut von 1651 an. Die Insel Borkum nahm von Jahr zu Jahr ab, bis im 18. Jahrhundert verstärkte Schutzmaßnahmen einsetzten. Der Entwicklungsgang der übrigen ostfriesischen Inseln nahm einen ähnlichen Verlauf.

Besonders schwerwiegende Folgen hatte die in den letzten Jahrhunderten größte Sturmflut vom 3. bis 5. Februar 1825. So wurde bei dieser

Sturmflut die Insel Juist soweit zerstört, daß sie zeitweilig verlassen werden mußte, die Insel Baltrum durch viele Einbrüche verwüstet und durchteilt. größere Teile wurden auch von den übrigen ostfriesischen Inseln fortgespült. Der Windstau bei der Sturmflut 1825 betrug über MThw: an der ostfriesischen Küste 3,20 m, an der Elbmündung 3,50 m und an der Dithmarscher Küste 4,40 m. Um diesen Betrag erhöhten sich die normalen Flutwellen, die an der Südküste der Nordsee eine Höhe von 2 bis 3 m, und an der Ostküste von 1 bis 1,5 m erreichen. Daraus ergeben sich die gewaltigen Wassermassen, die von der Nordsee zur Küste getrieben wurden.

Im Brandungsgürtel, der bis zur 3-m-Tiefe reicht, wandert der Sand unter der Wirkung des Gezeiten- und Windstromes am stärksten. Das südlich der Inseln liegende Watt, das bis auf die Rinnen bei Niedrigwasser trocken ist, füllt sich bei Flut durch die Seegaten und wird durch sie bei Ebbe geleert. Jedes Seegat hat seine Wattgebiete, welche durch Wattscheiden getrennt sind. Die Wattscheiden bilden keine festliegenden Linien sondern verschieben sich je nach den Winden. Der im Brandungsgürtel vor den Inseln nach Osten wandernde Sand wird durch den Flutstrom auf die Westseite des Seegats geschoben und von dort durch den Ebbstrom nach Norden. Auf den Barren, die den Mündungen der Seegats vorgelagert sind und nach Norden steil abfallen, wandert der Sand nach Osten und dann von der Ostseite der Gats nach SO auf die nächste Insel zu. Je größer das Seegat, desto weiter ist die Barre vorgeschoben, desto mehr ist die östliche Insel gegen die westliche gestaffelt.

Die mit der Brandung und dem Flutstrom von Westen herangebrachten Sandmassen bauen den Riffgürtel vor den Seegaten auf. Die Ebbeströmung verfrachtet die Sandmassen nach Norden weiter und lagert sie im nördlichen Teil des Riffgürtels ab, von wo sie wiederum durch Brandung und Flutstrom nach Osten auf die nächste Insel zu transportiert werden. Bei Norderney und Baltrum haben sich im Laufe der Jahrzehnte die Stromrinnen des Seegats eingengt und vertieft, was einerseits durch den Druck der Riffe, andererseits durch die Befestigung des Weststrandes der Inseln bedingt ist. Aus dem Wege der Sandwanderung ist zu ersehen, daß die Sandzufuhr zum Westende von Norderney und Baltrum erschwert ist. Andererseits greifen die Strömungen und die Brandung die Westenden an und suchen Abbrüche herbeizuführen.

Alle diese Erscheinungen werden unterlagert durch Senkungen, welche als Auswirkung tektonischer oder noch andauernder bodenmechanischer Vorgänge (alluvialer Senkungen) sich vollziehen. In welchem Maße sich die Küstensenkung in der Gegenwart fortsetzt, ist noch nicht eindeutig festgestellt worden. Im ostfriesischen Gebiet können i. M. 20 cm im Jahrhundert angenommen werden. Dieser Umstand wirkt sich nachteilig für einen dauernden Küstenschutz aus.

II. Maßnahmen zur Verminderung der Erosionswirkung an der ostfriesischen Küste.

Als erste Maßnahme ist die Erkenntnis der Vorgänge in der Natur zu nennen. Dazu gehören systematische Untersuchungen, welche seinerzeit von der Forschungsstelle Norderney eingeleitet worden sind: erdgeschichtlicher Aufbau des Küstengebietes und Nordseebeckens, Windbeobachtungen, Wasserstandsbeobachtungen, Wellen- und Strömungsmessungen, Bestimmung der Sandwanderung und Sinkstoffbewegung, Temperatur- und Dichtemessungen, Eisbeobachtungen, Untersuchung der Bodenarten, Tier-

und Pflanzenwelt. Besonders zu beachten sind die Beziehungen zwischen Wetterlagen und Wasserbewegung (Sturmfluten).

Von den bisher ausgeführten künstlichen Maßnahmen sind zu nennen die im 18. Jahrhundert begonnene Dünenpflege und der seit Mitte des 19. Jahrhunderts durchgeführte Küstenschutz durch Buhnen und Längswerke. Die im Zeitraum 1858 bis 1938 getroffenen Maßnahmen haben eine Änderung der sturmflutfreien Flächen der Inseln im allgemeinen verhindert, doch hat an den gefährdeten Stellen der Strand abgenommen. Durch diese Maßnahmen ist zwar die Wirkung der Angriffe von Seiten der See bekämpft, aber die Ursachen sind dadurch nicht beseitigt worden. Deshalb sind auch die getroffenen Maßnahmen nicht ausreichend gewesen. Die Anlagen an den Westenden der Inseln mußten im Laufe der Jahrzehnte bedeutend verstärkt, erweitert und umgebaut werden. Als nächste Maßnahme käme eine Lenkung der Meeresströmungen in Betracht, um dadurch die Erosionsrinnen von den Westenden der gefährdeten Inseln mehr nach Westen zu verlagern.

So wird zur Verbesserung der Verhältnisse im Norderneyer Seegat und zum Schutze der stark gefährdeten Insel Norderney eine Verlängerung und Aufhöhung einer oder mehrerer westlichen Buhnen nebst Ausbau einer Buhne mit Leitwerk erwogen. Dadurch soll ein früher vorhanden gewesener, günstiger Zustand wieder hergestellt werden, bei welchem sich durch den westlichen Teil des Riffgürtels beständige Ebbrinnen offen gehalten haben sollen. Dabei müßten die Durchflussmengen und Durchflußquerschnitte im richtigen Verhältnis stehen, um Erosionen zu vermeiden. Die Durchflussmenge hängt von der Flächengröße und Höhenlage des zum Seegat zugehörigen Wattengebietes ab. Ferner lassen sich vielleicht die Lage und die Größe der Zuflußgebiete der Seegate durch Verlegung der Wattscheiden im gewünschten Sinne regeln. Gleichzeitig könnte eine Wiederaufhöhung der abgenommenen Wattflächen südlich der Insel Juist in Erwägung gezogen werden, um so die Durchflussmengen im Norderneyer Seegat zu verkleinern. Die genannten Maßnahmen sind aber äußerst kostspielig und es ist fraglich, ob sie verwirklicht werden können. Nach Erforschung der Strömungsverhältnisse in der Natur ließe sich ihre Lenkung durch künstliche Maßnahmen im Modell überprüfen. Hierbei sind jedoch die Sandwanderung und Sinkstoffbewegung als solche naturähnlich nicht darstellbar.

III. Die Naturvorgänge an der Süd- und Ostküste der Ostsee.

Zur Erfassung der Strömungen und der Erosionswirkung an der Süd- und Ostküste der Ostsee ist von der Entstehungsgeschichte dieses Beckens auszugehen. Dabei ist von wesentlicher Bedeutung die Wasserbewegung zwischen der Nord- und Ostsee und ihre Auswirkung auf die Strömungen in der Ostsee.

Durch die dänischen Meerengen strömt das schwerere Nordseewasser in den unteren Schichten in die Ostsee ein, während zum Ausgleich oder bei vorherrschenden Winden des östlichen Sektors das leichtere Ostseewasser als obere Schicht ausströmt. Bei anhaltenden stärkeren Westwinden setzt sich der Einstrom in die Ostsee im ganzen Querschnitt durch. Die sich dann in der südlichen Ostsee fortsetzende Westströmung staut das Wasser der Ostsee, die Wasserstände von West nach Ost hebend. Aus dem Hauptstrom ergießen sich zum Ausgleich der Wasserstände Nebenströme in die Buchten. Vor den das Stettiner Haff begrenzenden Inseln hat die Sandanlandungszone sich weiter seewärts vorgeschoben, die Strömung nordwärts abdrängend.

Von Bornholm ausgehend nähert sich die 40 m Tiefenlinie vor der hinterpommerschen Küste im Bogen der Küste (Scheitel zwischen Kolberg und Jamundersee) und entfernt sich wieder in Richtung zur Stolperbank (Abb. 2). Die Verfrachtung der Wassermassen vollzieht sich hier hauptsächlich durch die Stolprinne, die sich zwischen der Mittel- und Stolpebank von der Bornholmer zur Danziger Mulde hinzieht. Diese Rinne ist der einzige tiefere Durchlaß von West nach Ost, so daß hier bei Wasserverlagerungen in der Ostsee erhebliche Geschwindigkeiten auftreten. Die Auswirkung dieser Wasserbewegung auf die küstennahe Erosion wird weiterhin behandelt.

Nach Pratje (4) bestehen vier Sedimentationszonen, von denen die zwei an die Küste anschließenden unter der unmittelbaren Wirkung der Erosion stehen, nämlich die küstennahe Sandanhäufungszone und das Abtragungsgebiet.

Die küstennahe Sandzone häuft den Sand aus der Küstenzerstörung und teilweise aus der zweiten Zone (Abtragungsgebiet) an. Diese Zone ist im allgemeinen ziemlich schmal, sie wird an Flußmündungen und an Küstenvorsprüngen breiter, vor den Steilküsten dagegen schmaler. In ihr vollzieht sich die Brandung. Sie ist gekennzeichnet durch die Riffbildungen.

Bei einer Strandböschung 1:20 bis 1:30 m ist die mittlere Strandbreite an Flachküsten der Südküste der Ostsee 35 bis 40 m. Die landseitige Angriffszone der Wellen ist eindeutig begrenzt durch die Strandlinie und den Dünenfuß, während die seeseitige Begrenzungslinie nicht festliegt. Die Mächtigkeit des Sandes ist in der küstennahen Zone der Südküste meist nicht groß und übersteigt selten 2 bis 3 m (Pommern, Ostpreußen). An den Steilküsten liegt vorwiegend Schutt aus jüngerer Zeit, da diese Küsten dauernd im Rückgang sind, z. B. in Ostpreußen $\frac{1}{2}$ bis $\frac{3}{4}$ m im Jahr. Bei hohen Sturmfluten besteht am Boden der küstennahen Zone eine Gegenströmung (Sog), durch welche das Material seewärts verfrachtet wird und dieser Zone und dem Küstenschutz verloren geht.

An die küstennahe Sandanhäufungszone schließt sich die zweite Zone, das Abtragungsgebiet, an. Die Tätigkeit der Brandung in der ersten Zone wird hier durch Strömungen fortgesetzt, welche sich in der Vertiefung des Bodens (Erosion) auswirken. Wo der diluviale Untergrund vor den Küsten hochliegt, insbesondere vor Steilküsten, befinden sich in dieser Zone Flächen, die frei von Sedimenten oder mit größerem Material (Geschiebemergel, Steine) bedeckt sind. Hier läuft ein starker Strom mehr oder minder parallel zur Küste, führt das lockere Material fort, läßt nur groben Kies und Steine liegen und wäscht den Untergrund oberflächlich aus. Da der Küstenrückgang den Strom immer wieder in flacheres Wasser landwärts verschiebt, so ist in den meisten Fällen der Gleichgewichtszustand noch nicht erreicht.

An der Südküste der Ostsee neigen besonders zum Rückgang außer den vorspringenden Steilküsten folgende Strecken:

- a) die schon erwähnte Küste der Kösliner Bucht zwischen Funkenhagen und Rügenwaldermünde mit dem Scheitel am Jamunder See;
- b) vom Seengebiet an der ehemaligen deutsch-polnischen Grenze bis Rixhöft, gekennzeichnet durch eine Vertiefung des Meeresbodens (Erosion) und durch eine Abrasion der Küste; die Abtragungen sind in diesem Gebiet auf 1 km Küstenlänge mit 70 000 m³ im Jahr berechnet worden.
- c) die ostpreußische Samlandküste.

Außerdem sind starkem Abbruch die Küsten auf den Leeseiten natürlicher oder künstlicher (Hafenanlagen) Vorsprünge unterworfen, was durch die Unterbrechung der Brandungszone bedingt ist.

Die Verhältnisse an der Ostküste der Ostsee von Memel bis zur Pernauschen Bucht des Rigaschen Meerbusens sind von Knaps (6) untersucht worden. In Anbetracht der in der Einleitung erwähnten Einschränkung (offene Küsten) soll hier nur der Teil zwischen Memel und dem Rigaschen Meerbusen betrachtet werden. Knaps' Untersuchungen beschränken sich in der Hauptsache auf die küstennahe Zone, für welche die durch die Winde hervorgerufene Wasserbewegung (Wellenschlag, Brandung und von letzterer hervorgerufene Strömung) maßgebend ist. Der Vorstrand hat hier eine Neigung von 1:50 bis 1:200. Nach den ausgeführten Untersuchungen sollen die Anlandungen und der Abtrag weniger von der Küstenform und der Vorstrandneigung abhängig sein, als von der Geschwindigkeit der Sandwanderung. Im Falle einer verlangsamten Bewegung wird im Bereich dieser Bewegung weniger fort- als zugeführt, wodurch Anlandungen entstehen. Bei einer beschleunigten Bewegung überwiegt der Abgang den Zugang, wodurch die Tiefen zunehmen und die Neigung des Vorstrandes abnimmt. Größere Tiefen fördern die Materialwanderung; Hafengebäute und Küstenvorsprünge aus widerstandsfähigerem Material bremsen sie. Die von Memel aus kommende Materialwanderung setzt sich fort bis zum Libauschen Hafen, wo sie seewärts abgelenkt wird. Nördlich dieses Hafens nimmt nach einem Abtragsgebiet die Materialwanderung wieder zu. Im weiteren Verlauf der Küste wechseln Abtrag- und Anlandungsstrecken. Die Materialwanderung wird dann wieder durch den Windauer Hafen gebremst, wonach eine größere Abtragsstrecke folgt. An der Spitze von Domesnäs setzt sich die Sandwanderung in Richtung der Küste als Nehrung fort, die eine Länge von 6 km erreicht hat. Die jährliche Zunahme der Nehrung beträgt 2 500 000 m³.

Bei der Untersuchung der beschriebenen Küstenstrecke ist von der Munch-Petersenschen Formel $E = h \cdot s^2 \cdot \sqrt{f}$ ausgegangen worden, wo h die Windhäufigkeit, s die Windgeschwindigkeit der auflandigen Winde und f die Streichlänge ist. E wird als Resultierende aus den einzelnen auflandigen Himmelsrichtungen bestimmt, wobei $h \cdot s^2$ ein meteorologischer Faktor ist, der eine entsprechende Brandung sowie Strömungen hervorruft, die sich auf die Materialbewegung der Küste auswirken. Nach Zerlegung von E (Wellenschlagsenergiefaktor) in eine zur Küste winkelrechte und in eine parallele Komponente erhält man die zerstörende (aufwühlende) und die transportierende Kraftkomponente. Eine solche Untersuchung ergibt zutreffende Werte für die Vorgänge in der küstennahen Zone. Nicht erfaßt aber werden die Strömungen in der seewärts anschließenden Abtragszone. Deshalb muß die Untersuchung der Erosionswirkung auf breiterer Grundlage aufgebaut werden, wozu die Erfassung der seeseitigen Strömungsverhältnisse gehört.

Im beschriebenen Küstenabschnitt überwiegen die Anlandungen, wobei Erosion nur als Folge von vorspringenden Bauten auftritt. Die 20-m-Tiefenlinie zieht sich i. M. in einer Entfernung von 10 km von der Küste hin, die 50-m-Tiefenlinie in einer Entfernung von 20 bis 30 km.

Die Verhältnisse an der baltischen Ostseeküste sind vom Verfasser in einem Bericht zum XV. Internationalen Schiffahrtskongreß (7) behandelt worden. Erosionswirkungen machen sich nur an der Steilküste des Finischen Meerbusens zwischen Baltischport und Narwa bemerkbar. Diese

Steilküste (Glint) besteht aus Silurkalkstein und kambrischem Ton. Sie wird durch Buchten und Fläckküsten unterbrochen, die sie im Bogen umgeht. Wo die Steilküste unmittelbar bis an das Meer reicht, hat sich aus den Zerstörungsprodukten ein Vorstrand von verschiedener Breite gebildet. Die 20-m- und 50-m-Tiefenlinien verlaufen parallel der Strandlinie und nähern sich streckenweise bis auf wenige Kilometer der Küste. An solchen Stellen ist der Vorstrand schmal und die Erosionswirkung merklich. Durch das von oben wirkende atmosphärische Wasser und durch den Frost wird das Gestein zerklüftet, um dann nach Unterspülung brockenweise herabzustürzen, den Vorstrand weiter ausbildend.

Die Finnländische Ostseeküste gehört zum Gebiet der Fennoskandischen Landeshebung. Die Hebung beträgt im nördlichen Teil Finnlands 10 mm/Jahr. Infolge dieses Umstandes und der die Küste bildenden widerstandsfähigeren Gesteinsart treten hier keine bedeutenderen Erosionswirkungen auf.

Da die Frage der Küstenhebung oder -senkung von wesentlicher Bedeutung für das Ausmaß von Erosionswirkungen ist, folgen einige Untersuchungsergebnisse dieses Vorganges an der Süd- und Ostküste. Ausgehend von langjährigen Wasserstandsbeobachtungen (1841—1930) an den Pegeln der Südküste von Travemünde bis Pillau sollen nach Hahn und Rietschel (8) keine größeren Änderungen in den gegenseitigen Beziehungen der Wasserstände genannter Pegel eingetreten sein. Im Falle einer Senkung der Südküste wäre nach ihrer Lage zwischen dem vermuteten Senkungsfeld der Deutschen Nordseeküste und dem Hebungsbereich Fennoskandiana im westlichen Gebiet der Ostsee eine größere Senkung und damit ein stärkeres relatives Ansteigen der Wasserstände zu erwarten. Andererseits jedoch würde eine Zunahme westlicher Winde über der Ostsee ein verstärktes Ansteigen der Wasserstände an den östlichen Pegeln der Südküste gegenüber den westlich gelegenen hervorrufen. Da diese beiden Erscheinungen (Küstensenkung und verstärkte atmosphärische Zirkulation) sich entgegengesetzt auf die Wasserstände im östlichen und westlichen Teil der Südküste auswirken, können sie sich gegenseitig aufheben. Deshalb läßt sich auf dieser Grundlage nicht feststellen, ob eine Senkung stattgefunden hat. Nach Model (9) soll die gesamte westliche Ostsee absinken, wobei die Senkung mit maximal 2 mm/Jahr angegeben wird. Diese Feststellung folgte aus der Untersuchung der Wasserstände von 79 Pegelstationen im Zeitraum 1904/1938. Die untersuchte Zeitspanne erscheint aber zu kurzfristig zur Bestimmung säkularer Senkungen.

Nach Pratje (4) fand die letzte große Senkung 4000 Jahre v. Chr. statt, wonach die Ostsee bis an die heutige Südküste vordrang. Dabei verschob sich auch die Kippachse bis an diese Küste. Deshalb ist augenblicklich keine starke Bewegung anzunehmen. Nur mit dem Abbruch von Steilküsten ist weiterhin zu rechnen.

Auf die Erosion und den Küstenabbruch üben Sturmfluten einen nachhaltigen Einfluß aus. Für die Südküste der Ostsee sind nach vorhergehenden, länger andauernden Weststürmen Stürme aus NO besonders bedrohlich. Durch westliche Winde wird ein starker Einstrom hervorgerufen. Nach der Winddrehung auf NO werden die in der Ostsee angestauten Wassermengen gegen das südliche Ufer geworfen. Die große Wassermasse kann nicht schnell genug abfließen, sondern läuft hoch auf den Strand. Da beim Durchzug der Zyklonen nur selten eine Drehung von W bis nach O stattfindet, ist die Zahl der Sturmfluten an der Südküste der Ostsee bedeutend geringer als an der Südküste der Nordsee. Im Zeitraum 1304/1908

sind 79, davon 36 bedeutendere Sturmfluten beobachtet worden, somit 6 größere Sturmfluten im Jahrhundert. Nach 1908 sind nur wenige größere Sturmfluten aufgetreten (Ende Dezember 1913, 10. Januar 1914). Die ostpommersche Küste ist noch von Sturmfluten in den Jahre 1921 und 1926 betroffen worden.

Bei den Sturmfluten wird nicht nur die küstennahe Zone durch den Wellenschlag und die sich dabei entwickelnden Strömungen angegriffen, sondern beim Rückströmen des aufgestauten Wassers wirkt sich der Sog auch auf größere Tiefen aus. Größere Sturmfluten bedeuten oft Wendepunkte in der Entwicklung der Küsten.

An der Ostküste der Ostsee, insbesondere in nördlicheren Breiten, werden die Küsten in strengen Wintern auch durch Eis gefährdet. Die angehäuften Eismassen erreichen mitunter außergewöhnliche Ausmaße. Darüber liegt ein Bericht von Kraus zur 3. Baltischen Hydrologischen Konferenz vor. Die Eisschubberge wirken zerstörend auf die Küsten und insbesondere auf die Schutzanlagen. Ihre erodierende Wirkung ist aber nicht festgestellt worden.

IV. Maßnahmen zur Verminderung der Erosionswirkung an der Süd- und Ostküste der Ostsee.

Auf Grund der beschriebenen Naturvorgänge sind bei den Maßnahmen zur Verminderung der Erosionswirkung die Zusammenhänge zwischen der Erosion und der Gestaltung der Küste in Betracht zu ziehen. Danach ist die Gesamtwirkung der bestehenden Schutzanlagen zu prüfen, woraus sich Hinweise für weitere Maßnahmen ergeben.

Die Frage des Küstenschutzes im weiteren Sinne ist auf dem XV. Internationalen Kongreß 1931 erschöpfend behandelt worden. Die zu diesem Kongreß vorgelegten Berichte waren zu einem Generalbericht zusammengefaßt, der Empfehlungen für alle baulichen Schutzmaßnahmen enthält. Diese Empfehlungen wurden in die Beschlüsse des Kongresses aufgenommen. In der vorliegenden Mitteilung sind, von der Betrachtung der Naturvorgänge und von der Wirkung der bestehenden Schutzanlagen ausgehend, einige Vorschläge zur Verminderung der Erosion und damit zur Sicherung des ganzen Küstenschutzes gemacht worden.

Die Frage des Küstenschutzes an der Südküste der Ostsee hat eingehend Heiser behandelt (10). Vorspringende befestigte Küsten und Hafenanlagen bilden eine Reihe von festen Punkte, zwischen denen sich dann ein flach gekrümmtes Ufer ausbildet, an dem sich die durch Wellen und Strömung in Bewegung gesetzten Sinkstoffe ablagern. Dabei darf nach Heiser die Entfernung zwischen den festen Punkten nicht zu groß sein, da sonst im Scheitel der Krümmung der Abbruch einsetzt. Lehrreich ist in dieser Hinsicht die Befestigung der Küste der Kösliner Bucht zwischen Funkenhagen und Rügenwaldermünde (Abb. 2). Von Funkenhagen aus ist die Küste nach und nach auf einer Strecke von 12 km durch Buhnen geschützt worden. Desgleichen ist östlich der Hafenanlage von Rügenwaldermünde die Buhnenreihe ständig verlängert worden. Da die Sehnenlänge der Bucht, bei einer Ausrundung im Scheitel von 5 km, 40 km beträgt, trat im Scheitel, der sich nach Verlängerung der Funkenhagener Anlage zum Buckower See verschoben hat, Abbruch auf, so daß die Küste auch an dieser Stelle befestigt werden mußte. Obwohl durch Buhnen sich die Breite des Vorstrandes auf der geschützten Uferstrecke erhalten läßt, wirken sich solche Anlagen nachteilig auf die leeseitig (östlich) anschließenden Strecken aus. Durch Verzögerung und Ablenkung der Küstenströmung und durch Aufhalten der

Wandersande wird die zur Unterhaltung der anschließenden Küste erforderliche Sandzufuhr vermindert, was zu Abbrüchen führt. So müssen bestehende Anlagen ständig nach Osten verlängert werden, was ihren Nutzen einschränkt. Durch Verbreiterung des Strandes werden auf den befestigten Strecken zwar die schädlichen Tiefen von der Küste ferngehalten, doch tritt in den anschließenden Strecken eine verstärkte Erosionswirkung auf. Besonders gefährdet sind Küsten, an welche die größeren Tiefen der See dicht heranreichen, wie in der Kösliner Bucht.

Als weiteres Beispiel einer gefährdeten Küste ist die Samländische (Ostpreußen) zu nennen. Der Strandstreifen vor der Steilküste von Warnicken bis Rauschen ist nur schmal. Zur Befestigung dieser Strecke waren 60 Buhnen vorgesehen, die zum Teil gebaut sind. Die Sandzufuhr soll zwar genügend sein, auch hat die Strandbreite stellenweise zugenommen, doch ist die Gefahr einer weiteren Erosion noch nicht gebannt. An dieser Küste sind auch einzelne Buhnen durch Eis zerstört worden.

Zu beachten ist der Schutz von vorspringenden Steilküsten, die durch Erosion besonders gefährdet sind. Dazu gehören u. a. die Befestigung des Streckelsberges westlich von Swinemünde mit anschließender leeseitiger Küste und des Ufervorsprungs bei Jershöft westlich von Rügenwaldermünde. Zum Schutz solcher Küsten dienen vor allem von Buhnen begrenzte Längswerke. Die Längswerke können in einiger Entfernung vom Hochufer angelegt werden oder sie werden unmittelbar an das Ufer angelehnt. Im ersten Falle sollen sich die abbrechenden Bodenmassen hinter dem Längswerk ablagern und eine neue, flachere Böschung bilden. Nach dieser Bauweise ist das Längswerk bei Jershöft ausgeführt und dank der Wirkung der Buhnen übersandet. Leichtere Längswerke in Form von Steinwällen sind an einigen anderen Küsten angelegt worden. Als Beispiel einer unmittelbar an das Ufer anschließenden Anlage ist die Sicherung des Streckelberges zu nennen. An die genannten Längswerke schließen sich leeseitig Buhnenfelder an.

Alle genannten Anlagen haben sich hinsichtlich der Erhaltung der Strandbreite bewährt, doch ist dabei die Frage der Verminderung der Erosionswirkung nicht geklärt worden. Die Erosion steht im unmittelbaren Zusammenhang mit der Küstenströmung in dem an die küstennahe Sandanhäufungszone seewärts sich anschließenden Abtragungsgebiet. Dabei sind die Geschwindigkeit der Küstenströmung, die Gestaltung und der Bestand des Meeresbodens im Bereich der Strömung und ihre Sinkstofffracht maßgebend. In Gebieten, wo Küstenabbruch vorherrscht, müßte die Strömungsgeschwindigkeit verringert werden, was durch Grundschwellen möglich wäre. Diese sind in der Rinne der Küstenströmung anzulegen. Als Material sind größere Steine anzuwenden, wozu die in der Rinne liegenden Sedimente Anhaltspunkte liefern können. Wie erwähnt, wirken sich Uferschutzwerke der gebräuchlichen Art (Längswerke und Buhnen) oft schädlich auf die Sandführung aus, weil dadurch der Strömung das zu verfrachtende Material entzogen wird. Bei Nichtvorhandensein solcher Schutzwerke bildet sich ein Gleichgewichtszustand aus, doch ist der damit verbundene Landverlust nicht immer zulässig, was dann zusätzliche Anlagen in größeren Tiefen erforderlich macht. Allein durch eine Ablenkung der Küstenströmung läßt sich das Ziel nicht erreichen, weil dadurch sich die zerstörende Kraft der Strömung zwar schwächen läßt, doch andererseits ihre aufbauende Wirkung an der an eine vorspringende Anlage sich anschließenden Küste entzogen wird. Maßnahmen zur Milderung der Übergänge von einer befestigten zu

einer unbefestigten Küstenstrecke durch allmähliche Verminderung der Bühnenlänge reichen in den meisten Fällen nicht aus, um leewärtigen Abbruch zu vermeiden.

V. Schlußfolgerungen.

1. Zur Verminderung der Erosionswirkung an Küsten sind durch Beobachtungen und Messungen auch die Vorgänge außerhalb der küstennahen Sandhäufungszonen zu erfassen, nämlich die Gestaltung und der Bestand der Erosionsrinne sowie Geschwindigkeiten und Sinkstofffracht der Strömungen in verschiedenen Tiefenlagen. Da bei bewegter See Strömungsmessungen in größeren Tiefen schwer ausführbar sind, ist zu beachten, daß sich im Zustand der Sohle (Entblößung älterer Formationen, Sedimente, Tier- und Pflanzenwelt) die Geschwindigkeit der Grundströmung widerspiegelt.

2. Besonders ist festzustellen:

- a) ob die betreffende Küstenstrecke in einem säkularen Hebungs- oder Senkungsgebiet befindet
- b) die Wirkung von Sturmfluten auf die Gestaltung der Erosionszone und der küstennahen Sandzone durch Peilungen vor und nach den Sturmfluten sowie der durch Sturmfluten verursachte Schaden
- c) die Wirkung schwieriger Eisverhältnisse auf die Küstengestaltung und der durch sie verursachte Schaden.

3. Die in der Sandanhäufungszone üblichen Küstenschutzanlagen (Längswerke und Bühnen) bieten gegen Erosionswirkungen nur einen örtlich begrenzten Schutz, während in den leeseitigen Küstenstrecken meist verstärkte Erosion auftritt.

4. Zur unmittelbaren Bekämpfung der Erosion ist die Anlage von Grundswellen in den Erosionsrinnen in Betracht zu ziehen, wodurch die Geschwindigkeit der Grundströmung vermindert und die aufbauende Tätigkeit der Küstenströmung erhöht werden kann.

5. Da über Einbauten der unter 4 vorgeschlagenen Art, im Zusammenhang mit den unter 1 angeführten Untersuchungen noch keine praktischen Erfahrungen vorliegen, können Modellversuche wertvolle Hinweise geben. Dabei ist zu untersuchen:

- a) die Wirkung von Einbauten in der Erosionszone auf die Wasserbewegung bei unveränderlicher Sohle im Modell;
- b) die Wirkung einer sinkstoffführenden Strömung auf eine bewegliche Sohle mit und ohne Einbauten.

Letztere Versuche lassen sich jedoch nicht naturgetreu darstellen und können nur ein verzerrtes Bild über die Wirkung genannter Bauten geben.

Über erwünschte Modellversuche zur Untersuchung der Verhältnisse in Tidegebieten sind im Teil II dieser Abhandlung einige Angaben gemacht.

6. In Verbindung mit den unter 5 angeführten Modellversuchen ist die Ausführung von Versuchen in der Natur durch den Bau einiger Schwellen in einer Erosionsrinne zu empfehlen, wonach sich deren Wirkung auf die Strömungsverhältnisse und Ablagerungen beobachten läßt.

7. Unter gewissen Verhältnissen ist es zweckmäßiger, von künstlichen Maßnahmen abzusehen und es der Natur zu überlassen, einen Gleichgewichtszustand herzustellen, was allerdings mitunter erst in einigen Jahrzehnten erfolgt.

Insbesondere bei Steilküsten aus festeren Bestandteilen, welche sich durch Brandung nicht verfrachten und durch Strömungen nicht fortschwemmen lassen, bildet sich im Laufe der Zeit ein ausreichender Vorstrand, wodurch die Erosionsrinne seewärts verschoben wird.

Auch bei Flachküsten tritt oft nach einer Periode des Abbruches ein andauernder Gleichgewichtszustand ein, der aber weiterhin durch außergewöhnliche Naturvorgänge (Sturmfluten, Eis) unterbrochen werden kann.

Dabei lassen sich die unter 3 erwähnten nachteiligen Folgen vermeiden.

8. Die Wirkung aller Maßnahmen zur Verminderung der Erosion ist zeitlich beschränkt, da der Küstenrückgang ein natürlicher geologischer Vorgang ist, der sich nur aufhalten aber nicht abändern läßt. An den Küstensockeln sowohl der Steil- als auch der Flachküsten nagt unablässig der Zahn der Zeit.

Literaturverzeichnis.

- (1) Backhaus, Die Entwicklung der ostfriesischen Inseln in geschichtlicher, geomorphologischer, hydrodynamischer und seebautechnischer Hinsicht. (Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft, 1939/1940.)
- (2) Krüger, Die Entwicklung der Harlebucht und ihr Einfluß auf die Außenjade. (Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft, 1937.)
- (3) Gaye und Walther, Die Wanderung der Sandriffe vor den ostfriesischen Inseln. (Bautechnik, 1935.)
- (4) Pratje, Die Sedimentation in der südlichen Ostsee. (Annalen der Hydrographie, 1939.)
- (5) Hartnack, Die Küsten Hinterpommerns mit besonderer Berücksichtigung der Morphologie. (Jahrbuch der geographischen Gesellschaft, Greifswald, 1926.)
- (6) Knaps, Prüfung der Formel von Munch-Petersen. (Bericht zur VI. Baltischen Hydrologischen Konferenz, 1938.)
- (7) Leppik, Verteidigung der Küsten gegen das Meer, an Küsten mit und ohne vorwiegende Sinkstoffführung. (Bericht zum XV. Internationalen Schiffahrtskongreß, 1931.)
- (8) Hahn und Rietschel, Langjährige Wasserstandsbeobachtungen an der Ostsee. (Bericht zur VI. Baltischen Hydrologischen Konferenz, 1938.)
- (9) Model, Die gegenwärtige Küstenhebung im Ostseeraum. (Bericht zur Tagung der Geophysikalischen und Meteorologischen Gesellschaften, 4./6. September 1948, Hamburg.)
- (10) Heiser, Uferschutzbau an der deutschen Ostseeküste. (Bautechnik, 1927.)



