

Maßgebende Sturmfluthöhen für das Deichbestick der schleswig-holsteinischen Westküste*)

Mit Berücksichtigung der Hollandsturmflut vom 1. Februar 1953

Von Claus Hundt

Inhalt

I. Allgemeine Vorbemerkungen	96
II. Der maßgebende Sturmflutwasserstand	98
1. Abkürzungen und Begriffe	98
2. „Höchstmögliche“ Sturmflutwasserstände nach Untersuchungen vor dem 1. Februar 1953	99
3. Einige Verfahren zur Ermittlung kritischer Sturmflutwasserstände	100
a) Physikalisches Verfahren	100
b) Einfaches Bezugsverfahren	100
c) Kombiniertes Bezugsverfahren	102
d) Häufigkeitsverfahren	102
4. Berücksichtigung raumbedingter und säkularer Wasserstandsänderungen	107
5. Raumbedingte Wasserstandsänderungen	107
a) Änderung des Mitteltidehochwassers in Husum	107
b) Änderung der Sturmflutwasserstände in Husum	109
c) Änderung des Mitteltidehochwassers in Tönning, Büsum, Cuxhaven und Glückstadt	110
d) Änderung der Sturmflutwasserstände in Tönning, Büsum, Cuxhaven und Glückstadt	111
6. Säkulare Wasserstandsänderung	112
7. Beschickung früherer Sturmflutwasserstände auf den heutigen und zukünftigen Gewässerzustand	114
8. Richtwerte des maßgebenden Sturmflutwasserstandes	122
III. Der maßgebende Wellenauflauf am Deich	126
1. Unterlagen und Verfahren (Westküste)	126
a) Die Flutkanteneinwägungen	127
b) Modellversuche über Wellenhöhen im Wattgebiet	127
c) Wellenperiodenmessungen an der schleswig-holsteinischen Westküste während der Sturmflut am 16. 1. 1954	131
2. Allgemeine Auswertung	132
3. Vergleich der Naturbeobachtungen mit Modellversuch und Theorie	133
4. Maßgebender Wellenauflauf bei höchsten Sturmflutwasserständen	135
a) Errechnete Werte	135
b) Kritische Betrachtung	136
c) Richtwerte des maßgebenden Wellenaufbaus	137
5. Der Wellenauflauf an den rechtselbischen Deichen	137
IV. Die maßgebende Sturmfluthöhe	139
V. Vergleiche	141
VI. Zusammenfassung	147
VII. Schriftenverzeichnis	149

I. Allgemeine Vorbemerkungen

Die folgenden Darlegungen gehen auf Untersuchungen zurück, die im Auftrage der Wasserwirtschaftsverwaltung der Landesregierung Schleswig-Holstein durchgeführt wurden.

Schon seit den drei schweren Sturmfluten vom 18. und 27. Oktober 1936 und 24. November 1938, die den Eindruck einer seit Jahrzehnten sich steigernden Sturmfluttätigkeit verschärft

*) Nach einem Vortrag am 14. 5. 1954 in Kiel vor dem Bund der Wasser- und Kulturbauingenieure.

hatten, laufen im Interesse eines sicheren Hochwasserschutzes die systematischen Bemühungen, eine obere Sturmflutgrenze ausfindig zu machen. Sie finden, von neuem durch den an der schleswig-holsteinischen Westküste äußerst bedrohlichen Orkan vom 9. Februar 1949 angeregt, ein Jahr später ihren vorläufigen Abschluß in den Untersuchungsergebnissen des inzwischen verstorbenen Oberregierungsbaurats SCHELLING (35). Er folgerte, daß die höchsten Sturmflutwasserstände an der schleswig-holsteinischen Westküste bis zu rund vier Meter höher als das heutige mittlere Tidehochwasser auflaufen könnten, das ist etwa ein halber Meter mehr als nach der damals herkömmlichen Vorstellung. Wenn sich daraufhin die Landesregierung Schleswig-Holstein und mit ihr die Deichverbände entschlossen, dies Ergebnis trotz seiner theoretischen Herkunft auf den praktischen Deichbau anzuwenden, so wollten sie hiermit nicht etwa irgendeinen übermäßigen Sicherheitsanspruch schlechthin zur Geltung bringen, sondern lediglich einem längst vorhandenen Gefahrenzustand begegnen, der jetzt aufgedeckt worden war. Was noch fehlte, waren Erfahrungsstatsachen. Und schon drei Jahre später warf die holländisch-englische Katastrophenflut vom 31. Januar und 1. Februar 1953 ernste Zweifel auf, die noch weit über die SCHELLINGSchen Schlußfolgerungen hinausreichen und sich in folgende Fragen¹⁾ fassen lassen:

1. Widersprachen die Merkmale der außergewöhnlich hohen Sturmflut vom 1. Februar 1953 in den Niederlanden den derzeitigen Erkenntnissen der Wetter- und Meereskunde?
2. Sind die bisher für die schleswig-holsteinische Westküste geltenden Erkenntnisse, insbesondere die Untersuchungsergebnisse SCHELLINGS zu ändern?
3. Welche Sturmflutwasserstände sind zukünftig für das Deichbestick als maßgebend anzusehen?
4. Welche Wellenaufbauhöhen sind für das Deichbestick maßgebend?

Es stellte sich bald heraus, daß die an der Festlandsküste aufgetretenen Wasserstände der Februarflut 1953 nachträglich mit der herrschenden Theorie [SCHALKWIJK 1947 (33)] im wesentlichen erklärt werden konnten, sobald nur das erzeugende Windfeld bekannt war. Aber es war — und bleibt vorläufig — vor allem die Unkenntnis der ungünstigsten meteorologischen Zusammenhänge, woran sowohl die genaue hydromechanische Vorausberechnung einer individuellen Sturmflut, als besonders auch die Berechnung des überhaupt möglichen höchsten Wasserstandes scheitert. Zur Lösung der letztgenannten Aufgabe führten die Niederländer unter vorläufigem Verzicht auf endgültige kausale Einsichten die statistische Analyse der Wasserstandshäufigkeiten als Behelfsverfahren ein [WEMELSFELDER 1939 (45)]. Ein umfassendes Beobachtungsmaterial und eine verhältnismäßig zuverlässige historische Überlieferung boten dazu die Möglichkeit. In den weitgehenden Vorschlägen der niederländischen STURMFLUTKOMMISSION von 1939 [vgl. SCHEPERS (36)], die den Sicherheitsgrad des Hochwasserschutzsystems an der niederländischen Küste behandeln, findet diese Denkweise ihre erste verantwortliche Anwendung. Sie wird durch die Tatsachen am 1. Februar 1953 vollauf gerechtfertigt [WEMELSFELDER (46)], und ihr folgt zum Teil auch die vorliegende Untersuchung.

Örtlich beschränkt sich die Hauptbearbeitung der Wasserstände auf die Pegel H u s u m, T ö n n i n g und B ü s u m an der Festlandsküste, auf den Pegel G l ü c k s t a d t als Beispiel für das rechtselbische Marschufer und auf C u x h a v e n als Bezugspegel längerer Beobachtungsdauer. Weitere Pegelorte werden durch Differenzbildung angeschlossen (Abb. 1).

¹⁾ Ausländische Behörden und Fachmänner haben sich in jeder Weise bemüht, ihre Erfahrungen über Ursachen und Wirkungen der Sturmflut vom 1. Februar 1953 weiterzugeben. Besonderer Dank gilt dem RIJKSWATERSTAAT in 's-Gravenhage.

Auf deutscher Seite hat der KÜSTENAUSSCHUSS NORD- UND OSTSEE bereits seit dem Erscheinen der SCHELLING'schen Arbeiten die Untersuchungen gutachtend gefördert. Das DEUTSCHE HYDROGRAPHISCHE INSTITUT in Hamburg hat durch die Bereitstellung von Gezeitengrundwerten und sonstigen hierfür erarbeiteten Untersuchungsergebnissen sein Interesse für die Bedürfnisse der Praxis wiederum bekundet und den Verfasser laufend kritisch beraten. Das SEEWETTERAMT in Hamburg half durch spezielle Auswertungen, die Auffassungen über das Auftreten höchster Windstärken zu klären.

Die vorliegende Arbeit bildet im Ergebnis eine Ergänzung der Untersuchungen von SCHELLING. Auch an dieser Stelle soll der Wert des großen von ihm erarbeiteten und hinterlassenen Zahlen- und Archivmaterials mit ganz besonderem Dank hervorgehoben werden.

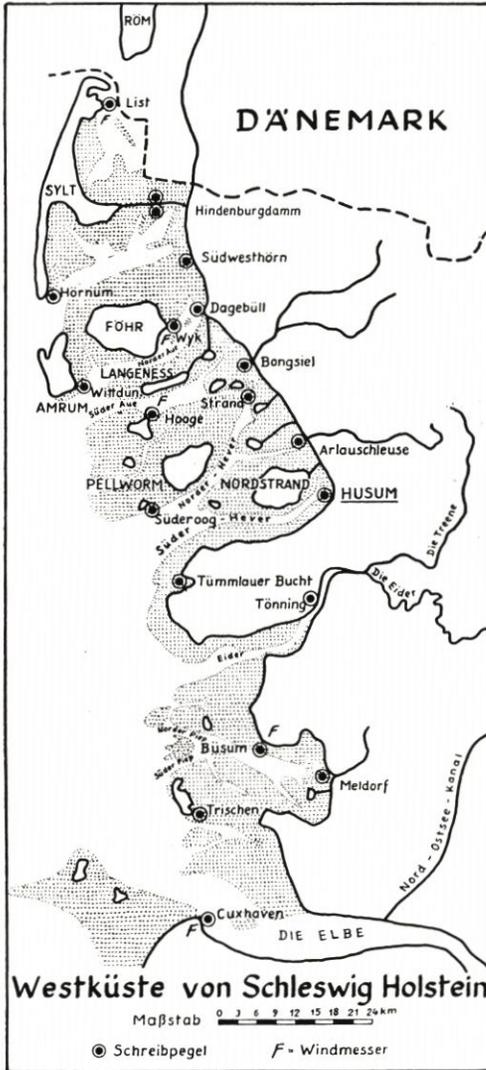


Abb. 1. Westküste von Schleswig-Holstein
Übersicht
(Die punktierten Flächen stellen die Watten dar)

Zeitlich beschränkt sich die Untersuchung zunächst auf den Zeitraum von 1901 bis 1950, da in diesem Zeitabschnitt die Wasserstände hinreichend vollständig registriert wurden. Um aber den mit so kurzzeitigen Beobachtungen verbundenen Zufallscharakter abzuschwächen, werden außerdem die höchsten der seit dreihundert Jahren überlieferten Sturmflutwasserstände nach Umrechnung auf heutige Verhältnisse mit einbezogen (s. S. 107). So unvollkommen ein Versuch dieser Art auch sein mag: wollte man allein aus der Gegenwart heraus, ohne eine Orientierung über säkulare Tendenzen, etwas über mögliche Höchstwasserstände der Zukunft aussagen, bestände die Gefahr großer Trugschlüsse.

Die angestellte Ermittlung über den Wellenauflauf an Deichen (s. S. 126 ff.) bedeutet für die hiesige, durch breite vorgelegerte Watten ausgezeichnete Küste einen ersten Versuch. Die Meeresforschung hat in der an und für sich weit entwickelten Seegangs- und Wellentheorie den Sonderfall eines breiten seichten Gewässers bisher kaum berücksichtigt. Von der Landesregierung Schleswig-Holstein im Jahre 1953 veranlaßte Modellversuche des FRANZIUS-INSTITUTS Hannover (13) und Untersuchungen von ROLL 1949 (31) bieten erste Teilerkenntnisse in dieser Richtung. Weitere planmäßige Forschungen sind eingeleitet worden. Ihre grundlegende praktische Bedeutung lehrt die Tatsache, daß die Unterschätzung des Wellenaufbaus häufig den Anlaß zu Deichschäden und Deichbrüchen gegeben hat.

Naturbeobachtungen, die in ihrer Einmaligkeit für die Beurteilung des höchsten zu erwartenden Wellenaufbaus entscheidend geworden sind, verdanken wir den Herren W. BOCK, Pellworm (Abb. 17 u. 18), M. EICKMEYER, Osnabrück, sowie dem Nordstrander Bauern und Heimatforscher A. BUSCH (2).

II. Der maßgebende Sturmflutwasserstand

1. Abkürzungen und Begriffe

MThw	Mittleres Tidehochwasser.
SpThw	Springtidehochwasser.
HThw	Höchstes Tidehochwasser innerhalb eines betrachteten Beobachtungszeitraums.
HHThw	Überhaupt beobachtetes äußerstes Tidehochwasser.
HHSpThw	Überhaupt beobachtetes bzw. vorausgerechnetes äußerstes Springtidehochwasser.

△MThw	Änderung des MThw.
Berme	Flachgeneigte Verbreiterung von Deichen auf der Außen- oder Innenböschung.
Beschickung, beschicken	Einen Wasserstand beschicken bedeutet hier, einen unter bestimmten Voraussetzungen geltenden Wasserstand auf andere Voraussetzungen umrechnen.
Deichbestick	Rahmenartige Vorschrift über die Sollabmessungen einer Deichanlage, meistens unter Angabe des zugrundegelegten Sturmflutwasserstandes, des Wellenaufbaus sowie etwaiger Sicherheitszuschläge und Sackmaße.
Flutkante	Auch „Treibselkante“ genannt, = der vom Tidehochwasser, insbesondere dem Sturmfluthochwasser auf der Deichaußenböschung hinterlassene Anschwemmungstreifen. Vorsichtig gedeutet kann die Flutkante als die Verbindungslinie der höchsten am Deich aufgelaufenen Wellenspitzen gelten.
Schardeich	Deich, dessen Fuß unmittelbar am Wasser auf oder unter Mittelhochwasserhöhe liegt, meist durch besonderes Deckwerk gegen Seegang geschützt. Die meisten Deiche der schleswig-holsteinischen Westküste sind mit einer Grasnarbe bedeckt, sogenannte „grüne Deiche“, deren Fuß an bewachsenes Vorland auf der Höhe 0,50 bis 1 m über Mittelhochwasser grenzt.
Windstau	Hier im weiteren Sinne: Unterschied zwischen eingetretenem und vorausgerechnetem Wasserstand. Abgekürzt als „Stau“ bezeichnet.

2. „Höchstmögliche“ Sturmflutwasserstände nach Untersuchungen vor dem 1. Februar 1953

Den größten, bei Sturmflut möglichen Windstau in Husum bestimmten:

- 1) PRÜGEL 1942 (29) aus Beziehungen zwischen Stau und Gradientwind Deutsche Bucht als „Mindestwert für die größtmögliche Erhöhung des Wasserstands über die Gezeitenflut“ zu + 4,10 m MThw
- 2) SCHELLING 1952 (35) nach dem Beispiel der Sturmflut vom 16. 2. 1916 (Windstau = 3,50 m) und nach einer selbst entwickelten Windstaufunktion für Windstärke 12, die der Katastrophenflut im Februar 1825 entsprochen habe, zu rund + 4,00 m MThw
- 3) FISCHER 1953 (5) in der Annahme, daß die Sturmflut vom 4. 2. 1825, von der dieses Maß (14 Fuß hamburgisch) überliefert ist, als extreme Erfahrung zu gelten hat, zu + 4,02 m MThw

Mit Hilfe solcher und ähnlicher Windstauwerte veranschlagten den für die Gegenwart gültigen höchstmöglichen Sturmflutwasserstand in Husum

- 4) GAYE 1948 (7) „sowohl im Hinblick auf die Sturmflut von 1825 wie auch nach den Ermittlungen von Prügel“ zu etwa + 5,75 m NN
 - 5) SCHELLING 1952 (35)
 - a) als Superposition des größtbeobachteten Windstaus 1916 (3,50 m) und des höchsten vorausgerechneten SpThw = 1,93 m NN,
 - b) als Rekonstruktion der Sturmflut 1825 mittels der selbst ermittelten Windstaubeziehung,
 - c) als Umkonstruktion der Orkanflut vom 9. 2. 1949 auf ungünstigste Zeitumstände, zu rund + 5,50 m NN
 - 6) FISCHER 1953 (5) aus dem oben genannten Windstauwert über GHW von 4,02 m und dem von ihm für das Jahr 1825 vermuteten MThw = + 1,23 m NN, also ohne Berücksichtigung der inzwischen eingetretenen MThw-Hebung, zu + 5,25 m NN
- Den höchstmöglichen Wasserstand in Cuxhaven bestimmten:
- 7) PRÜGEL 1942 (29) auf Grund einer von ihm aufgestellten Beziehung zwischen Windstau, Gradientwind Deutsche Bucht und absolutem Luftdruck, zu . . . + 5,90 m NN
 - 8) LEPIK 1950 (23) ausgehend vom beobachteten Stand Februar 1825 = + 4,65 m NN, + 25 cm für ungünstige Tidezeitumstände, + 30 cm für säkulare MThw-Hebung von 1825 bis 1950, + 30 cm geschätzten „Sicherheitsgrad“ zur Berücksichtigung anscheinend noch höherer historischer Sturmfluten, zu . . . + 5,50 m NN

Alle Verfasser haben offenbar die Vorstellung, mit den genannten Werten die obere Grenze des physikalisch überhaupt Möglichen erfaßt zu haben. SCHELLING zum Beispiel spricht vom „wahr-

scheinlich höchstmöglichen Wasserstand“. Er folgert, daß dieser Stand in historischer Zeit (seit 1634) nicht überschritten worden ist, und „daß zur Zeit keine Anzeichen zu erkennen sind, die auf eine mögliche Überschreitung in absehbarer Zukunft hinweisen“. Ein derartiger Nachweis würde eine zwar hochgradige, jedoch nicht die volle, in dem Begriff „höchstmöglich“ ausgedrückte Sicherheit bedeuten.

Wie vorsichtig der Begriff „höchstmöglich“ in Wirklichkeit genommen sein will, hat schlagend die Hollandsturmflut vom 1. Februar 1953 gezeigt. Sie wäre nach der üblichen Auffassung von nun an als „höchstmöglich“ einzuordnen gewesen, denn sie überschritt die seit Jahrhunderten geltenden Sturmflutmarken um gänzlich unerwartete Beträge von 50 bis 80 cm. Wo aber ist die tatsächliche Grenze anzusetzen, wenn die genaue Nachprüfung ergab, daß die Möglichkeit noch wesentlich größerer Überschreitungen durchaus gegeben war? Das Springtidehochwasser, der Küstenwind und der Rhein-Maas-Abfluß wiesen damals niedrige oder mäßige Werte auf [WEMELSFELDER (46)]!

Um aus diesem Zwiespalt der Vorstellungen und der Wirklichkeit herauszukommen, folgt zunächst eine Gegenüberstellung einiger in Betracht kommender Ermittlungsmöglichkeiten.

3. Einige Verfahren zur Ermittlung kritischer Sturmflutwasserstände

a) Physikalisches Verfahren

Die wissenschaftliche Grundlagenforschung ist — von einigen dynamischen Problemen der Schwallbildung abgesehen — gewiß in der Lage, die Ursachen von Sturmfluten physikalisch zu analysieren und wiederum den Sturmflutwasserstand irgendeines Küstenortes als Funktion der Einzelursachen (Wetterlage, Gestirnsstide, Küstenform u. a.) zu bestimmen. Somit wäre schließlich der Nachweis theoretisch möglich, ob ein Grenzwert — ein sogenannter „höchstmöglicher“ Wasserstand also — existiert. Praktisch dagegen bereiten die erforderlichen übermäßigen Zahlenoperationen Schwierigkeiten, die bisher noch nicht überwunden sind.

Unter stark vereinfachten Voraussetzungen hat SCHALKWIJK (33) annähernd quadratische Windstaufunktionen für die niederländische Küste entwickelt, die den hydrodynamischen Grundgleichungen genügen. Betrachtet man Abbildung 2, so spricht nichts dafür, daß bei Windgeschwindigkeiten bis zu rund 35 m/sec ein Grenzwert des Windstaus erreicht wird. Ob und wo den Windgeschwindigkeiten selbst eine Grenze gesetzt ist, ist eine weitere, von der Meteorologie noch nicht beantwortete Frage.

In Schottland sind am 31. 1. 1953 mittlere Windgeschwindigkeiten von zeitweise über 35 m/sec registriert worden mit Böen bis 50 m/sec [RODEWALD (30)]. Vergleichsweise beträgt die größte bisher an der schleswig-holsteinischen Westküste registrierte mittlere Windgeschwindigkeit 32 m/sec in Büsum am 10. 2. 1949 mit Böen bis 42 m/sec; während vier Stunden sind damals 30 m/sec überschritten worden.

Für Husum haben SCHELLING (35) und TOMCZAK (40) auf empirischem Wege Windstaubeziehungen abgeleitet, die ohne theoretische Begründung ebenfalls etwa quadratische Funktionen ergaben. Nach SCHELLING bewirkt ein Wind von 30 m/sec in Husum rund 4 m Windstau, was mit höchster Springtide + rund 2 m NN kombiniert auf Wasserstände zwischen + 5,50 und + 6 m NN führen würde. Damit werden wiederum die auf den Seiten 99 bis 100 genannten Wasserstände als obere Grenzen in Frage gestellt.

b) Einfaches Bezugsverfahren

Der Deichinspektor SCHEFFER (34) sagt in seiner Begründung zum „Verordnungsmäßigen Profil der Deiche in Norderdithmarschen vom Jahre 1865“ unter anderem:

„Für die Eiderdeiche waren die Resultate der längs des ganzen Deiches beobachteten Sommerfluten von 1858 und 1860, kombiniert mit der genau festgestellten Höhe der Flut vom Jahre 1825 bei Tönning, maßgebend. Es wurden . . . dazu diejenigen Höhen des Wellenschlages gerechnet, die bei der Flut vom Juli 1858 an denselben verschiedenen Eiderdeichstrecken wirklich beobachtet worden sind. Diese Summe normierte die Höhe der Deiche. Es ist der bezeichnete Weg der einzige, auf dem unter den obwaltenden Umständen überall zu einer positiven Ansicht zu gelangen ist.“

SCHEFFERS „positiver Ansicht“ mußte es also Notgedrungen genügen, Bezug zu nehmen auf

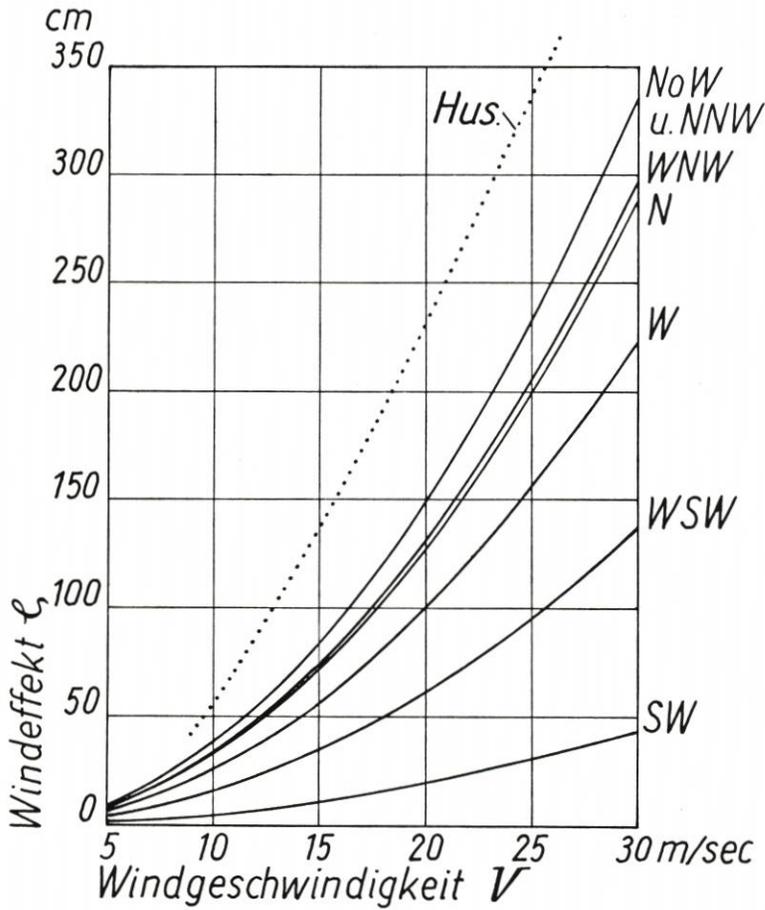


Abb. 2. Windeffekt am Pegel Hoek van Holland für ein stationär auf die ganze Nordsee wirkendes homogenes Windfeld, bei verschiedenen Windrichtungen [nach SCHALKWIJK 1947 (33)]

Formel $\zeta = K \frac{L \cdot V^2 (\cos \Psi - 15^\circ)}{H_0}$, worin:

- ζ (cm) = Windeffekt, d. i. der Aufstau über dem ungestörten Wasserspiegel durch Wind allein,
- L (km) = Länge des Meeresbeckens,
- H_0 (m) = Wassertiefe,
- Ψ = Winkel zwischen der Windrichtung und der Nordseelängsachse,
- V (m/sec) = Windgeschwindigkeit,
- K = aus Beobachtungen gewonnener konstanter Beiwert.

Punktierte Kurve: Windstau Husum bei Hochwasser und bei wirksamster Windrichtung West [nach SCHELLING 1952 (35)]

die Flut von 1825, also die zufällig letztbekannte schwerste Sturmflut als die überhaupt höchste zu unterstellen, ohne wissen zu können, ob nach zufallsfreiem Zusammenhang die obere Wasserstandsgrenze nicht doch noch höher liegt. So wie in diesem klassischen Beispiel ist herkömmlicherweise seit Jahrhunderten bis in die jüngste Zeit vorgegangen worden.

Nach schweren Sturmfluten wird das Deichbestick hin und wieder überprüft und gegebenenfalls der neuen Erfahrung angepaßt, so nach 1634, nach den Flutserien des 18. Jahrhunderts, nach 1825 und schließlich nach dem 16. Februar 1916, der in Husum mit + 5,09 m NN den nach 1825 höchstbeobachteten Wasserstand brachte. Moderne Deichverstärkungsentwürfe für die rechtselbischen Marschen bauen auf den Flutmarken von 1825 auf. Nicht viel anders in Holland: Die Sturmflutmarken von 1894 und 1906 zum Bei-

spiel bestimmten das Maß jener ausgedehnten Deicherhöhung in Zeeland vor gut vierzig Jahren, die mit dem Namen DE MURALT verknüpft sind.

Die Berufung auf eine tatsächlich eingetretene Katastrophenflut hat natürlich viel Überzeugendes an sich. Aber eine noch so gewaltige Erscheinung schließt, wie schon der 1. Februar 1953 lehrt, die Möglichkeit weiterer Steigerung nicht aus. Denn säkulare Wasserstandsverschiebungen, Veränderungen des Gewässerbettes, örtliche Sackungen von Flutmarken und anderes verändern die für unsere und kommende Generationen wichtigste Eigenschaft einer ehemaligen Sturmflut, nämlich die Höhenlage ihres Scheitels in bezug auf die heute und morgen zu schützende Landoberfläche. Aus dem Studium historischer Bedeichungen hat PETERSEN (27) gefolgert, daß „etwa alle 100 Jahre die Deiche um 30 bis 40 cm erhöht werden mußten“. Für die Niederlande nennt VAN VEEN (44) als wesentlich schnelleres Maß, daß die „Sturmfluten im Durchschnitt alle 30 bis 40 Jahre von einer — ebenfalls durchschnittlich — jeweils 10 Zoll höheren Flut übertroffen werden“. Dieser Anstieg von rund 0,75 m je Jahrhundert gehe allerdings zum Teil auf die säkulare Landsackung im holländischen Alluvium zurück. Das Problem wird auf Seite 107 ff. ausführlicher behandelt.

In bewußter oder unbewußter Anerkennung solcher bedrohlichen Erscheinungen hat man mit vollem Recht in den meisten Deichbesticks einen willkürlich angenommenen „Sicherheitszuschlag“ von mehreren Dezimetern eingeschaltet (vgl. z. B. S. 99 Ziff. 8). Das Ziel muß aber sein, die Ungewißheiten einzugrenzen und einen zahlenmäßig definierten, maßgebenden Sturmflutwasserstand anzugeben. Das einfache Bezugsverfahren allein genügt dazu nicht.

c) Kombiniertes Bezugsverfahren

Das kombinierte Bezugsverfahren besteht darin, getrennt gefundene extreme Einzelmerkmale verschiedener Sturmfluten und deren Begleiterscheinungen in ungünstigstem Sinne zu kombinieren. Die geläufigste und überzeugendste Abart dieses Verfahrens ist die Überlagerung (Superposition) des bisher größten einwandfrei beobachteten Windstaus über dem zugehörigen astronomischen Tidehochwasserstand und des in den Sturmmonaten Oktober bis März astronomisch höchstmöglichen Springtidehochwasserstandes. SCHELLING hat dies Verfahren als beweiskräftigste Stütze seiner Ermittlungen für Husum angewandt (s. S. 99).

Auf der einen Seite hat das Verfahren den Vorzug der Einfachheit und der Verwendung nur zweier, klar bestimmter Größen und daher auch den Nimbus hoher Zuverlässigkeit. Es besitzt andererseits einen durch den kurzen Zeitraum zuverlässiger Pegelregistrierungen eng bedingten Zufallscharakter, selbst wenn die zweite Größe, das vorausberechnete astronomische Springtidehochwasser, als gesichert anzunehmen ist. Wenn zum Beispiel der am Pegel Husum seit 45 Jahren (Schreibpegel seit 1905) beobachtete größte Windstau am 16. 2. 1916 3,6 m betragen hat, so darf dieser zwar als ein außergewöhnlich hoher, jedoch nicht ohne weiteres als der überhaupt äußerste Wert angesehen werden. Schon der Orkan vom 9./10. 2. 1949 in Husum hätte nach SCHELLINGS Überlegungen einen größeren Windstau von etwa 4,1 m über Tidehochwasserstand erzeugen können, falls Wind und Tide damals ungünstig zusammengetroffen wären. Der damalige Windstau über Tideniedrigwasser hatte übrigens den größten hier bisher beobachteten Wert von 5,70 m.

Derartige Rechnungsversuche zeigen immer wieder, wie fragwürdig es ist, wenn noch so markante Einzelergebnisse gesondert betrachtet werden. Das Verfahren darf daher, ebenso wie das im vorigen Abschnitt behandelte einfache Bezugsverfahren, allenfalls ergänzend und vergleichend angewandt werden.

Die Frage, wie weit einfache Superposition bei verschiedenen Wassertiefen zulässig ist, wird im Abschnitt V. behandelt.

d) Häufigkeitsverfahren

In seiner Stellungnahme zu den Untersuchungen von SCHELLING hat der KÜSTENAUSSCHUSS NORD- und OSTSEE (20) schon 1950 erklärt: „Die Frage nach der größtmöglichen Sturmfluthöhe muß also z. Zt. noch offen bleiben. (Die Beantwortung würde mindestens voraussetzen, daß einige der schwierigsten Probleme, welche die dynamische Meereskunde in Gebieten wie der

Nordsee heute aufzuweisen hat, eine hinreichend allgemeine Lösung gefunden hätten; vermutlich werden sich jedoch Fragen dieser Art auf sehr lange Zeit hin exakt überhaupt nicht beantworten lassen.) *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 ist²⁾.*

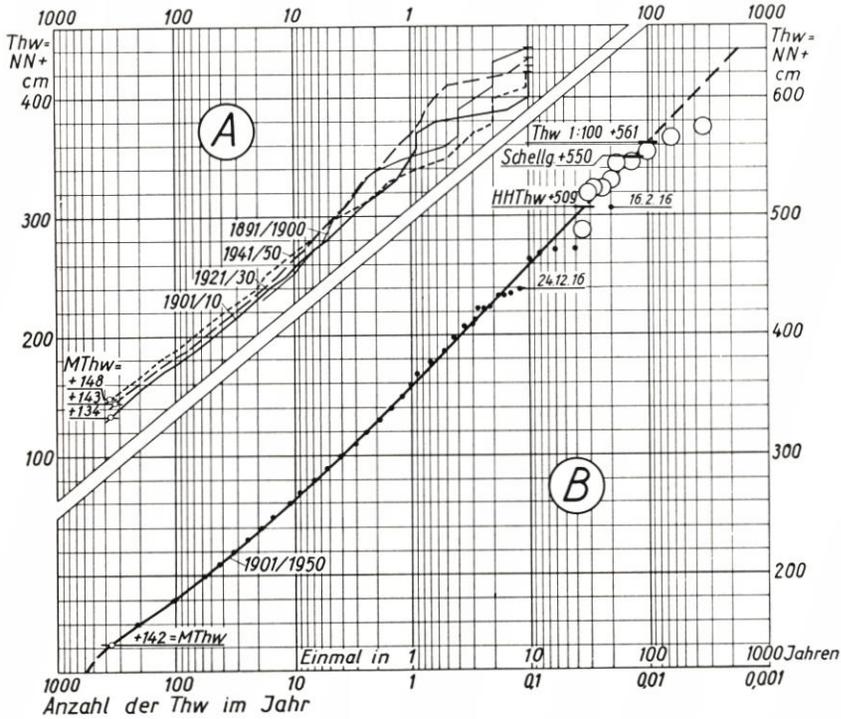


Abb. 3. Mittlere jährliche Überschreitungshäufigkeiten der Tidehochwasserstände am Pegel Husum von 1634 bis 1950

A. Zehnjahresmittel.

B. Punkte: Fünfzigjahresmittel 1901—50 nach unmittelbaren Pegelbeobachtungen. Sturmflutdaten in Reihenfolge von oben nach unten: 16. 2. 16 (HHThw), 18. 10. 36, 27. 10. 36, 24. 11. 38, 6. 11. 11, 24. 12. 16.

Linie: Ausgleichkurve der Fünfzigjahresmittel 1901—50.

Gestrichelt: Gradlinige Extrapolation für 1901—50.

Kreise: Überschreitungshäufigkeit der zehn schwersten Sturmfluten in den letzten 300 Jahren. Scheitelstände der historischen Sturmfluten rekonstruiert und auf den Gewässerzustand 1925 (Mitte von 1901—50) nach Tabelle 3a und 3b.

Sturmflutdaten in Reihenfolge von oben nach unten:

24. 12. 1717	25. 2. 1718	26. 2. 1726	
4. 2. 1825	31. 12. 1720	7. 10. 1756	
11. 11. 1634	22. 3. 1791	16. 2. 1916	11. 12. 1792

Auch die Niederländer hatten, wie erwähnt, aus denselben Erwägungen seit 1939 das Häufigkeitsverfahren zur Anwendung gebracht, nachdem WEMELSFELDER (45) nachgewiesen hatte, daß die Häufigkeitsverteilung der Wasserstände innerhalb des beobachteten Bereichs ziemlich genau das „POISSONSche Gesetz der seltenen Ereignisse“ erfüllt. Indem er weiterhin annimmt,

²⁾ In () = zusätzlicher Wortlaut des Entwurfs, in der Stellungnahme nicht enthalten.

daß die Gesetzmäßigkeit in den bisher noch nicht beobachteten Bereich höchster Wasserstände hinein extrapoliert werden dürfe, bemerkt er dazu, daß hinreichender Aufschluß über die Eintrittswahrscheinlichkeit sehr hoher Wasserstände anscheinend auf keine andere Weise zu erhalten ist.

Nachprüfungen an den Pegeln Husum und Büsum ergaben für die verhältnismäßig kurze Beobachtungszeit 1901 bis 1950 auch hier die Gültigkeit des genannten Gesetzes.

Abbildung 3 zeigt zunächst die mittleren jährlichen Überschreitungshäufigkeiten der Wasserstände nach Registrierungen von 1901 bis 1950 in halblogarithmischer Auftragung (starke Punkte und Linie). Bis in den Bereich + 470 cm NN, das ist rund + 325 cm MThw, verläuft die durch die Ausgleichsline vorgestellte Häufigkeitsfunktion eindeutig regelmäßig gestreckt und im oberen Bereich gerade, das heißt rein logarithmisch, darüber hinaus streuen die Wertepaare entsprechend ihrem abnehmenden Gewicht, bis schließlich die Häufigkeit $n = 0,03$ des höchstbeobachteten HHThw = 509 cm NN als einmalige Beobachtung keinen Mittelwert mehr darstellt, sondern einen einmaligen Zufallswert. Bei längerer Beobachtungsdauer ist aber eine weitere Konzentration der Wertepaare zur Ausgleichsline zu erwarten, so wie es entsprechend der Übergang von den dargestellten Zehnjahresmitteln A zu den 50-Jahresmitteln B bereits veranschaulicht. Wenn nunmehr die Gerade B über etwa + 570 cm NN hinaus um eine mäßige Strecke extrapoliert wird, etwa bis in den Bereich + 600 cm NN, dann widerspricht diese Kontinuität weder den formalen Regeln der Wahrscheinlichkeit noch insbesondere den physikalischen Möglichkeiten der Wasserstandsbildung, wie auf Seite 100 erläutert wurde.

Zur weiteren Klärung der Häufigkeitsverteilung im extremen Wasserstandsbereich wurden die höchsten historisch überlieferten Sturmfluten auf gleiche hydrographische Verhältnisse des Jahres 1925, der Mitte der Pegelaufzeichnungen von 1901 bis 1950, beschildert (Tabelle 3b). Man erhält dann eine annähernd vollständige Sammlung von zehn Wasserständen zwischen + 500 und + 600 cm NN für einen Zeitraum von rund dreihundert Jahren. Deren mittlere jährliche Häufigkeiten (Abb. 3, Kreise) decken sich ungefähr mit der geradlinigen Extrapolation der Häufigkeitslinie. Angesichts der Unsicherheiten in Überlieferung und Beschildung kann die Rekonstruktion der historischen Sturmfluten nur einen Versuch mit gewissen Fehlermöglichkeiten nach oben und unten darstellen. Der Charakter der Untersuchungen gestattet aus Sicherheitsgründen aber nicht, etwa nur der unteren Fehlergrenze zu folgen.

Nachdem man jetzt die dargestellte Häufigkeitsverteilung als hinreichend gesichert ansehen darf, ist außerdem zu bedenken, daß die Funktion durchaus an die zur Zeit der Beobachtungen herrschenden hydrographisch-meteorologischen Verhältnisse gebunden ist, zum Beispiel an den Zustand des Gewässerbettes von 1901 bis 1950, den zugehörigen Stand der säkularen Wasserstandsänderung und anderes. Ferner handelt es sich in jedem Fall nur um langzeitige Durchschnittswerte der Häufigkeiten, die über die voraussichtliche Höhe und den Zeitpunkt einzelner Sturmfluten nur sehr beschränkte Aussagen gestatten.

Eine obere Grenze, der sogenannte „höchstmögliche“ Wasserstand, der sich in der Häufigkeitskurve durch Rechtswendung zu einer Horizontalen andeuten müßte, ist in dem für das Deichbestick zu erwägenden Bereich bis etwa + 600 cm NN nicht feststellbar, der Begriff ist also praktisch genommen widersinnig. Man kann, mit aller gebotenen Beachtung der Voraussetzungen, lediglich feststellen, wie oft ein bestimmter Wasserstand im langzeitigen Durchschnitt eintritt. Man kann die Wahrscheinlichkeit berechnen, mit der dieser Wasserstand in einem Zeitraum bestimmter Dauer, zum Beispiel in einem Jahr oder in einem Jahrhundert, zu erwarten ist. Das ermöglicht dann, verschiedene Wasserstände ihrer Höhe und Eintrittswahrscheinlichkeit entsprechend nach Gesichtspunkten des Hochwasserschutzes zu beurteilen und schließlich den für das Deichbestick „maßgebenden Sturmflutwasserstand“ auszuwählen.

Hier ist nicht der Platz, wahrscheinlichkeitstheoretischen Fragen nachzugehen. Es sei aber darauf hingewiesen, daß durch die Anhäufung genügender Zufallswerte das gesuchte Gesetz der Häufigkeitsverteilung nicht weniger streng hervortritt, als zum Beispiel ein Windstaugesetz, das empirisch und im oberen Bereich aus meist wenigen, streuenden Wertepaaren gemittelt wird. Vergleichsweise stellt sich ferner aus noch unabgeschlossenen Untersuchungen, die das SEEWETTERAMT Hamburg mitgeteilt hat, heraus, daß die Häufigkeitsverteilung der Windstärken in Beaufort auf zwei Stationen in der südwestlichen Nordsee auf Wetterschiff S 2 und in der Deutschen Bucht auf Feuerschiff Elbe 1, eine ähnliche ist wie diejenige der hier behandelten Küstenwasserstände. Die Kontinuität der Windstärkeverteilung bis in den oberhalb der Beobachtung liegenden Bereich hinein ist kaum zweifelhaft; ebensowenig ist dann an der Kontinuität der Wasserstandsverteilung als Auswirkung der Windstärken (Windstau) zu zweifeln.

Der bekannte niederländische Ingenieur VAN VEEN (44) hat in verständlicher Besorgnis vor Trugschlüssen „den Glauben an die Vorhersage mittels Häufigkeitskurven als verhängnisvolle Ansicht“ bezeichnet, die ins Verderben führen könne. Er weist auf die „einfachen Zeichen an der Wand“, die historischen Sturmflutwasserstände der niederländischen Küste hin, und betont warnend, daß die Überflutungs-Häufigkeit dieser Marken heute wesentlich größer ist als damals. Das trifft nicht nur für die Niederlande mit ihrer merklichen Küstensackung zu, sondern ebenfalls für

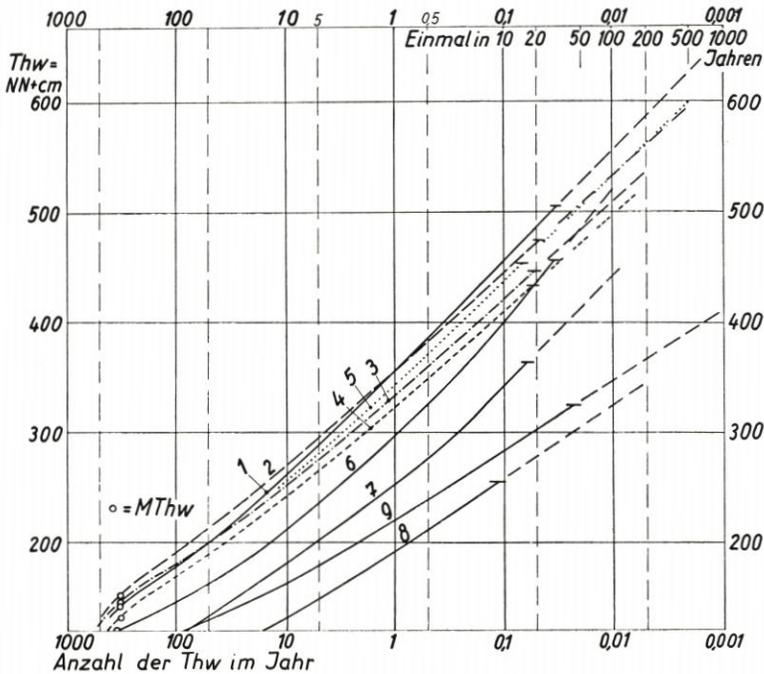


Abb. 4. Mittlere jährliche Überschreitungshäufigkeiten der Tidehochwasserstände in Schleswig-Holstein und Holland

1. Husum	1901—50	6. Delfzijl	1860—1953
2. Tönning	1901—50	7. Harlingen	1862—1953
3. Büsum	1901—50	8. Den Helder	1933—1953
4. Cuxhaven	1901—50	9. Hoek van Holland	1888—1937
5. Glückstadt/Elbe	1901—50		

(Nr. 6 bis 9 nach ALGEMENE DIENST RIJKSWATERSTAAT 's-Gravenhage)
 Unterbrochene Linien = extrapoliert

die deutsche Nordseeküste, allein schon wegen des säkularen Wasseranstiegs, aus welcher Ursache er auch stamme. Es wäre auch hier verderblich, sich auf Häufigkeitskurven zu verlassen, die nicht auch durch kritische Berücksichtigung historischer Umstände kontrolliert würden. In diesem Sinne ist der oben erwähnte Versuch zu verstehen, die obere Extrapolation der Häufigkeitskurve für Husum durch historische Sturmflutwasserstände zu sichern, die auf die Gegenwart besichtigt sind.

Abbildung 4 enthält eine Zusammenstellung von Häufigkeitskurven der schleswig-holsteinischen Westküste; die obere Extrapolation für Tönning und Büsum ist in der für Husum beschriebenen Art unter Beachtung der historischen Sturmfluten geprüft. Die Kurvengruppe für die niederländische Küste stammt aus dem Archiv des Rijkswaterstaat in Den Haag durch die Vermittlung des Herrn Ing. WEMFELFELDER. Entsprechende Unterlagen von der niedersächsischen Küste stehen zur Zeit noch vor der Bearbeitung.

Die Darstellung vermag in einfacher Weise einige grundsätzliche, teils schon bekannte An-

schauungen zu vermitteln. Die Pegelgruppe der schleswig-holsteinischen Westküste, besonders Husum, ist hohen Wasserständen (Windstau) wesentlich stärker ausgesetzt als die niederländischen Pegel südlich der Zuiderzee. Der ausnehmend steile Verlauf der Häufigkeitsverteilung hoher Wasserstände an Punkten wie Husum, Delfzijl und Harlingen legt hier besondere Vorsicht bei der Wahl der maßgebenden Sturmfluthöhen nahe. Weitere Folgerungen werden auf den Seiten 141 bis 146 behandelt.

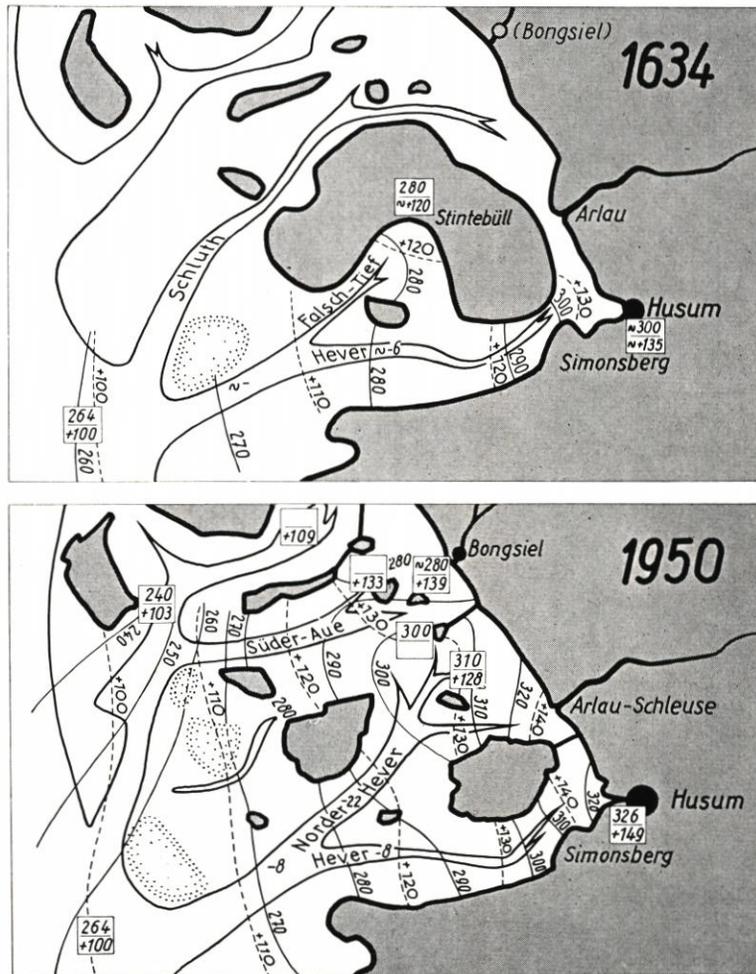


Abb. 5 und 6. Gewässerzustand der Husumer Bucht 1634 und 1950 (schematisch)
Tidewerte 1634 geschätzt, 1950 nach Beobachtungen, teils interpoliert. Tide der offenen See unverändert angenommen

Mittlerer Tidehub:

326

 in cm und ausgezogene Isolines
Mittleres Tidehochwasser:

+149

 in cm +NN und gestrichelte Isolines

Abschließend darf der Wert des Häufigkeitsverfahrens für die vorliegende praktische Aufgabe so gesehen werden: Es liefert heute als einziges Verfahren einige zufallsfreie Beziehungen über das Auftreten kritischer Sturmflutwasserstände und dadurch die Möglichkeit, einen praktisch „maßgebenden“ Sturmflutwasserstand nach mehrseitigen Gesichtspunkten zu wählen.

4. Berücksichtigung raumbedingter und säkularer Wasserstandsänderungen

Um die Höhen früherer Sturmfluten mit heutigen Beobachtungen vergleichbar zu machen, muß unter anderem geklärt werden, ob und wie sich die Voraussetzungen der Wasserstandsbildung inzwischen geändert haben. Dabei werden, seit dem hier in Betracht kommenden Zeitpunkt kurz vor dem Sturmflutjahr 1634, die Tide- und Windstauverhältnisse der offenen See als unveränderlich angesehen, dagegen nicht diejenigen des Wattenmeeres.

Säkularer³⁾ Wasserstandsänderungen sind hier solche, die durch weit- oder tiefreichende (nicht raumbedingte) Ursachen geophysikalischer Natur langdauernd bewirkt werden (Klimaänderungen, Krustenbewegungen u. a.).

Die aus Pegelbeobachtungen erkenntlichen, allgemein in Form von Ganglinien übergreifender 19jähriger Mittel dargestellten Wasserstandsänderungen enthalten meistens raumbedingte Anteile⁴⁾ und decken somit nicht immer den obigen Begriff „säkular“.

5. Raumbedingte Wasserstandsänderungen

a) Änderung des Mitteltidehochwassers in Husum

Die Raumveränderungen während der letzten drei Jahrhunderte in der Husumer Bucht sind durch die Zerteilung Alt-Nordstrands 1634, sowie durch den Einbruch, das Vordringen und die Ausbreitung der Norderhever in Verbindung mit dem Verschwinden schützender Landmassen vor der Festlandsküste gekennzeichnet.

Die heutigen Tideverhältnisse zeigt überschläglich die Abbildung 6. Das Einzugsgebiet der Norderhever beträgt rund 200 km².

Vor der Katastrophenflut von 1634 (Abb. 5) war das Einzugsgebiet des Falschtiefs, des wesentlich kleineren Vorläufers der heutigen Norderhever, die nur rund 50 km² große, flache Rungholtbucht mit dem Ort Stintebüll in ihrem Innern. Die Außenhever war entsprechend flach und schmal. Der eindringende Teil der Tidewelle muß schwächer als heute gewesen sein. Die damalige Süderhever war zwar etwas flacher, hatte aber im wesentlichen schon die Gestalt und Größe von heute. Insgesamt wird geschätzt, daß in Husum der damalige Tidehub 25 cm und das damalige MThw 15 cm kleiner gewesen sind als heute.

Eine Vorstellung über die weitere Entwicklung des MThw bei Pellworm und in Husum infolge von Raumveränderungen seit 1634 vermittelt die Abbildung 7.

Je weiter das Falschtief beziehungsweise die spätere Norderhever trichterartig vordrang, sein Einzugsgebiet vergrößerte und seinen Lauf verlängerte, desto größer wird in seinem — sich nordwärts verlagernden — Oberlauf der Tidehub geworden sein, bis bei dem heutigen Zustand der MThw-Unterschied zwischen der Mündung und der Küste rund 40 cm groß geworden ist. Bei Ost-Pellworm muß also ein länger dauernder Anstieg des MThw stattgefunden haben, der vorübergehend 15 bis 20 cm gegenüber dem MThw von 1634 betragen haben mag, um nach dem weiteren Vordringen der Norderhever an Pellworm vorbei wieder etwas abzuklingen, vielleicht seit Anfang des 19. Jahrhunderts (vgl. Abb. 7). Wenn also der bei MÜLLER-FISCHER (26) zitierte Generalbericht des Deichinspektors SALCHOW über das Pellwormer Wasserwesen von 1804 angibt, daß seit der Anlage der neuen Pellwormer Deiche (1687) „die ordinäre Fluthöhe um 1 bis 1¼ Fuß (= rund 35 cm in 117 Jahren) gestiegen ist“, dann müssen 35—15 = rund 20 cm als Auswirkung einer nicht raumbedingten, nämlich der säkularen Wasserstandshebung gedeutet werden; das ergibt für den Zeitraum 1687 bis 1804 einen mittleren MThw-Anstieg von 1,7 mm/Jahr. Dies ist aus der Husumer Bucht der einzig bekannte zahlenmäßige Anhalt für das 17. und 18. Jahrhundert⁵⁾.

³⁾ Der Ausdruck „säkular“ ist dagegen in der Geologie auf gleichsinnig verlaufende tektonische Vorgänge von jahrhundertelanger Dauer beschränkt.

⁴⁾ Raumbedingt werden hier diejenigen länger- oder kurzdauernden Wasserstandsänderungen genannt, die durch örtlich begrenzte Umformung des Wasserraums im Küstengebiet zustande kommen.

⁵⁾ Vgl. Fußnote S. 113.

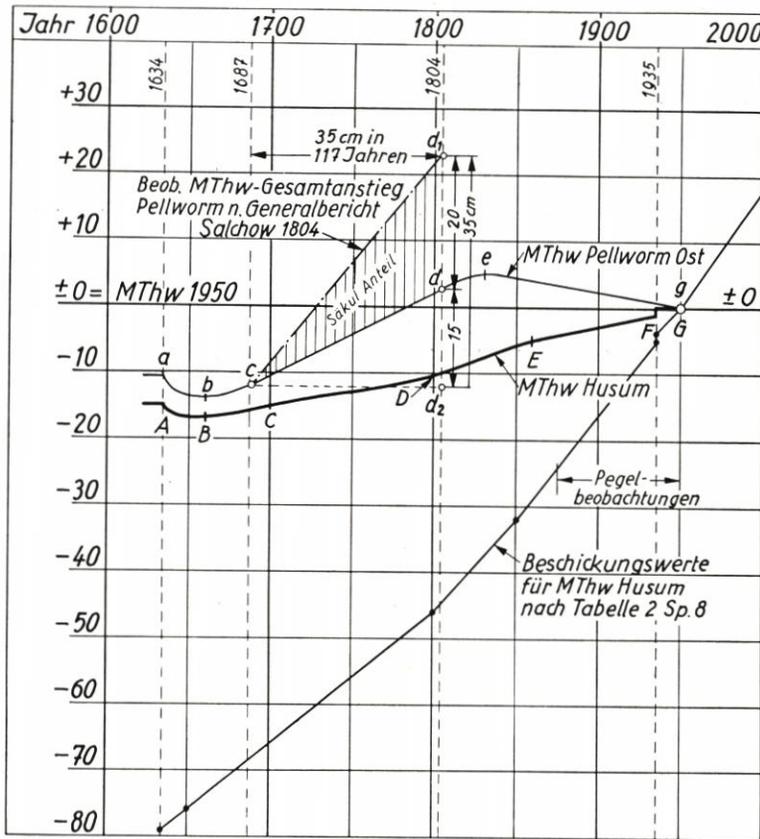


Abb. 7. Raumbedingte Entwicklungstendenz des MThw in Husum und Pellworm Ost, 1634 bis 1950

Vergleiche Tabelle 2 und Abb. 8. Die MThw-Stände sind auf das MThw 1950 bezogen. Die Tide der freien See wird konstant gesetzt. „Säkulare“ Einflüsse (klimatisch, geologisch o. ä.) gleich Null gesetzt.

Zum MThw Husum:

Abschnitt:	Zeitraum rd.:	Bemerkungen:
A B	1634—1660 (?)	Ausbreitung der Tide über das zerstörte Alt-Nordstrand, Prielbildung im Anfang. MThw sinkt.
B D	1660—1800	Tide der sich erweiternden Norderhever zunehmend wirksam bis Husum. Süderhever vertiefend. Sturmflutserien des 18. Jahrhunderts förderlich. MThw steigt.
D E	1800—1860	Oberlauf der Norderhever erweitert sich zur Küste. Zunehmende Überlagerung mit der Süderhever-Tide. Verstärkter MThw-Anstieg.
E F	1860—1935	Eindeichungen am Oberlauf der Süderhever steigern MThw in Husum. (Dockkoog 1848, Abschleusung Husumer Hafen 1859, Simonsberger Koog 1861, Morsumkoog 1867, Pohnshalligkoog 1924).
F G	1935—1950	Nordstrander Damm 1935 mit nachfolgender Aufschlickung und Eindeichung des Finkhaushalligkooges 1935 steigern MThw (hier nicht besonders berücksichtigt).

Zum MThw Pellworm Ost:

a	1634	Untergang Alt-Nordstrands am 11. 11. 1634.
a b	1634—1660 (?)	Überlauf des Thw über die zerstörten Köge. MThw sinkt.

b) Änderung der Sturmflutwasserstände in Husum

Die Tabelle 1 enthält die Windstauwerte von Sturmfluten der letzten Jahrzehnte und läßt einige Merkmale für den heutigen Zustand erkennen.

- aa) Im Mittel dreier Sturmfluten aus West bis Südwest (18. 10. 1936, 27. 10. 1936 und 24. 11. 1938) verhält sich die Staudifferenz der Süderhever : Norderhever : Süderau wie 100 : 81 : 57 (Zeile 6). Die zugehörigen Pegelentfernungen (Staulängen) betragen rund 30 : 30 : 22 km.
- bb) Die Windrichtungsempfindlichkeit zeigt sich im Unterschied der Zeilen (1+2) und 3. Das Verhältnis der Stauefälle der drei Wattströme ist — in derselben Reihenfolge, und Süderhever gleich 100 gesetzt — bei Weststurm 100 : 72 : 48, bei Südwest 100 : 108 : 92. Bei Weststurm staut es also in der Süderhever mehr, bei Südwest in der Norderhever und Süderau, was an sich bekannt ist.
- cc) Der Stau entlang dem Festland zwischen Husum und Bongsiel (Spalte 13) fällt bei Weststurm in Richtung Bongsiel ab, bei Südwest schwach umgekehrt.
- dd) Nach SCHELLING (35) liegt der Sturmflutscheitel auf der Südseite des Nordstrander Dammes (Husum) rund 20 cm höher als auf der Nordseite (Arlauschleuse), und zwar sowohl bei West- als auch bei Südweststurm. Vergleiche auch Tabelle 1, Spalte 7 und 8.

Tabelle 1
Heutige Windstauverhältnisse, Husumer Bucht

1	2	3 4 5 6 7 8					9 10 11 12 13						
		Stau in cm ^{*)}					Staudifferenz Ds in cm						
Gewässer :		Wattenmeer				Küste		Süder- Au	Norder- Hever	Süder- Hever	Küste		
Pegel :		Ho	So	St	Bo	Ar	Hu	Bo -Ho	Bo -So	Hu -Ho	Hu -So	Hu -Bo	
Tag	Wind												
1	18. 10. 1936	W	271	(240)	304	307	325	36	(61)	54	(85)	+18	
2	27. 10. 1936	WSW	251	(240)	292	296	325	45	(61)	74	(85)	+29	
3	24. 11. 1938	SW	260	250	302	315	297	310	55	65	50	60	— 5
4	16. 2. 1916	W	277				359			82			
5	Mittel 1...3		261	243	299	306	320	44	62	59	77	14	
6	In % von Ds Süderhever		57	81	77	100	18						
7	Mittel 1 + 2 (West)		761	(240)	298	301	325	40	(61)	64	(85)	24	
8	In % von Ds Süderhever		47	72	74	100	28						
9	Zeile 3 in % von Ds Süderhever (Südwest)		92	108	83	100	— 8						

*) Erklärung:

s = HW_{beob.} — HW_{astr.} = Stau [Werte nach SCHELLING (35)]

() = geschätzte Werte

Ho = Hooge, So = Süderoogsand, St = Strand, Bo = Bongsiel, Ar = Arlauschleuse,

Hu = Husum

Die Beobachtungen aa) bis dd) besagen für den heutigen Zustand, daß das Wasser bei Weststurm in der tiefwasserfernen, doch trichterförmigen Bucht der Süderhever wesentlich stärker angestaut wird als in der offenen, tiefwassernäheren Küste südlich Bongsiel. Am Nord-

b e	1660—1830 (?)	Priel- und Strombildungen im überfluteten Alt-Nordstrand. Norderhever vertieft, erweitert und verlängert. Tidehub und MThw steigen.
e g	1830—1950	Norderhever andauernd erweitert, besonders im Oberlauf. MThw im Oberlauf steigt (Überlagerung mit der Tide der Süderau!). MThw Pellworm sinkt etwas, da nunmehr am Mittellauf gelegen.
c d _{2d}	1687—1804	Geschätzter raumbedingter MThw-Anstieg in 117 Jahren = 15 cm.
c d _{2d1}	„ „	Beobachteter relativer Gesamtanstieg lt. Generalbericht von Salchow 1804 = 1 1/4 Fuß Rhld. = rd. 35 cm.
c d ₁	„ „	„Säkularer“ Anteil des beobachteten MThw-Anstiegs, gefolgert als Differenz 35—15 = 20 cm in 117 Jahren.

strander Damm besteht gleichzeitig ein ansehnliches Scheitelgefälle von einigen Dezimetern nach Norden. Bei Südweststurm (besonders 24. 11. 1938) setzt sich der Stau in der Norderhever und Süderau soweit durch, daß entgegen dem Gefälle des astronomischen Tidehochwassers die Sturmflutscheitel in Husum und Bongsiel auf fast gleicher Höhe liegen. Zwischen beiden bewirkt der Schutz durch die Insel Nordstrand und den Nordstrander Damm ein örtliches Absinken der Wasserstände am Festland um rund 20 cm. Bestände der Damm nicht, so würden die Husumer Wasserstände schätzungsweise 10 cm niedriger sein.

Demgegenüber ist das Verhalten der Sturmflut von 1634, im wesentlichen durch westlichen Sturm hervorgerufen, folgendermaßen zu beurteilen:

- ee) Der Küstenstrich von der Arlauschleuse bis zum jetzigen Bongsiel wurde durch die damals größeren Landmassen Altnordstrands und der Halligen gegen die See abgeschirmt. Insbesondere im Südwesten fehlen noch die breiten Seichtwasserflächen der Watten im oberen Einzugsgebiet der heutigen Norderhever (Nordstrandischmoor und Hamburger Hallig), die heutzutage aus der Norderhever heraus den Anstau zur Festlandsküste begünstigen (vgl. aa und bb). Der Windstaubetrag wird also hier im Jahre 1634 verhältnismäßig geringer gewesen sein als heute.
- ff) Das Anstauvermögen längs der Süderhever war ähnlich groß wie unter den heutigen Umständen (Deichbruchentlastung nicht berücksichtigt).
- gg) Da der Nordstrander Damm nicht bestand, wird Wasser aus der oberen Süderhever über das Watt hinter Nordstrand nordwärts abgeflossen sein und die innere Husumer Bucht entlastet haben.
- hh) Deichbrüche auf Nordstrand entlasteten ebenfalls den Wasserstand vor Husum.

Diese Umstände zusammen bewirken, daß der Sturm vom 11. 11. 1634 einen schätzungsweise 20 bis 30 cm höheren Windstau am Pegel Husum erzeugen würde, wenn er heute eintrete. Hierbei ist die säkulare Hebung der mittleren Wasserstände noch nicht berücksichtigt.

Für die Sturmflut von 1825 gelangt man zu einem ähnlichen Beschickungswert des Sturmflutscheitels in Husum von rund 20 cm über dem damaligen Scheitelstand, denn:

- ii) damals war der Windstau an der Küstenstrecke zwischen Bongsiel und Arlauschleuse wegen der Vernichtung der abschirmenden Landmassen Altnordstrands größer als 1634 und vielleicht ähnlich groß wie heute. Es muß also das Husum entlastende Küstenlängsgefälle (siehe gg)) zwar kleiner als 1634 gewesen sein,
 - kk) aber der Wasserraum am Oberende der Süderhever war nach den auf 1634 folgenden Ausdeichungen weit geräumiger als heute, und der Windstau bei Husum wird bei so verringertem Trichtereffekt geringer gewesen sein.
- ll) Der Aufstau südlich des Nordstrander Dammes fehlte damals.

Erst mit der Eindeichung des Dockkooges (1848), des Simonsberger Kooges (1861) und des Morsumkooges (um 1867) wird der Übergang zum heutigen Zustand der Husumer Bucht eingeleitet, bis er nach dem Bau der Hafenschleuse Husum (1859), des Pohnshalligkooges (1924), des hochwasserfreien Nordstrander Dammes (1935) und schließlich nach der Eindeichung der Finkhaushallig (1935) ganz erreicht ist (vgl. Abb. 7).

c) Änderung des Mitteltidehochwassers in Tönning, Büsum, Cuxhaven und Glückstadt

Anders als nach der wechselhaften Art in der Husumer Bucht hat sich der Wasserraum der Außeneider und des dithmarscher Wattenmeeres entwickelt. Watten, Sände und Köge wachsen gleichmäßig an.

Dabei hat die mittlere Tide von Tönning, Büsum und Cuxhaven offenbar keine wesentlichen raumbedingten Änderungen erfahren. Am Pegel Tönning hat die Abdämmung der Eider bei Nordfeld 1936 einen plötzlichen Anstieg der Tidehochwasser um rund 10 cm bewirkt.

Der mittlere Tidehochwasserstand in Glückstadt/Elbe hängt sehr von den jeweiligen Wasserräumen in den verschiedenen Elbestrecken und im Hamburger Hafen [HENSEN (12), LUCHT (25)] ab. Er ist während der stärksten Fahrwasserbaggerungen und Regelungsarbeiten (rund 15 Mio. cbm jährlich aus der Elbstrecke Geesthacht bis Mündung) nicht wie an den Seepegeln stetig angestiegen, sondern von 1900 bis 1950 um 0,5 mm/Jahr gefallen (vgl. Abb. 8). Angenommen, der nichtraumbedingte säkulare Anteil des beobachteten MThw-Anstiegs sei während dieser Zeit ähnlich Cuxhaven (2,7 mm/Jahr) Δ MThw = 2,5 mm/Jahr gewesen, dann

da die Sturmflut-Wasserräume durch die Fahrwasserbaggerungen verhältnismäßig weniger betroffen werden als die normalen Fluträume. Zahlenmäßige Nachweise fehlen noch. Daher werden für die Beschickung früherer Sturmfluten die Anstiegswerte der MThw berücksichtigt. Zu beachten ist aber, daß am 4. 2. 1825 ausgedehnte, entlastende Marschüberflutungen auf beiden Ufern vorkamen. Die Entlastung wird — unter Vorbehalt einer Sonderuntersuchung — nach niederländischen Erfahrungen über die Sturmflut am 1. 2. 1953 nur wenige Zentimeter betragen haben und wird auf höchstens 10 cm am Glückstädter Pegel geschätzt. In den engeren Nebenflüssen bestehen natürlich andere Voraussetzungen.

Die vorgenommene Abschätzung der raumbedingten Wasserstandsänderungen beruht vorwiegend auf qualitativen Erwägungen und kann ohne theoretische Analyse und weitergehendes Archivstudium keine endgültige Beweiskraft beanspruchen. Doch sie umreißt die Größenordnungen und kennzeichnet die Tendenzen. Es überrascht dabei, daß die ständigen Anlandungen und Bedeichungen in Süderdithmarschen keine fühlbaren Wasserstandserhöhungen an den dortigen Pegeln mit sich gebracht haben sollen. Wenn demgegenüber Maßnahmen wie die Eiderabdämmung, der Abschluß der Zuiderzee oder der Sylter Dammbau in nächster Umgebung wesentlich nachhaltiger gewirkt haben, so handelt es sich um Eingriffe in Systeme von stärkerer Strömung.

6. Säkulare Wasserstandsänderung

Für die hier gegebene Aufgabe genügt es, die langjährige Änderung des Mitteltidehochwasserstandes (Δ MThw) zu verfolgen.

Im rund hundertjährigen Zeitraum 1850—1950 betrug der durchschnittliche Anstieg der jährlichen MThw, festgestellt nach dem Gang übergreifender 19jähriger Mittel, an den Pegeln der schleswig-holsteinischen Westküste im Mittel 2,7 mm/Jahr.

An den einzelnen Pegeln wurde beobachtet:

Δ MThw	Husum	von 1868/1886 bis 1935/1953	= 3,1 mm/Jahr
„	Tönning ⁶⁾	„ 1867/1885 „ 1935/1953	= 2,8 „
„	Büsum	„ 1870/1888 „ 1935/1953	= 2,1 „
„	Cuxhaven	„ 1843/1861 „ 1935/1953	= 2,7 „
Δ MThw	Westküste im Mittel		= 2,7 mm/Jahr.

Zum Vergleich:

Δ MThw	Wilhelmshaven	von 1854/1872 bis 1932/1950	= 2,3 mm/Jahr.
---------------	---------------	-----------------------------	----------------

Die Ursachen des MThw-Anstiegs werden verschieden gesehen. Die meisten Bearbeiter machen die vermehrte atmosphärische Zirkulation verantwortlich, darunter LÜDERS (24) insbesondere die vermehrte Sturmtätigkeit. HENSEN (11) wies durch Diskussion der Wasserstandshäufigkeiten in Cuxhaven irgendeinen auf den gesamten Wasserstandsbereich wirkenden Einfluß nach und vermutet darin Küstensenkung. GAYES Forschungen (7) kommen zu ähnlichen Schlüssen und weisen außerdem (8) auf die Mitwirkung jahreszeitlich wechselnder, also vermutlich meteorologischer und ozeanographischer Einflüsse hin. Die in Abbildung 3 unter A aufgetragenen mittleren Überschreitungshäufigkeiten der MThw aus drei Jahrzehnten 1901/1910, 1921/1930 und 1941/1950 in Husum bekräftigen in ihrer regelmäßigen Stufenfolge die Ansicht HENSENS, daß der Gesamtanstieg fast ganz in dem allgemeinen Anstieg der häufiger vorkommenden Wasserstände des mittleren Bereichs enthalten ist.

Die Hauptursache des säkularen MThw-Anstiegs muß also eine zeitlich ständige, auf den Hauptbereich der Wasserstände gleichmäßig wirkende und örtlich übergeordnete Kraft sein, die unabhängig von den auf die einzelnen Tidehochwasserstände wirkenden Stauwinden den Meeresspiegel allgemein anhebt.

Für die Beschickung eines früheren Sturmflutscitelstandes auf den heutigen Stand des säkularen Anstiegs ist daher einfache Superposition zulässig, soweit nicht etwa eine Reduktion wegen Wassertiefenänderung hinzutritt (vgl. S. 143).

⁶⁾ Tönning ohne Einfluß der Abdämmung der Eider gerechnet.

Der säkulare MThw-Anstieg in Vergangenheit und Zukunft

GAYE (7) und andere vermuten, daß der säkulare Anstieg der Wasserstände in der Nordsee und in der Ostsee erst etwa 1860 einsetzt. Darauf deutet der Wasserstandsverlauf an den langjährig beobachteten Ostsepegeln Swinemünde (seit 1811), Kolberg (seit 1816) und Pillau (seit 1840) hin. Weitere Hinweise dafür gäbe die Tatsache, daß die Anstiegskurven mehrerer Pegel, zum Beispiel von Cuxhaven, Husum usw. (Abb. 8) mit fallender oder gleichbleibender Tendenz begännen. Demgegenüber läßt sich die Cuxhavener Kurve auch als periodisches Schwanken um ein deutlich definierbares mittleres Ansteigen herum auffassen, wovon die anfängliche horizontale Tendenz nur ein zufälliger Ausschnitt ist. Insofern spricht das Kurvenbild Cuxhavens und auch der Pegel an der Westküste nach Ansicht des Verfassers nicht gegen Anstieg schon vor 1860.

Für diese Ansicht spricht noch, daß nach Ausweis der Archive, der Sturmflutmarken und der aufeinanderfolgenden Deicherhöhlungen die gefährlichen Sturmfluten seit Jahrhunderten in bezug auf die Landoberfläche ständig höher und höher geworden sind, nach PETERSEN (27) in Schleswig-Holstein 30 bis 40 cm und nach VAN VEEN (44) in den Niederlanden um rund 0,75 m im Jahrhundert. Deicherhöhlungen mögen zum Teil auf Bodensetzung zurückgehen, sowie darauf, daß die menschlichen Sicherheitsansprüche gestiegen sind. Das Ansteigen des MThw findet jedoch für die Husumer Bucht eine wichtige Stütze in dem auf Seite 107 behandelten Generalbericht über das Pellwormer Wasserwesen von 1804, aus dem mittelbar auf einen säkularen Anstieg des MThw von 1,7 mm/Jahr während des 18. Jahrhunderts geschlossen wurde. Von dieser Folgerung muß im Sinne der vorliegenden, nach Deichsicherheit fragenden Untersuchung Gebrauch gemacht werden, und der aus nichträumlicher Ursache herrührende Anteil des säkularen MThw-Anstiegs in runden Zeitabschnitten für die praktische Berechnung wird wie folgt festgelegt⁷⁾.

Von 1850 bis 1950	entspricht an allen Pegeln der Westküste der Anstieg dem in Cuxhaven beobachteten Durchschnitt, der gleichzeitig das beobachtete Mittel aller Pegel darstellt:	
	△ MThw Westküste säkular	= 2,7 mm/Jahr
von 1650 bis 1800	△ MThw Westküste säkular	= 1,7 „
von 1800 bis 1850	Anstieg wie vorher	
	△ MThw Westküste säkular	= 1,7 „
von 1950 bis 2000	Anstieg wie vor 1950	
	△ MThw Westküste säkular	= 2,7 „

Für Glückstadt	beträgt der aus nichträumlicher Ursache herrührende Anteil des beobachteten Anstiegs nach den im Abschnitt II 5 c gemachten Angaben:	
von 1850 bis 1950	△ MThw Glückstadt	= 2,5 mm/Jahr
von 1825 bis 1850	△ MThw Glückstadt	= 1,5 „

⁷⁾ Es wird nochmals auf die auf Seite 107 gegebene Begriffserklärung für „säkular“ hingewiesen. Es bleibt also dahingestellt, wie weit Vertikalverschiebungen der Erdkruste oder meteorologische Vorgänge zu dem Anstieg des MThw beigetragen haben mögen.

Nach DITTMER [(4) und mündl. Mitteilung] sprechen einige geologische Befunde dagegen, daß das MThw an der schleswig-holsteinischen Westküste im Mittelalter wesentlich niedriger gewesen sei als heute. Z. B. läge die Oberfläche der steinbronzezeitlichen Marsch in Nordstrand und Pellworm noch heute auf einer Höhe von stellenweise nicht weniger als rund + 0,70 m NN. Diese alte Marsch sei der Kulturboden der Inseln vor 1634 gewesen. Wenn also die Sturmflut von 1634 diesen Boden nachhaltig überflutet und in der Folgezeit zu Watt gemacht habe, müsse das damalige MThw beträchtlich höher gewesen sein, mindestens etwa + 1,20 m NN, also rund 50 cm höher als in dieser Arbeit vorausgesetzt werde (vgl. Abb. 8).

Dieser Widerspruch zu den Ermittlungen des Deichinspektors SALCHOW, des Verfassers des zitierten Pellwormer Generalberichts, bleibt aufzuklären. Auf Seite 142 ist in ähnlichem Zusammenhang nachgewiesen worden, daß selbst stärkere Abweichungen von den vorausgesetzten Beträgen des säkularen MThw-Anstiegs nicht von entscheidendem Einfluß auf die Ermittlung der maßgebenden Sturmfluthöhen sind.

7. Beschickung früherer Sturmflutwasserstände auf den heutigen und zukünftigen Gewässerzustand

Die in den beiden vorigen Abschnitten angestellten Überlegungen führen zu den tabellari-schen und graphischen Darstellungen der Beschickungswerte in Tabelle 2 und auf Abbildung 9, die sich selbst erklären.

Aus Archivangaben werden nunmehr die damaligen Wasserstände der zehn höchsten historischen Sturmfluten rekonstruiert und sodann mit Hilfe der aus dem Diagramm, Abbil-dung 9, abzugreifenden Beschickungswerte auf einen einheitlichen vergleichsfähigen Gewässer-zustand (1950 bzw. 1925) beschickt. Diese auf der Tabelle 3a und b durchgeführten und durch graphische Darstellung einiger Sturmflutprofile auf Abbildung 10 kontrollierten Ermittlungen ermöglichen schließlich, die auf Seite 102 ff. behandelte Extrapolation der Häufigkeitslinie der Hochwasserstände (Abb. 3) als eine kontinuierliche und gradlinige wahrscheinlich zu machen. Das war das Hauptziel der vorigen Abschnitte.

Die Abbildung 3 (S. 103) veranschaulicht, daß die meisten der historischen Katastrophen-wasserstände von Husum heutzutage (1950) mit mäßiger Streuung um den Pegelstand + 550 cm NN liegen würden (die für die Mitte des Zeitraumes 1901/1950 = 1925 errechneten Wasser-stände sind um 18 cm zu erhöhen, um gemeinsam für den Gewässerzustand 1950 zu gelten, s. Tab. 3b). Sie erscheinen dann vom Wasser her (hydrographisch) gleichwertig, obwohl die von der Land-oberfläche aus beobachtenden jeweiligen Zeitgenossen den richtigen Eindruck ständig anwachsender Sturmfluthöhen haben mußten; auf derartige Umstände hatten, wie gesagt, VAN VEEN und PETERSEN mit anderen Worten hingewiesen (s. S. 105 u. 113).

Als höchste Sturmflut in Husum überhaupt erweist sich rechnerisch die Weihnachtsflut von 1717. Das aus der historischen Ableitung sich ergebende Scheitelgefälle von Husum nach Tönning ist allerdings so ungewöhnlich groß (s. Abb. 10), daß besonders der Husumer Scheitel-wert angezweifelt werden muß. Gleichwohl zählt die Weihnachtsflut von 1717 zu den schwer-ten. Von 1717 abgesehen, muß dann die Februarflut von 1825 als überhaupt schwerste ange-sehen werden, nächst dieser die Katastrophenflut von 1634.

Tabelle 2

Beschickungswerte früherer Sturmflutwasserstände auf den Gewässerzustand 1950
Schleswig-holsteinische Westküste

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Pegel Zeitraum	MThw-Anstieg				Beschickungswerte, bezogen auf 1950 ^{b)}					
	Jahre	Pegelbeob- achtung	Außer- räumlich (Säkulär) ^{a)}	Raum- bedingt	Gesamt- Anstieg	Jahr	für MThw	für Windstau raumbedingt	Gesamt für Sturmflut- scheitelstand	
	mm/Jahr	mm/Jahr	mm/Jahr	mm/Jahr	cm mm/Jahr		cm	cm	cm	
Husum										
.... 2000							2000	- 18	- 2	- 20
2000—1950	50		(2,7)	(0,8)	18	3,5	1950	0	0	0
1950—1935	15	3,2 ¹⁾	2,7 ²⁾	0,5	5	3,2	1935	+ 5	0	+ 5
							1935 ³⁾	+ 5	+ 10 ³⁾	+ 15
1935—1850	85	3,2 ¹⁾	2,7	0,5	27	3,2	1850	+ 32	+ 20 ⁴⁾	+ 52
1850—1800	50		1,7 ⁶⁾	1,0	14	2,7	1800	+ 46	+ 20	+ 66
1800—1650	150		1,7 ⁵⁾	0,3	30	2,0	1650	+ 76	+ 20 ⁷⁾	+ 96
1650—1634	16		1,7	0,3	3	2,0	11. 11. 1634	+ 79	+ 30 ⁷⁾	+ 109
1950—1650	300				79	2,6		+ 79		

Tönning										
.... 2000							2000	- 18	- 2	- 20
2000—1950	50	(2,7)	(0,8)	18	3,5		1950	0	0	0
1950—1936	14	2,8 ⁸⁾	2,7²⁾	4	2,8		1936	+ 4	0	+ 4
							1936 ⁹⁾	+ 14	0	+ 24
1936—1850	86	2,8	2,7	24	2,8		1850	+ 38	0	+ 48
1850—1650	200		1,7 ¹²⁾	34	1,7		1650	+ 72	0	+ 82
1650—1634	16			3	1,7		1634	+ 75	0	+ 85
							4. 2. 1825	+ 42	+ 10 ¹⁰⁾	+ 62
							11. 11. 1634	+ 75	+ 10 ¹⁰⁾	+ 95
1950—1650	300			75	2,5			+ 75		
Büsum										
.... 2000							2000	- 14	0	- 14
2000—1950	50	(2,7)	(0)	14	2,7		1950	± 0	0	± 0
1950—1850	100	2,1 ¹¹⁾	2,7	21	2,1		1850	+ 21	0	+ 21
1850—1650	200		1,7¹²⁾	34	1,7		1650	+ 55	0	+ 55
1650—1634	16			3	1,7		1634	+ 58	0	+ 58
1950—1650	300			58				+ 58		
Cuxhaven										
.... 2000							2000	- 14	0	- 14
2000—1950	50	(2,7)	0	14	2,7		1950	± 0	0	± 0
1950—1850	100	2,7 ¹³⁾	2,7	27	2,7		1850	+ 27	0	+ 27
1850—1650	200		1,7¹²⁾	34	1,7		1650	+ 64	0	+ 64
1650—1634	16			3	1,7		1634	+ 64	0	+ 64
1950—1650	300			64	2,3					
Glückstadt										
.... 2000							2000	- 13	0	- 13
2000—1950	50	(2,5) ¹⁷⁾	0	13	2,5		1950	± 0	0	± 0
1950—1900	50	- 0,5	(2,5)	2	- 0,5		1900	- 2	0	- 2
1900—1850	50	2,2 ¹⁴⁾	(2,5)	11	2,2		1850	+ 9	0	+ 9
1850—1825	25	(2,2)	1,5	2	1,5		4. 2. 1825	+ 11	+ 10 ¹⁸⁾	+ 11
1950—1850	100			11	1,1			+ 11		+ 21

Bemerkungen:

Fett = Ermittlung

Kursiv = Festlegung

(Klammer) = Schätzung

a) „Säkular“ im engeren Sinn.
„Säkular“ im allgemeinen Sprachgebrauch enthält meist schon die raumbedingten Anteile. Beispiel Glückstadt.

b) Beschickungswert = Pegelablesung 1950 weniger zeitgenössische Pegelablesung.

¹⁾ Mittel 1868—86... 1935—53, festgelegt für 1850—1950.

²⁾ Mittel Westküstenpegel etwa 1870—1950, gleich Mittel Cuxhaven 1843—61... 1935—53.

³⁾ Sturmflutfreier Damm Nordstrand.

⁴⁾ N.-Hever noch klein. S.-Hever Oberlauf breit.

⁵⁾ Laut Generalbericht Pellwormer Wasserwesen 1804.

⁶⁾ Analog 1800—1650.

⁷⁾ Entlastung durch Deichbrüche und Ausdeichungen 1634, u. a.

⁸⁾ Mittel 1867—85... 1935—53.

⁹⁾ Eiderabdämmung Nordfeld, Mai 1936.

¹⁰⁾ Entlastung durch Deichbrüche.

¹¹⁾ Mittel 1870—88... 1935—53.

¹²⁾ Analog Husum.

¹³⁾ Mittel 1843—61... 1935—53.

¹⁴⁾ Nach summarischen Unterlagen. Bericht WBA Glückstadt 1. 11. 1937.

¹⁵⁾ Verstärkte Fahrwasserbaggerungen Elbe.

¹⁶⁾ Baggerungen beginnen etwa 1850.

¹⁷⁾ Etwas kleiner als Cuxhaven.

¹⁸⁾ Entlastung durch Deichbrüche Kremper Marsch.

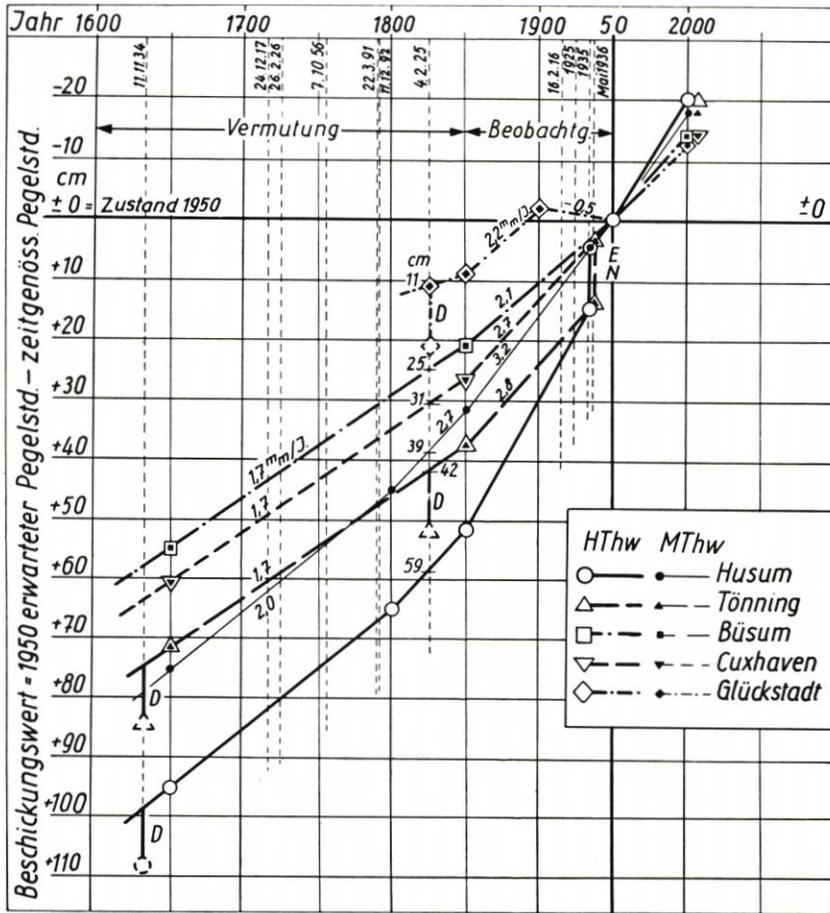


Abb. 9. Beschickungswerte früherer Sturmflutwasserstände für den Gewässerzustand 1950. Schleswig-holsteinische Westküste (nach Tab. 2)

D = vermuteter Einfluß von Deichbrüchen.

E = Anstieg infolge Eiderabdämmung bei Nordfeld 1936.

N = Anstieg infolge des sturmflutfreien Damms Nordstrand 1935.

Zahlen an den Linien = durchschnittlicher MThw-Anstieg.

Beispiel: Der Beschickungswert der Sturmflut vom 4. 2. 1825 in Tönning gibt an, daß diese Sturmflut unter denselben Wetterverhältnissen heute (1950) 42 cm höher auflaufen würde. Berücksichtigt man auch noch eine etwaige damalige Spiegelsenkung infolge Deichbruchentlastung, stiege der Beschickungswert auf + 52 cm.

Nach Abb. 8 ergibt sich das MThw, nach ausgeglichenen Ganglinien der 19jährigen Mittel in cm + NN zu:

Pegel	Husum	Tönning		Büsum	Cuxhaven	Glückstadt
		vor	nach			
Mittel		der Abdämmung				
1807/25	108	110		122	107	130
1907/25	140	125		142	132	142
1932/50	147	(142)	152	147	138	141

Tabelle 3a
Ermittlung und Beschickung hoher Sturmflutstände auf den Gewässerzustand 1950.
Schleswig-holsteinische Westküste

- Vorbemerkungen
- 1) Quellen und Unterlagen: SCHELLING (35), TOMCZAK (40), FISCHER (5), Tab. 2, Abb. 9 u. 10 dieses Aufsatzes.
 - 2) Bezeichnungen: 'Rhd. = Rheinländischer Fuß = 31,4 cm (etwa = dän. Fuß). 'Hbg. = Hamburger Fuß = 28,7 cm. OF = „Ordinäre Flut“ etwa = GHW = „Hochwasser der gewöhnlichen Flut“ = etwa MHW = Mittl. Tidehochwasser. HW, MHW, HHW = Abkürzungen für Thw, MThw, HThw. DMHW, DHHW = Beschickungswert (Differenz) der MHW und HHW lt. Abb. 10 dieses Aufsatzes. s = Stau = HW — MHW, s_a = HW — HW astronomisch.
 - 3) Indexe: HHW₁₈₂₅ = im Jahr 1825 eingetretener Pegelstand einer Sturmflut. HHW₁₈₂₅ (1950) = HHW₁₈₂₅ beschickt auf Gewässerzustand 1950. HHW_{Marke} 1825 = Sturmflutscheitelstand lt. Landmarke. DHHW_{1825/1900} = Änderung der Sturmflutwasserstände von 1825 bis 1900 infolge verändertem Gewässerzustand, lt. Abb. 9.
 - 4) Bemerkungen: Alle MHW-, DMHW- und DHHW-Angaben abgeleitet aus ausgeglichenen Ganglinien der 19jährigen MHW. MHW₁₉₅₀ (ausgeglichen): Husum + 147, Tönning + 152, Büsum + 147, Cuxhaven + 138 und Glückstadt + 141 cm NN. Frühere MHW zu berechnen aus MHW₁₉₅₀ (ausgegl.) — DMHW .../1950 nach Abb. 9.
 - 5) Zusammenstellung der Endwerte auf Tabelle 3b.

Lfd. Nr.	HHW damals 1950 NN+cm NN+cm
-------------	-----------------------------------

3./4. 2. 1825. Wind SW ... NW. Springzeit.

1. Tönning. HHW_{Marke} 1825 = + 502 NN [Jb. f. Gwk. 1901 ff. Wstdslisten 1885 ff. FISCHER (5). Bem. auf Deichkarte von 1895, MBA Heide: eingemessen „nach mehreren übereinstimmenden, gleich nach der Flut 1825 zu Tönning ... angebrachten, noch vorhandenen Zeichen“]. Stau s = 502 — MHW₁₈₂₅ = (502 — 110) NN lt. Abb. 9 = 392 cm = 12,5 'Rhd./13,5 'Hbg. Ähnlicher Wert lt. Angabe FISCHER durch Deichinsp. SALCHOW, wonach s₁₈₂₅ = 13,5 'Hbg. = 385 cm. Somit das MHW₁₈₂₅ = 110 NN etwa bestätigt bis auf 7 cm. HHW₁₈₂₅ (1950) = 502 + DHHW_{1825/1950} = 502 + 52/42 = + 554/544 NN mit/ohne Berücksichtigung von 10 cm Deichbruchentlastung. 502

544
2. Büsum. Nach Deichinspektor CHRISTENSEN bzw. nach der obengenannten Deichkarte von 1895 ist der Stau über OF: s₁₈₂₅ = 13 'Hbg. bzw. 13,5 'Rhd. = 373/424 cm. Letzterer Wert = „höchster Wellenauflauf“, daher nach Beispiel des 15. 10. 1881 vermessenen Wellenauflaufs um rund 1 bis 1¹/₂' zu kürzen, s₁₈₂₅ = 373/424 — 35 = 373/390 cm. HHW₁₈₂₅ = MHW₁₈₂₅ + s = (147 — 25) + 373/390 = + 495/512 NN. Verglichen mit HHW_{Tönning} = + 502 NN ist ersterer Wert wahrscheinlicher, da alle Sturmflutscheitel von Tönning nach Büsum fallen, auch bei nordwestlichem Wind (Abb. 10): HHW₁₈₂₅ = + 495 NN (FISCHER und das amtliche Jahrbuch geben an + 505 NN). HHW₁₈₂₅ (1950) = 495 + DHHW_{1825/1950} = 495 + 25 = + 520 NN. 495

520
3. Husum. Nach FISCHER u. a. gilt als überlieferter Stauwert s₁₈₂₅ = 14 'Rhd./Hbg. (?) = 440/402 cm. Die Art des Fußmaßes ist nicht eindeutig entschieden, auch nicht, ob Wellenauflauf enthalten ist. MHW₁₈₂₅ = 147 — 39 = 108 NN (Abb. 9). HHW₁₈₂₅ = 108 + 440/402 = + 548/510 NN, und mit 1' = rund 30 cm Wellenabzug + 518/470 NN. Dies ist ein ähnlicher Schwankungsbereich wie die andersartig ermittelten Grenzwerte + 549/483 NN ohne Wellenabzug nach SCHELLING (35) S. 142. Zuverlässiger ist ein Bezug auf den bestgesicherten Wert, HHW₁₈₂₅ Tönning = + 502 NN, mittels sonst beobachteter Scheiteldifferenzen. HHW_{Husum} — HHW_{Tönning} = 25/25/44 cm für die Sturmfluten 18./27. 10. 36/16. 2. 16. Die mittlere Staudifferenz 1936—41 beträgt nach TOM-

Lfd. Nr.		HHW	
		damals NN+cm	1950 NN+cm
	czak (40) bei Westwind Stärke 10 bzw. Westnordwest 10 = 20/25 cm, was mit Rücksicht auf das rund 5 cm höhere MHW in Tönning (nach der Eiderabdämmung) 15/20 cm höhere HHW in Husum ergibt. Bei aus WNW Sturmfluten wie 1825 ist heute mit 15 bis 40 cm großen Scheiteldifferenzen zu rechnen. Um 1825 war die Differenz kleiner im Zusammenhang mit dem in Husum stärkeren MHW-Anstieg und der räumlichen Entwicklung der Husumer Bucht (Abb. 9 und Tab. 2). Mit der für 1825 plausiblen HHW-Differenz von 15 cm wird $HHW_{1825}^{Husum} = HHW_{Tönning} + 15 = 502 + 15 = \text{rund} + 520 \text{ NN}$ (FISCHER errechnet + 524 NN = + 122 NN + 14 'Hbg. = $MHW_{1825} + \text{Stau}$). $DHHW_{1825/1950} = 59 \text{ cm}$, $HHW_{1825}^{(1950)} = 520 + 59 = + 579 \text{ NN}$.	520	579
4.	Cuxhaven. $HHW_{1825} \text{ Marke} = + 464 \text{ NN}$. $DHHW_{1825/1950} = 31 \text{ cm}$, $HHW_{1825}^{(1950)} = + 495 \text{ NN}$.	464	495
5.	Glückstadt. $HHW_{\text{Marke } 1825} = + 552 \text{ NN}$. Der Betrag des Staues ist glaubwürdig überliefert (FISCHER u. frühere), $s_{1825} = 15'3'' \text{ Hbg.} = 4,38 \text{ m}$, wozu geringe Beobachtungsfehler durch Wellenauflauf u. ä. hinzutreten mögen. Zum Vergleich: Mittels Abb. 9 erhält man $MHW_{1825}/MHW_{1950} - 11 = 141 - 11 = + 130 \text{ NN}$. Danach wäre $s_{1825} = 552 - 130 = 422 \text{ cm} = 14,7' = 14'8'' \text{ Hbg.}$. Bis auf 5" decken sich demnach die beiden Werte s. Würde nach FISCHER das $MHW_{1825} = 552 - 438 = + 114 \text{ NN}$ angenommen, so würde der Anstieg $DMHW_{1825/1900} = (152 + 2) - 114 = 40 \text{ cm} = 5,3 \text{ mm/Jahr}$, also ein unwahrscheinlich hoher Wert gewesen sein. $HHW_{1825}^{(1950)} = 552 + 11 = + 563 \text{ NN}$.	552	563
<i>11. 11. 1634. Wind SW...NW. 2 Tage vor Springzeit.</i>			
6.	Tönning. $HHW_{\text{Marke } 1634} = HHW_{\text{Marke } 1825} - 1'5'' \text{ Hbg.} = 502 - 46 \text{ cm} = + 456 \text{ NN}$ Bericht SALCHOW 1825 [SCHELLING (35)]. $DHHW_{1634/1950} = 75/85 \text{ cm}$ ohne/mit Berücksichtigung von 10 cm problematischer Deichbruchentlastung. $HHW_{1634}^{(1950)} = 456 + 75/85 = + 531/541 \text{ NN}$.	456	531
7.	Husum. Keine historischen Zahlenangaben für Husum. Nach SALCHOW ist auf Pellworm die Flut 1825 „stärker“ als 1634 gewesen. Analog Tönning vermutet für Husum: $HHW_{\text{Marke } 1634} = HHW_{\text{Marke } 1825} - 46 \text{ cm} = 520 - 46 = + 474 \text{ NN}$. $DHHW_{1634/1950} = 99 \text{ cm}$. $HHW_{1634/1950} = 474 + 99 = + 563 \text{ NN}$.	474	563
8.	Büsum. Keine historischen Zahlenangaben. Die mittlere Staudifferenz 1936—41 Tönning—Büsum bei West 10/Westnordwest 10 MDs = 40/10 cm, und bei den Sturmfluten 16. 2. 16/18. 10. 36/27. 10. 36 war $D_s = 17/17/40 \text{ cm}$, also sehr richtungsempfindlich. Da 1634 die ziemlich westnordwestliche Richtung entschied, wird $D_{s1634}^{(1950)} = 20 \text{ cm}$ geschätzt, wegen des von 1950 bis 1634 eingetretenen Unterschiedes $DHHW_{1634/1950} \text{ Tönning} - DHHW_{1634/1950} \text{ Büsum} = 75 - 57 = 18 \text{ cm}$ ist jedoch die damalige Scheiteldifferenz zwischen Tönning und Büsum merklich geringer als heute (u. a. Eiderabdämmung!) auf etwa $20 - 18 = \text{rund } 5 \text{ cm}$ zu schätzen. Daher $HHW_{1634} \text{ Büsum} = HHW_{1634} \text{ Tönning} - 5 \text{ cm} = 456 - 5 = + 451 \text{ NN}$. $DHHW_{1634/1950} = 57 \text{ cm}$. $HHW_{1634}^{(1950)} = 451 + 57 = + 508 \text{ NN}$.	451	508
9.	Cuxhaven nicht bearbeitet.		
10.	Glückstadt nicht bearbeitet.		

Lfd. Nr.	HHW	
	damals	1950
<hr/>		
NN+cm NN+cm		
24. 12. 1717. <i>Weihnachtsflut. Wind ... NW. 2 Tage vor Nippzeit.</i>		
Nach der Schilderung von WOEBCKEN (48) hat es sich in Ostfriesland um einen aus SW beginnenden Sturm gehandelt, der etwa vier Stunden vor HW-Zeit nach vorübergehendem Abflauen stoßartig zum NW-Orkan answoll (Trogsturm). Wegen des riesigen Überflutungsumfanges längs der ganzen deutsch-niederländischen Nordseeküste wird gefolgert, daß die Sturmverhältnisse in Schleswig-Holstein ähnlich wie in Ostfriesland waren, nämlich Hauptorkan aus WNW bis NW. Daher vermutlich der Stau in Husum wesentlich größer als Tönning und Büsum (Abb. 10 u. ob. Nr. 3 u. 8).		
11.	Tönning. HHW _{Marke 1717} = HHW _{Marke 1825} - 1'5''Hbg. = 502 - 46 cm = + 456 NN [SALCHOW 1825, lt. SCHELLING (35)]. DHHW _{1717/1950} = 60 cm. HHW _{1717/1950} = 456 + 60 = + 516 NN.	456 516
12.	Husum. HHW _{Marke 1717} = HHW _{Marke 1825} [SCHELLING (35)] = + 520 NN (s. Nr. 3), jedoch fraglich wegen unwahrscheinlich großer Scheiteldifferenz Husum - Tönning = 520 - 456 = 64 cm; HHW _{Marke 1717} = Beobachtungsfehler etwa durch Wellenaufschlag? Verbessert geschätzt auf HHW ₁₇₁₇ = + 505 NN. DHHW _{1717/1950} = 82 cm. HHW _{1717 (1950)} = 505 + 82 = 587 NN. Damit wäre die „heutige“ Scheiteldifferenz Husum - Tönning = 587 - 516 = 71 cm = 37 cm mehr, als am 16. 2. 1916 eingetreten ist.	505 587
13.	Büsum. Keine direkten Beobachtungen. Scheiteldifferenz gegen Tönning geschätzt - 5 cm. HHW ₁₇₁₇ = 456 - 5 = + 451 NN. DHHW _{1717/1950} = 44 cm, HHW _{1717 (1950)} = 451 + 44 = + 495 NN.	451 495
25. 2. 1718 und 31. 12. 1720. <i>Wind ?</i>		
Nach HEIMREICH sollen die Sturmfluten 1718 und 1720 in der Husumer Bucht ebenso hoch aufgelaufen sein wie im Jahre 1717. HHW _{1718 Husum} = „14' + GHW“. HHW ₁₇₂₀ auf den Halligen „ebenso hoch wie 1717, aber ungestümer noch in seinem Angriff“.		
14.	Husum. Die vagen Angaben erlauben höchstens die Schätzung, daß die Flutmarken 1718 und 1720 nicht viel niedriger als 1717 zu suchen sind. Festgelegt wird - für die Häufigkeitsbetrachtung hoher Sturmfluten -: HHW _{1718 (1950)} = HHW _{1717 (1950)} - 30 cm = 587 - 30 = + 557 NN. HHW _{1720 (1950)} = HHW _{1717 (1950)} - 30 cm = + 557 NN.	557 557
15.	Tönning, Büsum, Cuxhaven und Glückstadt keine verwertbaren Angaben.	
26. 2. 1726. <i>Wind?</i>		
16.	Tönning. HHW _{Marke 1726} = HHW _{Marke 1717} = HHW _{Marke 1825} - 1'5''Hbg. [SALCHOW 1825 lt. SCHELLING (35)] = + 456 NN (Nr. 11). DHHW _{1726/1950} = 59 (Abb. 9), HHW _{1726 (1950)} = 456 + 59 = + 515 NN.	456 515
17.	Husum. Keine Angaben. Scheiteldifferenz Husum - Tönning gering geschätzt, da andernfalls Erwähnung bei SALCHOW zu erwarten gewesen wäre. HHW _{Husum 1726 (1950)} = HHW _{Tönning 1726 (1950)} + 20 cm = 515 + 20 = + 535 NN	535

Lfd. Nr.	HHW			
	damals	1950		
	NN+cm	NN+cm		
18. Übrige Pegel. Nicht bearbeitet.				
7. 10. 1756. <i>Wind vermutlich West.</i>				
In den Sturmflutberichten 1825 der Deichinspektoren SALCHOW und CHRISTENSEN werden als vergleichswürdig hohe Sturmfluten aus der zahlreichen Serie der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts diejenigen von 1756, 1791 und 1792 hervorgehoben. 1756 wird der Wasserstand sowohl in Tönning als auch in Glückstadt als hoch erwähnt; so muß, obwohl nicht besonders erwähnt, auch Husum hohen Stau gehabt haben. Scheiteldifferenzen also gering etwa wie am 18. 10. 1936 (Abb. 10).				
19.	Tönning. $\text{HHW}_{\text{Marke 1756}} = \text{HHW}_{\text{Marke 1825}} - 1'5''\text{Hbg.} = 502 - 46 = + 456 \text{ NN. DHHW}_{1756/1950} = 54 \text{ cm. HHW}_{1756 (1950)} = 456 + 54 = + 510 \text{ NN.}$	456		510
20.	Husum. Scheiteldifferenz Husum — Tönning = 25 cm wie am 18. 10. 1936 lt. Abbildung 10. $\text{HHW}_{1756(1950)} = 510 + 25 = + 535 \text{ NN.}$			535
22. 3. 1791. <i>Wind?</i>				
21.	Husum. $\text{HHW}_{\text{Marke 1791}} = \text{HHW}_{\text{Marke 1825}} - 1'5''\text{Hbg. [ARENDS nach SCHELLING (35)]} = 520 - 46 = + 474 \text{ NN. DHHW}_{1792/1950} = 67 \text{ cm, HHW}_{1792 (1950)} = 474 + 67 = + 541 \text{ NN.}$	474		541
11. 12. 1792. <i>Wind vermutlich etwa WNW.</i>				
SALCHOW erwähnt das HHW Glückstadt als um 1,5' niedriger als 1825. Gleichzeitig „nahm die Sturmflut besonders schwer die Halligen mit“ (MÜLLER, 1917, Wasserwesen: Die Halligen Bd. 1). Keine sonstigen Zahlenangaben.				
22.	Husum. Vermutet wird das auf heute beschickte $\text{HHW}_{1792 (1950)}$ nicht niedriger als + 500 NN, d. i. rund $1\frac{1}{2}'$ niedriger als 1791.			500
1792 bis 1916				
An der schleswig-holsteinischen Küste keine Sturmfluten überliefert über + 500 NN, beschildert auf heute, außer der oben behandelten Flut von 1825.				
16. 2. 1916. <i>Wind W... WNW. 3 Tage vor Springzeit</i>				
Nach Schreibpegelbeobachtungen. Die DHHW 1916/1950 siehe Abbildung 9.				
23.	Husum. $\text{HHW}_{1916 (1950)} = 509 + 23 = + 532 \text{ NN}$	509		532
24.	Tönning. „ = 465 + 20 = + 485 NN	465		485
25.	Büsum. „ = 446 + 7 = + 453 NN	446		453
26.	Cuxhaven. „ = 410 + 9 = + 419 NN	410		419
27.	Glückstadt. „ = 447 + (-2) = + 445 NN	447		445

Tabelle 3b
Zusammenstellung der Scheitelstände hoher Sturmfluten

a) damaliger zeitgenössischer Pegelstand
b) beschrift auf Gewässerzustand 1925
c) beschrift auf Gewässerzustand 1950

		Husum			Tönning			Büsum			Cuxhaven			Glückstadt		
		a	b ¹⁾	c	a	b ²⁾	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
1	Sturmflut 11. 11. 1634	474			456			451								
			545			514										
				563			531		508							
2	24. 12. 1717	505			456			451								
			569			499										
				587			516		495							
3	25. 2. 1718		539			(508) ³⁾										
			557			(525) ³⁾										
4	31. 12. 1720		539			(508) ³⁾										
			557			(525) ³⁾										
5	26. 2. 1726				456											
			517			498										
				535			515									
6	7. 10. 1756				456											
			517			493										
				535			510		(490) ⁴⁾		(482) ⁴⁾					528
7	22. 3. 1791	474														
			523			(493) ³⁾										
				541		(510) ³⁾										
8	11. 12. 1792															
			482			(463)										
			500			(480)										
9	4. 2. 1825	520			502			495		464			552			
			561			527										
				579			544		520		495					563
10	16. 2. 1916	509			465			446		410			447			
			514			468										
				532			485		453		419					445

() = roh geschätzte Werte.

¹⁾ = Anstieg der Sturmflutstände DHHW_{1925/1950} Husum = 18 cm (Abb. 9).

²⁾ = Anstieg der Sturmflutstände DHHW_{1925/1950} Tönning = 17 cm.

³⁾ = rund 30 cm unter Husum.

⁴⁾ = Gefälle ähnlich 18. 10. 1936.

Der hier angestellte Versuch der Beschickung von Wasserständen muß angesichts der lückenhaften Unterlagen in Einzelheiten gewisse Zweifel offenlassen. Indessen — es möge wiederholt werden — darf heute keine über die Sicherheit der Küste anzustellende Planung mehr die Berücksichtigung von womöglich bedrohlichen säkularen Tendenzen der Wasserstandsänderung vernachlässigen.

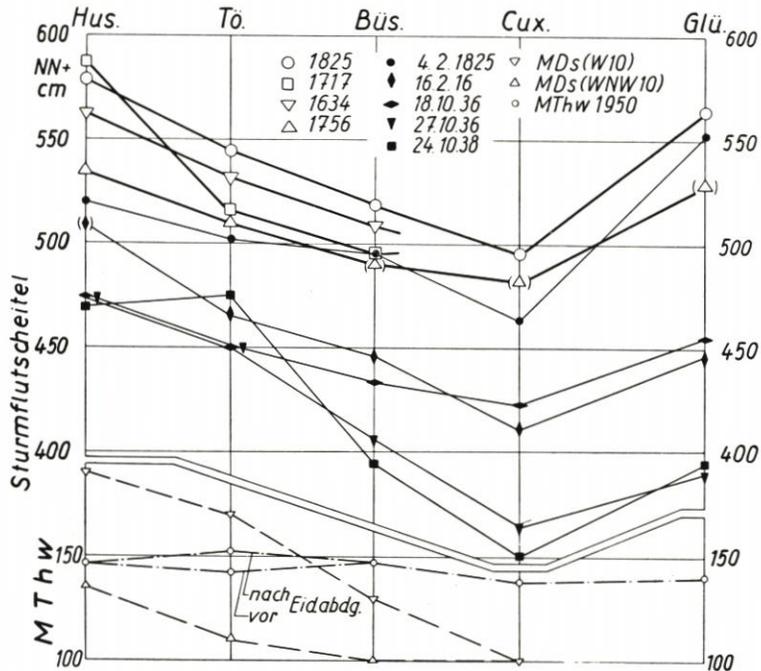


Abb. 10. Scheitelstände historischer und neuerer Sturmfluten entlang der schleswig-holsteinischen Westküste

Große offene Signaturen: Scheitelstände historischer Sturmfluten, beschriftet auf den heutigen (1950) Gewässerzustand. Nach Tab. 3b.

Kleine schwarze Signaturen: Scheitelstände neuerer Sturmfluten einschl. 1825, nach zeitgenössischen Pegelbeobachtungen.

Kleine offene Signaturen: Mittelwerte, und zwar

MDs (W10) = Mittlere relative Windstaudifferenzen aller Sturmfluten bei Windstärke 10 Bft. aus West 1936/1941 [nach TOMCZAK 1952 (41)]

MDs (WNW10) = wie vor, bei Windstärke 10 Bft. aus Westnordwest (41)

MThw 1941/50 = Mittel tidehochwasser 1941/50

8. Richtwerte des maßgebenden Sturmflutwasserstandes

Physikalische Zusammenhänge und statistische Gesetzmäßigkeiten, ferner die Erfahrung aus der holländischen Katastrophenflut von 1953 und schließlich auch die Ansichten berufener Fachmänner wie VAN VEEN (44) und Fachgremien wie des KÜSTENAUSSCHUSSES NORD- UND OSTSEE, der holländischen DELTAKOMMISSION von 1953 (3), kurz, alles spricht gegen das Bestehen einer unüberschreitbaren oberen Sturmflutgrenze in einem Höhenbereich, der (einschließlich des Wellenaufbaus) als absolut sturmflutkehrende Deichhöhe wirtschaftlich noch in Betracht käme (s. S. 104). Die Lösung dieses Grenzwertproblems bleibt weiterführenden Studien überlassen.

Praktisch bedeutet das den Verzicht auf die irreführende Vorstellung der absoluten Überflutungssicherheit. Dafür gewinnt man die Gewißheit einer zahlenmäßig definierbaren relativen Sicherheit, wenn man mit Hilfe der Häufigkeitsbeziehungen einen Sturmflutwasserstand wählt, der unter Berücksichtigung des Wellenaufbaus (s. S. 126 ff. und 139 ff.) die Überflutung einer Deichkrone gerade so oft erwarten läßt, wie es für tragbar gehalten wird.

Es ist daher für den Entwurf des Deichbesticks vernünftiger, den bisherigen, absolute Sicherheit nur vortäuschenden Begriff „höchstmöglicher Sturmflutwasserstand“ (s. S. 98 ff.) abzulösen

durch den sinnvolleren Begriff „maßgebender Sturmflutwasserstand“, der nunmehr kein eindeutiges Zahlenergebnis mehr darstellt, sondern die Angelegenheit einer Reihe praktischer Berechnungen wird.

Aus der Erwägung, daß man bautechnisch einen Deich gegen ein längeres, aber doch vorübergehendes Überfluten von Wellen widerstandsfähig machen kann, daß die Höhenlage der meisten Marschen Schleswig-Holsteins und die in ihr liegenden Objekte im äußersten Fall eine seltene, vorübergehende und geringe Überstauung ohne katastrophale Folgen erlaubten und daß sich das Verhältnis der Baukosten zu dem abzuwehrenden Risiko in vernünftiger Grenze bewegen sollte, wird als maßgebender Sturmflutwasserstand anhaltweise ein solcher vorgeschlagen, der durchschnittlich einmal in hundert Jahren zu erwarten ist (vgl. S. 145 ff.)⁸⁾.

Damit diese aus statistischen Durchschnittswerten abgeleitete Festlegung im Einklang mit der bisher schwersten an der schleswig-holsteinischen Westküste erlebten Erfahrung bleibt, wird verlangt, daß der maßgebende Sturmflutwasserstand keinesfalls wesentlich unter der auf heutige Verhältnisse beschickten Katastrophenflut vom 3./4. 2. 1825 liegen darf.

Ferner wird noch auf den Rat des KÜSTENAUSSCHUSSES (21) nach SCHELLINGS Vorbild (35) geprüft, ob in den bisherigen Pegelregistrierungen Einzelmerkmale von Sturmfluten enthalten sind, die, ungünstig kombiniert, einen höheren Sturmflutwasserstand als den maßgebenden hätten ergeben können (vgl. S. 99, Ziffer 5a u. b).

Da schließlich eine Fortdauer des säkularen Wasseranstiegs und damit eine ständige Verminderung der Überflutungssicherheit nicht ausgeschlossen werden kann, wird noch der entsprechende Zuschlag für eine absehbare Zukunft eingerechnet (Tab. 2).

Diese Vorschläge hat die Landesregierung Schleswig-Holstein durch die im März 1954 von ihr erlassenen Grundsätze zur Ermittlung des für die Nordsee- und Elbedeiche maßgebenden Sturmflutwasserstandes anerkannt.

Die Ergebnisse der drei Verfahren:

- a) Feststellung desjenigen Wasserstandes, der durchschnittlich einmal in hundert Jahren erreicht oder überschritten wird,
- b) Rekonstruktion der überlieferten Sturmflutscheitelstände des 3./4. Februar 1825 unter Berücksichtigung der inzwischen eingetretenen säkularen und raumbedingten Änderung der Wasserstände,
- c) Superposition des bisher beobachteten größten Unterschiedes zwischen dem eingetretenen und dem vorausberechneten Hochwasserstand (Windstau) und des höchsten vorausberechneten Springtidehochwassers, werden kritisch miteinander verglichen. Daraus wird ein Richtwert des maßgebenden Sturmflutwasserstandes gebildet, der keins der aufgezählten Ergebnisse wesentlich unterschreitet und außerdem nicht nur für den heutigen (1950) sondern auch für den rund ein halbes Jahrhundert vorauszu sehenden (Jahr 2000) Gewässerzustand Gültigkeit haben soll.

Nach den in den Tabellen 4 und 5 aufgezeichneten Ableitungen und nach der Darstellung in Abbildung 24 liegen die nach obigen Grundsätzen festgestellten „maßgebenden Sturmflutwasserstände“ im Jahre 2000 an der schleswig-holsteinischen Westküste bis zu 0,40 m höher als die von SCHELLING berechneten sogenannten höchstmöglichen Wasserstände (s. Tab. 5, Spalte 4 und 8).

Im einzelnen ergeben sich die „maßgebenden Sturmflutwasserstände“ HThw (maßg.) zu:

HThw (maßg.)	Husum	= + 5,9 m NN	= + 4,4 m MThw	1941/50
„	„	Tönning	= + 5,6 m NN	= + 4,1 m „
„	„	Büsum	= + 5,3 m NN	= + 3,8 m „
„	„	Glückstadt	= + 5,6 m NN	= + 4,2 m „
„	„	Westküste im Mittel	= + 5,6 m NN	= + 4,1 m „

⁸⁾ Die Angabe der durchschnittlichen Häufigkeit sagt nichts über den zu erwartenden Eintrittstermin aus. Dieses „eine Mal in hundert Jahren“ kann im Einzelfall schon morgen und übermorgen oder auch erst nach über hundert Jahren eintreten!

Tabelle 4
Ermittlung der Richtwerte des maßgebenden Sturmflutwasserstandes

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
	a) Superposition, Größtstau + Springtide		b) Beschldg. 1825 c) Häufigkeit 1mal in 100 Jahren											
Pegel	Beob. seit	Datum	HHs	HHS _p HW	HHW	HHW	HHW	DHHW	HW (1:100)	DHHW	DHHW	Richtwert		
			cm	NN + cm	NN + cm	NN + cm	NN + cm	cm	NN + cm	cm	cm	NN + cm NN + cm		
1. Husum	1868	16. 2. 16	359	197	556	579	599	561	19	580	600	20	5,7	5,9
2. Tönning	1867	6. 11. 11	332	210	542	544	564	536	17	553	573	20	5,4	5,6
3. Büsum	1870	16. 2. 16	etwa 290	201	491	520	534	510	5	515	529	14	5,2	5,3
4. Cuxhaven	1843	13. 1. 16	310	192	502	495	509	500	6	506	520	14	5,1	5,2
5. Glückstadt	(1900)	18. 10. 36	310	194	504	563	375	538	-1	537	549	12	5,5	5,6
6. Nordfeld/Eider														
7. Meldorf														
8. Friedrichskooghafen														
9. Brunsbüttelkoog														

Bezeichnungen:

- s = Stau = HW_{eingetreten} - HW_{astronomisch}.
- HH_s = höchstbeobachteter Stau
- HHS_pHW₍₁₉₅₀₎ = Höchstvoraberechnetes Spring-HW, Zustand 1950 (lt. Dtsch. Hydr. Institut Hamburg 24. 4. 1954).
- DHHW_{1925/1950} = Anstieg des HHW im Zeitraum 1925-1950 (lt. Abb. 9).
- HHW_{1825 (1950)} = Höchster Sturmflutstand 1825, beschildet auf Gewässerzustand 1950.
- HW (1:100) = Wasserstand mit der mittleren Überschreitungshäufigkeit 1mal in 100 Jahren.
- HHW_{massg. (1950)} = Maßgebender Sturmflutwasserstand beschildet auf den Gewässerzustand 1950.

Aus: HHW_{T0} + Diff. HHW_{Nf} - HHW_{T0} = 5,6 + 1,3 [nach HUNDT (15)] = 6,9
 Diff. HHW_{Maf} - HHW_{Bis} = rund 30 cm [TOMCZAK (40)] bis 50 cm [HUNDT (15)]
 HHW_{massg. (2000) Bis} + 0,4 = 5,7 HHW (1:100)Maf nach Dauerlinie 5,7
 1926-50 für 1938 = + 5,6, für Jahr 2000 = + 5,8 m NN
 Diff. HHW_{Fr} - HHW_{Cux} = 14 cm als Mittel von 6 hohen Sturmfluten seit 1930
 HHW_{massg. Cux} + 0,14 = 5,2 + 0,1 = + 5,3 m NN 5,3
 HHW_{massg. Brunsb} = HHW_{massg. Cux} + 0,2 = 5,2 + 0,2 = + 5,4 m NN 5,4

Tabelle 5

Vergleich höchstmöglicher und maßgebender Sturmflutwasserstände und Stauwerte
Schleswig-holsteinische Westküste

1 Pegel	2 HHW (maßgeb.) (Richtwerte Tab. 4)		3 HHW (höchst- möglich) nach SCHELLING 1952		4 HHW (höchstmöglich) sonstige Untersucher		5 HHW (maßgeb.) (2000) höher als HHW (SCHELLING)		6 HHThw (amtlich) J. f. Gwkde.		7 MHW heute		8 Stau des HHW (maßgeb.) über heutigem MHW	
	1950 NN+m	2000 NN+m	1950 NN+m	1950 NN+m	1948...1953 NN+m	1950 NN+m	m	m	1941/50 NN+m	1950 m	1950 m	2000 m		
Beschriftet auf Gewässerzust.														
1. Husum	5,7	5,9	5,5	5,75 5,25	GAYE 1948 FISCHER 1953	5,09	0,4	1,49	4,2	4,4				
2. Tönning	5,4	5,6	5,3			5,12	0,3	1,53	3,9	4,1				
3. Büsum	5,2	5,3	5,0			5,05	0,3	1,47	3,7	3,8				
4. Cuxhaven	5,1	5,2	—	5,90 5,50	PRÜGEL 1948 LEPPIK 1950	4,66	—	1,38	3,7	3,8				
5. Glückstadt	5,5	5,6	—			5,52	—	1,42	4,1	4,2				
6. Nordfeld/Eider	—	6,9	—			5,14	—	1,78	—	5,1				
7. Meldorf	—	5,7	5,2			4,49	0,5	1,55	—	4,1				
8. Friedrichskooghafen	—	5,3	—			4,26	—	1,43 (1948/50)	—	3,9				
9. Brunsbüttelkoog	—	5,4	—			—	—	—	—	—				

Der höchste Sturmflutwasserstand wird an der Eiderabdämmung, 20 km oberhalb von Tönning erwartet:

$$\text{HThw (maßg.) Nordfeld} = + 6,9 \text{ m NN} = + 5,1 \text{ m MThw 1941/50}$$

Die Ergebnisse wurden im Abschnitt V noch vergleichend gewertet.

III. Der maßgebende Wellenauflauf am Deich

Unter dem Wellenauflauf A wird in diesem Aufsatz der lotrecht gemessene Höhenunterschied zwischen der auf die Deichböschung aufgelaufenen höchsten Wellenspitze und dem Ruhewasserspiegel verstanden.

Während der Sturmfluten am 18. und 27. Oktober 1936 wurden einzelne Deichstrecken der schleswig-holsteinischen Westküste von Wellen überflutet, obwohl die höchstbekanntesten Wasserstände (HThw) nicht überall erreicht wurden und obwohl der Küstenwind nicht einmal Orkanstärke hatte, so auf Nordstrand-Nord und -West, Pellworm-West und -Ost (!), am Dockkoog bei Husum und am Neufelder Koog-West. Die Schäden an den überströmten Binnenböschungen waren bedrohlich und im ganzen ein Zeichen unzureichender Schätzung der Höhe des Wellenaufbaus [vgl. BUSCH 1937 (2) und die teils unveröffentlichten Lichtbilder Abbildungen 14 bis 19]. Dieser Unsicherheit in der Abschätzung des Wellenaufbaus wurde bisher beim Entwurf von Deichhöhen durch einen „Sicherheitszuschlag“ Rechnung getragen, insbesondere für die sturmzugewandten Luvdeiche, weniger für die Leedeiche. Ähnlich unterschiedlich war die Bemessung der Deichhöhen im südholändischen Inselgebiet gehandhabt worden mit der Auswirkung, daß die Sturmflutkatastrophe des 1. Februar 1953 entscheidend durch Binnenschäden an den Leedeichen eingeleitet wurde, die bei zu sparsamer Höhenbemessung zuerst vom Wasser überflutet wurden [KLEIN (19), HUNDT (17)].

Die zukünftig maßgebenden Sturmflutwasserstände reichen noch rund 1 m über die Sturmflutwasserstände des Oktober 1936 hinaus, für deren Wellenaufbau, wie oben erwähnt, die bestickmäßige Kronenhöhe vereinzelt schon nicht ausgereicht hatte. Daß dann die übliche Faustformel: Größter Wellenaufbau am Festland = rund 2 m und an den Inseln rund 1,50 m nicht mehr genügen kann, liegt auf der Hand [vgl. SCHELLING (35)].

1. Unterlagen und Verfahren (Westküste)

Deichinspektor SCHEFFER (34) hat an der Eider und in Dithmarschen zu den rekonstruierten Wasserständen von 1825 Wellenaufbau beträge hinzugeschlagen, die er bei selberlebten Sturmfluten von 1858 und 1860, die niedriger als 1825 waren, nach Flutkanten gemessen hatte. Danach war zum Beispiel bei Büsum der Wellenaufbau A = 5 Fuß + Zuschlag 1 Fuß = 6 Fuß = 1,9 m. Im übrigen wurde der Wellenaufbau nach örtlicher Erfahrung und Erinnerung geschätzt. Ein modernes Deichbesteck, wie das von 1937 für die abgedämmte Untereider, beruhte ebenfalls auf der Einwägung der Flutkanten einzelner Sturmfluten, unter anderem vom 27. Oktober 1936, denen ein „Sicherheitsbetrag“ von 50 cm hinzugeschlagen wurde. Andere Verfahren gab es nicht. Und so entbehrt bis heute die Bemessung des Wellenaufbaus an Seedeichen noch zuverlässiger Grundlagen.

Ähnlich hatten teilweise die Verhältnisse im Deichwesen des südholändischen Katastrophengebietes gelegen. Erst die Tätigkeit der 1939 berufenen, sogenannten STURMFLUTKOMMISSION scheint dort eine eingehendere Beschäftigung auch mit der Frage des Wellenaufbaus zur Folge gehabt zu haben. Bei der generellen Überprüfung der Deichzustände hat man sich ebenfalls nur auf einige wenige vollständige Flutkantenvermessungen stützen können (zum Beispiel nach der Sturmflut 1943 in Südholland und nach dem 4. Februar 1944 in Westfriesland), und benutzt diese als mehr oder weniger fragwürdigen Anhalt für die Bestimmung der Sollhöhen der Deiche.

Man hat in den Niederlanden nach 1940 außerdem, ausgehend von den umfangreichen, von MUNK und SVERDRUP durchgeführten amerikanischen und englischen Seeganguntersuchungen,

die rechnerische Ermittlung der Wellenhöhen und des Wellenaufbaus eingeführt. Während dieses aus „Tief“ wassergebieten abgeleitete Formel- und Diagrammaterial [von GROEN (9) anschaulich dargestellt] auf die morphologisch teils ähnlichen Küstengebiete Südhollands mit vielen Schardeichen anwendbar ist, ist es für die flachen Wattgewässer vor den deutschen Nordseediechen nur bedingt brauchbar. Für den Wellenaufbau selbst und seine auf den Deich wirkenden Kräfte hat das Wasserbau-Laboratorium Delft aus Modell- und Naturmessungen folgende Formel entwickelt: $A = K \cdot H$.

A = Höhe des Wellenaufbaus,

H = Wellenhöhe vor dem Deich,

K = ein von den Deichabmessungen und von der Deichlage abhängiger Wert, der unter anderen den dämpfenden Einfluß der auf den meisten niederländischen Deichen befindlichen Außenberme berücksichtigt [VALKEN (43) und BIJKER (18)].

Auch dieses Rechenmittel, das weder die Wassertiefe vor dem Deich noch die Wellenperiode erfaßt, läßt sich nicht ohne weiteres auf die meist durch Watt oder Vorland geschützten deutschen Deiche anwenden.

Angesichts solcher unzureichenden Kenntnisse erhielt 1953 das Franzius-Institut in Hannover von der Landesregierung Schleswig-Holstein den Auftrag zur Durchführung entsprechender Modellversuche. Deren Ergebnisse, ergänzt durch Naturmessungen, erlauben nunmehr den Versuch, die Größenordnung des bei sehr hohen Sturmfluten zu erwartenden Wellenaufbaus zu bestimmen.

a) Die Flutkanteneinwägungen

Die Unterlagen für die folgenden Ermittlungen bilden Ergebnisse von Flutkanteneinwägungen in Nordfriesland nach den Sturmfluten vom 18. und 27. 10. 1936, in Eiderstedt, Dithmarschen und Nordfriesland nach dem 16. 1. 1954, und Wellenaufbauschätzungen in Südholland nach dem 1. 2. 1953, deren Auswertungen in den Abbildungen 11 bis 13 und teilweise in Tabelle 6 wiedergegeben werden. Verschiedentlich konnte der Wellenaufbau nicht vermessen werden, sondern mußte bei den nächtlichen sich überstürzenden Ereignissen in Südholland nachträglich nach dem Beschädigungsgrad des Deiches oder in Nordstrand und Pellworm im Oktober 1936 nach den fotografischen Aufnahmen geschätzt werden (vgl. hierzu die Abbildungen 14 bis 19). Im Höchstfall (z. B. Tab. 6, Nr. 12), wurden die Spitzen der überflutenden Wellen 60 cm höher als die Deichkrone geschätzt, was nach Abbildung 18, die diese auf West-Pellworm gelegene Deichstrecke betrifft, nicht übertrieben scheint.

In den Diagrammen der Abbildungen 11 bis 13 ist versucht worden, die für den Wellenaufbau etwa maßgebenden Faktoren der Deichlage in bezug auf Wind und See zu veranschaulichen.

b) Modellversuche über Wellenhöhen im Wattgebiet

Die im Franzius-Institut in Hannover angestellten Versuche [HENSEN (13)] erstreben an einem schematischen und auf quer auflaufenden Seegang beschränkten Modell zunächst grundsätzliche Einsicht in die Wellen- und Brandungsmechanik vor und an einem Deich, der hart am tiefen Wasser liegt, also an einem Ort, wo die gesamte Energie der Meereswellen bis dicht an den Deich herangelangt, einem Gefahrenpunkte, wie er an der schleswig-holsteinischen Westküste allerdings selten vorkommt.

Die zunächst gewählte Versuchsbeschränkung auf ein Tiefwasserrelief läßt die Anwendung der Ergebnisse auf die weit überwiegenden Naturfälle der Flachwasserreliefs (Deich hinter breiten Watt- und Vorlandflächen) nur in Auswahl zu. Tatsächlich ist der Wattgürtel an der schleswig-holsteinischen Westküste fast nirgends schmaler als 3 km, im übrigen mehr als 10 km breit, und die Watt Rücken erheben sich durchweg bis zu + 0,50 m NN, d. h. bis rund 1 m unter MThw, vereinzelt höher. Wenn somit die wirksame Wassertiefe bei hohen Sturmfluten auf sehr langen Wellenbahnen nur 3 bis 4,50 m beträgt, werden die Meereswellen nach dem Durchgang durch die Brandungszone des äußeren Wattensaumes mehr oder weniger gelöscht sein,

128

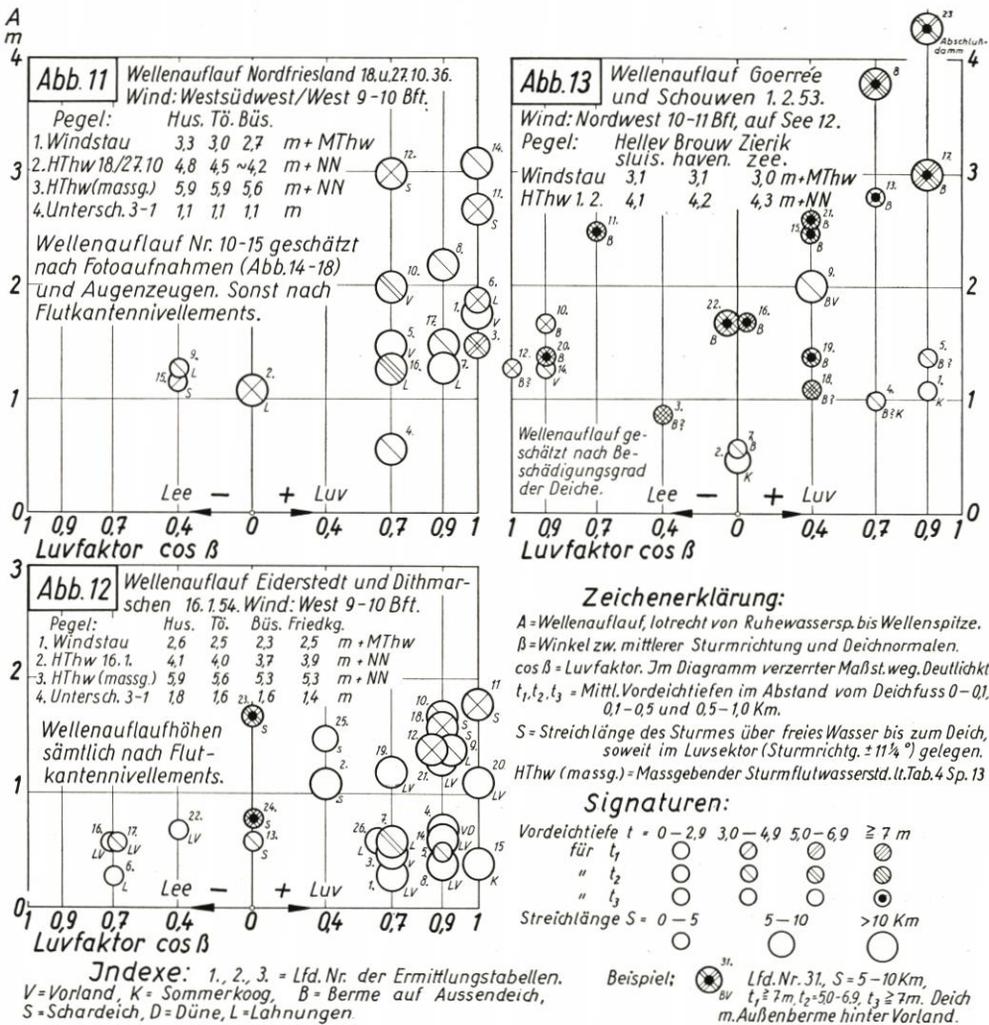


Abb. 11 bis 13. Wellenauflauf und Deichlage bei einigen Sturmfluten in Schleswig-Holstein und in Holland

Erläuterung zu:

Abb. 11

- Nr. 1— 9 Festland
- 10—15 Nordstrand und Pellworm
- 16—17 Hundeknöll und Wesselburenerkoog-West (vgl. Abb. 12, Nr. 7—8)
- 9 Nordstrander Damm Süd
- 12 Pellworm West, Hölle (vgl. Abb. 17—18)
- 14 Pellworm Nordwest, Kl. Norderkoog
- 15 Pellworm Ost, Hafen

Abb. 13

- Nr. 1— 2 Goeree, Nordseite
- 3— 7 Goeree, Südseite
- 8—13 Schouwen, Nordseite

Abb. 12

- Nr. 1— 6 Eiderstedt
- 7—13 Norderdithmarschen
- 14—24 Süderdithmarschen
- 7— 8 Hundeknöll und Wesselburenerkoog West (vgl. Abb. 11, Nr. 16—17)
- 25 Föhr West, Nordfriesland
- 26 Südwesthörn, nordfriesisches Festland
- Nr. 14—20 Schouwen, Südseite
- 21—22 Kattendijk und Kruijningen auf Süd-Beveland
- 23 Kornwerderzand, Abschlusdamm

Tabelle 6
Wellenauflauf und Deichlage in Nordfriesland am 18. und 27. 10. 1936
(graphische Darstellung s. Abb. 11)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10a	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33				
Lfd. Nr.	Deichstrecke	Stat.	Deich			Bodenhöhe vor dem Deich zu NN			Sommerkoog, Vorland, Lahnung Schar	Richtungen			Wasserstand und Wassertiefen				Deichschäden				Lfd. Nr.																
			Kronenhöhe	mittl. Böschung über MHw	Berne Mauer	Abstand vom Deichfuß	Mittl. Höhe vor dem Deich i. Abst.	Sommerkoog, Vorland, Lahnung Schar		Deichnormale nach	Hauptsturm aus	Luvfaktor	Streichraum in Luvsektor	HT _{hw}	Mittl. Wassertiefe v.d.Deich im Abstand	Binnen	Außen	Durchbruch	Zahl bzw. Strecke	Wellenspitzen		Mindestwellenauflauf	Geschätzter Wellenauflauf														
			NN+	1 :	B, M	- 3m	- 6m	- 9m	0-0,1 km	0,1-0,5 km	0,5-1 km	SK, V, L, S	(16er Skala)	cos β	km×km	NN+	0-0,1 km	0,1-0,5 km	0,5-1 km																		
1	Wiedingharder Alter Koog		71			—	—	—	18	12	5	V	W	W +1	23×9	41	23	29	36															1			
2	Südwesthörn		69			6	7		-2	-5	-10	L	S	W ±0	24×9	41	43	46	51															2			
3	Dagebüller Koog		66			2	4		-10	-20	-24	S	W	W +1	7×2,5	40	50	60	64															3			
4	Osewoldter Koog		69			6,5	8		18	10	2	V	SW	W +0,7	11×4 ¹⁾	41	23	30	39															4			
5	Fahretofter Koog		61			3	3,5		18	18	12	V	SW	W +0,7	14×5 ¹⁾	42	24	24	30															5			
6	Ockholmer Koog		70			4,3	4,3		2	0	-5	L	W	W +1,0	8×3	45	43	45	50															6			
7	Sönke-Nissen-Koog		72			5,2	5,5		18	18	5	V, L	WSW	W +0,9	22×1	45	27	27	40																7		
8	Hattstedter Koog		71			5	6		18	10	5	V, L	WSW	W +0,9	19×1,5	46	28	36	41																8		
9	Nordstranderdamm Süds.		70			—	—		18	10	5	V, L	SSO	W -0,4	0×0	47	29	37	42																9		
10	Nordstrand Kiefhuk		58			3	3,1		16	0	-10	V, S	NW	W +0,7	10×3	44	28	44	54																Wellenüberlauf	10	
11	Nordstrand Trendermarschkoog		63			3	3,2		0	-5	-10	S	W	W +1,0	∞×∞	42	42	47	52								++									11	
12	Pellworm Hölle	Dst 12	62			2,5	4		±0	-2	-5	S	SW	W +0,7	∞×∞	38	38	40	43																	Wellenüberlauf	12
13																																					13
14	Pellworm, kl. Norderkoog	Dst 30	63			1,8	4		16	0	-8	V	W	W +1,0	∞×∞	38	22	38	46																		14
15	Pellworm Hafen	Dst 44	51			2,2	2,4		0	12	-8	S	SSO	W -0,4	0×0	42	42	30	50								+										15
16	Hundeknöll	104,4	68			0,3	0,35		16	-25	-4	L	NW	W +0,7	∞×∞	45	29	70	49																		16
17	Wesselburener Koog		69			1,2	2,0		24	10	0	V, L	WNW	W +0,9	∞×∞	45	21 ²⁾	35	45																		17

¹⁾ Schneidet Oland-Damm.
²⁾ Steinkante + 2,4 auf 100 m vom Deichfuß!



Abb. 14
Nordstrand Nordwest,
Kieffhuk
Schwere Brandung am
Außendeich
18. 10. 36 etwa 14 Uhr.
HThw + 4,4 m NN.
Wind W 10 Bft.
Deichrichtung
(hinten) SW... NO.
Blick gegen Ost

Aufn. A. BUSCH, Nordstrand

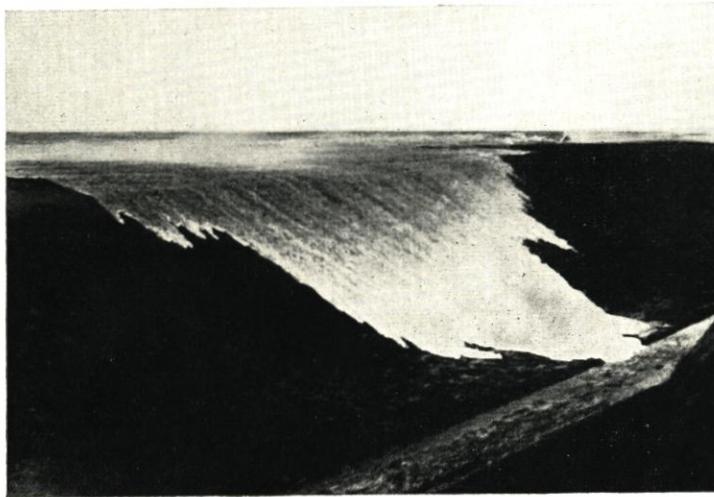


Abb. 15
Nordstrand Nordwest,
Kieffhuk
Überschießende Welle
18. 10. 36 etwa 14 Uhr.
HThw + 4,4 m NN.
Deichkrone + 5,8 m NN.
Wind W 10 Bft.
Deichrichtung SW... NO.
Blick gegen Nord.
Dieselbe Deichstrecke
wie Abb. 14

Aufn. A. BUSCH, Nordstrand

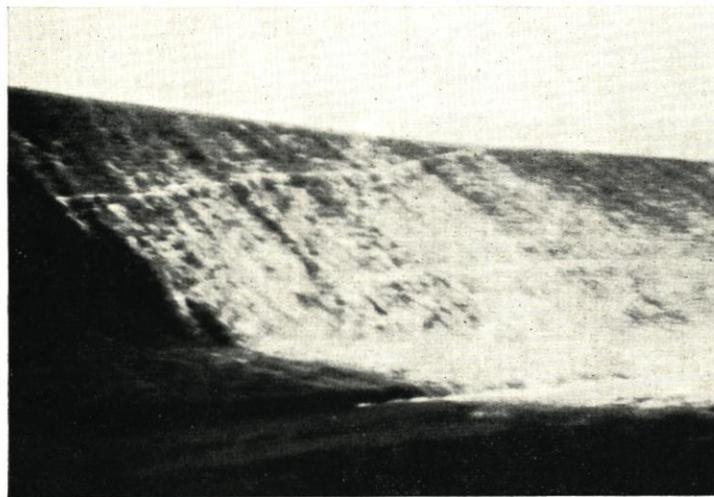


Abb. 16
Nordstrand Nordwest,
Kieffhuk
Überschießende Wellenfront
18. 10. 36 etwa 14 Uhr.
HThw + 4,4 m NN.
Deichkrone + 5,8 m NN.
Wind WNW 11 Bft.
Deichrichtung SW... NO.
Blick gegen Nord.
Standort wie Abb. 15

Aufn. A. BUSCH, Nordstrand

150
Abb. 17
Pellworm, Südwest, Hölle
Brandung vor dem Deich
27. 10. 36 etwa 10 Uhr.
HThw + 3,8 m NN.
Deichkrone + 6,2 m NN.
Wind W 11 Bft.
Deichrichtung O... W.
Blick gegen W

Aufn. W. BOCK, Pellworm

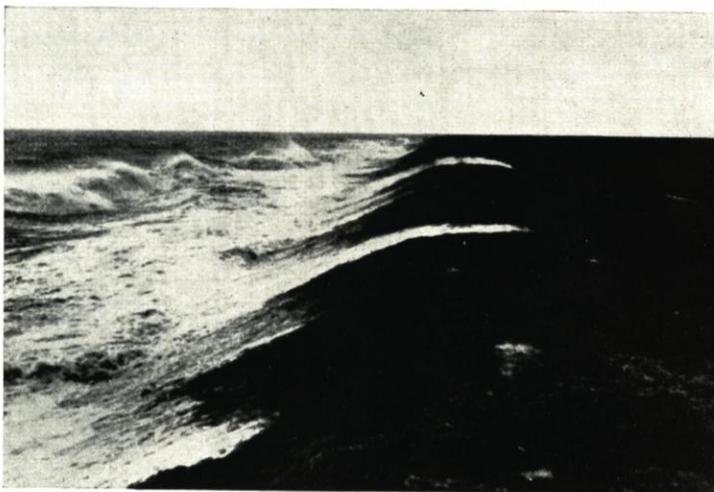


Abb. 18
Pellworm, Südwest, Hölle.
Überschießende Welle
27. 10. 36 etwa 10 Uhr.
Sonst wie Abb. 17

Aufn. W. BOCK, Pellworm



Abb. 19
Pellworm, Südwest, Hölle.
Deich und Vorland, etwa
bei Mittelwasser
Okt. 1936 nach den
Sturmfluten

Aufn. A. BUSCH, Nordstrand



bevor sie den Deich erreichen können. Herrscht Wind oder gar Sturm, wird man sich vorstellen müssen, daß über den Watten eine von der offenen See unabhängige Windsee entwickelt wird, die niedrigere und steilere Wellen, insbesondere aber kürzere Perioden aufweisen dürfte. Insofern wären die im Tiefwassermodell entwickelten Wattwellen sicher gefährlicher anzusehen, als die im Wattenmeer tatsächlich zu erwartenden.

Über dieses Problem der Windseebildung im „Flach“wasser — d. h. nach ROLL (31) für Wellen mit dem Verhältnis Länge : Wassertiefe $L : t \geq 4$ — sind keine Untersuchungen bekannt geworden. Wichtig erscheint hierzu die Ansicht von ROLL, daß die von ihm auf dem Neuwerker Watt bei Windstärke 3—4 Bft und Wassertiefen bis 1,50 m gemessenen Windwellen selbständige Wattgebilde waren.

c) Wellenperiodenmessungen an der schleswig-holsteinischen Westküste während der Sturmflut am 16. 1. 1954

Abbildung 20 enthält die mit der Stoppuhr beobachteten Wellenperioden an einigen Deichstationen. Die Einzelwerte bedeuten jeweils das Mittel aus einer Zweiminutenbeobachtung (Büsum) beziehungsweise das Mittel aus zehn aufeinanderfolgenden Perioden (Husum). Der Wind

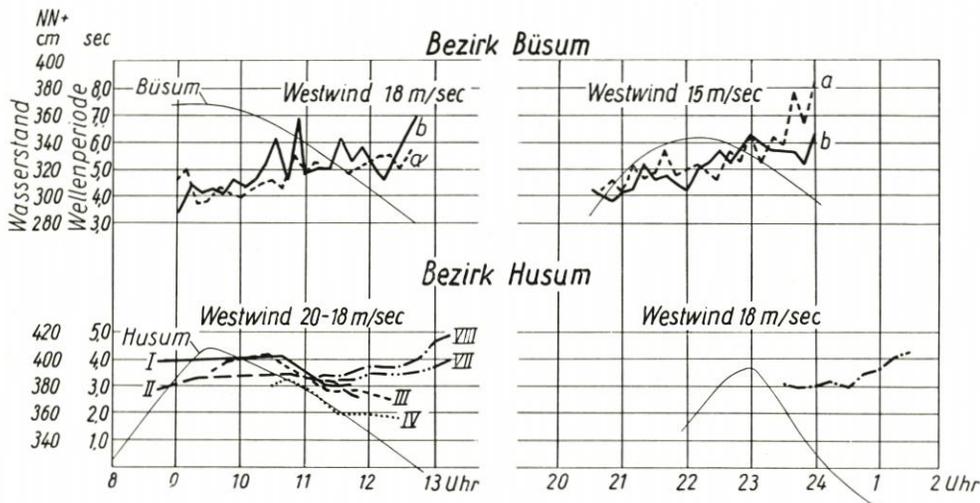


Abb. 20. Beobachtete Sturmflut-Wellenperioden am 16. Januar 1954 an der schleswig-holsteinischen Westküste

Bezirk Büsum:

- a) Büsum Ostdeich
- b) Büsum Westdeich

Bezirk Husum:

- I. Nordstrander Damm, km 1,1 Nordseite
- II. Nordstrander Damm, km 1,1 Südseite
- III. Hattstedter-Seedeich

IV. Sönke-Nissen-Koog

- VII. Hindenburgdamm Nord, vor dem Dreieckskoog bei Deichstein 65
- VIII. Südwesthörn, 200 m nördlich des Deichsiesels

hatte bis zum Vormittagshochwasser zehn Stunden lang vorher gleichmäßig mit $v = 18 \dots 20$ m/sec = 8...9 Bft aus West geweht und behielt Stärke und Richtung bis zum zweiten Hochwasser annähernd bei. Die Meßzeiten erstrecken sich leider nur auf 3 bis 4 Stunden um die Hochwasserzeit.

Allen Meßstellen gemeinsam ist, daß die Perioden mit dem Tidegang, wenn auch phasenverschoben, schwankten. Da Periodenschwankungen in der offenen und tiefen See bei dem dauernd gleichmäßigen Sturm unwahrscheinlich waren, muß ihre periodische Ursache innerhalb des flachen Wattenmeeres gesucht werden, nämlich, abgesehen vom Tidestrom, in der mit der Tide schwankenden Wassertiefe. Setzt man zum Beispiel die mittlere Sohlenlage des

Wattengebietes vor Südwesthörn zu -1 m NN, dann hat die Wassertiefe am 16. 1. 1954 zwischen rund 4,5 und 2,5 m, also zwischen 100 und 180 % der Tiefe bei Thw geschwankt.

Die Periodenmessungen des 16. 1. 1954 bieten außerdem — in Ergänzung der Hannoverschen Versuche — den wichtigen Hinweis, daß die für die Wellenbildung und insbesondere für den Wellenaufbau als gefährlich ermittelten langen Perioden bis zu etwa $T = 9$ sec in einem tiefwassernahen Wattgebiet wie Büsum durchaus denkbar sind; Werte von 8 sec wurden bereits angetroffen. Andererseits sind in Wattgebieten ohne nahegelegene Tiefs, etwa wie bei Husum, weniger lange Perioden zu erwarten.

2. Allgemeine Auswertung

Daß der Sturmwindwinkel zum Deich (Winkel β) wesentlichen Einfluß auf die Höhe des Wellenaufbaus (A) hat, wird durch die Abbildungen 11 bis 13 anschaulich bestätigt. Die höchsten Wellenaufbauwerte treten an Deichstrecken mit höheren „Luvfaktoren“ ($\cos \beta$) auf, naturgemäß dort, wo der Wind quer auf den Deich weht. Beachtlich sind jedoch die Ausnahmefälle hohen Wellenaufbaus in Lee (negativer Luvfaktor), wie auf Abbildung 11, Nr. 9 (Nordstrander Damm Süd) und Nr. 15 (Pellworm Hafen = Inselostseite). Während hierfür eine Erklärung schwerfällt, bieten andere Ausnahmen wie Abbildung 12 Nr. 23 und Abbildung 13 Nr. 11, deren Gegebenheiten aus den Signaturen abgelesen werden mögen, eine Deutung. Diese Punkte liegen nämlich unmittelbar oder nahe an großen Tiefen von ziemlicher Ausdehnung, sind also den Erscheinungen der Wellenbeugung, des Wellenreflexes und der Interferenz in einem kaum abschätzbaren Maße ausgesetzt. Diese Erscheinungen haben im süd-holländischen Inselgebiet am 1. 2. 1953 vermutlich mit zum Verderben beigetragen. Sie sind, wenn auch nicht so ausgeprägt, an den Leeseiten von Nordstrand und Pellworm zu berücksichtigen, außerdem an allen leeseitigen Deichstrecken in Buchten und Flußmündungen, die nicht durch Vorland geschützt sind (Schardeiche). Auch die Sturmflut am 16. 1. 1954 mit der mäßigen Sturmstärke 9 Bft bot mehrere Beispiele dieser Art (Abb. 12).

Als zweiter Einflußfaktor kommt die Wassertiefe in der Nachbarschaft des Deiches in Frage. Angeregt durch die Hannoverschen Wellenaufbauversuche sind für die in den Diagrammen und Tabellen ausgewerteten Deichstrecken die mittleren Wassertiefen (im folgenden „Vordeichtiefen“ genannt) in den drei Vordeichtzonen im Abstand 0 . . 0,1 0,1 . . 0,5 und 0,5 . . 1,0 km vom Deichfuß (Zonenbreiten 100 + 400 + 500 = gesamt 1000 m) festgestellt und in den Diagrammen gekennzeichnet worden. Außerdem ist das Vorkommen von (überfluteten) Sommerkögen, Vorland, Lahnungen sowie Schardeichen besonders vermerkt. Aus den Diagrammen für die Westküste (Abb. 11 und 12) ersieht man, daß die Höchstwerte des Wellenaufbaus nur an Schardeichen vorkommen und daß die zugehörigen Vordeichtiefen im Abstand bis 500 m größer als 3 m sind. Lahnungen und Vorland findet man nur im Bereich der kleineren und mittleren Aufbauwerte, etwa bis zu 70 % der jeweiligen Größtwerte von A.

Im unteren Bereich des Wellenaufbaus muß der Grund des niedrigen Wertes von Nr. 3 in Abbildung 11 (Dagebüll) in örtlichen, noch nicht bekanntgewordenen Gegebenheiten gesucht werden. Bei seinen großen Vordeichtiefen $t = 5$ bis 6,90 m wäre bei der Nähe der ausgedehnten Tiefen der Norderau trotz der Schutzwirkung von Föhr ein größerer Wert zu erwarten gewesen. Einfacher sind die ebenfalls auffällig niedrigen A-Werte am Wesselburener Koog erklärbar (Abbildung 11, Nr. 16 und 17 und Abbildung 12, Nr. 7 und 8). Sie scheinen der unmittelbaren Anschauung — Nähe des Eiderfahrwassers, gefährdete Abbruchstrecke mit kostspieligen Schutzmaßnahmen — zu widersprechen. Indessen übt hier der zwar schmale aber ziemlich hohe Vorlandgürtel (+ 2,4 m NN) eine durchgreifende Wirkung aus. Bei den am 18. und 27. Oktober 1936 aufgetretenen Wasserständen betrug die Wassertiefe vor dem Deich nur 2 m.

Die geschilderten Zusammenhänge zwischen Vordeichtiefen und Wellenaufbau findet man durch die aus den Niederlanden bekanntgewordenen Tatsachen bestätigt, wie sie unter anderem in Abbildung 13 zum Ausdruck kommen. Darüber hinaus fällt im Vergleich zu den katastrophalen Deichbrüchen aber auf, daß der Wellenaufbau bei der Orkanflut des 1. Februar 1953 an den Luvdeichen der Inseln Schouwen und Goeree (Abb. 13) kaum höher war als an den wesentlich

weniger ausgesetzten Deichen Schleswig-Holsteins während der Oktoberfluten 1936, nämlich nicht höher als maximal 3 m. Die Erklärung liegt zum Teil darin, daß der Sturm des 1. Februar 1953 unmittelbar vor und an der holländischen Küste die Stärke von 10 Bft nicht übertroffen hat [POSTMA (28)]. Der Wellenauflauf war in Südholland zum Beispiel bei der Sturmflut 1943 merklich höher. Die höchsten Werte, Nr. 8 (Nordschouwen) und Nr. 23 (Abschlußdamm bei Harlingen), sind darauf zurückzuführen, daß diese Deichstrecken näher an größeren Meeresflächen liegen als jene, sowie darauf, daß ihnen Bermen fehlen. Zweifellos sind es nämlich die sonst in Holland meist üblichen, auf etwa MThw + 1,50 m gelegenen Außendeichbermen (Index „B“ in den Diagrammen), die den an sich höher zu vermutenden Wellenauflauf gedämpft haben.

Ein dritter den Wellenauflauf bestimmender Faktor könnte nach der Seegangstheorie die Streichlänge des Windes sein, das ist die dem maßgebenden Wind ausgesetzte Seestrecke luvwärts des Beobachtungspunktes. In den Diagrammen sind daher die überschläglich ermittelten luvwärtigen Streichlängen in grober Abstufung gekennzeichnet worden. Aus den verfügbaren verhältnismäßig geringen Beobachtungen läßt sich indessen kein eindeutiger Einfluß der Streichlänge ableiten, weder für die schleswig-holsteinische Westküste mit ihren einheitlich großen Streichlängen noch für das südholländische Inselgebiet. Immerhin ist festzustellen, daß in Südholland einzelne hohe Werte des Wellenaufbaus (Nr. 23 Abschlußdamm, Nr. 8 und 17 auf Schouwen) sowohl mit großen Tiefen als auch großen Streichlängen gekoppelt sind.

Zusammengefaßt ergeben die Naturbeobachtungen für die Verhältnisse an der schleswig-holsteinischen Westküste folgende Anhaltspunkte:

- a) Der Sturmeinfallswinkel zum Deich (β) ist maßgebend für die Höhe des Wellenaufbaus. Der gefährliche Sturmsektor erstreckt sich ungefähr bis zu $\beta = 45^\circ$ beiderseits der Hauptsturmrichtung, also auf insgesamt 90° (Luvfaktor $\cos \beta = +0,7$ bis $+1,0$). An Deichen mit flacher auftreffenden und auch ablandigen Sturmrichtungen ($\cos \beta = +0,4$ bis $-1,0$) können Wellenaufbauhöhen von etwa 75 % bis 50 % der bei steilem Einfall in demselben Küstengebiet auftretenden Größtwerte entstehen, sobald ausgedehnte Wasserflächen größerer Tiefe in der Deichumgebung liegen.
- b) Die Wassertiefe nur der unmittelbar vor dem Deich gelegenen bis etwa 100 m breiten Zone scheint für den Wellenaufbau entscheidend zu sein. Höchstwerte sind zu erwarten, sobald die Wassertiefe dieser Zone bei Sturmfluten mehr als rund 3 m groß wird (wie vor Schardeichen). Ist sie flacher, kommen nur kleine bis mittlere Aufbauhöhen vor; es sei denn, daß verschärfende Einflüsse der weiteren Umgebung, wie Tiefwassergebiete oder Buchteneffekte, überwiegen. Hinter Landgewinnungsflächen von mindestens rund 500 m Breite sind Aufbauhöhen von höchstens 70 % der unter sonst gleichen Umständen bei Schardeichen auftretenden Größtwerte zu erwarten.
- c) Die Streichlänge des Windes hat für den Wellenaufbau an der Wattküste untergeordnete Bedeutung.

3. Vergleich der Naturbeobachtungen mit Modellversuch und Theorie

Wellenperioden. Nach den Beobachtungen bei der Sturmflut am 16. 1. 1954 vormittags (Abb. 20) dauerte eine mittlere Wellenperiode zur Hochwasserzeit:

7 sec an der Sylter Westküste,

4,5 sec bei Büsum,

3,5 sec an der nordfriesischen Festlandsküste.

Diese an See- und Wattküste unterschiedlichen Werte entsprechen überschläglich der Seegangstheorie, zum Beispiel:

- a) Sylt, Westküste: Für Windstreichlänge $F = 200$ km, Windgeschwindigkeit $U = 20$ m/sec, unbegrenzte Winddauer, Wassertiefe $t = 20$ m und Erdbeschleunigung $g = 10$ m/sec² ergeben sich Wellenhöhe H , Wellenperiode T , Wellengeschwindigkeit C und Wellenlänge L

aus dem Diagramm Abbildung 22 [nach ROLL (31)] zu: $H = 6$ m, $C = 11$ m/sec, woraus [nach GROEN (9) Abb. 9] $T = 8$ sec und $L = 90$ m folgen.

- b) Wattenmeer: Für $F = 10$ km, $t = 5$ m (was etwa der mittleren wirksamen Wassertiefe am 16. 1. 1954 nahekäme), im übrigen wie oben, ergibt sich $H = 1,6$ m, $C = 6$ m/sec, $T = 5$ sec, $L = 30$ m.

Es leuchtet ein, daß bei steigender Tide die wirksame Streichlänge um so größer werden muß, je mehr die höheren Wattücken untertauchen, und man darf diesen Umstand bei der Betrachtung von sehr hohen Sturmfluten nicht vernachlässigen:

- c) Bei schwersten Sturmfluten werden für den Fall b) (Wattenmeer) $F = 12$ km, $U = 30$ m/sec und $t = 6,5$ m, was theoretisch $H = 2,5$, $C = 7$ m/sec, $T = 6,5$ sec ergäbe.

Im weiteren wird schätzungsweise als größte mögliche Wellenperiode an der Wattküste zugrunde gelegt:

$$T_{(\max)} \text{ Wattküste} = \text{rund } 7 \text{ sec.}$$

Wellenauflauf. Die Hannoverschen Versuche haben erwiesen, daß die Höhe der bis an den Deich gelangenden Wellen fast nur von der Wassertiefe dicht vor dem Deich abhängt, nicht von der Wellenhöhe in See außerhalb des Wattengebietes und kaum von der Periode. Die Ursache und die — bei Sturm fast immer erfüllte — Voraussetzung dieser Erscheinung ist das

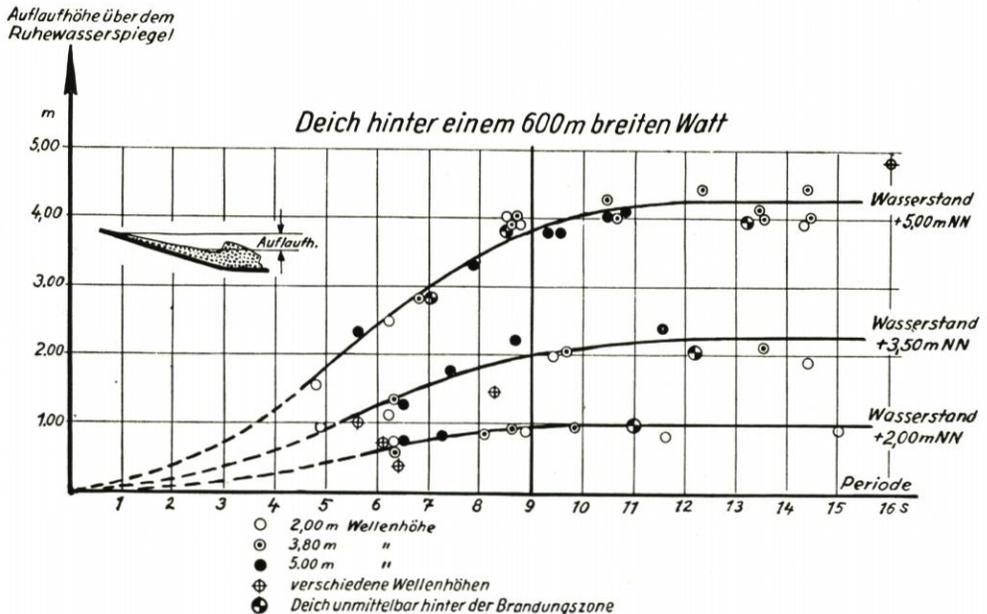


Abb. 21. Auflaufhöhe in Abhängigkeit von der Periode

Vorhandensein einer ausgeprägten Brandung mindestens 100 m seewärts des Deiches. Die weitere Folge ist, daß der anschließende Wellenauflauf ebensowenig von den Wellenhöhen in See abhängt, sondern nur von der Wassertiefe vor dem Deich und in ausgeprägtem Maße von der Periode, bei T größer als 11 sec nur noch von der Wassertiefe allein (Abb. 21).

Ähnlich werden sich diejenigen Wellen verhalten, die nicht wie die Modellwellen aus der tiefen See stammen, sondern selbständige Windwellen des Wattenmeeres sind. Auch sie werden beim Einlaufen in die flache Vordeichzone branden, und der anschließende Vorgang des Wellenaufbaus wird sich wie im Modellfall unter den auf Abbildung 21 aufgezeigten Abhängigkeiten vollziehen. Hiermit bietet sich schließlich eine Handhabe, über Wellenaufbau bei höheren Wasserständen etwas auszusagen.

4. Maßgebender Wellenauflauf bei höchsten Sturmflutwasserständen

a) Errechnete Werte

Zunächst soll die nordfriesische Küstenstrecke zwischen der dänischen Grenze und Husum betrachtet werden, für welche die an acht Stationen während der Oktoberfluten 1936 genommenen Meßwerte zu folgenden Gebietsmittelwerten zusammengefaßt wurden (vgl. Tab. 6, Zeile 1 bis 9):

Mittleres Sturmfluthochwasser	HThw _m 1936 =	+ 4,3 m NN
Mittlere Vordeichtiefe	t _m 1936 =	3,2 m
Mittlerer Wellenauflauf	A _m 1936 =	1,6 m
Mittlere Wellenperiode	T _m 1936 =	5 sec

T_m = 5 sec wurde schätzungsweise nach dem am 16. 1. 1954 beobachteten Wert T (für 16. 1. 1954) = 3,5 sec und dem ermittelten äußersten Wert T_(max) = 7 sec interpoliert.

Für den Fall der maßgebenden Sturmflutwasserstände HThw (maßg.) = rund + 5,5 m NN (Tab. 4) ergibt sich:

$$t_{m(max)} = 3,2 + (5,5 - 4,3) = 4,4 \text{ m}$$

$$T_{m(max)} = 7 \text{ sec.}$$

Man geht mit den Wertepaaren T_m und t_m in die Kurvenschar der Abbildung 21 und entnimmt die zu 1936 und (max) gehörigen Kurvenwerte A'_m 1936 und A'_{m(max)}. Ihr Zuwachs ΔA'_m wird dem 1936 beobachteten Wellenauflaufwert A_m 1936 zugerechnet und man erhält:

A' _m 1936	=	0,8 m für T = 5 sec, t = 3,2 m
A' _{m(max)}	=	2,3 m für T = 7 sec, t = 4,4 m
ΔA' _m	=	1,5 m
A _{m(max)}	=	A _m 1936 + ΔA' _m = 1,6 + 1,5 = 3,1 m.

Es darf nicht verwundern, daß der Modellwert A'_m 1936 = 0,8 m kleiner als der Beobachtungswert A_m 1936 = 1,6 m ist, denn es fehlt im Modell der Wind, der in der Natur die Wellen noch die Deichböschung hinauftreibt. Außerdem war im Modell nicht die höchste Lage (entsprechend der Flutkante), sondern die mittlere Lage der Wellenspitzen zugrunde gelegt worden. Insofern sind zwar die absoluten Kurvenwerte nicht naturähnlich, wohl aber ihre relativen Änderungen. Der errechnete erstaunlich hohe Unterschied von ΔA'_m = 1,5 m leuchtet ein, wenn man den fortschreitend wachsenden Einfluß der Wassertiefe erkennt, der zum Beispiel bei konstanter Periode für die zweieinhalbfache Wassertiefe einen vierfachen Wellenauflauf bewirken würde.

Bei der Unsicherheit der Periodenermittlung sei noch die Periode T = 6 sec angewendet; dies ergibt:

$$A_{m(max)} = 1,6 + (1,9 - 0,8) = 1,6 + 1,1 = 2,7 \text{ m.}$$

Da zur Zeit keine andere Handhabe zur weiteren Annäherung an den tatsächlichen Wert gegeben ist, wird der Größenordnung nach gerechnet, daß der maßgebende⁹⁾ Sturmflut-Wellenauflauf an den nordfriesischen Festlandsdeichen im Mittel

$$A_m(\text{maßg.}) = 2,8 \text{ m beträgt.}$$

Die für die einzelnen Deichstrecken maßgebenden Werte sind den auf Seite 132 und 133 gegebenen Anhaltspunkten und den örtlichen Gegebenheiten entsprechend zu bestimmen. In

⁹⁾ Der „maßgebende Sturmflut-Wellenauflauf“ ist der Ermittlung nach derjenige, mit dem beim Eintritt des „maßgebenden Sturmflutwasserstandes“ und der zugeordneten Windrichtung gerechnet werden muß. Höhere Wasserstände als die „maßgebenden“ sind indessen möglich, wenn auch sehr selten zu erwarten. Das bedeutet, daß in außergewöhnlichen Fällen auch der Wellenauflauf noch größer als der „maßgebende Sturmflutwellenauflauf“ werden kann.

Ferner ist zu beachten, daß sich alle Angaben über den Wellenauflauf auf das an der schleswig-holsteinischen Westküste vorherrschende Deichprofil beziehen, dessen Kennzeichen die konkave Außenböschung mit flachgeneigtem Fuß und die Bedeckung mit einer Grasnarbe sind. Neuere, beim Franzius-Institut Hannover laufende Versuche geben eine gewisse Aussicht, durch andere Profilformung (konvex) und rauhere Abdeckung den Wellenauflauf herabzusetzen.

ähnlicher Weise werden für die Deiche im Westen der Inseln Nordstrand und Pellworm (Beobachtungsstationen Tab. 6 Nr. 10, 11, 12 und 14) folgende Mittelwerte gefunden:

HThw _m	1936 = + 4,0 m NN, ... (maßg.) = etwa + 5,2 m
t _m	1936 = 3,2 m, ... (max) = 4,4 m
T _m	1936 = (6) sec, ... (max) = (8) sec
A _m	1936 = 2,7 m, ... (max) = ?

und aus dem Diagramm, Abbildung 21:

A' _m	1936 = 1,2 m, A' _m (max) = 2,7 m
ΔA' _m	= 1,5 m,
A _m (max)	= 2,7 + (2,7 - 1,2) = 4,2 m

Es wird daraufhin für die Westdeiche der Inseln Nordstrand und Pellworm im Mittel mit maßgebenden Wellenauflaufhöhen um

$$A_m (\text{maßg.}) = 4,0 \text{ m}$$

zu rechnen sein.

Für die Leedeiche im Osten der beiden Inseln ist der Wellenauflauf nach den auf Seite 133 gegebenen Hinweisen nicht weniger als 75 bis 50 % der Größtwerte des Gebietes zu wählen. Für Pellworm sollte wegen der benachbarten Norderhever etwa 70 % gefordert werden. Für Nordstrand-Ost dürfte wegen der angenommenen höheren Wattgebiete ein Anteil von rund 50 % genügen.

Pellworm Ost	A _m (maßg.) = 4 · 70 % = 2,8 m
Nordstrand Ost	A _m (maßg.) = 4 · 50 % = 2,0 m

b) Kritische Betrachtung

Die obigen Wellenauflaufwerte übertreffen wesentlich die landläufige Vorstellung. Es soll nun versucht werden, die Rechenwerte ohne Rücksicht auf einschränkende praktische Erfordernisse auf ihre Realität hin abzuwägen. Aus Tabelle 6 und Tabelle 7 geht hervor, daß auf beiden Inseln tatsächlich am 18. und 27. 10. 1936 schon Wellenauflaufhöhen von rund 3 m vorgekommen sein müssen. Dieses Maß beruht auf der niedrigen Schätzung, daß das tatsächliche Auflaufvermögen der über den Deich schießenden Wellen (vgl. Abbildung 17 und 18) um 60 cm über die Deichkrone hinausreicht, falls die Außenböschung höher hinaufreichen würde. Dies gilt für einen Wasserstand, der um mehr als 1 m niedriger liegt als der dort maßgebende Sturmflutwasserstand von rund + 5,3 m NN. Für diesen Wasserstandsbereich gibt es keine Beobachtungen. Wie vorsichtig man in der Schätzung des für derartige Wasserstände geltenden Wellenauflaufs sein muß, lehnen die Hannoverschen Modellversuche. Solange es keine andere Erfahrungsquelle als diese Versuche gibt, wird man den Einfluß der — als bekannt anzusehenden — Wassertiefen für so bedeutsam halten müssen, wie es die Modellversuche erweisen.

Weniger bekannt ist der zweite entscheidende Faktor, nämlich die bei den maßgebenden Sturmflutwasserständen auftretenden Wellenperioden. Ihre Abhängigkeit von den Bestimmungsgrößen (Windstärke, Streichlänge, Wassertiefe) ist rechnerisch zwar schwer zu erfassen, die Vermutungen über die maßgebende größte Periode lassen sich indessen durch folgende Erwägungen eingrenzen:

- Im Wattengebiet sind bei der mittelschweren Sturmflut am 16. 1. 1954 Perioden bis zu 8 sec vorgekommen (bei Büsum).
- In der Nordsee sind Perioden bis zu 10 sec gemessen worden [Feuerschiff S 2 nach (32)], und zwar bei noch nicht schwersten Stürmen bis Stärke 10 Bft.
- Als kürzeste Perioden wurden am 16. 1. 1954 im Wattgebiet 3,5 sec festgestellt.

Während aus diesem Sachverhalt gefolgert wurde, daß bei Sturmfluten an der inneren Wattküste immerhin noch 7 sec für möglich gehalten werden müssen, gibt es andererseits für Pellworm-Südwest ohne Vorlandschutz und in der Nähe der tiefen Hever gelegen keine Handhabe, die Möglichkeit einer Periode von 8 sec auszuschließen. Darauf und auf die durch die Modellversuche erwiesene Periodenabhängigkeit stützte sich die Bestimmung des maßgebenden Wellenauflaufs für Pellworm West.

Tabelle 7
Mittlere Richtwerte für den maßgebenden Wellenauflauf an den Deichen der schleswig-holsteinischen Westküste

Lfd. Nr.	Deichabschnitt	Datum	Bekannte ¹ Wellenauflauf-Höchstwerte				Höchstberechnete Abschnittsmittelwerte ²⁾					Mittl. Abschnitts-Richtwerte des Wellenauflaufs ³⁾ A _m (massg) dm	Bemerkungen	Lfd. Nr.
			HThw NN+dm	Wind Bft.	T ⁴⁾ sec	HHA dm	Jahr	Thw _{m(max.)} NN+dm	Wind _(max.) Bft.	T _{m(max.)} sec	A _{m(max.)} dm			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Nordfriesische Inseln West Pellworm/Nordstrand	27. 10. 36	+40	W 11	(6)	27	2000	+52	W 12	(8)	42	40/38	Deich liegt quer zum Hauptstauwind	1
2	Nordfriesische Inseln Ost Pellworm/Nordstrand						75 % bzw. 50 % von Nr. 1					28/20		2
3	Dänische Grenze bis Hindenburgdamm													3
4	Nordfriesische Festlandsküste Hindenburgdamm bis Husum	27. 10. 36	+43	W 11	(5)	16	2000	+55	W 12	(7)	31	28	Deich liegt quer zum Hauptstauwind	4
5	Eiderstedt Nord	16. 1. 54	+38	W 9—10	(3,5)	8	2000	+52	W 12	(7)	20	20	Hauptstauwind flankierend	5
6	Eiderstedt West													6
7	Eiderstedt Süd Estensiel bis Kating	16. 1. 54	+39	W 9—10	(5)	6	2000	+52	SW 12	(7)	21	22	Hauptstauwind teils quer	7
8	Norderdithmarscher Außeneider Karolinenkoog—Hundeknöll	27. 10. 36	+45	W 11	(6)	10	2000	+53	SW 12	(7)	18	18	Hauptstauwind flankierend	8
9	Wesselburener Koog West	15. 10. 81	+44	WNW 10	(6)	20	2000	+53	W 12	(7)	27	26	Beob. Werte trotz Eidernähe niedrig. Hohes Vorland	9
10	Heringsand						2000	+53	W 12			26	Sommerkøge	10
11	Hedwigenkoog und Büsum West	15. 10. 81	+43	WNW 10	(6)	22	2000	+53	W 12	(7,5)	37	35	Tiefwasser in der Nähe (Piep). Längste beob. Perioden d. Westküste. Schardeiche ohne Vorland	11
12	Büsum—Warwerort	15. 10. 81	+43	WNW 10	(6)	17	2000	+53	W 12	(7)	27	25	Hauptwind flankierend	12
13	Innere Meldorfer Bucht	13. 3. 06	+45	WSW/NW 10	(4)	15	2000	+55	W 12	(7)	26	25	Hohe Watten und Vorland	13
14	Meldorfer Bucht Süd	16. 1. 54	+40	W 9—10	(3,5)	6	2000	+55	W 12	(7)	21	22	Tiefwasser unweit Sommerkoogsteertloch	14
15	Friedrichskoog Spitze	13. 3. 06	+43	WSW/NW 10	(5)	21	2000	+53	W 12	(7)	34	32	Südlich Sicherungsdamm kleinerer Auf- lauf	15
16	Dieksander Koog	16. 1. 54	+39	W 9—10	(4,5)	11	2000	+55	W 12	(7)	25	25		16
17	Kaiser-Wilhelm-Koog	13. 3. 06	+44	WSW/NW 10	(5,5)	16	2000	+52	WNW 12	(7)	25	26	Tiefwasser unweit (Elbe). Hauptstau- wind etwas flankierend	17
18	Neufeld (Bucht)	16. 1. 54	+38	W 9—10	(4,5)	7	2000	+52	Nr. 17 × 75 %		19	18	Geschützt vor Hauptstauwind	18
19	Sösmehusen	16. 1. 54	+39	W 9—10	(5)	17	2000	+53	WNW 12	(7,5)	(>35)	25	Geschützt vor Hauptstauwind, jedoch lange Wellenperioden aus der offenen Außenelbe zu befürchten	19

Anmerkungen:

- 1) Archivstudien nicht abgeschlossen, Ergänzungen vorbehalten.
- 2) Mit Hilfe geschätzter größter Wellenperioden und an Hand von Modellversuchen.
- 3) Nach allgemeiner Erwägung (Hauptstauwindrichtung, überhaupt irgendwo höchstbekanntest Wellenauflauf) als höchstmöglich geschätzte Abschnittswerte, die bei Einzelbemessung zu berücksichtigen sind.
- 4) Periodenschätzung nach Beobachtungen am 16. 1. 1954. Siehe Abb. 20.

Bezeichnung:

- T = Wellenperiode
- A = Wellenauflauf
- () = geschätzt

Die weitere Frage ist, ob in ähnlichen Gebieten wie Pellworm West irgendwo einmal ein Wellenauflauf von ähnlicher Größenordnung tatsächlich vorgekommen ist. Nach Abbildung 13 muß am 1. 2. 1953 der Wellenauflauf am Abschlußdamm der Zuiderzee rund 4,30 m betragen haben. Das ist eine Örtlichkeit, die im Relief mit Pellworm West eine entfernte Ähnlichkeit hat. Der Außendeich hat keine Berme in Sturmfluthöhe (nur eine 5 m breite Berme in Mittelwasserhöhe = rd. NN), die Windstärke stieg nicht über 10 Bft. Ferner trat am 19. 1. 1921 am Seedeich in Den Helder ein Wellenauflauf von 4,40 m ein (39).

Aus obigen Darlegungen geht zusammengefaßt hervor, daß der für Pellworm West errechnete Wellenauflauf nicht nur den Berechnungsgrundlagen entspricht, sondern auch in den Rahmen der bis heute bekannten Beobachtungen paßt.

c) Richtwerte des maßgebenden Wellenaufbaus

Außer für die nordfriesischen Deichabschnitte werden in derselben Weise die Wellenauflaufbeträge für die südwärts anschließenden Küstenabschnitte ermittelt.

Dem bisherigen Untersuchungsstadium entsprechend, in dem weniger die Werte der verschiedenartigen Einzelorte, sondern repräsentative Werte ausgewählter Deichabschnitte gesucht werden, sind die ermittelten Werte des Wellenaufbaus nicht geradezu als „maßgebender Wellenaufbau“, sondern als „Mittlere Abschnitts-Richtwerte des maßgebenden Wellenaufbaus“ an der schleswig-holsteinischen Westküste zu bezeichnen. In diesem Sinne ist die Tabelle 7 aufgestellt worden, die nunmehr den Ausgangspunkt für Einzelbemessungen bilden kann. Die in Spalte 13 notierten Werte besagen, daß in Verbindung mit den maßgebenden Sturmflutwasserständen in den meisten Deichabschnitten mit Wellenaufbauhöhen über 2 m zu rechnen ist.

Drei Meter und mehr sind westlich Büsum, an den Westseiten von Pellworm und Nordstrand und vor Friedrichskoogspitze möglich. Den höchsten Wellenaufbau überhaupt hat nicht ein Punkt der Festlandsküste, sondern Pellworm West mit rund 4 m zu erwarten.

Wenn der Versuch, Wellenaufbauhöhen voraus zu berechnen, auch keine strenge Lösung bietet, so umreißt er doch die Größenordnungen, die es zu erkennen gilt. Wie sich im einzelnen der Deichbau mit Aufbauhöhen von 3 bis 4 m abfindet, ist eine Frage für sich. Keine Frage ist, daß er sich auf derartige Beanspruchungen einstellen muß, wenn die Lehre aus Hunderten von Deichbrüchen nicht umsonst gewesen sein soll, die in Südholland den zu niedrigen Deichen oder zu schwachen Binnenböschungen zugeschrieben werden müssen.

5. Der Wellenaufbau an den rechtselbischen Deichen

Von den rund 120 Deichkilometern rechts der Niederelbe zwischen Schulau und Brunsbüttelkoog (einschließlich der unteren Nebenflußdeiche) sind einige unmittelbar am Elbstrom gelegene Deichstrecken zwischen Kollmar und Brunsbüttelkoog von zusammen rund 25 km Gesamtlänge dem Seegang in besonderem Maße ausgesetzt.

Die übrigen Deiche, an schmalen Nebenflüssen oder hinter Vorland, Inseln und Weidenkulturen oder in Windlee gelegen, lassen auch bei schweren Sturmfluten einen Wellenaufbau von schätzungsweise nicht mehr als 1,50 m erwarten und werden hier nicht weiter behandelt, da sie sich der rechnerischen Ermittlung weitgehend entziehen.

Es folgt als Beispiel für einen schwer beanspruchten Deich die Ermittlung des bei den maßgebenden Sturmfluthöhen zu erwartenden Wellenaufbaus am Elbdeich bei Arentsee, zwischen St. Margarethen und Brockdorf gelegen. Die Nähe und Tiefe des Stromes begünstigen hier gerade bei den aufstaufördernden westlichen Stürmen, wenn die Streichlänge von Cuxhaven her groß ist, einen Seegang, der berüchtigt ist. Die Außenböschung des Deiches, bestehend aus einem Steinfuß rund 1 : 2, darüber Grasböschung rund 1 : 4, hat im Gegensatz zum konkaven Typ der Nordseedeiche ein im unteren Teil konvexes Profil. Ein schmaler Vorlandsaum ist wegen seiner tiefen Lage ohne Bedeutung.

Bei der Sturmflut vom 16. 1. 1954 sind hier Wellenhöhen und Wellenaufbau am Deich vermessen worden, woran die für die Vorausberechnung schwersten Wellenaufbaus angewandten Formeln geeicht werden konnten. Der andersartigen Profilverhältnisse wegen (Schardeich neben

Tiefwasser) wird nicht wie an der Wattküste von der Wellenperiode ausgegangen, sondern von niederländischen Wellenauflaufversuchen, wonach die Höhe der den Deich erreichenden Wellen ausschlaggebend ist.

a) Nachrechnung des Wellenaufbaus bei Arentsee am 16. 1. 1954.

Mit Windgeschwindigkeit $U = 18 \text{ m/sec}$, Windrichtung = WzS = 260° , Richtung der Deichnormalen = SSW = 205° , Wellen-(= etwa Wind-)einfallrichtung $\beta = 55^\circ$, Luvfaktor $\cos \beta = 0,57$, Streichlänge $F = \text{etwa } 6000 \text{ m}$, HThw = + 3,80 m NN, mittlere Wassertiefe $t_m = \text{etwa } 15 \text{ m}$ und Deichböschung 1 : m = 1 : 4 ergibt sich nach Abbildung 22 aus U und F :

Wellengeschwindigkeit $C = 4,70 \text{ m/sec}$,

Wellenhöhe $H = 1,12 \text{ m}$,

sodann nach der AIRY'schen Formel [GROEN (9) S. 13]

Wellenlänge $L = C^2 \cdot 2 \pi / g = 14,10 \text{ m}$,

Wellenperiode $T = C \cdot 2 \pi / g = 3,0 \text{ sec}$,

und nach VALKEN (43) auf Grund von Versuchen der Technischen Hochschule Delft:

$A = 8 \cdot H (\cos \beta - B/L) : m$

$= 8 \cdot 1,12 (0,57 - 0) : 4 = 1,28 \text{ m}$

da die Bermbreite $B = 0$ ist.

Bestätigend wurde durch GRÜTTNER (10) beobachtet:

$H_{\max} = 1 \text{ m}$, A (Flurkante) = 1,00 ... 1,40 m.

b) Vorausberechnung des Wellenaufbaus bei Arentsee für den Fall des maßgebenden Sturmflutwasserstandes.

HThw (maßg.) = + 5,50 m NN = Mittel aus Glückstadt und Brunsbüttelkoog (nach Tab. 4, Spalte 13) = 1,70 m höher als am 16. 1. 1954, $t_m = 15 + 1,70 = 16,70 \text{ m}$, F geschätzt = 8000 m, U angenommen = 32 m/sec, sonst wie bei a), woraus:

$C = 6,70 \text{ m/sec}$, $H = 2,00$, $L = 29 \text{ m}$, $T = 4,3 \text{ sec}$ und $A = 2,30 \text{ m}$,

das ist 1 m höher als am 16. 1. 1954.

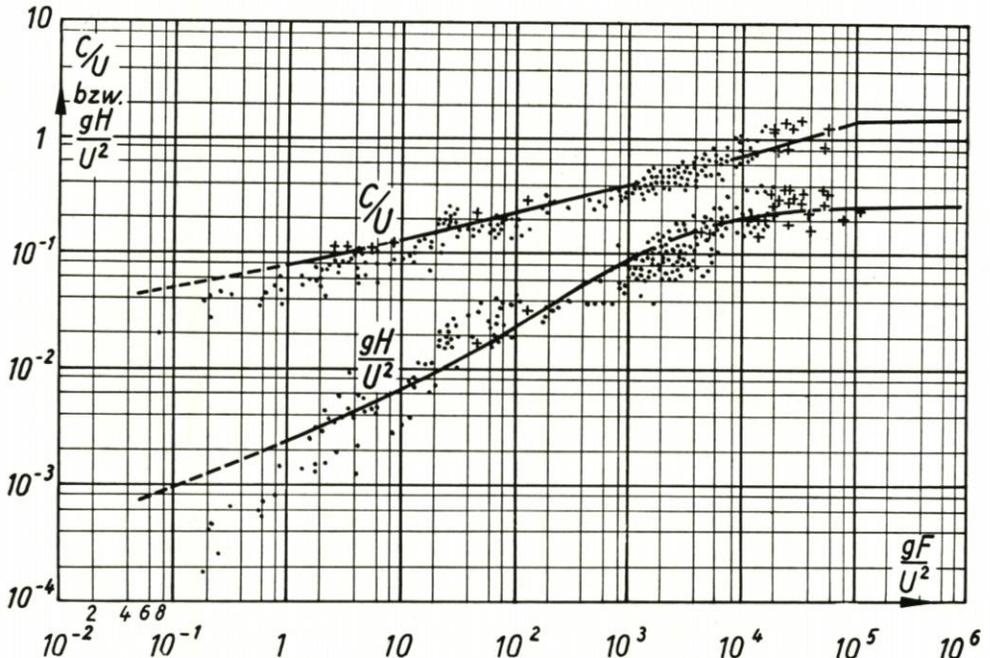


Abb. 22. Einfluß der Windstreichlänge auf den Seegang [nach ROLL 1949 (31)]
Dimensionsloses Diagramm C/U und gH/U^2 als Funktion von gF/U^2

Signatur: - Neuwerker Messungen von ROLL 1949; + von SVERDRUP und MUNK benutzte Werte
 C = Wellengeschwindigkeit in m/sec H = Wellenhöhe in m, $g = 9,8 \text{ m/sec}^2$
 U = Windgeschwindigkeit in m/sec F = Streichlänge in m

Man erhält nach Berechnung weiterer Punkte für die Elbdeichstrecke zwischen Arentsee und Hollerwetteren (nahe der Störmündung) im Streckendurchschnitt einen Auflauf $A = 2,50$ m. Mit Rücksicht darauf, daß nach Beobachtungen von Einwohnern schon die Flutkante der Sturmflut vom 16. 2. 1916 etwa 2,25 m über dem Wasserspiegel (HT_{hw} = + 4,50 m NN) gelegen haben muß, wird für diesen Deichabschnitt ein Richtwert des maßgebenden Wellenaufbaus auf der Strecke Scheelenkuhlen (nahe Arentsee) bis Hollerwetteren (Wilstermarscher Elbdeich)

$$A_m \text{ (maßg.)} = 2,6 \text{ m}$$

festzulegen sein.

Dieser Richtwert ist sodann im einzelnen nach oben oder unten ähnlich dem Ergebnis des oben genannten Flutkantennivellements vom 16. 1. 1954 abzuwandeln.

Es zeigt sich dabei unter anderem die bemerkenswerte Tatsache, daß der Wellenaufbau an zwei probeweise mit Bitumen beziehungsweise Beton glattgedeckten Außenböschungen 0,50 m größer war als an den benachbarten Grasböschungen derselben Neigung.

Vergleichsweise liegt die heutige Krone dieser Elbdeichstrecke im Mittel um rund 2,40 m über dem überlieferten damaligen Wasserstand vom 3./4. 2. 1825. Als die Summe einer langen, in der niedrigstgelegenen Marsch Schleswig-Holsteins gewonnenen Erfahrung sind die zu dieser Höhe führenden Grundsätze besonders ernst zu nehmen, zumal sie sich offenbar auch 1825 bewährt hatten. Die Wilster Marsch blieb damals im Gegensatz zur Kremper Marsch trocken [vgl. Abb. 4 in PETERSEN (27)]. Wenn sich somit Erfahrung (2,40 m) und Rechnung (2,60 m) zahlenmäßig annähernd gegenseitig bestätigen, dann wird um so mehr jedes Deichbestück bedenklich sein müssen, dessen Wellenaufbau den ermittelten Richtwert unterschreitet, ohne daß gleichzeitig Maßnahmen für schadlose Überflutung getroffen werden.

Für die weiteren, am schwersten angegriffenen Elbdeichstrecken wird aus gleichen Überlegungen als Richtwert des maßgebenden Wellenaufbaus vorgeschlagen:

Östliches Ufer der äußeren Störmündung (Deickecke bei Ivenfleth): $A_m \text{ (maßg.)} = 2,40$ m
 Elbdeich zwischen Kollmar und Bielenberg: $A_m \text{ (maßg.)} = 2,10$ m

IV. Die maßgebende Sturmfluthöhe

Die Summe des maßgebenden Sturmflutwasserstandes und des maßgebenden Wellenaufbaus wird hier als „maßgebende Sturmfluthöhe“ bezeichnet:

$$SF \text{ (maßg.)} = HT_{hw} \text{ (maßg.)} + A \text{ (maßg.)}$$

Die maßgebenden Sturmfluthöhen liegen demnach längs des Deiches auf einer Linie, die von den höchsten Wellenspitzen erreicht, aber nicht überschritten wird. Dies entspricht der Ableitung der Wellenaufbauwerte aus der Höhenlage von Flutkanten, die von den höchsten Wellenspitzen gebildet werden. Auf solche Höhen ausgebaut, würde die Deichkrone theoretisch trocken bleiben, und man könnte insofern von der Trocken-Sollhöhe reden. In Abbildung 23 sind diese Sollhöhen eingetragen worden. Die Darstellung enthält unter Vernachlässigung von Mulden die Isthöhen der Deiche nach dem Stand von etwa 1938 und entspricht in vereinfachter Form der von SCHELLING (35) gebrachten Abbildung 70.

Die von der Isthöhe bis zur Trocken-Sollhöhe vorhandenen Fehlhöhen betragen im Streckendurchschnitt etwa:

Nordfriesland (Hindenburgdamm . . . Husum)	1,20 m
Eiderstedt Nord	1,20 m
Eiderstedt Süd (bis Tönning)	0,90 m
Norderdithmarschen (Karolinenkoog bis Meldorf)	1,20 m
Süderdithmarschen (bis Brunsbüttel)	1,00 m
Pellworm	1,90 m
Nordstrand	1,50 m.

In der Praxis werden bautechnische und andere Gesichtspunkte es häufig bedingen, die Ansprüche an die Deichhöhe herabzusetzen, so daß dann die sich aus dem endgültigen Bestick ergebenden Fehlhöhen kleiner als die genannten Werte ausfallen werden [vgl. PETERSEN (27)].

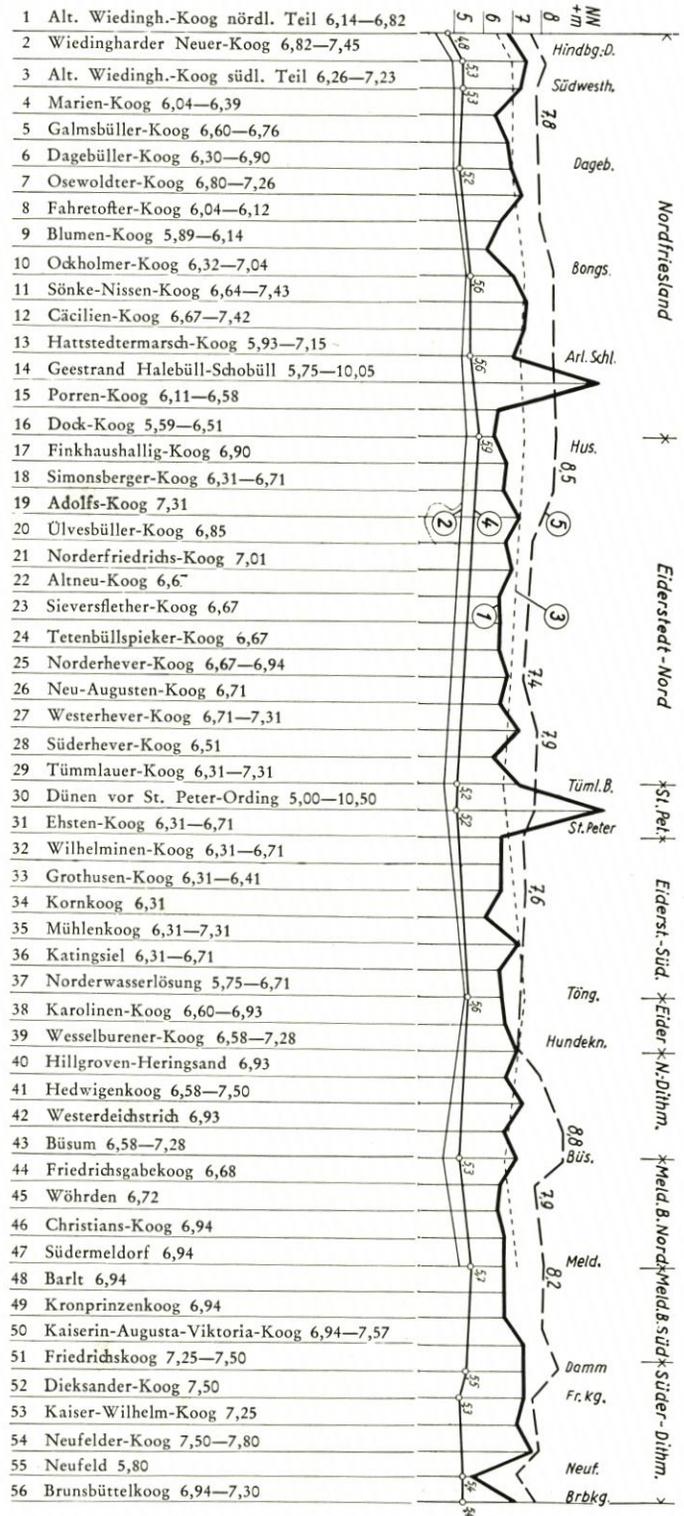


Abb. 23. Höhen der Seedeiche an der Westküste Schleswig-Holsteins und auf den Inseln

1 = Isthöhe um 1938.
 2 = Höchstmöglicher Sturmflurwasserstrand nach SCHELLING 1952 (35).
 3 = Erforderliche Deichhöhe nach SCHELLING 1952 (35).
 Bemerkung: Profildarstellung für Wilstermarsch im maßstäblichen Längenverhältnis. Die übrigen Profile im nichtmaßstäblichen Längenverhältnis. Höhen auf NN bezogen.

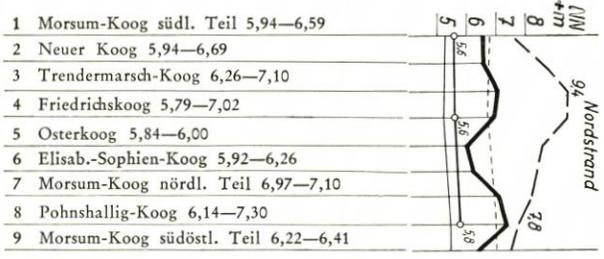
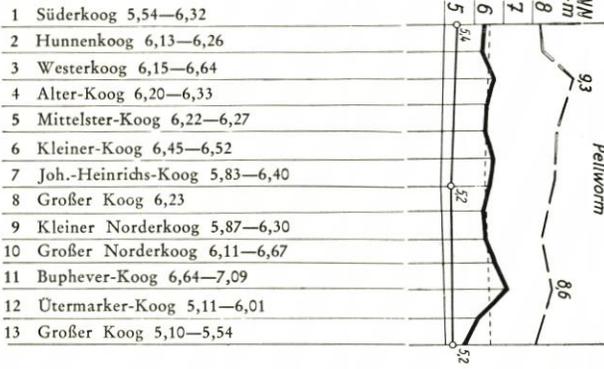
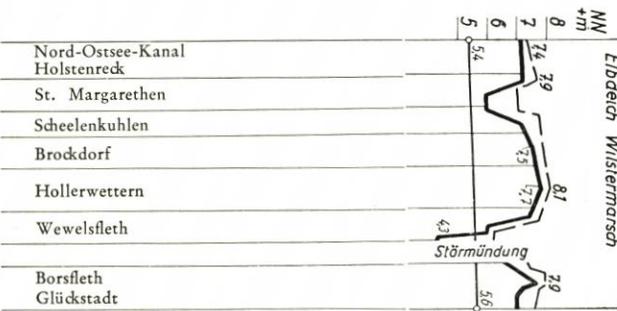
4 = Richtwert des maßgebenden Sturmflurwasserstrandes 1954.
 5 = Richtwert der Deichsollhöhe 1954.

V. Vergleiche

Die als maßgebend festgesetzten Sturmfluthöhen übersteigen teilweise die herkömmliche Vorstellung so sehr, daß noch auf einige einleuchtende Zusammenhänge hingewiesen werden soll.

Was den Wellenauflauf betrifft, mag die auf Seite 126 ff. gegebene Kritik genügen, die darauf hinausläuft, daß die rechnermäßig zu erwartenden Größtwerte nicht außerhalb der bisherigen Erfahrung liegen.

Für die Werte der maßgebenden Sturmflutwasserstände der schleswig-holsteinischen Westküste fehlt noch solche Erfahrung. In der Tat erscheint es zunächst recht sprunghaft, wenn zum Beispiel für Husum um etwa 1936 ein Wasserstand von 3,50 m über Mittelhochwasser als katastrophal galt, nach dem Orkan am 9. Februar 1949 ein solcher von rund 4 m und heute nach der holländischen Sturmflutkatastrophe eine Höhe von fast 4,50 m über Mittelhochwasser noch nicht einmal als „höchstmöglich“ bezeichnet wird. Vergleiche dazu die Abbildung 24, in der unter anderem die amtlich veröffentlichten äußersten Wasserstände HHThw (22), sodann die SCHELLINGSchen „höchstmöglichen“



und schließlich die in dieser Arbeit ermittelten „maßgebenden“ Sturmflutwasserstände dargestellt sind.

Wir übergehen die amtlichen Werte, da sie als Aufzeichnungen zufällig bekanntgewordener Ereignisse nur in Einzelfällen Bedeutung haben.

Erhöht man SCHELLINGS am Pegel Husum für den Gewässerzustand 1950 berechneten Wert um den voraussichtlichen Betrag von 20 cm für den Säkularanstieg bis zum Jahre 2000, so nähert dieser sich dem maßgebenden Sturmflutwasserstand bis auf 20 cm (vgl. Tab. 2 u. Abb. 9), so daß der genannte Sprung von 4 auf fast 4,50 m über MThw zur Hälfte eine Verschärfung von Sicherheitsanforderungen für die Zukunft bedeutet. Zugleich erhalten SCHELLINGS Untersuchungsergebnisse auf anderem Wege annähernd ihre zahlenmäßige Bestätigung; dem Sinne nach muß allerdings die in den Begriffen „höchstmöglich“ und „maßgebend“ ausgedrückte Verschiedenheit der Auffassungen beachtet bleiben.

Die Sturmflutwasserstände vom 3. und 4. Februar 1825 sind auf Seite 114 ff. rekonstruiert und auf heutigen Zustand beschriftet worden (Tab. 3b und 4). Gewiß ist der oft unternommene Versuch, die noch lebendige Erfahrung dieser letzten Katastrophenflut in heute gültige Zahlen zu fassen, auch hier nicht ohne Bedenken. Sie lassen sich aber eingrenzen. Einer der unsichersten

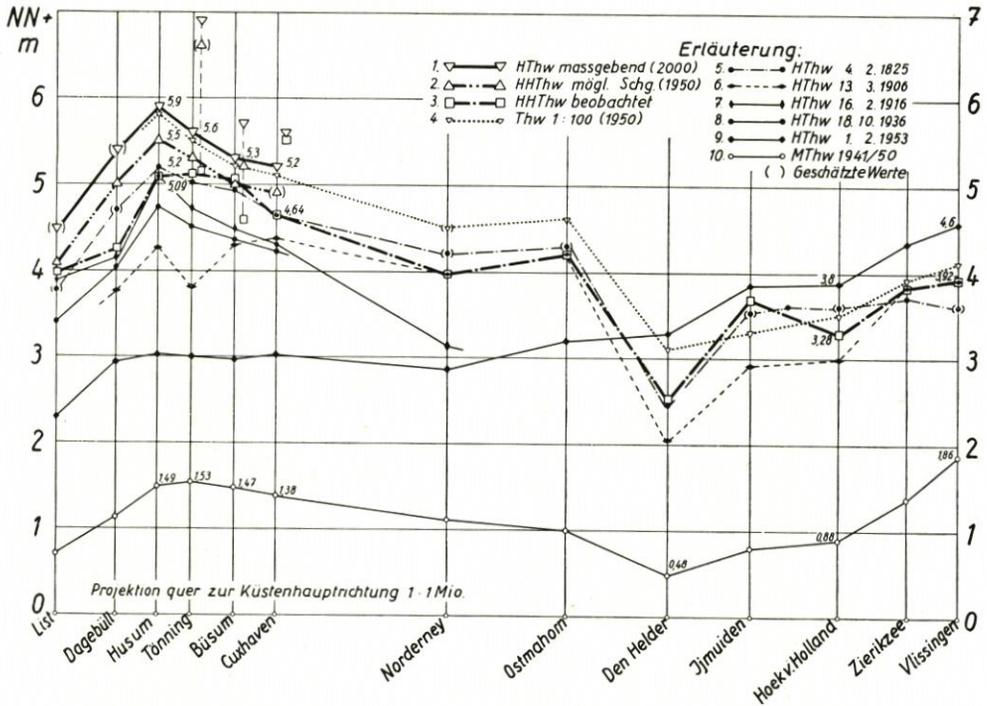


Abb. 24. Kritische Sturmflutwasserstände entlang der Nordseeküste von Schleswig-Holstein bis Holland

1. Für das Deichbestick maßgebender Sturmflutwasserstand, mit Rücksicht auf Säkularanstieg beschickt auf den voraussichtlichen Gewässerzustand des Jahres 2000. Nach Tab. 4, Sp. 13.
2. „Höchst möglicher“ Sturmflutwasserstand für den Zustand 1950. Nach SCHELLING 1952 (35).
3. Nach amtlichen Jahrbüchern bis 1950. Husum siehe Nr. 7.
4. Tidehochwasserstand, der bei dem Gewässerzustand 1950 im Durchschnitt 0,01mal im Jahr erreicht oder überschritten wird. Nach Tab. 4, Sp. 10. Auf den voraussichtlichen Zustand des Jahres 2000 beschickt, läge er an der Westküste 12 bis 20 cm höher.
5. Nach Sturmflutmarken und Archivangaben rekonstruierter zeitgenössischer Pegelstand.
- 6.—9. Nach Pegelregistrierungen. Amtliches HThw 16. 2. 16 in Husum = + 5,09 NN wegen Schreibpegelstörung unzuverlässig und tatsächlich 1 bis 2 Dezimeter niedriger zu vermuten.
10. MThw in Holland aus 1931/40.

Werte ist zum Beispiel der Betrag des säkularen MThw-Anstiegs zwischen 1825 und etwa 1850, dem Beginn von Pegelbeobachtungen¹⁰⁾ an der deutschen Nordseeküste (an der deutschen Ostseeküste seit 1811). Nimmt man zum Beispiel das MThw 1825 in Husum nicht auf + 108 cm NN (Abb. 8), sondern um das unwahrscheinlich große Fehlermaß von 20 cm höher an, so rechnete sich der MThw-Anstieg von 1825 bis 1950 nicht zu 39 cm (Abb. 9, Beschickungswert des MThw von 1825 auf 1950), sondern nur zu 19 cm, und der auf 1950 beschickte Wasserstand dieser Sturmflut läge um 20 cm niedriger als vordem errechnet. Er würde trotzdem noch etwas über dem SCHELLINGschen Wert liegen, nämlich auf 5,60 m über NN, das ist 4,10 m über Mittelhochwasser und, auf das Jahr 2000 bezogen, würden sie die „maßgebenden“ Sturmflutwasserstände streifen. Mit anderen Worten: Den entlang der Westküste und an der Elbe überlieferten Wasserstandsmarken von 1825 mögen an und für sich die heutigen Deichhöhen hoch genug gegenüberstehen. Dies darf nicht darüber hinwegtäuschen, daß dieselbe Sturmflut, jedoch unter heutigen Verhältnissen, weit über diese Marken bis zu Wasserständen hin-

¹⁰⁾ Vgl. Fußnote S. 113.

aussteigen würde, die die als maßgebend errechneten Werte streifen oder womöglich übertreffen. Die Flut von 1825 bietet die recht genauen Muster von Wasserständen, die nach jetziger Anschauung für die Seedeichhöhen maßgebend sein sollen.

Die Rekonstruktion und Beschilderung der Sturmflut von 1825 beruht, ebenso wie andere in dieser Arbeit vorgenommene Umrechnungen von Wasserständen, auf der einfachen Superposition mehrerer Bestimmungsglieder. Dies gilt ebenfalls für das kombinierte Bezugsverfahren, das nach den auf Seite 122 erwähnten Grundsätzen eine der Grundlagen zur Feststellung der maßgebenden Sturmflutwasserstände bilden soll; es ist außerdem für die SCHELLINGSchen Werte der Kernbeweis. Angesichts der sich daraus ergebenden außerordentlichen Höhe der Wasserstände muß auf den Einwand eingegangen werden, daß derartige Superpositionen zu große Werte ergeben müßten, weil der Windstau und die Gestirnstide nicht unabhängig voneinander verlaufen.

Betrachten wir nach SCHELLINGS Vorbild die Umrechnung der Sturmflut vom 16. 2. 1916 in Husum auf den Fall höchsten Springtidehochwassers (Tab. 4, Spalte 2—6): Der damalige Windstau betrug (a) bei einem Wasserstand + 509 cm NN und dem astronomischen Tidehochwasserstand + 150 cm NN, $s = 359$ cm und ergäbe (b), dem vorausberechneten HHSpThw = 197 cm NN überlagert, zahlenmäßig den Wasserstand + 556 cm NN (b). Von der damals zwischen Husum und Helgoland beobachteten Staudifferenz $\Delta s = 359 - 190 =$ rund 170 cm möge auf die Teilstrecke des flachen Wattenmeeres zwischen Süderoogsand und Husum hochgeschätzt $\Delta s_a = 170 \cdot \frac{2}{3} =$ rund 120 cm entfallen sein bei einer mittleren wirksamen Wassertiefe $T_a =$ etwa 6 m [Seichtwassereffekt, vgl. WEMELSFELDER (46); TOMCZAK (42)]. Im Falle (b) würde dann die Tiefe nicht größer werden als $T_b = 6,5$ m, und da der Windstau effekt sich im allgemeinen umgekehrt proportional zur wirksamen Wassertiefe verhält, würde sich die Staudifferenz auf $\Delta s_b = 120 \cdot \frac{6}{6,5} = 110$ cm reduzieren [STAATSCOMMISSIE 1918—26 (39), SCHALKWIJK (33)]. Die gleichzeitige Abnahme des Stau effekts in der offenen See bis Helgoland und darüber hinaus spielt wegen der großen Wassertiefen keine wesentliche Rolle. Der Überschlag lehrt also, daß bei hohem Sturmfluthochwasser und unter gleichen Windverhältnissen der Windstau an der Küste nur um etwa 1 bis 2 Dezimeter abnimmt, wenn die Wassertiefe im Wattenmeer um rund 10 % zunimmt. Die Dauersturmflut vom 5. bis 8. 12. 1895 bietet mit ihren regelmäßigen, der Wassertiefe folgenden Stauschwankungen eine greifbare Anschauung der beschriebenen Erscheinungen, und ihre Auswertung führt zu ähnlichen Ergebnissen [NEHLS 1895 nach SCHELLING (35)].

Der berechnete Sturmflutwasserstand vom 16. 2. 1916 HThw = + 556 cm NN wäre also auf rund + 540 cm NN zu reduzieren¹¹⁾. Anders als diese Sturmflut, die schnell aufkam und deren Hauptstaufeld nahe vor der schleswig-holsteinischen Westküste lag, zeigen hohe Sturmfluten bei ausgedehnteren Sturmfeldern wesentlich kleinere Staudifferenzen zwischen Husum und Helgoland, zum Beispiel 105 cm am 18. 10. 1936 oder rund 70 cm am 10. und 12. 10. 1926 bei einem Stau in Husum über Tidehochwasserhöhe von 325 bzw. 275 cm. Hier hat sich das Staufeld offensichtlich weit seewärts erstreckt. Der örtliche Stau im Wattenmeer war verhältnismäßig gering; deswegen wäre der mit einer Anhebung des Gezeitenwasserspiegels auf das höchstmögliche Springtidehochwasser HHSpThw verbundene Abfall des Küstenstaus noch geringer als für den 16. 2. 1916 anzunehmen, schätzungsweise zu etwa 10 cm und damit fast bedeutungslos.

Diese Folgerung gilt insbesondere auch für die Sturmflut von 1825, deren Hauptsturmfeld und Hauptstaufeld sich in großer Ausdehnung bis weit vor die deutsch-niederländischen Küsten erstreckt haben muß. Anzeichen dafür sind, daß der Sturm tagelang geweht hat, daß der Küstenwind nicht als äußerst kräftig empfunden worden ist [Deichinspektor CHRISTENSEN 1825,

¹¹⁾ Von einer Berichtigung der wahrscheinlich zu hohen Husumer Pegelablesung HThw (16. 2. 1916) = + 509 cm NN wird hier abgesehen, da sie für die Ermittlung der maßgebenden Sturmflutwasserstände nicht entscheidend ist.

nach SCHELLING (35)], und daß die Wasserstände auch an der niederländischen Küste katastrophal waren (Abb. 24).

Insgesamt wird der Einwand gegen die beliebige einfache (additive) Superposition getrennt gefundener Höchstwerte des Staues und der Gestirnstide bei küstennahen Sturmfeldern als bedeutungsvoll, dagegen bei seewärts ausgedehnten Sturmfeldern als nicht wesentlich beurteilt. Auch die teilweise mittels solcher Superpositionen abgeleiteten Werte der „maßgebenden Sturmflutwasserstände“ (Tab. 4; Abb. 24) werden insofern nur unwesentlich von dem Einwand berührt.

Das Problem der Superposition hat die Londoner Sturmflutkonferenz 1953 eingehend beschäftigt (18):

1. Nach englischen und niederländischen Beobachtungen sei das Maximum des Windstaus einer Sturmflut niemals mit der astronomischen Hochwasserzeit zusammengefallen [THYSSE, ROSSITER (18)].
2. Auch sei bisher niemals ein wirklich großer Windstau mit hoher Springtide [THYSSE, FARQUHARSON (18)] zusammengetroffen.
3. Der Grund für diese Art Gegenwirkung sei, daß die zur Anfuhr des Stauwassers erforderlichen Meeresströmungen auf Reibungswiderstände stießen, die in einem höheren Verhältnis zunähmen als die kombinierten Wasserstände selbst [THYSSE (18), auch STAATSCOMMISSIE 1918—26 (39)].

Zu Punkt 1. ist auf folgendes hinzuweisen. Wenn, wie es scheint, nicht berücksichtigt wurde, daß in angestaumtem Wasser die vorausberechnete Gestirnstide deformiert wird und voreilt, werden fehlerhafte Stauwerte abgelesen (eingetretener minus vorausberechneter Wasserstand), und das Maximum des Staues kann schon deshalb nicht mehr auf die kalendermäßige Tidehochwasserzeit fallen [unter anderem TOMCZAK 1953 (42), WEMELSFELDER 1953 (46), HUNDT 1942 (15)]. Entsprechend berichtigt, würden zum Beispiel in den von SCHELLING (35) gebrachten Sturmflutkurven des 18. 10. 1936 und des 24. 11. 1938 in Husum die beiden Maxima etwa zusammenfallen. Ferner liegt es auf der Hand, daß wegen der kleineren Wassertiefen die Stau-maxima in der Nähe der astronomischen Niedrigwasserzeiten bevorzugt auftreten müssen und nicht zu den Hochwasserzeiten. Zu Punkt 2. ist darauf zu verweisen, daß hohe Springtiden und großer Windstau an sich schon seltene Erscheinungen sind. Ihr kombiniertes Auftreten ist auch ohne physikalische Gegenwirkungen so selten zu erwarten, daß es bisher in dem kurzen Zeitraum von hundert bis hundertfünfzig Jahren noch nicht beobachtet worden zu sein braucht. Den Punkt 3. hatte LORENZ in (39) für die Verhältnisse der Wattensee vor dem Zuiderzee-Abschlußdamm hervorgehoben. Er ist indessen bei den für Schleswig-Holstein gefährlichen Sturmfluten des Skagerraktyps [vgl. SCHELLING (35)], die meist allmählich einsetzen, weniger von Belang. Es ist sogar fraglich, ob nicht hierbei die in das Wattenmeer hineinsetzenden Strömungen schwächer als normal sind und somit den angeführten Effekt umkehren können.

Insgesamt darf in diesen Fragen der von FARQUHARSON (18) ausgedrückten Meinung zugestimmt werden, „daß gegenwärtig keine Gründe bekannt sind, derentwegen noch ungünstigere Kombinationen von Windstau und Gezeit, als bisher beobachtet, in Zukunft etwa nicht auftreten sollten“.

Wenn die hoch erscheinenden Werte der für die schleswig-holsteinischen Deiche maßgebenden Sturmflutwasserstände zur Zeit noch mit nicht ganz einwandfreien Rechnungen begründet werden müssen, so können ihrerseits die Niederländer seit dem 1. Februar 1953 eindeutige Erfahrungstatsachen für sich sprechen lassen, unter anderem auch WEMELSFELDER (46) und Abbildung 24:

4. Entlang der Seeküste der nördlichen und südlichen Niederlande betrug der über heutigem MThw gemessene Stau durchschnittlich fast 3 m und damit rund 0,50 m mehr als je bekannt.
5. Bei Fortfall mehrerer glücklicher Umstände (niedriges SpThw, nur mäßiger Sturm an der Küste, schwaches Oberwasser), deren zahlenmäßige Einflußsumme mehr als 1 m beträgt, hätte der Stau entsprechend höher gewesen sein können. Die Flut zeichnete sich also nicht durch ein extrem ungünstiges Zusammenwirken der beteiligten Faktoren, sondern allein

durch die außerordentlich wirksame Dauer, Lage, Ausdehnung und Energie des Windfeldes aus.

6. Der Sturmflutverlauf bot der derzeitigen Wissenschaft kein Rätsel, sondern wäre bei bekannter Witterung durchaus vorausberechenbar gewesen.
7. Die zentrale Planung hatte Wasserstandshöhen wie am 1. 2. 1953 bereits seit 1939 als möglich und für den Deichbau maßgebend festgesetzt, teils auf Grund statistischer Überlegungen, ohne indessen überall Anerkennung zu finden. Die Begleitumstände der Sturmflut (s. Ziff. 5) zwingen heute zu noch höheren Planwasserständen, woraufhin die DELTACOMMISSIE 1953 eine durchschnittliche „Erhöhung der Deiche um mindestens $1\frac{1}{2}$ —2 m erwogen hat“ (3).

Welche Lehren sind für die schleswig-holsteinische Westküste zu ziehen?

Sturmfluten erreichen zwar durchschnittlich in den Niederlanden wesentlich niedrigere Höhen als an unserer Westküste (Abb. 24), und die niederländischen Seedeiche sind durchweg niedriger als unsere; es wäre jedoch ein gefährlicher Trugschluß, hierin für die Westküste eine größere Sicherheit zu sehen! Warum, wird verständlich, wenn man die ihrer Eintrittshäufigkeit nach aufgetragenen Stauhöhen über MThw vergleicht (Abb. 25). Diese Darstellung entsteht aus den Häufigkeitskurven der Abbildung 3, indem man die Tidehochwasserstände nicht auf Normalnull, sondern auf das MThw jeden Pegels bezieht. Die Abbildung 25 zeigt:

8. Die amtlichen HHThw-Werte, die bis etwa 1940 die maßgebenden Planzahlen der Deichentwürfe darstellten, entsprachen in beiden Ländern einer durchschnittlichen Überschreitungshäufigkeit von rund einmal in fünfzig Jahren (1 : 50).
9. Die Sturmflut vom 1. 2. 1953 hat unmittelbar bewiesen, daß in den Niederlanden Wasserstände von mehr als 3 m über MThw möglich sind, deren Eintrittshäufigkeit kleiner als 1 : 500 ist. Die neuen Wasserstände für die Bestickentwürfe entsprechen bereits Häufigkeitszahlen von weniger als 1 : 1000 (einmal in 1000 Jahren) und liegen höher als rund 3,50 m über MThw. Aus der obigen Ziffer 5 geht hervor, wie berechtigt diese — inzwischen durch Abdämmungsprojekte — teils wieder überholten Absichten waren.
10. Demgegenüber entsprechen die für die Westküste vorgeschlagenen neuen Richtwerte des maßgebenden Wasserstandes (Tab. 4) der heutigen Eintrittshäufigkeit von 1 : 200 (einmal in 200 Jahren), die bei anhaltendem säkularem Anstieg bis zum Jahr 2000 sogar noch auf den Wert 1 : 100 (einmal in 100 Jahren) zunehmen wird.
11. Die verschiedene Neigung der Kurven besagt, daß die einer gleichen Häufigkeitsabnahme zugeordnete Windstauvergrößerung an der Westküste Schleswig-Holsteins fast doppelt so groß ist wie in den Niederlanden; unsere Westküste ist windempfindlicher. Gründe dafür sind unter anderem die zum vorherrschenden westlichen Sturmsektor offene Küstenlage sowie die Lage hinter dem breiten windstaubegünstigenden Seichtwassersaum des Wattenmeeres.
12. Wenn man — grob gesagt — unter dem Sicherheitsmaß eines maßgebenden Sturmflutwasserstandes die Anzahl Jahre versteht, während derer er im langzeitigen Durchschnitt voraussichtlich einmal erreicht oder überschritten wird, dann bedeuten (mit Rücksicht auf Absatz 8 bis 10) die niederländischen Planungen eine zwanzigfache Sicherheitserhöhung gegenüber früher, wogegen die schleswig-holsteinische Planung nur eine zweifache Sicherheitserhöhung darstellen würde.

Z u s a m m e n g e f a ß t ergeben die Betrachtungen des vorstehenden Abschnitts folgendes:

Die nach herkömmlichen Begriffen überaus hoch erscheinenden Richtwerte des maßgebenden Sturmflutwasserstandes an der schleswig-holsteinischen Westküste sind bisher zwar noch nicht eingetreten. Als Ersatz solcher fehlenden Erfahrungen darf indessen die Sturmflut vom 3. bis 4. 2. 1825 angesehen werden, die bei dem heutigen Stand der sikularen Wasserspiegelhebung und unter den heutigen Gewässerverhältnissen auf ähnliche Höhen wie die Richtwerte auflaufen würde.

Die tatsächlichen Erfahrungen aus der Katastrophenflut in Holland am 1. 2. 1953 bestätigen

die anderweitig begründete Feststellung, daß die schleswig-holsteinischen Richtwerte noch nicht die Grenze des physikalisch Möglichen darstellen.

Das durch die Richtwerte gebotene „Sicherheitsmaß“ würde zwar größer als bei den früheren Planzahlen für das Deichbestick sein, aber — bedingt durch die größere Anfälligkeit der Westküste gegen Windstau — immer noch zehnmal so gering wie nach den holländischen Planungen. Es ist mit anderen Worten die Wahrscheinlichkeit, daß die schleswig-holsteinischen Richtwerte überschritten werden, wesentlich größer als für die holländischen Richtwerte, die sich auf die Theorie und unmittelbar auf die Erfahrung von 1953 stützen können.

Zu ergänzen ist, daß die Wahrscheinlichkeit katastrophaler Sturmflutschäden, abgesehen von Gebieten wie der Wilstermarsch und der Insel Pellworm, bei uns im ganzen gesehen etwas kleiner ist als für die niedriger gelegenen Polder Hollands.

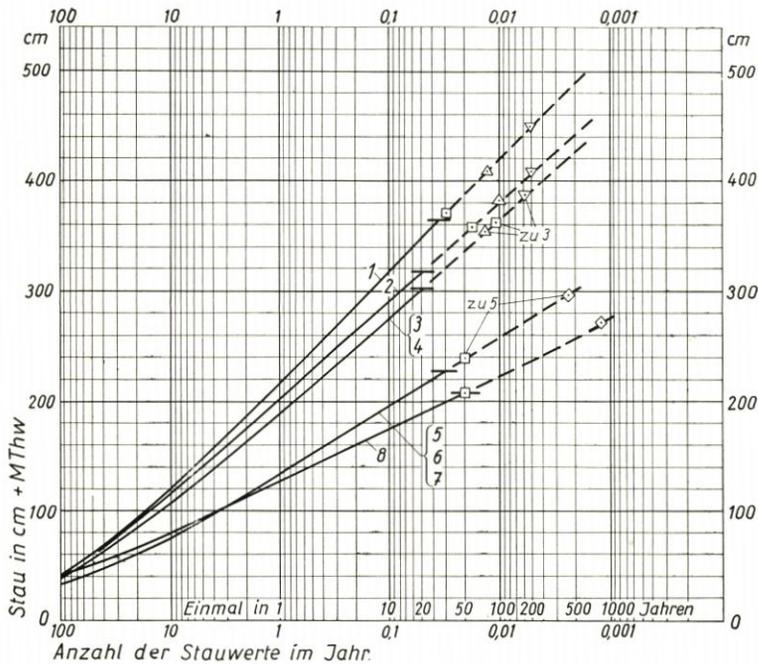


Abb. 25. Mittlere jährliche Überschreitungshäufigkeit des Staus über MThw
Vergleich Schleswig-Holstein und Holland

1. Husum	MThw 1901/50 = + 142 cm NN
2. Tönning	MThw 1936/50 = + 153 cm NN nach der Abdämmung
3. Büsum	MThw 1901/50 = + 144 cm NN
4. Cuxhaven	MThw 1901/50 = + 133 cm NN Kurve ähnlich Nr. 3
5. Hoek van Holland	MThw 1921/36 = + 88 cm NN (nach Wemelsfelder 1939)
6. Ijmuiden	MThw 1921/36 = + 78 cm NN Kurve ähnlich Nr. 5
7. Den Helder	MThw 1921/36 = + 48 cm NN Kurve ähnlich Nr. 5
8. Vlissingen	MThw 1921/36 = + 184 cm NN

- ◇ = Stau-Unterschied der HThw 1. 2. 53 über dem MThw 1921/36
 □ = Stau der amtlichen HHThw " " " 1901/50
 △ = Stau der „höchstmöglichen“ HHThw (SCHELLING 1952) " " " 1901/50
 ▽ = Stau der „maßgebenden“ HThw Zustand 2000. (s. Tab. 4, Sp. 13) " " " 1901/50

VI. Zusammenfassung

1. Die bisherigen Verfahren zur Bestimmung höchster Sturmflutwasserstände werden bewertet und das statistische Häufigkeitsverfahren als zufallsfreies Auskunftsmittel über deren Auftreten eingeführt. Die Auffindung einer oberen Grenze der Wasserstände scheidet sowohl nach physikalisch-analytischen als auch nach dem statistischen Verfahren. Selbst für die niederländische Katastrophenflut vom 1. Februar 1953 erweisen die Begleitumstände, daß die äußerste Möglichkeit der Sturmfluten damit noch nicht erreicht wurde.
2. Der — Sicherheit vortäuschende — Begriff „höchstmöglicher Sturmflutwasserstand“ wird daher durch den Begriff „maßgebender Sturmflutwasserstand“ abgelöst. Dieser wird für die schleswig-holsteinische Westküste als derjenige Wasserstand definiert,
 - a) der im Durchschnitt nicht häufiger als einmal im Jahrhundert zu erwarten ist,
 - b) der außerdem die auf die Gegenwart umgerechneten Sturmflutwasserstände vom 3./4. Februar 1825 nicht unterschreitet,
 - c) der außerdem nicht niedriger ist als die Summe des größten beobachteten Windstaus (über Tidehochwasserstand) und des möglichen höchsten Springtidehochwassers, und
 - d) der mit Rücksicht auf den voraussichtlichen säkularen und raumbedingten Wasserstandsanstieg den unter a) bis c) genannten Bedingungen auch bei zukünftigen Gewässerhältnissen bis zum Jahre 2000 entspricht.
3. Der Anstieg des Mitteltidehochwassers wird unter Berücksichtigung räumlicher Veränderungen im Wattenmeer geprüft. Er dauert wahrscheinlich mehr oder weniger seit mindestens dreihundert Jahren an. Zum Beispiel würde die Sturmflut von 1825 an der Westküste heute 0,25 bis 0,50 m höher auflaufen als damals. Der beobachtete MThw-Anstieg an den Pegeln der schleswig-holsteinischen Westküste betrug in den letzten achtzig Jahren durchschnittlich 2,7 mm im Jahr. Ein ähnlicher Betrag wird für die Zukunft (bis zum Jahr 2000) angenommen.
4. Die zehn höchsten seit 1634 eingetretenen Sturmfluten würden unter heutigen Verhältnissen höher als damals aufgelaufen sein, zum Beispiel in Husum im Mittel auf rund + 5,50 m NN = rund + 4 m MThw.
5. Die Sturmflut vom 3./4. Februar 1825 würde heute an der Westküste im Mittel bis 4 m und maximal (Husum) bis 4,30 m über MThw aufgelaufen sein. Man kann ihre auf die Gegenwart umgerechneten Wasserstände als Muster der maßgebenden Sturmflutwasserstände ansehen.
6. Die Richtwerte des im Sinne der Ziffer 2 maßgebenden Sturmflutwasserstandes betragen in

Husum:	HThw (maßg.) =	+ 5,90 m NN =	+ 4,40 m MThw	1941/50
Tönning:	„ „	= + 5,60 m NN =	+ 4,10 m „ „	
Büsum:	„ „	= + 5,30 m NN =	+ 3,80 m „ „	
Glückstadt:	„ „	= + 5,60 m NN =	+ 4,20 m „ „	
Westküste i. M.:	„ „	= + 5,60 m NN =	+ 4,10 m „ „	

Das Maximum überhaupt wird erwartet in

Nordfeld/Eider:	+ 6,90 m NN =	+ 5,10 m MThw	1941/50
-----------------	---------------	---------------	---------
7. Der Wellenauflauf an den Deichen wird unter Berücksichtigung der Wellenlehre, von Modellversuchen und einiger Naturbeobachtungen untersucht.
8. Der den Wellenauflauf an Deichen der Westküste hervorrufende Seegang wird als selbständige Erscheinung des Wattenmeeres ohne wesentlichen Zusammenhang mit der offenen See angesehen.
9. Den Wellenauflauf an Deichen der Westküste bestimmen in erster Linie die Wellenperiode und die Wassertiefe unmittelbar vor dem Deich, weniger die Wellenhöhe.
10. Verschiedene Sturmwindrichtungen sind an der Westküste innerhalb eines Sektors von $\pm 45^\circ$ zur Deichsenkrechten auf die Größe des Wellenaufbaus ohne unterschiedlichen Einfluß.

Ablandige Stürme können unter besonderen Umständen einen Wellenauflauf von 50 bis 75 % des bei auflandigen Stürmen zu erwartenden Wertes erzeugen.

11. Der höchste an der Westküste bisher einwandfrei festgestellte Wellenauflauf betrug an mehreren Strecken auf Südwest-Pellworm am 18. Oktober 1936 mehr als 3 m.
12. Die mittleren Gebietsrichtwerte des maßgebenden Wellenaufbaus, das ist der bei den maßgebenden Sturmflutwasserständen und bei der zugehörigen Windrichtung zu erwartende höchste Wellenaufbau, betragen an der Westküste zum Beispiel

auf West-Pellworm:	A_m (maßg.) = 4,00 m,
westlich Büsum/Dithmarschen:	„ „ = 3,50 m,
bei Friedrichskoogspitze/Dithmarschen:	„ „ = 3,20 m,
an der übrigen Festlandsküste:	„ „ = 1,80 bis 2,50 m.

Das ist bis zu 2 m mehr als nach der herkömmlichen Regel, nach der der höchste Wellenaufbau mit 2 m angenommen wird.

13. An den Elbdeichen der Kremper- und Wilstermarsch wurden die mittleren Gebietsrichtwerte des maßgebenden Wellenaufbaus ermittelt, zum Beispiel für

Deichstrecke Scheelenkuhlen bis Hollerwettern (Wilstermarsch)	A_m (maßg.) = 2,60 m,
Deichstrecke zwischen Kollmar und Bielenberg (Krempermarsch)	„ „ = 2,10 m,
Deichstrecke bei Ivenfleth am östlichen Störmündungsufer (Krempermarsch)	„ „ = 2,40 m.

An den übrigen Deichen rechts der Niederelbe zwischen Schulau und Brunsbüttelkoog einschließlich der Nebenflüsse wird kein höherer Wellenaufbau als 1,50 m erwartet.

14. Die „maßgebende Sturmfluthöhe“ als die Summe des maßgebenden Sturmflutwasserstandes und des Wellenaufbaus ergibt die (Trocken-)Sollhöhe des Deichs, falls absolute Überflutungsfreiheit gefordert wird. Die den Unterschied zwischen Trocken-Sollhöhe und Deich-Isthöhe darstellenden Fehlhöhen ergeben sich für die Festlandsdeiche der Westküste im Gesamtdurchschnitt zu rund 1,20 m, für Pellworm zu rund 2 m. Dies gilt in bezug auf die Deichverhältnisse um 1938, kurz vor Beginn des zweiten Weltkrieges.

Die auszubauende Deichhöhe kann aus praktischen Erwägungen, welche die Standsicherheit des Deiches, den Untergrund, die Geländehöhe über dem Meeresspiegel, die Siedlungsdichte und anderes berücksichtigen, meist niedriger sein. Die Zugabe des herkömmlichen „Sicherheitszuschlages“ entfällt.

15. Bis etwa 1936 galt in Husum ein Wasserstand von rund + 3,50 m MThw als katastrophal, nach dem Orkan vom 9./10. Februar 1949 ein solcher von rund + 4 m MThw, und heute, nach der niederländischen Katastrophenflut vom 1. Februar 1953, wird eine Höhe von + 4,50 m MThw noch nicht einmal als höchstmöglich angesehen. Diese Steigerung beruht zum Teil auf der Forderung, angesichts des säkularen Wasseranstiegs einen angemessenen Hochwasserschutz auch in absehbarer Zukunft (bis zum Jahre 2000) sicherzustellen.
16. Die jetzt festgesetzten maßgebenden Sturmflutwasserstände bieten eine zweimal so große „Sicherheit“ gegen Überflutung als die amtlichen „überhaupt bekannten äußersten Wasserstände“ (HHThw), die vor 1936 als Grundlage des Besticks dienten; unter dem Sicherheitsmaß wird die Seltenheit verstanden, mit der durchschnittlich diese Wasserstände zu erwarten sind.
17. Verglichen mit den nach dem 1. 2. 1953 revidierten niederländischen Planungen bieten die für die schleswig-holsteinische Westküste maßgebenden Sturmflutwasserstände eine allerdings nur zehnmal so kleine Sicherheit.
18. Die dieser Arbeit vorangestellte, für die zukünftige Hochwasserschutzplanung bedeutsame Frage: „Widersprechen die Merkmale der außergewöhnlichen Sturmflut vom 1. 2. 1953 in den Niederlanden den derzeitigen Erkenntnissen der Wetter- und Meereskunde?“, kann verneint werden: Nach den qualitativen Merkmalen widersprach diese Sturmflut trotz ihrer außerordentlichen Höhe in keinem wesentlichen Umstand dem derzeitigen Stand der hydromechanischen Erkenntnis.

Quantitativ sind aus Wasserstandsstatistiken abgeleitete Voraussagen über das mögliche Auftreten derart hoher Wasserstände durch die Ereignisse bestätigt worden.

Allerdings hat diese Sturmflut die bisherigen quantitativen Erfahrungen über die meteorologischen Erscheinungen so weit übertroffen, daß die Frage nach dem absoluten Maximum der Sturmenergie und des resultierenden Windstaus weiterhin offen bleibt.

19. Die zweite grundsätzliche Frage: „Sind die bisher für die schleswig-holsteinische Westküste geltenden Erkenntnisse, insbesondere die Untersuchungsergebnisse SCHELLINGS, auf Grund der Sturmflut vom 1. 2. 1953 zu ändern?“ wird bedingt bejaht, so zum Beispiel in folgenden Punkten:

a) SCHELLING und andere hatten die an verschiedenen Sturmfluten getrennt beobachteten Größtwerte der sturmflutbildenden Einzelfaktoren in ungünstigem Sinne zu „höchstmöglichen“ Wasserständen kombiniert unter der stillschweigenden Voraussetzung, daß außergewöhnliche Beobachtungen eines relativ kurzen Zeitraumes die möglichen Höchstwerte überhaupt darstellen.

Im zufallsfreien Zusammenhang (s. Ziff. 1) erweist sich diese Voraussetzung als irreführend, und der Begriff „höchstmöglich“ muß aufgegeben werden.

b) Der zur Zeit noch anhaltende säkulare Anstieg des Meeresspiegels verlangt aus Gründen dauerhafter Sicherung, die vermutlichen Verhältnisse der näheren Zukunft ins Auge zu fassen. Aus dieser Forderung ergeben sich höhere maßgebende Sturmflutwasserstände als nach SCHELLING und anderen, die ihre Ermittlungen nur auf die Gegenwart bezogen hatten.

c) Die von SCHELLING mangels geeigneter Unterlagen übernommenen traditionellen Schätzwerte für den höchsten Wellenauflauf müssen auf Grund der neueren Erkenntnisse wesentlich erhöht werden.

20. Mit der Feststellung der für das Deichbestick maßgebenden Sturmflutwasserstände darf die praktische Seite dieses Problems als vorläufig abgeschlossen gelten. Einzelne Ergänzungen, insbesondere eine gründlichere Erforschung der historischen Sturmfluten und des säkularen Wasseranstiegs vor 1850 versprechen weiterführende Einsichten.

Außerdem sollte die Erkenntnis der physikalischen Zusammenhänge so gefördert werden, daß insbesondere der Einfluß der räumlichen Gestaltung und Umgestaltung des Wattenmeeres auf die örtlichen Wasserstände besser als bisher geklärt werden kann.

Die größte aktuelle Bedeutung indessen hat der Aufbau und die Durchführung von Beobachtungen und Untersuchungen über die speziellen Wellenerscheinungen im Wattenmeer und am Deich.

VII. Schriftenverzeichnis

1. ALGEMEENE DIENST VAN DEN RIJKSWATERSTAAT: Tienjarig Overzicht 1931—1940 der Waterhoogten langs Zeeuwsche Stroomen, Noordzee, Lauwerszee, Eemmond, Hoofdrivieren en Ijsselmeer. 's-Gravenhage 1944.
2. BUSCH, A.: Bilder vor und nach den Oktoberfluten 1936. Die Heimat Nr. 1, 1937.
3. DELTACOMMISSIE: Afdamming Zeearmen. Deerde Interim-Advies. 's-Gravenhage 1954. (Deutsche Übersetzung in „Die Küste“ 2, H. 2, 1954.)
4. DITTMER, E.: Die nacheiszeitliche Entwicklung der schleswig-holsteinischen Westküste. Meyniana Bd. 1, Kiel 1952.
5. FISCHER, O.: Die Wirkungen des Hindenburgdammes auf das Ansteigen der Sturmfluthöhen im Gebiet südlich des Dammes. Bericht an Schlesw. Holst. Min. f. Ern., Landw. u. Forsten Juni 1953. Archiv Landesstelle für Gewässerkunde Kiel (Unveröffentlicht).
6. FISCHER, O.: Das Wasserwesen an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste. Teil III. Das Festland. Berlin 1955 (z. Z. im Druck).
7. GAYE, J.: Gutachten für die Gemeinde Pellworm über das Ansteigen der mittleren und höheren Tidewasserstände. Marne 11. 2. 48 (Unveröffentlicht).
8. GAYE, J.: Die Wasserstandsänderungen in der Ostsee und in der Nordsee in den letzten 100 Jahren. Die Wasserwirtschaft, Sonderheft 1951.

9. GROEN, P.: Zeegolfen. 's-Gravenhage 1950.
10. GRÜTTNER, H.: Sturmflut vom 16. Jan. 1954, Messungen des Wellenaufbaus an den Deichböschungen. Marschenbauamt Itzehoe, Dienstbericht Tgb. Nr. 161/54 vom 25. 1. 54 (Unveröffentlicht).
11. HENSEN, W.: Über die Ursachen der Wasserstandshebung an der deutschen Nordseeküste. Bautechnik 1, H. 16, Berlin 1938.
12. HENSEN, W.: Entwicklung der Fahrwasserverhältnisse in der Außenelbe. Berlin 1941.
13. HENSEN, W.: Modellversuche über den Wellenaufbau an Seedeichen im Wattengebiet. Mitt. Franzius-Institut Nr. 5, Hannover 1954.
14. HENSEN, W.: Sturmflut 1. 2. 1953 Holland (unveröffentlichter Vortrag).
15. HUNDT, C.: Dienstbericht betr. Sturmflutuntersuchungen an der Westküste vom 16. 1. 1942. Archiv Marschenbauamt Heide, Pegelaußenstelle Büsum, Akte 2204/1 (Unveröffentlicht).
16. HUNDT, C.: Arbeitsbericht über das Anwachsen der Sturmfluthöhen in der Untereider von 1936 bis 1950 infolge Versandung des Eiderbettes seit der Abdämmung bei Nordfeld. Büsum 9. 12. 50 mit „Erster Nachtrag ...“ vom 10. 4. 52. Archiv MBA Heide, Pegelaußenstelle Büsum, Akte 2204/1 (Unveröffentlicht).
17. HUNDT, C.: Erkundungsreise Juli 1953 in das holländische Sturmflutkatastrophengebiet. Dienstbericht der Pegelaußenstelle Büsum vom 5. 8. 53. Archiv Landesst. f. Gwkde. Kiel (Unveröffentlicht).
18. THE INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS: Conference on the North Sea Floods of 31 January/1 February 1953. London 1954.
19. KLEIN, J. L.: De overstromingsramp 31 Januari/1 Februari 1953. Dijkbreuken. De Ingenieur Nr. 34. 1953.
20. KÜSTENAUSSCHUSS NORD- UND OSTSEE: Stellungnahme der Untergruppe „Sturmfluten“, Küstenausschuß Nord- und Ostsee, zu der Untersuchung von Reg. Baurat Schelling über die Sturmfluten an der Westküste Schleswig-Holsteins, Januar 1950. Schr. an die Landesregierung Schleswig-Holstein, Min. f. Ernährg., Landw. u. Forsten. Archiv Landesst. f. Gwkde. Kiel (Unveröffentlicht).
21. KÜSTENAUSSCHUSS NORD- UND OSTSEE: Stellungnahme des Küstenausschusses Nord- u. Ostsee, Untergruppe „Sturmflut vom 1. Febr. 1953“ zu Anfragen der Landesregierung Schlesw.-Holst. und Niedersachsen betr. Sturmflutuntersuchungen. Kiel 11. 3. 54. Archiv Landesst. f. Gwkde. Kiel (Unveröffentlicht).
22. LANDESSTELLE FÜR GEWÄSSERKUNDE KIEL: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Küstengebiet Nord- und Ostsee. Abflußjahr 1950. Kiel 1953.
23. LEPPIK, E.: Die Sturmfluten in der Elbmündung. Besondere Mitt. z. Dt. Gewässerk. Jahrbuch Nr. 1, Hamburg 1950.
24. LÜDERS, K.: Über das Ansteigen der Wasserstände an der deutschen Nordseeküste. Zentralblatt d. Bauverw. Heft 50, 1936.
25. LUCHT, F.: Geschiebe- und Sinkstofftransport in der Elbe. Mitt. Geol. Staatsinstitut Hamburg, Heft 23, 1954.
26. MÜLLER-FISCHER: Das Wasserwesen an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste. 2. Teil: Die Inseln, Folge 4. Pellworm. Berlin 1936.
27. PETERSEN, M.: Grundlagen zur Bemessung der schleswig-holsteinischen Landesschutzdeiche. Die Küste, Jg. 2, Heft 3, 1954 (siehe dieses Heft).
28. POSTMA, K. R.: De overstromingsramp 31 Januari/1 Februari 1953: Storm- en Stormvloedprognose. De Ingenieur Nr. 34, 1953.
29. PRÜGEL, H.: Die Sturmflutschäden an der schleswig-holsteinischen Westküste in ihrer meteorologischen und morphologischen Abhängigkeit. Berlin 1942.
30. RODEWALD, M.: Der große Nordseesturm vom 31. Januar und 1. Februar 1953. Die Naturwissenschaften, 1953.
31. ROLL, H. U.: Über die Ausbreitung der Meereswellen unter der Wirkung des Windes, auf Grund von Messungen im Wattenmeer. Dt. Hydr. Ztschr. Bd. 2, Heft 6, 1949.
32. ROLL, H. U.: Von der Initialwelle bis zur Sturmsee. Hansa Nr. 6/7, 1953.
33. SCHALKWIJK, W. F.: A contribution to the study of the storm surges on the Dutch coast. 's-Gravenhage 1947.
34. SCHEFFER: Denkschrift über das ordnungsmäßige Profil für die Deiche der Norderdithmarscher Kirchspiele ... 1865. Archiv Deich- und Hauptsielverband Norderdithmarschen, Heide (Unveröffentlicht).

35. SCHELLING, H.: Die Sturmfluten an der Westküste von Schleswig-Holstein unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse am Pegel Husum. Die Küste 1, H. 1, 1952.
36. SCHEPERS, J. G. H.: Een stormvloed teisterde Zuidwest-Nederland. Tijdschr. Klk. Nederl. Aandr. Gen., Leiden 1953.
37. SCHIJF, J. B.: Coastal Engineering III. De Ingenieur Nr. 11. 1954.
38. SCHOTT, C.: Die Westküste Schleswig-Holsteins, Probleme der Küstensenkung. Schr. Geogr. Inst. Kiel, Bd. XIII, Heft 4, 1950.
39. STAATSCOMMISSIE: Verslag Staatscommissie Zuiderzee 1918/26. 's-Gravenhage 1926.
40. TOMCZAK, G.: Die Sturmfluten vom 9. und 10. Febr. 1949 an der deutschen Nordseeküste. Dt. Hydr. Ztschr., Band 3, Heft 3/4, 1950.
41. TOMCZAK, G.: Einfluß der Küstengestalt und des vorgelagerten Meeresbodens auf den windbedingten Anstau des Wassers, betrachtet am Beispiel der Westküste Schleswig-Holsteins. Dt. Hydr. Ztschr., Band 5, Heft 2/3, 1952.
42. TOMCZAK, G.: Die Einwirkung des Windes auf den mittleren Wasserstand der Deutschen Bucht vom 15. Februar bis 6. März 1951. Dt. Hydr. Ztschr., Band 6, Heft 1, 1953.
43. VALKEN, K. F.: Een schatting van de kruinhoogte van de Braakman-Dijk. De Ingenieur 65, Nr. 34, 1953.
44. VAN VEEN, J.: Fatal Beliefs on Flooding Level. Dock and Harbour Nr. 401, 1954.
45. WEMELSFELDER, P. J.: Wetmatigheden in het optreden von Stormvloeden. De Ingenieur Nr. 9, 1939.
46. WEMELSFELDER, P. J.: De overstromingsramp 31. Jan./1. Febr. 1953, Waterstanden. De Ingenieur Nr. 34, 1953.
47. WEMELSFELDER, P. J.: De stormvloed van 1 Februari 1953 op de Noordzee. Nadere beschouwing van international gegevens. De Ingenieur Nr. 22, 1954.
48. WOEBCKEN, C.: Deiche und Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste. Bremen 1924.

Weitere Quellen nach Akten, Berichten, mündlichen und
schriftlichen Mitteilungen:

Rijkswaterstaat, 's-Gravenhage, Niederlande,
Herr Andreas Busch, Nordstrand,
Herr Willi Bock, Pellworm,
Herr Max Eikmeyer, Osnabrück,
Deutsches Hydrographisches Institut Hamburg,
Seewetteramt Hamburg,
Wasser- und Schiffahrtsdirektion Hamburg, Gewässerkundliches Büro,
Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Kiel,
Landesstelle für Gewässerkunde Kiel,
Wasser- und Schiffsamt Tönning,
Wasser- und Schiffsamt Glückstadt,
Marschenbauämter Husum, Heide und Itzehoe,
Pegelaußenstelle Büsum des Marschenbauamtes Heide,
Forschungsstelle Westküste.

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abbildungen

1. Westküste von Schleswig-Holstein, Übersicht
2. Windeffekt am Pegel Hoek van Holland
3. Mittlere jährliche Überschreitungshäufigkeiten der Tidehochwasserstände am Pegel Husum von 1634 bis 1950
4. Mittlere jährliche Überschreitungshäufigkeiten der Tidehochwasserstände in Schleswig-Holstein und Holland
5. Gewässerzustand der Husumer Bucht 1634 (schematisch)
6. Gewässerzustand der Husumer Bucht 1950 (schematisch)
7. Raumbedingte Entwicklungstendenz des MThw in Husum und Pellworm Ost, 1634 bis 1950
8. MThw-Anstieg Westküste Schleswig-Holstein

9. Beschickungswerte früherer Sturmflutwasserstände für den Gewässerzustand 1950. Schleswig-holsteinische Westküste (nach Tab. 2)
10. Scheitelstände historischer und neuerer Sturmfluten entlang der schleswig-holsteinischen Westküste
11. Wellenauflauf Nordfriesland 18. und 27. 10. 1936
12. Wellenauflauf Eiderstedt und Dithmarschen 16. 1. 1954.
13. Wellenauflauf Goeree und Schouwen 1. 2. 1953
14. Nordstrand Nordwest, Kiehhuk. Schwere Brandung am Außendeich. 18. 10. 1936
15. Nordstrand Nordwest, Kiehhuk. Überschießende Welle. 18. 10. 1936
16. Nordstrand Nordwest, Kiehhuk. Überschießende Wellenfront. 18. 10. 1936
17. Pellworm Südwest, Hölle. Brandung vor dem Deich. 27. 10. 1936
18. Pellworm Südwest, Hölle. Überschießende Welle. 27. 10. 1936
19. Pellworm Südwest, Hölle. Deich und Vorland bei Mittelwasser. Oktober 1936 nach den Sturmfluten
20. Beobachtete Sturmflut-Wellenperioden am 16. Januar 1954 an der schleswig-holsteinischen Westküste
21. Wellen-Auflaufhöhe in Abhängigkeit von der Periode
22. Einfluß der Windstreichlänge auf den Seegang (nach Roll 1949)
23. Höhen der Seedeiche an der Westküste Schleswig-Holsteins und auf den Inseln
24. Kritische Sturmflutwasserstände entlang der Nordseeküste von Schleswig-Holstein bis Holland
25. Mittlere jährliche Überschreitungshäufigkeit des Staus über MThw. Vergleich Schleswig-Holstein und Holland

Tabellen

1. Heutige Windstauverhältnisse, Husumer Bucht
2. Beschickungswerte früherer Sturmflutwasserstände auf den Gewässerzustand 1950. Schleswig-holsteinische Westküste
- 3a. Ermittlung und Beschickung hoher Sturmflutstände auf den Gewässerzustand 1950. Schleswig-holsteinische Westküste
- 3b. Zusammenstellung der Scheitelstände hoher Sturmfluten
4. Ermittlung der Richtwerte des maßgebenden Sturmflutwasserstandes
5. Vergleich höchstmöglicher und maßgebender Sturmflutwasserstände und Stauwerte. Schleswig-holsteinische Westküste
6. Wellenauflauf und Deichlage in Nordfriesland am 18. und 27. 10. 1936
7. Mittlere Richtwerte für den maßgebenden Wellenauflauf an den Deichen der schleswig-holsteinischen Westküste