

Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse der ehemaligen Arbeitsgruppe „Sturmfluten“ und Empfehlungen für ihre Nutzenanwendung beim Seedeichbau*

Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Technisch-Wissenschaftlicher Beirat

Inhalt

I. Veranlassung	81
II. Die Sturmfluten von 1949, 1953 und 1962 an der südlichen Nordseeküste aus deichbau- technischer Sicht	83
III. Maßgebende Sturmfluterscheinungen für die Bemessung der Seedeichhöhen	
A. Allgemeines	86
B. Seegang im Vorfeld des Seedeiches	86
C. Wellenbewegung am Seedeich	88
D. Der für die Bemessung der Seedeichhöhe maßgebende Sturmflutwasserstand	90
1. Bisherige Verfahren für die Bestimmung eines Bemessungswasserstandes	90
2. Neue Vorschläge für Bemessungsverfahren	97
IV. Empfehlungen für die Bemessung der Seedeichhöhen	98
V. Schrifttum	101

I. Veranlassung

Die Arbeitsgruppe „Sturmfluten“ des Küstenausschusses Nord- und Ostsee war in ihrem 19jährigen Bestehen (1950 bis 1968) mehrmals vor die Aufgabe gestellt worden, den Ablauf und die Auswirkungen schwerer Sturmfluten zu untersuchen und aus den Ergebnissen Folgerungen für den Seedeichbau an der deutschen Nordseeküste zu ziehen. Hierbei handelte es sich in erster Linie um folgende Sturmfluten:

Sturmflut vom 9./10. Februar 1949: Diese Sturmflut, die kurz vor der Einsetzung der Arbeitsgruppe „Sturmfluten“ (im Frühjahr 1950) eingetreten war, hatte wegen ihres ungewöhnlichen Verlaufs die Wasserwirtschaftsverwaltung des Landes Schleswig-Holstein veranlaßt, eine eingehende Untersuchung über die Sturmfluten an der Westküste von Schleswig-Holstein durch ihre Landesstelle für Gewässerkunde vornehmen zu lassen. Der von dem mit dieser Untersuchung beauftragten Regierungsbaurat SCHELLING am 1. 3. 1950 erstattete Bericht „Die Sturmfluten an der Westküste Schleswig-Holsteins unter Berücksichtigung der Verhältnisse am Pegel Husum“ wurde dem Küstenausschuß Nord- und Ostsee mit der Bitte übergeben, zu den Untersuchungsergebnissen durch die Arbeitsgruppe „Sturmfluten“ kritisch Stellung nehmen zu lassen. Zu Beginn des Jahres 1951 wurde die Stellungnahme der Arbeitsgruppe der Wasserwirtschaftsverwaltung des Landes Schleswig-Holstein zugestellt; sie ist bisher nicht veröffentlicht worden. Der Bericht von SCHELLING ist nach seinem Tode (12. 2. 1951) in der Zeitschrift „Die Küste“ erschienen (37).

Die Hollandflut vom 1. Februar 1953 brachte für die Arbeitsgruppe „Sturmfluten“

*) Bericht aus dem Fachgebiet „Wissenschaftliche Untersuchungen im Küstengebiet“ des Technisch-Wissenschaftlichen Beirats im Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Obmann Professor Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. W. HENSEN.

eine besonders umfangreiche Untersuchungsarbeit, nachdem die Länder Schleswig-Holstein und Niedersachsen den Küstenausschuß Nord- und Ostsee beauftragt hatten, zu prüfen, ob und welche Folgerungen für den deutschen Seedeichbau aus jener verheerenden Sturmflut gezogen werden müssen. Für diese wichtige Aufgabe bildete der Küstenausschuß Nord- und Ostsee am 6. 3. 1953 eine Sonderarbeitsgruppe „Sturmflut vom 1. Februar 1953“. In zwei Bereisungen in das von der Sturmflut betroffene niederländische Küstengebiet durch Mitglieder der Sonderarbeitsgruppe wurden die Sturmflutschäden an Ort und Stelle besichtigt (10 und 16). Nach Auswertung des umfangreichen niederländischen Schrifttums über diese Sturmflut, der Manuskripte (9) und (31), der Berichte über die erwähnten Bereisungen und der im Franzius-Institut der Technischen Hochschule Hannover inzwischen ausgeführten Modellversuche (5) erstattete die Sonderarbeitsgruppe am 11. 3. 1954 ihre Empfehlungen über die Bemessungswasserstände für Seedeiche (18).

Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 hatte die deutsche Küste, besonders das Elbe-Gebiet, schwer betroffen. Über die umfangreichen Schäden an den Küstenschutzwerken haben die Küstenländer Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Hamburg und Bremen eingehend berichtet (21). Eine Zusammenstellung des über diese Sturmflut entstandenen Schrifttums ist in der Zeitschrift „Die Küste“ veröffentlicht (29).

Unmittelbar nach dieser schweren Sturmflut sind vom Küstenausschuß Nord- und Ostsee zwei Sonderarbeitsgruppen gebildet worden, die mit der Aufgabe betraut wurden, die Folgerungen aus den Sturmflutschäden für den künftigen Küsten- und Inselschutz zu ziehen.

Die Sonderarbeitsgruppe „Sturmfluten“ (Leitung Professor Dr.-Ing. W. HENSEN) hatte folgende Aufgaben übertragen erhalten:

Untersuchung

der Ursachen und des Ablaufs der Sturmflut vom 16./17. Februar 1962, des Eintritts und Ablaufs künftiger Sturmfluten als Maßstab für die Höhe der Küstenschutzbauwerke und Bauwerksanlagen, des Einflusses weiterer Ausbauten an Tideflüssen sowie der Errichtung weiterer Sperrwerke an Tideflüssen.

Die Sonderarbeitsgruppe „Küstenschutzwerke“ (Leitung Regierungsdirektor Dr.-Ing. K. LÜDERS) sollte Empfehlungen über die konstruktive Gestaltung der Deiche bearbeiten und die Größe der auftretenden Angriffskräfte, die Beschaffenheit des Deichuntergrundes, Sicherungsfragen und Baustoffeignung im Seedeichbau untersuchen.

Auf der 4. Arbeitstagung des Gesamtausschusses Nord- und Ostsee am 26. November 1965 in Hamburg ist über den Stand der Arbeiten der beiden Sonderarbeitsgruppen berichtet worden (7 und 28). Die bis dahin erarbeiteten Ergebnisse wurden in der Zeitschrift „Die Küste“ veröffentlicht (22 und 23).

Beim Wechsel im Vorsitz des Küstenausschusses Nord- und Ostsee nach der erwähnten Tagung des Gesamtausschusses wurde bereits auf eine beabsichtigte Umorganisation des Arbeitsausschusses hingewiesen (1). Die hierüber im Verwaltungsausschuß geführten Besprechungen ergaben die Zweckmäßigkeit, den bisherigen Arbeitsausschuß durch einen technisch-wissenschaftlichen Beirat zu ersetzen, dessen Mitglieder (Obmänner) die Federführung bei der Bearbeitung der an den Küstenausschuß gerichteten Fachfragen übernehmen. Durch diese Regelung wurde die Tätigkeit aller bisherigen Arbeitsgruppen zunächst eingestellt. Die Weiterführung der noch unvollendet gebliebenen und die Einleitung neuer Arbeiten obliegt nunmehr den Obmännern des „Technisch-Wissenschaftlichen Beirats“ (TWB).

Der TWB konstituierte sich am 6. Juni 1967 in Hamburg. Auf dieser Sitzung wurde vom Leiter der ehemaligen Arbeitsgruppe „Sturmfluten“ vorgetragen, daß die Arbeitsgruppe über die Grundlagen zur Ermittlung eines Bemessungswertes für die Seedeiche keine einheitliche Auf-

fassung habe erreichen können. Die Ursache liege im wesentlichen darin, daß die Wissenschaft noch nicht in der Lage ist, ausreichende Unterlagen für das gesteckte Ziel zu liefern. Bis dies möglich sein wird, können noch viele Jahre vergehen. Um aber die bisher gewonnenen Untersuchungsergebnisse möglichst bald dem praktischen Seedeichbau zur Verfügung zu stellen, sei beabsichtigt, sie von einem dazu neu zu bildenden Arbeitskreis für die Praxis auswerten zu lassen.

Professor Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. W. HENSEN, Hannover,
Reg.-Baudirektor i. R. C. HENSEN, Kiel,
Reg.-Direktor a. D. Dr.-Ing. K. LÜDERS, Hannover,
Reg.-Baudirektor Dr.-Ing. M. PETERSEN, Kiel.

II. Die Sturmfluten von 1949, 1953 und 1962 an der südlichen Nordseeküste aus deichbautechnischer Sicht

Jede dieser drei Orkanfluten hatte an den Küsten der Nordsee Wirkungen gehabt, die dort bisher noch nicht beobachtet worden waren und die zu neuen Bemessungen der deutschen Seedeiche geführt hatten.

Die Sturmflut vom 9./10. Februar 1949 verlief an der gesamten Westküste von Schleswig-Holstein insofern ungewöhnlich, als ihr Scheitelwasserstand (HT_{hw}) zeitlich mit dem vorausberechneten Tideniedrigwasser (MT_{nw}) zusammenfiel, wodurch sich außergewöhnlich hohe Windstauwerte von stellenweise mehr als 5 m ergaben. Den größten Windstau verzeichnete die Pegelstation Husum mit 5,70 m; ein solcher Wert war bisher an der Westküste noch niemals beobachtet worden.

Für die Bemessung der Seedeichhöhen war es von großer Bedeutung, zu untersuchen, ob ähnlich hohe Windstauwerte auch bei einem zeitlichen Zusammentreffen des Sturmflutscheitelwasserstandes mit dem vorausberechneten Tidehochwasser möglich seien. Die von SCHELLING (37) ausgeführten diesbezüglichen Untersuchungen haben für den Pegel Husum u. a. ergeben.

„daß bei orkanartigen Stürmen westlicher Richtung mit mittleren Geschwindigkeiten von etwa 32 m/s und bei wirksamster Überlagerung von Windflut und Gestirnsflut mit einem größten Windstau von etwa 4,0 m über HW und mit einem Höchstwasserstand von etwa 1050 cm a. P. = 5,50 m NN gerechnet werden muß“.

Ob dieser Höchstwasserstand künftig noch überschritten werden kann, darüber ist jedoch von SCHELLING kein abschließendes Urteil gefällt worden, weil die hierfür notwendigen meteorologischen und hydromechanischen Zusammenhänge noch unbekannt waren; sie sind es auch heute noch. SCHELLING empfahl, für Husum einen vorläufigen Bemessungswasserstand von NN + 5,50 m für die Bestimmung der Seedeichhöhe anzuwenden.

Die Hollandflut vom 1. Februar 1953 hatte sich in der westlichen und südwestlichen Nordsee, besonders an den Küsten von Südost-England, Belgien und vor allem der Niederlande verheerend ausgewirkt. Diese Orkanflut wurde durch das Zusammenwirken eines recht hohen, astronomisch bedingten Hochwassers mit einem sehr hohen Anstieg des Meeresspiegels hervorgerufen, der sich überwiegend aus den außerordentlich starken Winden über der Nordsee und ihren nördlichen Zugängen ergab (2).

Der Orkan übte seinen verhängnisvollen Einfluß auf das westliche Gebiet der Nordsee vor allem wegen seiner Dauer von 24 Stunden und im begrenzten Seegebiet der südwestlichen Nordsee sogar von 30 Stunden aus. Nach TOMCZAK (39) hatte es in den Niederlanden seit dem Beginn systematischer meteorologischer Beobachtungen im Jahre 1898 noch keinen Sturm mit Windstärke 9 Bft. oder mehr von längerer Dauer als 12 Stunden gegeben. Durch den

Orkan wurde in der gesamten Nordsee eine südliche Strömung hervorgerufen, die beim Auftreffen auf die Küsten der südwestlichen Nordsee einen Anstau und damit ein Steigen des Wasserstandes hervorrief. Der Windstau bei Hoek van Holland wurde mit 3,28 m beobachtet. Der über der Nordsee tobende Orkan warf zudem einen Seegang von bisher selten erreichtem Ausmaß auf. In der freien See der nördlichen und mittleren Nordsee wurden Wellenhöhen bis zu 9 m mit Perioden von 8 bis 10 Sekunden beobachtet; vor der holländischen Küste wurden mit etwa gleicher Periode Höhen von 6 bis 7 m gemessen.

Die bei dieser Orkanflut erstmalig beobachteten, für die Nordseeküsten außergewöhnlichen Sturmfluterscheinungen gaben, obgleich die deutsche Nordseeküste nicht unmittelbar betroffen worden war, Veranlassung, die für die bisherige Bemessung der deutschen Seedeiche maßgebenden Sturmfluthöhen und Wellenaufaufwerte zu überprüfen (9, 18, 19, 31).

Die sehr schwere Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 lag mit ihrem Schwerpunkt über der gesamten Deutschen Bucht (35). Entlang der deutschen Küste wurden die bisher gültigen höchsten Tidehochwasser (HHThw) zwischen Wangerooge und den Nordfriesischen Inseln fast überall überschritten (34). Diese außergewöhnlich hohen Wasserstände sind eingetreten, obwohl die mittlere Windgeschwindigkeit in der Deutschen Bucht mit 23,4 m/s keinen Größtwert darstellte. Von anderen sturmflutzerzeugenden Stürmen sind schon wesentlich höhere mittlere Windstärken beobachtet worden, z. B. bei der Sturmflut vom 10. Februar 1949 mittlere Geschwindigkeiten von 30 m/s (7). Somit hat die Februar-Sturmflut 1962 erwiesen, daß außergewöhnlich hohe Wasserstände auch dann eintreten können, wenn die Windstärke in der Deutschen Bucht keine Größtwerte erreicht.

Neben der Stärke und Richtung des Sturmes müssen als für die Sturmflut 1962 maßgebende meteorologische Faktoren seine große Böigkeit, seine lange Dauer und die große Ausdehnung sowie die Einheitlichkeit des Sturmfeldes angesehen werden (7, 36).

Durch diese Windverhältnisse allein können jedoch die eingetretenen extremen Wasserstände an der deutschen Nordseeküste (in der Elbe bei Schulau erreichten sie einen Größtwert

Tabelle 1
Wasserstände an den deutschen Küstenpegeln

Pegel	MThw 1951/60	HHThw bis 1961	Spalte 3 bis Spalte 2	HThw 16./17. 2. 1962	Spalte 5 bis Spalte 2	Spalte 5 bis Spalte 3
1	2	3	4	5	6	7
List	569	854 (1916)	+ 285	865	+ 296	+ 11
Husum	648	1009 (1916)	+ 351	1021	+ 373	+ 12
Tönning	651	1002 (1825)	+ 351	1021	+ 370	+ 19
Büsum	646	1005 (1825)	+ 359	994	+ 348	- 11
Cuxhaven	638	966 (1825)	+ 328	996	+ 358	+ 30
Bremerhaven	664	1004 (1825)	+ 340	1035	+ 371	+ 21
Wilhelmshaven	665	1006 (1825)	+ 341	1022	+ 357	+ 16
Norderney	611	896 (1906)	+ 285	912	+ 301	+ 5
Emden	631	1018 (1906)	+ 387	976	+ 345	- 42
Borkum	594	882 (1906)	+ 288	882	+ 288	± 0
Helgoland	577	801 (1936)	+ 224	(860)	+ 283	+ 59

Zu Ziff. 2 und 3: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch — Küstengebiet der Nord- und Ostsee 1961 (1962).

Zu Ziff. 5: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch — Küstengebiet der Nord- und Ostsee 1962 (1963) — Das HHThw 1825 wurde in Büsum und Emden nicht erreicht.

von 4,30 m über MThw) (34) nicht erklärt werden. So hat das Einlaufen einer 90 cm hohen Fernwelle aus dem Atlantik in die Nordsee wesentlich zur Erzeugung der Maximalwerte beigetragen (14).

Wenngleich die auf Grund der Erfahrungen aus den schweren Sturmfluten von 1949 und 1953 für die Festsetzung der Seedeichhöhen abgeleiteten Bemessungswasserstände an der deutschen Nordseeküste an keiner Stelle von den Scheitelwasserständen der Februar-Sturmflut 1962 erreicht oder überschritten wurden [Tab. 1 u. 2, (7, 21, 28)], war es notwendig, die Frage, ob die bis dahin angewendeten Bemessungswerte weiterhin als ausreichend angesehen werden können, nochmals eingehend zu prüfen (11, 12, 13, 22, 23, 33).

Tabelle 2

Wasserstände und Bestickhöhen der Deiche

Bezeichnung	MThw	HHThw	Bemessungs- wasserstand cm am Pegel	Bestickhöhe des Deiches cm am Pegel	Bemerkungen
	cm am Pegel	cm am Pegel			
List/Sylt	571	865	930	—	
Hörnum/Sylt	582	882	950	—	
Südwesthörn	616	946*	1020	1260	* durch Bezug ermittelt
Wittdün/Amrum	607	914	950	1130	
Wyk/Föhr	613	931	990	1190	
Schlüttsiel	638	955	1040	1280	
Arlauschleuse	643	1000	1065	1300	
Pellworm	631	950	1030	1240	
Strucklahnungshörn	639	974	1050	1350	
Husum	649	1021	1080	1300	* durch Bezug ermittelt
Tetenbüllspieker	644	985	1050	1350	
Tönning	651	1021*	1060	1250	
Friedrichstadt	660	1035	1180	1230	} künftig 2. Deichlinie
Nordfeld	661	1050	1180	1230	
Hedwigenkoog	646	992	1030	1340	
Büsum	648	1005	1030	1320	
Wöhrden	657	1015	1030	1220	} künftig 2. Deichlinie
Meldorf	658	1029	1050	1380	
Barlt	659	1042	1050	1380	
Friedrichskoog	643	1002	1030	1380	
Cuxhaven	640	996	1046	1290	
Spieka-Neufeld	645	996	1046	1200	
Blexen	652	1035	1085	1280	
Fedderwardersiel	654	1025	1075	1230	
Eckwarderhörn	665	1013	1082	1340	
Schweiburg	669	1075	1144	1360	
Wilhelmshaven	667	1022	1077	1210	
Hooksiel	633	965	1034	1230	
Schillighörn	625	953	1017	1280	
Harlesiel	636	963	1027	1180	
Neuharlingersiel	633	981	1041	1240	
Bensersiel	632	977	1041	1200	
Ackungersiel	626	1000	1050	1230	
Norddeich	615	969	1038	1280	
Leybuchtziel	623	984	1034	1280	
Knock	621	996	1060	1300	
Emden	631	1018	1082	1300	
Pogum	636	1024	1088	1350	

III. Maßgebende Sturmfluterscheinungen für die Bemessung der Seedeichhöhen

A. Allgemeines

Bei Sturmflut werden die Seedeiche vor allem durch hohe Wasserstände, Wellenauflauf und Wellenüberschlag sowie Brecherstoß der Wellen auf die Außenböschung beansprucht. Die Wasserstandshöhe bewirkt je nach Höhe und Zeitdauer eine temporäre Durchfeuchtung des Deichkörpers, wodurch dessen Festigkeit verändert werden kann. Vom jeweiligen Wasserstand am Deich ist ferner die Größe des Wellenauflaufes und -überschlages abhängig. Die Größe der Wellenbewegung am Deich und die Stärke des Brandungsstoßes werden von den Seegangselementen im Vorfeld des Deiches gesteuert. Die dort herrschende Wellenhöhe, -länge, -periode und -richtung ist — außer von den aus der offenen See anlaufenden Wellen — abhängig von der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung und der im Vorfeld des Deiches bestehenden Morphologie des Geländes (Grünland, Watt, vorgelagerte Inseln oder Sandbänke).

Die genannten Sturmfluterscheinungen sind miteinander eng verflochten; zum Teil verstärken sie sich, zum Teil vermindern sie sich gegenseitig. Hierin liegt die Schwierigkeit, die Wirkungen der einzelnen Erscheinungen im Ablauf einer Sturmflut zu analysieren. Dies ist offenbar bisher der Grund dafür gewesen, daß Folgerungen aus Sturmflutschäden für eine grundlegende Verbesserung von Seedeichprofilen nur zögernd erreicht werden konnten.

Welche deichbautechnischen Erkenntnisse aus den Untersuchungen über die schweren Sturmfluten von 1949, 1953 und 1962 durch die Arbeitsgruppe „Sturmfluten“ gewonnen werden können, soll nachstehend dargelegt werden.

B. Seegang im Vorfeld des Seedeiches

Vor der Sturmflut vom 9./10. Februar 1949 sind die Seegangsverhältnisse im Vorfeld des Seedeiches und die hieraus zu ziehenden Folgerungen für die Bemessung der Seedeiche kaum beachtet worden. Es wurden zwar bei notwendigen Deichverstärkungen zwecks Verminderung der Wellenstoßwirkung auf die Deichböschung teilweise flachere Außenböschungen angeordnet, in der Hauptsache widmete man aber der Deichhöhe größere Aufmerksamkeit. Mußte diese vergrößert werden, dann erhöhte man vielfach die Deichkappe, ohne den Deichkörper selbst zu verändern. Die somit entstehenden steilen Böschungen im oberen Bereich des Deiches führten naturgemäß zu verstärktem Wellenstoß.

Die nach der Sturmflut 1949 von SCHELLING bearbeitete Untersuchung der Sturmfluten an der Westküste Schleswig-Holsteins (37) befaßte sich auch noch nicht mit den Seegangsverhältnissen im Vorfeld des Seedeiches und mit ihrem Einfluß auf das Deichprofil. In der Stellungnahme der Arbeitsgruppe „Sturmfluten“ zum SCHELLINGSchen Bericht wurde gleichfalls auf die Seegangsverhältnisse in Beziehung zur Profilgestaltung der Seedeiche nicht eingegangen.

Erst die Sturmflut vom 1. Februar 1953 (Hollandflut) gab den Anstoß, die Auswirkungen des Seeganges im Deichvorfeld auf die Seedeiche zu erörtern. Gelegentlich der beiden Bereisungen von Mitgliedern der Arbeitsgruppe „Sturmfluten vom 1. Februar 1953“ in das niederländische Katastrophengebiet im Juli und Dezember 1953 wurden diese Fragen angeschnitten. HUNDT (10) berichtete:

„... Im übrigen waren über Wellenhöhen auf See und zwischen den Inseln und über den Wellenauflauf an den Deichen weder eindeutige Beobachtungen noch abgeschlossene Vorstellungen zu erfahren. Unsere Gastgeber beschränkten sich auf den Hinweis auf die laufenden Ermittlungen und die Versuche im Delfter Laboratorium.“

Auf Grund eigener Überlegungen kommt HUNDT zu dem Ergebnis, daß bei Luv-Deichen flache Vorlandtiefen (Wassertiefe auf 0,5 km vor dem Deich weniger als 8 m bei HHThw 1953) einen dämpfenden Einfluß auf die Wellenbewegung am Deich hatten; große Vorlandtiefen (mehr als 8 m) dagegen hatten erhöhte Wellenbewegung am Deich zur Folge. Hierbei spielt die verfügbare Streichlänge des Windes in Richtung des Sturmsektors offenbar keine ausschlaggebende Rolle auf den Wellenangriff am Deich. Die sturmabgewandten Deiche (Lee-Deiche) waren ebenfalls einem erheblichen Seegang durch Dünung mit vermutlich vielfältigsten Interferenzerscheinungen ausgesetzt.

Auch bei der zweiten Bereisung im Dezember 1953 wurden keine genaueren Angaben über die Seegangsverhältnisse vor den Deichen gemacht. Hierzu ist im Bereisungsbericht vom 22. 1. 1954 (16) ausgeführt:

„Professor Dr.-Ing. HENSEN fragte nach den bei der Sturmflut beobachteten Wellenhöhen. Genaue Auskunft konnte nicht erteilt werden, da die höchsten Wasserstände in der Nacht aufgetreten sind und die Bevölkerung mit Rettungsarbeiten beschäftigt war. Man beabsichtigt jetzt, besondere Einrichtungen zur Messung von Wellenhöhen zu schaffen. Unmittelbar vor der Küste sollen die Wellenhöhen 4 bis 5 m betragen haben. Über die Perioden konnten keine näheren Angaben gemacht werden. Es wurde nur erwähnt, daß sie lang waren.“

Weiter wurde festgestellt, daß der Wellenauflauf auf das Deckwerk auf der Insel Goeree durch den 3 bis 4 km breiten sehr flachen Seegrund (— 1,0 bis — 2,0 m NAP) zweifellos gedämpft worden ist.

Diese mageren Angaben konnten keine Grundlage für eine Beurteilung der Seegangsverhältnisse vor den Seedeichen bei der Sturmflut von 1953 geben. Daher mußte sich die Arbeitsgruppe „Sturmflut vom 1. Februar 1953“ in ihrer am 11. 3. 1954 den Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder Schleswig-Holstein und Niedersachsen übergebenen Stellungnahme auf die Empfehlung beschränken, das Studium der Sturmfluten in ihren physikalischen Zusammenhängen nachhaltig zu fördern. Welche Fragestellungen hierbei vordringlich bearbeitet werden sollten, ist in der Niederschrift über die Sitzung der Arbeitsgruppe am 11. 2. 1954 ausgeführt (17). Dort heißt es:

„Da für die vorliegende Aufgabe nicht nur die Wasserstände bei den Sturmfluten eine Rolle spielen, sondern auch die Auflauhöhen der Wellen, ergeben sich im einzelnen folgende Fragestellungen:

1. Wie groß ist der Wellenauflauf auf einem Seedeich in Abhängigkeit von den Wellenelementen (Höhen, Perioden) und von den Bauweisen der Deiche (konkav oder konvex, Deckungsart)?
2. Welche Wellen können in Höhe und Periode maximal vor dem Deich eintreten? Die Bedeutung der Antwort auf diese Frage liegt in der Tatsache, daß die Periode und die Höhe der Wellen den Wellenauflauf bestimmen und ihrerseits von der Morphologie des Vorstrandes abhängen.
3. Welcher stärkste Wind kann aus den einzelnen Richtungen und von welcher Dauer vorkommen?
4. Welcher größte Windstau kann an den einzelnen Küstenpunkten als Funktion der Wassertiefe, der Tidephase und von örtlichen Einflüssen anderer Art vorkommen?
5. Wie ist der wirkliche Vorgang der Wasservertriftung bei Sturm?
6. Gibt es feststellbare säkulare Änderungen in den Windverhältnissen und in den allgemeinen meteorologischen und ozeanographischen Voraussetzungen?
7. Wie wirken die einzelnen vorgenannten Erscheinungen bei jeweils maximalem Auftreten aufeinander ein oder mit anderen Worten: darf jeder einzelne Bestandteil einfach mit den übrigen superponiert werden? (Z. B. nimmt der Windstau mit zunehmender Wassertiefe ab, während die mögliche Wellenhöhe und damit die Auflauhöhe auf den Deich gleichzeitig zunimmt.)“

Diesen Anregungen folgend, hatten die Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder Schleswig-Holstein und Niedersachsen dem Franzius-Institut der Technischen Hochschule Hannover die Ausführung von Modellversuchen über den Wellenauflauf an Seedeichen im Wattengebiet und zur Bestimmung des Einflusses der Form eines Seedeiches auf die Höhe des Wellenauflaufes übertragen. Die Versuchsergebnisse sind in den Mitteilungen des Franzius-Instituts veröffent-

licht (5, 6). Ebenso wurden, den vorstehenden Anregungen folgend, von verschiedenen an der Küste arbeitenden Bauämtern und Dienststellen sowie von einzelnen Forschern Beobachtungen und Untersuchungen zur Klärung der Seegangsverhältnisse im Vorfeld der Seedeiche ausgeführt (11, 25, 30, 41).

Die Sturmflutkatastrophe in den Niederlanden vom 1. Februar 1953 hatte den für den Küstenschutz zuständigen Verwaltungen der Küstenländer Veranlassung gegeben, den Deichschutz an der deutschen Nordseeküste auf seine Sicherheit zu überprüfen. Hierbei ergab sich, daß ein großer Teil der Seedeiche nach den Erfahrungen aus den vorangegangenen schweren Sturmfluten nicht mehr den modernen Sicherheitsforderungen genügte. Vom Küstenausschuß Nord- und Ostsee wurden nach sorgfältigen Überlegungen neue Grundlagen für die Bemessung der Seedeiche erarbeitet und veröffentlicht (19). Unter Berücksichtigung der inzwischen gewonnenen Erkenntnisse wurden in den folgenden Jahren die Seedeiche an der deutschen Nordseeküste ausgebaut und verstärkt (31).

Während diese Deicherhöhungs- und -verstärkungsarbeiten noch liefen, trat die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 ein. Diese schwere Sturmflut war eine Bewährungsprobe für den Küstenschutz, indem sie erwies, welche Schutzwerke den Angriffen der See nicht standgehalten haben, und andererseits zeigte, wie die Schutzwerke etwa gestaltet sein müßten, um auch schweren Angriffen widerstehen zu können.

Die aus dieser Sturmflut an der deutschen Nordseeküste gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse wurden von zwei Sonderarbeitsgruppen des Küstenausschusses Nord- und Ostsee ausgewertet. Zur Frage der Seegangsverhältnisse im Deichvorfeld konnte die Sonderarbeitsgruppe „Sturmfluten“ in ihrem „Ergebnisbericht 1“ nur feststellen, daß auch heute noch keine ausreichenden Unterlagen vorliegen, die es gestatten, die Deichabmessungen so zu bestimmen, daß sie die angreifenden Brandungskräfte schadlos abwehren können (23). Die von der Arbeitsgruppe „Sturmfluten“ bereits mehrfach erhobene Forderung, eine intensive Seegangsforschung zu betreiben, um die Ausarbeitung geeigneter Verfahren zur Ermittlung des maßgebenden Seeganges und Wellenauflaufes unter verschiedenen meteorologischen, hydrographischen und morphologischen Verhältnissen zu ermöglichen, wurde in dem Ergebnisbericht wiederholt.

C. Wellenbewegung am Seedeich

Die Größe des Wellenauflaufes bei Sturmfluten wird schon seit langer Zeit aus der Lage der Treibsel- oder Flutkanten auf der Außenböschung der Seedeiche bestimmt und für die Festlegung der Deichhöhen ausgewertet. Die so aus der unmittelbaren Beobachtung über lange Zeiten gewonnenen Werte geben ein einigermaßen zutreffendes Bild der Wellenerscheinungen an dem betreffenden Beobachtungswert, so daß man sich mit diesen Erfahrungswerten für die Bestimmung der Deichhöhe bei notwendig gewordenen Deicherhöhungen begnügte. Auch SCHELLING ging in seinem Bericht über die Sturmfluten an der Westküste Schleswig-Holsteins (37) auf den Wellenauflauf an Seedeichen nur am Rande ein. Bei der Festsetzung der Deichhöhen rechnete er an den Festlandsdeichen allgemein mit einem Wellenauflauf von 2 m und bei den Inseldeichen von 1,5 m über dem ermittelten HHThw.

Die Notwendigkeit einer rechnerischen Ermittlung der Wellenauflaufhöhe an Seedeichen ergab sich erst, als die schweren Sturmfluten von 1953 und 1962 die Frage nach dem „maßgebenden Wellenauflauf“ (9) für die Profilstellungen von zu erhöhenden und vor allem von neu zu bauenden Seedeichen stellten.

Wie im Abschnitt B bereits gesagt wurde, konnten über den Wellenauflauf an Seedeichen beim Besuch des Katastrophengebietes in den Niederlanden nur unzureichende Angaben in

Erfahrung gebracht werden. Beachtlich ist, daß die bei dieser Sturmflut eingetretenen zahlreichen Deichbrüche in erster Linie durch hohen Wellenauflauf mit überschlagenten Wellen, durch überströmendes Wasser und Durchnässung der Deiche bewirkt worden waren (10). Der Wellenstoß auf die Deichböschungen hatte zwar vielerorts schwere Beschädigungen verursacht, aber nicht zu Deichbrüchen geführt.

Über die Wellenstoßschäden am Abschlußdamm der Zuiderzee ist folgendes festgestellt worden (16):

„Das stärkste an der Nordseeküste vorhandene Verteidigungswerk, der 1932 fertiggestellte Zuiderzee-Damm, hat verhältnismäßig weit abseits vom Zentrum des Sturmangriffs am 1. 2. 1953 und außerdem im Schutze der Inseln Texel und Vlieland gelegen. Die höchsten Wasserstände lagen hier auf etwa + 3,75 m NAP, also etwa 30 bis 50 cm niedriger als im Zentrum des Sturmangriffs. Der Damm ist nach holländischem Verfahren an der flach nach oben gewölbten Außenböschung fast bis zur Krone durchweg mit schweren Basaltsäulen gepflastert. An der Stelle des vermuteten stärksten Wellenangriffs hat man statt der Basaltsäulen schwere kubische Blöcke aus belgischem Basalt (bis zu 750 kg Gewicht je Einzelpflasterstein) eingebaut. Die Krone des Dammes liegt auf + 7,50 m NAP. Trotz der großen wellenvernichtenden Kraft des Pflasters sind nicht nur auf weiten Strecken die Wellen über die Dammkronen geschlagen und haben hier auf der Innenböschung beträchtliche Auswaschungen zur Folge gehabt, sondern es sind auch in der Pflasterdecke selbst, besonders durch Hinausschlagen der belgischen Basaltblöcke — die teilweise auf der Binnenböschung gelandet sind — Schäden entstanden.“

Die Erfahrungen bei der Sturmflut vom 1. 2. 1953 in den Niederlanden und die bisherigen Untersuchungen der Arbeitsgruppe „Sturmflut vom 1. Februar 1953“ haben bezüglich des Wellenaufbaus an Seedeichen ergeben, daß die Deichkrone so hoch gelegt werden sollte, daß kein häufiges und starkes Überschwappen der Wellen über den Deich eintritt. Dabei sind die örtlichen Gegebenheiten (Vorlandhöhe und -breite, Buchteneffekt usw.) zu berücksichtigen. Da jedoch gegenwärtig noch keine Zahlenwerte für einen maximalen Wellenaufbau ermittelt werden können, muß der Deichquerschnitt so ausgebildet werden, daß der Deich auch bei Wellenüberschlag standsicher bleibt. Dafür ist vor allem erforderlich, daß die Binnenböschungen der Seedeiche flacher als bisher auszubilden sind (31). Als weitere wirksame Vorkehrung für die Verminderung des Wellenaufbaus an scharliegenden Deichen kommt die Gewinnung von Vorland in Betracht. Auf die im Abschnitt B bereits erwähnte Empfehlung für die Ausführung von Modellversuchen über den Wellenaufbau (5, 6) sei hier nochmals hingewiesen.

Endlich sei aus dem Reisebericht der Arbeitsgruppe „Sturmflut vom 1. Februar 1953“ (16) noch folgende Erklärung zitiert:

„Die Tatsache, daß weitaus die meisten Sturmschäden an der Leeseite eingetreten sind und hier die Höhe und der Unterhaltungszustand der Deiche vielleicht zu wünschen übrig ließen, hat in Deutschland vielfach zu der Auffassung geführt, daß angesichts des allgemein guten Unterhaltungszustandes der deutschen Seedeiche hier wenig Anlaß zu Besorgnissen hinsichtlich der Sicherheit der deutschen Küstenländer bei einer ähnlichen Sturmflut wie in Holland gegeben sei. Die von uns besichtigten Schadenstellen a) auf Goeree und b) am Abschlußdamm der Zuiderzee — welche sicherlich nicht die einzigen sind — widerlegen diese Auffassung.“

Für die nach der Sturmflut von 1953 begonnene Verstärkung der Seedeiche an der deutschen Nordseeküste hatte die Arbeitsgruppe „Küstenschutz“ eine kurzgefaßte Auswertung der bisher gewonnenen Erfahrungen bearbeitet, in der zur Frage des Wellenaufbaus wie folgt Stellung genommen ist (19):

„Die Forderung nach einer Deichhöhe, die für jeden denkbaren Sturmflutwasserstand einschließlich Wellenaufbau mit Sicherheit ausreicht, kann ... nicht länger aufrechterhalten werden, weil sie zu Deichabmessungen führen würde, die wirtschaftlich nicht zu ermöglichen sind. Man muß deshalb ernsthaft überlegen, die Seedeiche im allgemeinen so auszubilden, daß sie bei höchsten Sturmfluten ein Überschwappen der Wellen ohne Gefahr ihrer Zerstörung vertragen. Das Wasser darf allerdings nicht über die Deichkrone ‚strömen‘.“

Bestimmend für die Wellenauflaufhöhe sind die örtlichen Verhältnisse und die Bauweise des Deiches, insbesondere

die Lage des Deiches zur Windrichtung,
die Geländeverhältnisse vor dem Deich (Höhe und Breite von Watt und Vorland),
die Böschungsgestalt (flach, steil, eben, konkav, konvex),
die Oberflächenrauigkeit (Grasnarbe, Bitumen- oder andere Deckwerke).“

Wegen dieser verschiedenartigen Einflüsse können allgemeingültige Angaben für die größte Wellenauflaufhöhe nicht gemacht werden. Es wird dringend empfohlen, die Größe des Wellenauflaufes in der Natur an besonders hierfür ausgesuchten Stellen zu beobachten. Dabei sind u. a. zweckmäßig folgende Beobachtungen anzustellen:

1. Messen der auf dem Vorland oder dem Watt auftretenden Wellenhöhen (Pfahlpegel, Tassenpegel).
2. Beobachtung der Wellenperiode.
3. Messen der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung.
4. Einmessen der Treibsel-Grenzen nach höheren Fluten.

Die bei der Hollandflut 1953 gewonnenen Erfahrungen über die Auswirkung der Wellenbewegung an Seedeichen sind allgemein bei der Februar-Sturmflut 1962 wieder bestätigt worden. Auch 1962 sind die an der deutschen Nordseeküste eingetretenen Deichbrüche vor allem durch Wellenüberschlag in Verbindung mit der Zerstörung der Binnenböschung verursacht worden. Der Wellenstoß auf die Außenböschung hat zwar teilweise sehr schwere Schäden hervorgerufen, die aber nicht unmittelbar zu Deichbrüchen geführt haben. Zur Verminderung der Schäden durch Wellenstoß haben sich flache Außenböschungen, besonders im Bereich der Sturmflutscheitelwasserstände als zweckmäßig erwiesen. Die Erfahrungen aus dieser Sturmflut 1962 sind von der Arbeitsgruppe „Küstenschutzwerke“ als „Empfehlungen für den Deichschutz nach der Februar-Sturmflut 1962“ veröffentlicht worden (22); theoretische und experimentelle Untersuchungen über den Wellenstoß wurden neuerdings im Franzius-Institut der Technischen Universität Hannover durchgeführt, mit dem wichtigen Ergebnis, daß die Wellenstoßbelastung sofort schlagartig abnimmt, wenn der Brecher Rücklaufwasser auf der Böschung vorfindet. Hierdurch ist die Notwendigkeit einer flachen Außenböschung begründet (3).

D. Der für die Bemessung der Seedeichhöhe maßgebende Sturmflutwasserstand

1. Bisherige Verfahren für die Bestimmung eines Bemessungswasserstandes

Aus der ersten Sitzung der Arbeitsgruppe „Küstensenkung, Wasserstandshebung und Sturmfluten“ (Leiter Min.Rat GAYE) am 14. 3. 1950 in Hamburg wurde für die Bearbeitung der Frage, „ob in Zukunft höhere und häufigere Sturmfluten zu erwarten sind“, die Untergruppe „Sturmfluten“ (Leiter Oberreg.Rat HORN) gebildet, der als erste Aufgabe die Erstattung einer Stellungnahme zu der von SCHELLING aufgestellten Untersuchung über die Sturmfluten an der Westküste von Schleswig-Holstein (37) vom Küstenausschuß Nord- und Ostsee übertragen wurde. Die Anfang Februar 1951 der Landesregierung Schleswig-Holsteins zugestellte Stellungnahme der Untergruppe „Sturmfluten“ zu den Untersuchungen von SCHELLING ist bisher nicht veröffentlicht worden. Wegen der in ihr enthaltenen grundlegenden Ausführungen erscheint es geboten, die Gedanken zur Frage der Ermittlung eines Verfahrens für die künftige Bemessung der Seedeichhöhen nachstehend wiederzugeben.

Stellungnahme der Untergruppe „Sturmfluten“, Küstenausschuß „Nord- und Ostsee“, zu der Untersuchung von Reg.Baurat SCHELLING über die Sturmfluten an der Westküste Schleswig-Holsteins

Die Landesregierung Schleswig-Holstein, Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Wasserwirtschaftsverwaltung, hat den Küstenausschuß Nord- und Ostsee mit Schreiben III 49—WaWi/954 vom 12. 4. 1950 um Stellungnahme zu der von Reg.Baurat SCHELLING bei der Landesstelle für Gewässerkunde (Kiel) verfaßten Untersuchung über „Die Sturmfluten an der Westküste Schleswig-Holsteins unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse am Pegel in Husum“ gebeten. Im Beisein des Leiters des Arbeitsausschusses trat darauf die Untergruppe „Sturmfluten“ unter Vorsitz von Oberreg.Rat HORN am 27. 7. 1950 zu einer Sitzung beim Deutschen Hydrographischen Institut, Hamburg, erweitert wie folgt zusammen:

Min.Rat GAYE (Leiter des Arbeitsausschusses, Hamburg),
 Reg.Baurat SCHELLING (Landesstelle für Gewässerkunde, Kiel),
 Dipl.-Ing. HUNDT (Marschenbauamt Heide, Pegelaußenstelle Büsum),
 Oberreg.Baurat Dr.-Ing. LÜDERS (Wasserwirtschaftsamt Varel, Außenstelle Wilhelmshaven),
 Reg.Direktor Prof. Dr. SEILKOPF (Meteorologisches Amt für Nordwestdeutschland, Hamburg),
 Oberreg.Rat HORN (Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg),
 Oberreg.Rat Dr. HANSEN (Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg),
 Reg.Rat Dr. TOMCZAK (Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg).

Das Ergebnis der Besprechung, welche sich an einen Vortrag von Reg.Baurat SCHELLING über seine Untersuchung anschloß, wird folgendermaßen zusammengefaßt:

1. Die Untersuchung enthält eine dankenswerte Zusammenstellung detaillierter Angaben über den Verlauf einer größeren Anzahl von Sturmfluten sowie der zugehörigen amtlichen Wetterberichte und auszugsweise auch der Wetterkarten. Für weitere Untersuchungen wird damit eine anregende Materialsammlung geboten, wie sie in dieser Reichhaltigkeit bisher nicht geschlossen vorlag. Manche Größen, wie z. B. Oberflächengefälle bei Sturmfluten, werden hier wohl zum erstenmal bequem zugänglich gemacht. Natürlich unterliegen einzelne Deutungen (z. B. auch die Anlagen 3 b und 19 b) der Kritik, aber das beeinträchtigt keineswegs das große Verdienst dieser umfangreichen Zusammenstellung.
2. Die Untersuchung zielt auf eine Ermittlung des höchstmöglichen Wasserstandes am Pegel Husum und gibt diesen zu 5,50 m NN an. Dieser Wert wurde nach den aus beobachteten Sturmfluten ermittelten Größen und Zusammenhängen abgeleitet. Dabei sind drei verschiedene Verfahren angewendet worden:
 - a) Addition des bisher größten einwandfrei beobachteten Windstaus über astronomisch vorausgerechnetem Hochwasserstand (3,59 m im Jahre 1916) zu dem in den Sturmflutmonaten Oktober bis März astronomisch höchstmöglichen Hochwasserstand (1,93 m NN).
 - b) Rekonstruktion der besonders schweren Sturmflut von 1825 nach damaligen Windangaben mittels der jetzt abgeleiteten „Windstaubezugskurve“ für Husum und nach den amtlichen Angaben über die Sturmflutwasserstände von 1825 in Büsum und Tönning.
 - c) Konstruktion einer Sturmflutkurve für die Wetterlage der Sturmflut vom 9./10. 2. 1949 unter der Annahme einer besonders ungünstigen astronomisch vorausgerechneten Hochwasserzeit; Zusammensetzen des Sturmflutanstiegs abschnittsweise aus den bei anderen Sturmfluten unter ähnlichen Bedingungen beobachteten Tidenstiegen bei Annahme eines plausiblen Niedrigwasserstandes.

Die beiden letztgenannten Konstruktionen enthalten zu viele Unsicherheiten, als daß ihnen eine unabhängige Beweiskraft zugestanden werden könnte. Das erste Verfahren ist dagegen sehr einfach, seine Voraussetzungen sind infolgedessen übersehbar, und es werden nur zwei klar definierte Größen verwendet. Das Ergebnis bestätigt den bisher überschläglich als größten Windstau beim Hochwasser angenommenen Wert von etwa 3,5 m. Die Abschätzung des größtmöglichen Hochwasserstandes am Pegel Husum zu 5,50 m NN ist wesentlich sorgfältiger begründet als entsprechende Angaben in anderweitigen bisher bekanntgewordenen Arbeiten.

Keine zuverlässig beobachtete Sturmflut hat diese Höhe bisher überschritten, und keine von ihnen, auch nicht die Sturmflut vom 9./10. 2. 1949 gibt in ihrem Verlauf unmittelbare Anzeichen, daß der Wasserstand von 5,50 m NN bei ungünstigeren astronomischen Bedingungen überschritten worden wäre. Dieser Wasserstand darf daher als eine mit großer Wahrscheinlichkeit gültige obere Schranke für die Sturmfluthöhen am Pegel Husum angesehen werden.

3. Damit besteht allerdings weder eine unbedingte Gewähr, daß der Wasserstand von 5,50 m NN am Pegel Husum niemals überschritten werden wird, noch andererseits die Gewißheit, daß er wirklich eintreten kann. Der Wert 5,50 m NN ist unter vereinfachenden Voraussetzungen abgeleitet; ein so verwickeltes Problem wie das der Sturmfluten an der Küste eines natürlichen Gezeitengebiets kann vorläufig nicht anders angegriffen werden. Man muß sich aber die (ausgesprochen oder unausgesprochen) vorgenommenen Vereinfachungen gegenwärtig halten, wenn man die Tragweite eines so gefundenen Ergebnisses beurteilen will.

a) Der angenommene Wert des astronomisch höchstmöglichen Hochwasserstandes am Pegel Husum (1,93 m NN) kann als ziemlich gut gesichert gelten. Er tritt nur selten ein, die Wahrscheinlichkeit des Zusammentreffens mit einer Sturmflut ist dementsprechend gering. Da andererseits das mittlere Springhochwasser 1,6 m NN beträgt und astronomische Hochwasserstände von 1,8 m NN schon ziemlich häufig vorkommen, spielen die astronomischen Ungleichheiten bei der Frage nach dem höchstmöglichen Wasserstand nur eine untergeordnete, wenn auch keineswegs zu vernachlässigende Rolle; entscheidend ist der Windstau.

Der als maximaler Windstau beim Hochwasser angenommene Wert von 3,59 m ist in der 45jährigen Beobachtungsreihe von 1906 bis 1950 nur einmal aufgetreten und wurde anscheinend auch in dem erweiterten Zeitraum bis 1825 zurück höchstens erreicht, aber nicht überschritten. Anzunehmen, daß größere Werte auch künftig nicht auftreten werden, bedeutet jedoch eine Extrapolation, welche sich allein aus der Statistik der Sturmfluten nicht begründen läßt. Man kann nur sagen, daß Windstauwerte von 3,6 m oder mehr beim Hochwasser offenbar „seltene Ereignisse“ darstellen; die Unterlagen reichen aber nicht aus zur Ableitung einer Wahrscheinlichkeit für das Auftreten dieser Ereignisse (etwa der durchschnittlich im Jahrhundert zu erwartenden Anzahl). Unsicherheiten dieser Art sind notwendig mit jedem Rückgriff auf eine Statistik verbunden. Streng gültige Grenzen lassen sich, wenn überhaupt, nur auf physikalischen Überlegungen begründen.

b) Die Feststellung, daß unter gleichen meteorologischen Bedingungen der Windstau beim Hochwasser merklich geringer ist als beim Niedrigwasser, kann als allgemeine Erfahrung bestätigt werden, die auch bereits numerisch untersucht und theoretisch wohl verständlich ist. Die Sturmflut vom 9./10. 2. 1949, bei der das Windstaumaximum und damit das Hochwasser etwa auf die astronomisch vorausberechnete Niedrigwasserzeit fiel, würde also beim Zusammentreffen des Windstaumaximums mit dem astronomisch vorausberechneten Hochwasser aller Wahrscheinlichkeit nach nicht die vielfach befürchteten katastrophalen Ausmaße angenommen haben, sondern innerhalb des bisherigen Rahmens der schwereren Sturmfluten geblieben sein. Insofern ist auch dem Ergebnis der oben unter 2 c) genannten Konstruktion zuzustimmen.

Wenn sich aber Gezeiten und Windstau nicht unverändert superponieren, so führt die Berechnung des höchstmöglichen Wasserstandes einfach als Summe des angenommenen höchstmöglichen Windstaus von 3,59 m und des astronomisch höchstmöglichen Hochwassers von 1,93 m NN möglicherweise auf einen zu hohen Wert. Um wieviel zu hoch der resultierende Wert 5,5 m NN nach dieser Betrachtungsweise erhalten wird, kann allerdings bei der Spärlichkeit der Unterlagen wiederum nicht ausgesagt werden.

c) In der Untersuchung wird der Windstau beim Hoch- und Niedrigwasser als abhängig nur von der Richtung, Stärke und Dauer des Windes am Windschreiber Hooge angesehen. Die weitere statistische Bearbeitung führt allerdings eine Aufgliederung nach unterschiedlicher Winddauer nicht durch, sondern beschränkt sich bei der Herleitung der Windstaubezugskurven für Husum auf Winddauern von 6 Stunden (vor dem Hoch- bzw. Niedrigwasser), in der Annahme, daß der Wind innerhalb eines solchen Zeitraumes ungefähr seine größte Wirkung auf den Wasserstand erreicht habe. Diesem Bild stationärer Vorgänge, das nicht in allen Betrachtungen streng beibehalten wird, fügen sich die in der westlichen Ostsee auftretenden Sturmfluten meereskundlich nicht ein; sie können daher nicht zum Vergleich mit den Vorgängen an der Nordseeküste herangezogen werden.

Die Bemerkung, daß die Beziehungen zwischen Luftdruckgradienten über der Nordsee und dem Windstau bei Husum nicht eng genug seien, um die meteorologische Bedingtheit des Windstaus restlos auszudrücken, trifft zu; die Gradientenmethode, welche übrigens nicht auf die Verwendung mittlerer Druckgradienten über der Nordsee beschränkt und in der Untersuchung mißverstanden angewendet ist, bedarf der Ergänzung, an welcher im In- und Ausland gearbeitet wird. Windbeobachtungen von nur einer Stelle, sie sei — wie auch immer — gelegen, reichen jedoch als Unterlage für die Windvorhersage in keiner Weise aus; das hat schon LEVERKINCK (26) an Hand seiner Bezugslinien für Wilhelmshaven erkannt und kann durch viele Beispiele, auch gerade für die Sturmflut vom 9./10. II. 1949, belegt werden. Bedeutsamer jedoch als alle möglichen Ergänzungen der statistischen Unterlagen (Bezugskurven und Mehrfachkorrelationen) ist heute noch immer die Abhängigkeit der Windstauvorhersage von der Wettervorhersage, an deren Genauigkeit ungewöhnliche Anforderungen gestellt werden müssen. Nicht alle nachträglich (bei nunmehr voller Kenntnis des Wetterablaufs) auffindbaren statistischen Beziehungen zwischen dem Windstau und meteorologischen Elementen besitzen einen prognostischen Wert; die Vorhersage ist zu begründen auf dem, was sich vor dem Geschehen in hinreichender Kürze meteorologisch und ozeanographisch erkennen läßt. Daß dies überhaupt mit genügender Trefferwahrscheinlichkeit möglich ist, und zwar wesentlich auf Grund einer Beurteilung der gesamten Wetterlage und sämtlicher Pegelbeobachtungen an der Küste, bedeutet keine Selbstverständlichkeit; die regelmäßigen Wasserstandsvorhersagen für die Deutsche Bucht sind nach mehr als zwanzig Jahren noch immer die einzigen ihrer Art.

Der beobachtete maximale Windstau von 3,59 m beim Hochwasser fügt sich der abgeleiteten Windstaubezugskurve für Husum ohne Zwang ein, was allerdings wegen der geringen Belegung in diesem Teil der Kurve nicht allzuviel besagt. Bei der Frage nach dem größtmöglichen Windstau überhaupt wird man auf die Frage nach den zugehörigen extremen Wetterbedingungen und damit wieder auf eine statistische Ungewißheit, völlig analog der oben unter a) besprochenen, geführt; die Bezugskurve bietet keinen Weg zur Umgehung dieser Schwierigkeit. Entgegen der ausgesprochenen Vermutung kann eine Wetterlage, bei welcher sich an der Nordseeküste 72 Stunden lang Winde der Stärke 8 und mehr aus den gefährlichen Richtungen SW bis N ergeben, nicht als ausgeschlossen angesehen werden. Über die Wahrscheinlichkeit eines solchen Falles erlaubt auch die meteorologische Statistik noch keine Aussage.

Ebensowenig kann etwas über künftige Klimaschwankungen und deren Auswirkung auf die Häufigkeit und Dauer der Stürme ausgesagt werden. In großen Zügen war das Klima Mittel- und Westeuropas im ersten Drittel des 19. Jahrhunderts kontinentaler, etwa von der Mitte des vorigen Jahrhunderts ab und besonders seit der Jahrhundertwende maritimer; seit den dreißiger Jahren dieses Jahrhunderts ist es wieder kontinen-

taler geworden. Der maritimen Phase entspricht stärkere zonale, der kontinentalen Phase stärkere meridionale Zirkulation der Atmosphäre. Zur maritimen Phase braucht nicht notwendig eine größere Sturmhäufigkeit und -dauer zu gehören, vielmehr scheinen die Stürme gerade beim Übergang von einer Phase zur anderen etwas häufiger zu sein. Bei großräumig und langwährend starker zonaler Zirkulation ziehen die Sturmzentren schneller, sie können aber auch häufiger aufeinander folgen; bei meridionaler Zirkulation besteht eine Tendenz zu stationären Wetterlagen. Bezüglich der Sturmfluten hat die jüngste Klimaphase unverkennbar ein stärkeres Hervortreten des prognostisch schwierigsten Typs gebracht.

Bei gleichbleibender Stärke und Richtung des Windes wächst der Windstau nicht etwa proportional der Winddauer an, sondern er strebt einem bestimmten Grenzwert zu, welcher den hier vorausgesetzten stationären Zustand kennzeichnet. Dieser Grenzwert hängt im wesentlichen ab von der Größe, Gestalt und Tiefe des Seegebietes sowie von der Windgeschwindigkeit. Die Theorie, welche im Einklang mit meereskundlichen Ergebnissen und kürzlich im Windkanal angestellten Modellversuchen steht, ergibt für einen idealisierten Fall (gezeitenfreier schmaler Kanal konstanter Tiefe mit Dimensionen, welche etwa den Verhältnissen in einem Schnitt senkrecht zur Küste Schleswig-Holsteins entsprechen) und für die größten hier beobachteten Windgeschwindigkeiten einen stationären Stau an der Küste in der Größenordnung von 3,5 m. Eine ähnliche, von holländischer Seite angestellte Berechnung führt für die Südseite der Nordsee auf etwa den gleichen Betrag. Damit dürfte dieser alte Erfahrungswert wahrscheinlich seine physikalische Deutung gefunden haben. Dieses Ergebnis beweist aber natürlich nicht, daß größere Windstauwerte an der natürlichen Küste bei extremen Wetterlagen und instationären Vorgängen unmöglich sind.

- d) Die Auswirkungen eines plötzlich einsetzenden Windes oder einer plötzlichen Luftdruckänderung auf die Wasserstände sind bereits 1924 von englischer Seite theoretisch untersucht worden. Auch diese Untersuchung beschränkt sich der mathematischen Schwierigkeiten wegen auf den Fall eines schmalen, an beiden Enden geschlossenen Kanals konstanter Tiefe und darüber hinaus auf spezielle Ansätze, so daß als Ergebnis keine allgemein übertragbaren Formeln, aber doch einige Hinweise auf die grundsätzliche Beschaffenheit der auftretenden Wasserbewegungen erhalten wurden. In allen behandelten Beispielen wird der schließlich eintretende stationäre Zustand nicht asymptotisch, sondern in einem Einschwingungsvorgang erreicht, bei dem der Windstau zeitweilig um ein Beträchtliches (unter gewissen Umständen bis zum Doppelten) über den endgültigen Wert hinauswächst. Zu ähnlichen Ergebnissen, wenn auch nicht auf Grund einer wirklich strengen Durchrechnung, gelangt eine neuere niederländische Untersuchung, welche sich auch mit dem Fall eines einseitig offenen Kanals etwa von der nord-südlichen Ausdehnung der Nordsee befaßt.

Die britische Untersuchung wurde angeregt durch Beobachtungen bei Liverpool, nach denen schnell veränderliche Wetterlagen wesentlich größere Wasserstandsänderungen im Gefolge hatten als beständigere. An den Küsten der südwestlichen Nordsee ist ein schwingungsartiger Verlauf des Windstaus häufig und auffällig, besonders beim Übergang von beständigen zu veränderlichen Wetterlagen und umgekehrt. In den letzten Jahren wird die Ausbreitung großer Windstauwellen durch die Nordsee an Hand von Küstenbeobachtungen in Zusammenarbeit aller Anliegerstaaten untersucht, den Zeitumständen entsprechend unter ausländischer Initiative. An der Existenz solcher Schwingungen, wie sie bereits eine sehr unvollständige Theorie der instationären Vorgänge fordert, kann also kein Zweifel bestehen. Wetterlagen, bei denen sich typische Vorgänge ungestört er-

mitteln lassen, sind selten, die Bearbeitung der Beobachtungen ist wegen der unerlässlich sorgfältigen Eliminierung der Gezeiten langwierig und umständlich, die Deutung der Befunde mangels einer ausgebildeten Theorie oft schwierig. Erst in jüngster Zeit wurden allgemeine Methoden entwickelt, welche die strenge Durchrechnung charakteristischer Idealfälle, aber immerhin für natürliche Gebiete von nur nicht allzu geringer Tiefe, in den Bereich des Möglichen rücken. Die Vorgänge bei rasch veränderlichen Wetterlagen, in sehr seichten Gewässern und bei Überlagerung der Gezeiten entziehen sich vorerst noch der theoretischen Behandlung. Bei ihrer Deutung ist daher vorläufig noch besondere Zurückhaltung geboten.

Auch in der Deutschen Bucht sind Windstauschwingungen der geschilderten Art seit Jahrzehnten beobachtet, und sie werden, soweit erkennbar, bei den Vorhersagen berücksichtigt. Diesen offenbar großräumig bedingten Vorgängen, welche unabhängig vom örtlichen Wind verlaufen und gewöhnlich nur mäßige Amplituden aufweisen, überlagert sich ein Anteil, der mehr mit dem Wind- und Druckfeld über der Deutschen Bucht und mittleren Nordsee zusammenhängt und der besonders bei größeren Beträgen des Windstaus der entscheidende zu sein pflegt. Daß dieser Anteil offenbar nicht sehr stark zur Ausbildung von Schwingungen über den Grenzwert des stationären Zustandes hinaus neigt und daß er in verhältnismäßig einfachen Korrelationen zu den meteorologischen Elementen steht, muß bis zum Aufbau einer erschöpfenden Theorie als glücklicher Umstand angesehen werden. So selten aber auch instationäre Überhöhungen größeren Ausmaßes sein mögen, sie liegen nach heutigem Wissen auch an der deutschen Küste nicht außerhalb des Möglichen, besonders wenn man noch das verwickelte Zusammenspiel mit den Gezeiten in Betracht zieht. Die Sturmflut vom 9./10. 2. 1949 ist vielleicht überhaupt nur so erklärbar und würde dann wohl den ungünstigsten Vorgang darstellen, der bei der damaligen Wetterlage auftreten konnte.

Besondere Beachtung verdient die theoretische Untersuchung instationärer Vorgänge in geschlossenen Trichtern und Buchten; für diese könnte es individuelle kritische Bildungen geben, bei denen das Wasser innen ungewöhnlich hoch aufläuft.

4. Die Frage nach der größtmöglichen Sturmfluthöhe muß also z. Z. noch offenbleiben. Man sollte daher sinnvollerweise nicht nach der größtmöglichen Sturmfluthöhe schlechthin fragen, sondern nach der Häufigkeit, mit der das Eintreten oder Überschreiten bestimmter Wasserstände zu erwarten ist.

Diese Frage kann in lokaler Betrachtungsweise mit den Mitteln der gewässerkundlichen Statistik behandelt werden, während die Deutung der Resultate sich erst allmählich aus dem Fortschritt der großräumiger arbeiteten Meereskunde ergeben wird. SCHELLING hat in seiner Untersuchung im wesentlichen diesen statistischen Weg eingeschlagen; diese Teile seiner Arbeit wirken am überzeugendsten, und der Ausschuß wünscht Herrn SCHELLING (†) seine Anerkennung auszusprechen für die Sorgfalt und Ausdauer, mit welcher er hierbei verfahren ist.

Eine Wiederholung der gesamten Untersuchung für weitere Orte verspricht nach vorstehendem keine wesentlichen neuen Erkenntnisse. Diese Ansicht wird bestätigt durch eine ausführliche, nach Richtung und Geschwindigkeit des mittleren Windfeldes über der Deutschen Bucht aufgegliederten Tafel der Windstaudifferenzen, welche für die Westküste Schleswig-Holsteins vorliegt und z. B. bei der gefährlichsten Windrichtung durchschnittlich für Cuxhaven einen um einige Dezimeter geringeren Stau erwarten läßt als für Husum. Die Tafel wird auch auf die ostfriesische Küste ausgedehnt. Eine Abschätzung nach dem oben unter 2 a) bezeichneten Verfahren wird jedoch überall da, wo hinreichend lange Beobachtungsreihen vorliegen, eine nützliche Richtgröße liefern.“

Die Untersuchung von SCHELLING ist für die deutsche Nordseeküste der erste Schritt gewesen, die Seedeichhöhe für einen bestimmten Küstenort (hier Husum) auf Grund einer möglichen künftigen Sturmflut, die höher als alle bisher beobachteten Sturmfluten aufläuft, zu bestimmen. Das Eintreten einer derartigen Sturmflut ließ nicht lange auf sich warten, denn schon am 1. Februar 1953 trat ein solches Ereignis an der südwestlichen Nordseeküste ein, von dem — wie bereits erwähnt — besonders die niederländische Küste verheerend betroffen wurde. Die bei jener Sturmflut beobachteten Wasserangriffe auf die Seedeiche gaben den Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder Schleswig-Holstein und Niedersachsen Veranlassung, den Küstenausschuß Nord- und Ostsee mit der Prüfung zu beauftragen, ob die bisher für die Bemessung der Deiche zugrunde gelegten Wasserstände und Brandungsangriffe berichtigt werden müssen.

Die mit dieser Prüfung betraute Sonderarbeitsgruppe „Sturmflut vom 1. Februar 1953“ nahm nach der Besichtigung des niederländischen Katastrophengebietes zur Frage der Sturmflutwasserstände wie folgt Stellung (17):

„Die Erfahrungen bei der Sturmflut vom 1. 2. 1953 in Holland und die bisherigen Untersuchungen der Arbeitsgruppe ‚Sturmflut vom 1. 2. 1953‘ haben ergeben, daß eine ‚größtmögliche Sturmfluthöhe‘ nicht ermittelt werden kann. Es muß damit gerechnet werden, daß infolge des Zusammentreffens besonderer astronomischer, meteorologischer und ozeanographischer Umstände im Zusammenhang mit der säkularen Hebung der Wasserstände in der Nordsee, der Bodensenkung sowie infolge hoher Oberwasserstände, ferner infolge der Änderung der klimatischen Verhältnisse in Zukunft einmal höhere Sturmflutwasserstände eintreten, als nach den heute bestehenden Kenntnissen zu erwarten ist.

Es muß andererseits die Frage aufgeworfen werden, ob es wirtschaftlich tragbar ist, Deiche zu bauen, die nach menschlichem Ermessen niemals überflutet werden können.

Aus diesen Betrachtungen ergeben sich folgende Forderungen:

- a) Die Höhe der Deiche ist ausschlaggebend für die Sicherheit der durch sie geschützten Marschen.
- b) Die Krone der Deiche sollte so hoch gelegt werden, daß bei einem Sturmflutwasserstand, der nach der Wahrscheinlichkeitsrechnung (vgl. WEMELSFELDER, 40) mit einer noch zu bestimmenden Sicherheit unterschritten wird, und unter Berücksichtigung einer angemessenen Höhe für Wellenauflauf kein häufiges und starkes Überschwappen von Wellen über den Deich eintritt. Dabei sind die örtlichen Gegebenheiten (Vorlandhöhe und -breite, Buchteneffekt usw.) zu berücksichtigen.
- c) Da indessen ein Auftreten noch höherer Sturmfluten nicht ausgeschlossen ist, muß der Deichquerschnitt so ausgebildet werden, daß der Deich auch bei häufigem und starkem sowie lang anhaltendem Überschwappen von Wellen standsicher bleibt. Dafür ist erforderlich, die Binnenböschungen der Winterdeiche flacher auszubilden als bisher, damit sie auch bei häufigem Überschwappen von Wellen nicht einrutschen, ...“

Nach eingehenden Beratungen, bei denen insbesondere die Untersuchungen von HUNDT (9) und die rein statistische Methode von WEMELSFELDER (40) für die Bestimmung „maßgebender“ Sturmflutwasserstände erörtert wurden, beantwortete am 11. 3. 1954 die Arbeitsgruppe die an den Küstenausschuß Nord- und Ostsee gerichteten Anfragen der Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder Schleswig-Holstein und Niedersachsen wie folgt (18):

- „1. Es wird empfohlen, einen ‚maßgebenden Sturmflutwasserstand‘ für jede Pegelstelle mit hinreichend langen Beobachtungsreihen nach dem Beispiel von SCHELLING (‚Die Küste‘ 1952, Heft 1) zu ermitteln (Addition des bisher beobachteten größten Unterschieds zwischen dem eingetretenen und dem vorausberechneten Hochwasserstand zum heute höchstmöglichen astronomischen Hochwasser). Hierzu ist gegebenenfalls noch ein Betrag für weiteren säkularen Anstieg der Wasserstände hinzuzufügen. Zu berücksichtigen sind auch die Änderungen, die auf natürlichem oder künstlichem Wege in den Wasserständen hervorgerufen werden.
2. Eine genaue Angabe, mit welcher Wahrscheinlichkeit diese so ermittelten oder ähnlich hohe Wasserstände erreicht oder überschritten werden, läßt sich nicht machen. Einen Anhalt für solche Wahrscheinlichkeit gibt das von WEMELSFELDER (‚De Ingenieur‘ 1939, S. B 31—35) angewendete Verfahren.

3. Es wäre zu begrüßen, wenn das Studium der Sturmfluten in ihren physikalischen Zusammenhängen nachhaltig gefördert würde. Bei der Dringlichkeit, die Nordseeküste zu sichern, und bei der dadurch gegebenen Notwendigkeit zu einer kurzfristigen Beantwortung der an sie gerichteten Anfragen hält es die Arbeitsgruppe jedoch nicht für vertretbar, die Ergebnisse dieser umfangreichen und langwierigen Forschungen abzuwarten.“

Nach diesen Empfehlungen wurden von den vier Küstenländern die Deicherhöhungs- und -verstärkungsarbeiten ab 1953/54 in verstärktem Maße betrieben (9, 19, 20, 27, 31, 32). Bei der Bestimmung des „maßgebenden Sturmflutwasserstandes“ bestehen zwischen der niedersächsischen und der schleswig-holsteinischen Nordseeküste geringe Unterschiede, die im wesentlichen für die Küste Schleswig-Holsteins auf Ergebnissen statistischer Auswertungen von Häufigkeitsbetrachtungen, für die Küste Niedersachsens auf einer Zusammensetzung einzelner maximaler Anteile für das Auftreten hoher Sturmflutwasserstände zu einem Bemessungswert für die Deichhöhe beruhen. Beide Verfahren liefern annähernd gleiche Werte (Tab. 1 und 2).

Die bei der Februar-Sturmflut 1962 an den Pegeln der deutschen Nordseeküste gemessenen höchsten Wasserstände liegen überall unter den „maßgebenden Sturmflutwasserständen“. Insofern war kein Anlaß gegeben, die Frage nach einer Änderung der Bemessungswasserstände zu behandeln. Wenn trotzdem diese Frage erneut aufgegriffen wurde, so deshalb, weil die Februar-Sturmflut 1962 in den oberen Tideströmen und insbesondere in der Elbe bei Hamburg zu extremen Wasserständen sowie zu schweren Verlusten und Schäden geführt hatte.

Bei der eingehenden Erörterung der bisherigen Bemessungsverfahren und unter Benutzung physikalischer, meteorologischer und ozeanographischer Erkenntnisse ergaben sich in der Arbeitsgruppe „Sturmfluten“ begründete Auffassungen verschiedener Betrachtungsweisen, die sich nicht in allen Punkten vereinbaren ließen. Sie sollen im nächsten Abschnitt kurz beschrieben werden.

2. Neue Vorschläge für Bemessungsverfahren

Hierüber ist in der „Küste“ (7) wie folgt berichtet:

1. Hydrodynamisch-numerisches Verfahren

Die Bewegungsvorgänge im Meer werden mit Hilfe der hydrodynamischen Gleichungen quantitativ reproduziert. Diese Verfahren erfordern einen beträchtlichen numerischen Aufwand, für den jetzt elektronische Großrechenanlagen zur Verfügung stehen; sie weisen eine für praktische Untersuchungen ausreichende Naturähnlichkeit auf.

Für jeden Küstenort besteht ein „stauwirksamstes Windfeld“, mit dessen Auftreten durchaus gerechnet werden muß. Das Windfeld der Februar-Sturmflut 1962 für Cuxhaven war kein wirksamstes. Deshalb muß dort in Zukunft mit höheren Wasserständen gerechnet werden als bisher.

2. Verfahren mit physikalisch denkbaren Sturmflutwasserständen

Der physikalisch denkbare Sturmflutwasserstand wird berechnet aus einem astronomisch vorausberechneten Wasserstand und einer bei Sturmfluten auftretenden Wasserstandserhöhung, die aus drei einzeln abgeschätzten Anteilen zusammengesetzt wird, und zwar

- aus einem statistisch bestimmten Windstauwert,
- einem Zusatzwert, der vor allem die Böigkeit des Sturmes berücksichtigt, und
- aus dem Einfluß von freien Sturmwellen (Fernwellen).

3. Häufigkeitsverfahren

Die Häufigkeitsskala der eingetretenen Sturmflutwasserstände wird bei der Wahl des praktisch zweckmäßigen Kompromisses zwischen Gefährdungs- und Sicherheitsgrad verwendet.

Statistisch konstruierte mittlere Häufigkeitsfunktionen der Wasserstände werden nach

dem bequem zu handhabenden Exponentialgesetz mit gradliniger Extrapolation im einfach-logarithmischen Netz als zweckmäßigste Darstellung angesehen.

Der Bemessungswasserstand ergibt sich aus der Wahl einer Tidehochwasser-Seltenheit von z. B. einmal in 100 Jahren.

4. Statistische Untersuchung der Grenzhöhe von Sturmfluten

Auf hydrologisch-statistischem Wege werden die Höhen kommender Sturmfluten und ihre möglichen Grenzwerte untersucht. Dabei werden berücksichtigt:

- der säkulare Anstieg des Meeresspiegels,
- die jahreszeitliche Schwankung der Tidewasserstände und
- die Schwankung der Tidewasserstände aus Schwallerscheinungen.

Die vorstehend kurz angedeuteten Verfahren kommen zu unterschiedlichen Ergebnissen, je nach den Ausgangswerten, die sie verwenden. Es ist nicht möglich, sie in einem Verfahren zu verbinden. Die Arbeitsgruppe „Sturmfluten“ ist der Meinung, daß die verschiedenen Wege und Ansätze weiter verfolgt und untermauert werden sollen.

Es ist dabei bisher noch nicht berücksichtigt worden, daß die Wasserstände während der Sturmfluten örtlich auch von Wellenstau beeinflusst sein können. Es ist bekannt, daß landwärts der Brecherzone eine Hebung des Ruhewasserstandes allein durch die Wellenwirkung stattfindet, die außer von den Wellenkenngößen auch von der Morphologie des Gebietes abhängig ist. Wieweit die beobachteten Wasserstandsunterschiede zwischen den Pegeln auf den Inseln (z. B. Sylt) und den Pegeln auf dem Festland durch örtlichen Windstau auf den Wattengebieten oder durch Wellenstau bedingt sind, kann heute noch nicht eindeutig beantwortet werden. Sicher ist, daß auch der Windstau in Flachwassergebieten, in denen die Wellenhöhe abhängig von der Größenordnung der Wassertiefe ist, anderen Gesetzen gehorcht als in Tiefenbereichen, in denen die Wellenhöhe klein gegen die Wassertiefe ist.

IV. Empfehlungen für die Bemessung der Seedeichhöhen

Es geht aus den vorhergegangenen Abschnitten hervor, daß die Forschungsarbeiten der einzelnen Wissenschaften gerade in den letzten Jahrzehnten eine wesentliche Vertiefung der Kenntnis der Naturvorgänge bei Sturmfluten gebracht haben.

So war bis vor kurzem wenig über die Fernwellen und über die Beckenschwingungen von Randmeeren bekannt; jetzt werden sie ständig beobachtet und, wenn notwendig, in die Vorhersage mit einbezogen.

Ebenso haben die numerischen Modelle einen tieferen Einblick in den instationären Aufbau eines Windstaus gebracht und die Einflüsse auch küstenferner Windfelder aufgedeckt.

Von der Meteorologie her wird jetzt nicht allein die Windgeschwindigkeit und die Winddauer, sondern auch die Böigkeit des Windes als wichtiger sturmflutbeeinflussender Parameter betrachtet, wobei sowohl der Windstau als auch der Seegang mit der Böigkeit zunimmt.

Paradoxiereise bringt es aber gerade der schnelle Fortschritt der Forschung mit sich, daß wegen der ständigen Zunahme der Erkenntnisse ein abschließendes Ergebnis noch nicht gegeben werden kann. Dieses „abschließende“ Ergebnis wäre für jede Deichstrecke der Küste die — wissenschaftlich gesicherte und eindeutig definierte — Angabe eines Bemessungswasserstandes, der entweder überhaupt nicht oder mit übersehbarem Risiko in einer gewissen Zeitspanne nicht überschritten werden kann.

Diesem negativen Ergebnis steht als positives Ergebnis gegenüber, daß die nach den bisher verwendeten Verfahren (Verfahren mit physikalisch denkbaren Sturmflutwasserständen, Überlagerungsverfahren, Häufigkeitsverfahren) ermittelten Bemessungswasserstände

1. bei den Verfahren nur um wenige Dezimeter voneinander abweichen und
2. an keiner Stelle selbst bei der Sturmflut vom Februar 1962 erreicht oder überschritten wurden.

Tabelle 1 zeigt, daß die HHThw, auch wenn sie von anderen Sturmfluten als von der am 16./17. Februar 1962 stammen, überall einige Dezimeter unter dem zwischen 1953 und 1962 ermittelten Bemessungswasserstand bleiben.

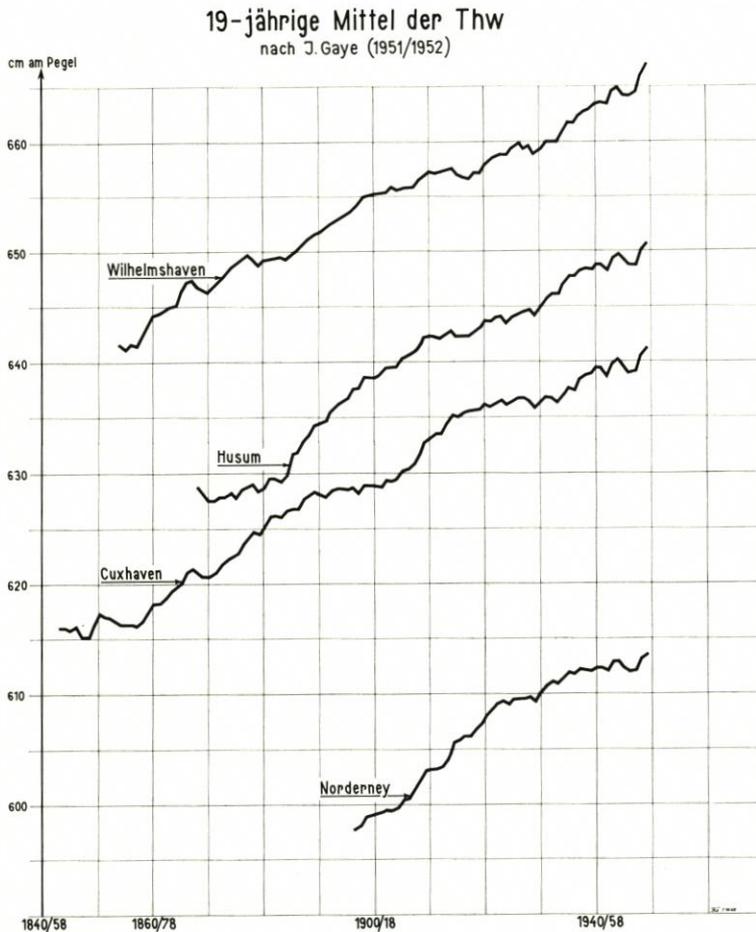


Abb. 1

Die Bemessungswasserstände in Schleswig-Holstein wurden dabei nach dem Häufigkeitsverfahren, die in Niedersachsen nach dem Verfahren der physikalisch denkbaren Sturmfluthöhen ermittelt. Von dem Ergebnis her betrachtet, liefern beide Verfahren ungefähr gleiche Werte.

Wissenschaftlich — und das muß leider betont werden — sind diese Werte nicht gesichert, ihr Gewicht ist ein empirisches. Es ist daher jede Bemühung zu unterstützen, weitere wissenschaftliche Ergebnisse zur Frage des höchsten Wasserstandes zu erhalten. Hierbei ist besonders an die Frage zu denken, ob durch langfristige meteorologische Änderungen in naher Zukunft

(d. h. in den nächsten Jahrzehnten) eine erhöhte Sturmflutgefahr für die deutschen Küsten besteht.

Ähnliches gilt für den säkularen Anstieg, der in den letzten 100 Jahren etwa 20 cm betragen hat. Wenn auch dieser Anstieg nicht immer gleichmäßig stattfand — es können Perioden stärkeren und geringeren Anstieges nachgewiesen werden —, so ist zur Zeit eine lineare Extrapolation in die Zukunft die einzige wissenschaftlich berechnete Interpretation der vorliegenden Naturbeobachtungen (also 2 mm Anstieg je Jahr); zukünftige Meßreihen müssen entscheiden, ob Abweichungen von der Linearität berücksichtigt werden müssen (Abb. 1).

Ausschlaggebend für die Praxis ist nun aber, daß für die Wahl der Seedeichhöhe nicht allein der Bemessungswasserstand, sondern als weiterer, und zwar entscheidender Parameter der Wellenauflauf maßgebend ist. Tab. 2 zeigt, daß die derzeitigen Bestickhöhen durchschnittlich 2 m, stellenweise sogar über 3 m über dem Bemessungswasserstand liegen, entsprechend den örtlichen Erfahrungswerten für den Wellenauflauf.

Damit wird die Frage der Genauigkeit, mit der der Bemessungswasserstand ermittelt werden kann, mit der Frage verbunden, wie genau eigentlich die zulässige Wellenbelastung eines Deiches ermittelt werden kann.

Während der Bemessungswasserstand noch eine einfache und klar definierbare physikalische Größe darstellt (der Scheitelwasserstand einer Sturmflut, von einem wellengedämpften Pegel aufgezeichnet), ist der Wellenauflauf bereits vom Wellenspektrum her eine statistisch streuende Größe; aber selbst bei völlig gleichen Wellen aus einer Wellenmaschine im Laboratorium streuen die Auflaufwerte infolge der Zufallseinflüsse beim Brechen der Wellen.

So muß — bei bekanntem Spektrum des Wellenauflaufes — wiederum eine „Bemessungsauflaufhöhe“ gewählt werden, etwa die Höhe, die von hundert Wellen nur dreimal überschritten wird oder die Höhe, bei der in einer bestimmten Zeitspanne nur eine bestimmte Überlaufmenge über der Deichkrone auftritt.

Im allgemeinen ist das Wellenspektrum vor den Deichen bei Sturmflutbedingungen nur wenig bekannt; es können daher auch die vorhandenen Berechnungsverfahren nicht angewendet werden, die die Berechnung des Wellenauflaufes aus den Wellenparametern gestatten. Seit alters her aber wurden durch Aufmessen der Spülsäume — die etwa den höchsten wirksamen Wellenauflauf während einer Sturmflut wiedergeben — Erfahrungswerte für den Wellenauflauf an einer Deichstrecke gewonnen; es ist mit diesem einfachen Verfahren der große Vorteil verbunden, daß dadurch auch örtliche Konzentrationen des Wellenangriffes (durch Deichvorsprünge, Morphologie des Vorlandes u. ä.) erfaßt werden, die sich einer nur zweidimensionalen Berechnung entziehen. Weiterhin werden durch die Spülsäume auch die örtlichen Wasserstandserhöhungen erfaßt, die durch Brandungsstau erzeugt werden können.

Auch an ein und demselben Ort wird sich der Spülsaum (= Höhe des wirksamen Wellenauflaufes) nicht unbedingt bei gleichen Sturmfluthöhen auf gleicher Höhe befinden; dies ist vor allem von der Lage des Deiches und seines Vorlandes zur Wind- oder Wellenrichtung abhängig.

Diese Abhängigkeiten sollten sorgfältig untersucht und nach Möglichkeit mit Wellenmessungen im Deichvorland verbunden werden. Denn die Unsicherheiten in der Bestimmung des maßgebenden Wellenauflaufes sind derzeit wesentlich größer als die des Bemessungswasserstandes. Dieser ist für die Flußdeiche und für die wellengeschützten Deiche zwar von ausschlaggebender Bedeutung; für die den Wellen ausgesetzten Seedeiche würde es aber sinnlos sein, eine Seedeichhöhe durch einen Bemessungswasserstand festzulegen, der auf wenige Zentimeter genau gesichert sein soll, wenn die Unsicherheit in der Ermittlung des Wellenauflaufes Meterbeträge erreichen kann.

Es muß dabei immer bedacht werden, daß ein vorlandgeprägter Seegang unmittelbar mit dem Wasserstand zusammenhängt und daß also sein zukünftiges HHThw, das höhere Wasser-

stände als die bisherigen liefert, auch höhere Wellen liefern wird. Es sollte versucht werden, eine Korrelation zwischen den Wasserständen vor dem Deich, Vorland, Watt oder Berme und dem senkrechten Abstand H_{Thw}-Spülsaum aufzustellen, damit durch Extrapolation mindestens eine Schätzung des Wellenauflaufes bei außergewöhnlichen Sturmflutwasserständen möglich ist.

Außerdem muß berücksichtigt werden, daß die Höhe des Wellenauflaufes auch von der Neigung und der Form, bei Deckwerken auch von der Rauigkeit der Außenböschung abhängig ist. Hierfür sei auf die Empfehlungen der Arbeitsgruppe „Küstenschutzwerke“ des Küstenausschusses Nord- und Ostsee (22) hingewiesen.

Es besteht Einigkeit darüber, daß es wirtschaftlich untragbar wäre, die Deiche so hoch zu bauen, daß auch bei Sturmfluten von der Höhe des Bemessungswasserstandes keine einzige Welle die Deichkrone erreicht. Es muß daher immer wieder die Forderung erhoben werden, daß die Deiche auch einen Wellenüberschlag aushalten müssen. Die meisten Deichbrüche traten in der Vergangenheit durch Erosion der zu steilen Binnenböschung ein; derzeit wird eine binnenseitige Böschung von 1:3 als ausreichend sicher angesehen. Es gibt noch keine Unterlagen für ein optimales Deichprofil bei gegebener Höhe.

Mit Sicherheit aber kann gesagt werden, daß mehr als durch jede Erhöhung die Standicherheit der Seedeiche durch solche Maßnahmen erhöht wird, die eine Verminderung des Wellenangriffes bewirken. Die Energie einer Welle ist etwa dem Quadrat ihrer Höhe proportional; eine Dämpfung der Seegangshöhe um nur 25 % bedeutet daher die Verminderung der Wellenenergie und damit der Stärke des Wellenangriffes um fast die Hälfte. Vorlanderhöhungen und Landanwachs stellen daher ein ausgezeichnetes Mittel zur Erhöhung der Deichsicherheit dar.

Für die Festlegung der Bestickhöhe kann abschließend gesagt werden, daß es zur Zeit keinen ersichtlichen Grund gibt, den gegenwärtigen Bemessungswasserstand zu erhöhen; weitaus wichtiger sind Untersuchungen darüber, ob die Bestickhöhe über dem Bemessungswasserstand ausreicht.

Abschließend muß noch einmal betont werden, daß die hier vorgelegten Empfehlungen nur für Seedeiche, nicht aber für Flußdeiche oder solche Deiche, die dem Wellenangriff nicht ausgesetzt sind, gelten.

V. Schrifttum

1. AGATZ, A.: Ansprache zur Eröffnung der 4. Arbeitstagung des Gesamtausschusses des Küstenausschusses Nord- und Ostsee. Die Küste 14 (1966), Heft 1.
2. DEPARTMENTAL COMMITTEE ON COASTAL FLOODING: Die Sturmflut vom 31. Januar/1. Februar 1953 in England. Die Küste 3 (1955), Heft 1/2.
3. FÜHRBÖTER, A.: Der Druckschlag durch Brecher auf Deichböschungen. Mitteilungen des Franzius-Instituts, Heft 28, Hannover 1966.
4. GRONWALD, W.: Welche Erkenntnisse zur Frage der vermuteten neuzeitlichen Nordseeküstensenkung hat die Wiederholung des Deutschen-Nordseeküsten-Nivellements gebracht? Die Küste 8 (1960).
5. HENSEN, W.: Modellversuche über den Wellenauflauf an Seedeichen im Wattengebiet. Mitteilungen des Franzius-Instituts, Heft 5, Hannover 1954.
6. HENSEN, W.: Modellversuche zur Bestimmung des Einflusses der Form eines Seediches auf die Höhe des Wellenauflaufes. Mitteilungen des Franzius-Instituts, Heft 7, Hannover 1955.
7. HENSEN, W.: Bericht der Arbeitsgruppe „Sturmfluten“ im Küstenausschuß Nord- und Ostsee. Die Küste 14 (1966), Heft 1.
8. HUNDT, CL.: Maßgebende Sturmfluthöhen für das Deichbestick der schleswig-holsteinischen Westküste. (Dienstbericht des Marschenbauamtes Heide, Pegelaußenstelle Büsum, aufgestellt im Herbst 1953.) Nicht veröffentlicht.

9. HUNDT, CL.: Maßgebende Sturmfluthöhen für das Deichbestick der schleswig-holsteinischen Westküste, mit Berücksichtigung der Hollandsturmflut vom 1. Februar 1953. Die Küste 3 (1955), Heft 1/2.
10. HUNDT, CL.: Erkundungsreise Juli 1953 in das holländische Sturmflutkatastrophengebiet. (Dienstbericht der Pegelaußenstelle Büsum vom 5. 8. 1953.) Teilveröffentlichung in: Die Küste 3 (1955), Heft 1/2.
11. HUNDT, CL.: Beitrag zur Frage des maßgebenden Sturmflutseegangs vor einem Deich am Watt. Beispiel Büsum. Die Küste 10 (1962), Heft 2.
12. HUNDT, CL.: Der maßgebende Sturmflutseegang und Wellenauflauf für das Deichbestick der deutschen Nordseeküste auf Grund der Sturmflut vom 16. Februar 1962. Die Küste 10 (1962), Heft 2.
13. KLINGE, W.: Betrachtungen zu den Höhen der Deiche an Elbe und Weser. Die Küste 10 (1962), Heft 2.
14. KOOPMANN, G.: Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 in ozeanographischer Sicht. Die Küste 10 (1962), Heft 2.
15. Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Untergruppe „Sturmfluten“: Stellungnahme zu der Untersuchung von Regierungsbaurat Schelling über die Sturmfluten an der Westküste Schleswig-Holsteins (aufgestellt 7. 12. 1950.) (Im vorliegenden Bericht abgedruckt.)
16. Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Sonderarbeitsgruppe „Sturmflut vom 1. Februar 1953“: Bericht über die Reise in die Niederlande zur Besichtigung der Sturmflutschäden vom 1. Februar 1953 (aufgestellt am 22. 1. 1954). Nicht veröffentlicht.
17. Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Sonderarbeitsgruppe „Sturmflut vom 1. Februar 1953“: „Bericht über die Sturmflut vom 1. Februar 1953.“ Kiel, 11. März 1954. Nicht veröffentlicht.
18. Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Sonderarbeitsgruppe „Sturmflut vom 1. Februar 1953“: Empfehlung für die Ermittlung eines „maßgebenden Sturmflutwasserstandes“ für die Bemessung der Sedeiche. Die Küste 4, (1955).
19. Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Arbeitsgruppe „Küstenschutz“: Allgemeine Empfehlungen für den deutschen Küstenschutz. Die Küste 4 (1955).
20. Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Arbeitsgruppe „Küstenschutz“: Gutachtliche Stellungnahme zur Anpassung der Warfen auf den nordfriesischen Halligen an die heute möglichen Sturmfluthöhen. Die Küste 6 (1957), Heft 1.
21. Küstenausschuß Nord- und Ostsee: Berichte der Küstenländer Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Hamburg und Bremen über die Februar-Sturmflut 1962. Die Küste 10 (1962), Heft 1.
22. Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Arbeitsgruppe „Küstenschutzwerke“: Empfehlungen für den Deichschutz nach der Februar-Sturmflut 1962. Die Küste 10 (1962), Heft 1.
23. Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Arbeitsgruppe „Sturmfluten“: Der maßgebende Sturmflutseegang und Wellenauflauf an den Deichen (Ergebnisbericht 1). Die Küste 10 (1962), Heft 2.
24. Küstenausschuß Nord- und Ostsee: Berichte der Küstenländer Hamburg, Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Bremen über die nach der Februar-Sturmflut 1962 ausgeführten Hochwasserschutzarbeiten. Die Küste 14 (1966), Heft 1.
25. LAMPRECHT, H. O.: Brandung und Uferveränderungen an der Westküste von Sylt. Mitteilungen des Franzius-Instituts, Heft 8, Hannover 1955.
26. LEVERKINCK: Über den Einfluß des Windes auf die Gezeiten unter besonderer Berücksichtigung Wilhelmshavens und der Deutschen Bucht. Veröffentlichung des Kaiserl. Observatoriums in Wilhelmshaven, Berlin 1915.
27. LÜDERS, K.: Wiederherstellung der Deichsicherheit an der deutschen Nordseeküste von der holländischen Grenze bis zur Elbe. Wasser und Boden 9 (1957), Heft 2.
28. LÜDERS, K.: Bericht der Arbeitsgruppe „Küstenschutzwerke“. Die Küste 14 (1966), Heft 1.
29. LÜDERS, K.: Veröffentlichungen über die Februar-Sturmflut 1962. Die Küste 14 (1966), Heft 1.
30. MAGENS, CL.: Seegang und Brandung als Grundlage für Planung und Entwurf im Seebau und Küstenschutz. Mitteilungen des Franzius-Instituts, Heft 14, Hannover 1958.
31. PETERSEN, M.: Über die Grundlagen zur Bemessung der schleswig-holsteinischen Landes-schutzdeiche. Die Küste 3 (1955), Heft 1/2.
32. PETERSEN, M.: Wiederherstellung der Deichsicherheit an der deutschen Nordseeküste von der Elbe bis zur dänischen Grenze. Wasser und Boden 9 (1957), Heft 2.
33. PETERSEN, M.: Die zweite Deichlinie im Schutzsystem der deutschen Nordseeküste. Die Küste 14 (1966), Heft 2.

34. PETERSEN, M.: Sturmflut 1962. Wasserstände an den Küsten der Nordsee. Die Küste 15 (1967).
35. RODEWALD, M.: Zur Entstehungsgeschichte der Sturmflut-Wetterlagen in der Nordsee im Februar 1962. Die Küste 10 (1962), Heft 2.
36. ROEDIGER, G.: Entwicklung und Verlauf der Wetterlage vom 16./17. Februar 1962. Die Küste 10 (1962), Heft 1.
37. SCHELLING, H.: Die Sturmfluten an der Westküste von Schleswig-Holstein unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse am Pegel Husum (aufgestellt am 1. 3. 1950). Die Westküste 1 (1952), Heft 1.
38. SCHULZ, H.: Verlauf der Sturmfluten vom Februar 1962 am deutschen Küsten- und Tidegebiet der Nordsee. Die Küste 10 (1962), Heft 1.
39. TOMCZAK, G.: Was lehrt uns die Holland-Sturmflut 1953? Die Küste 3 (1955), Heft 1/2.
40. WEMELSFELDER, P. J.: Wetmatigheden in het optreden van Stormvloeden. De Ingenieur 54 (1939), Heft 9.
41. ZITSCHER, FR. F.: Analyse zur Bemessung von Außenböschungen scharliegender Seedeiche gegen Wellenbeanspruchung. Wasser und Boden 14 (1962), Heft 10.