Die Küste, 10 Heft 1 (1962), 55-68

Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 in ozeanographischer Sicht

Von Georg Koopmann

Inhalt

1. Die Wasserstände vom 16./17. Februar 1962 im Vergleich mit früheren Sturmfluten . 55
2. Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 im Vergleich mit der Sturmflut vom 12. Februar 1962 61
3. Die Ursachen der hohen Wasserstände 66
4. Sind höhere Wasserstände denkbar? 67
5. Schriftenverzeichnis 68

Einleitung

Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 hat entlang der deutschen Nordseeküste vielerorts Wasserstände hervorgerufen, welche die bisher bekannten Höchstmarken überschritten haben, obwohl die über der Deutschen Bucht gemessenen Windstärken im Vergleich zu bereits früher beobachteten nicht außergewöhnlich groß waren (Roediger 1962, Rodewald 1962).

Natürlich ist das Wettergeschehen in seiner Gesamtheit verantwortlich für die Abweichungen der Wasserstände von den astronomisch bedingten Verhältnissen. Dennoch muß eine Aufgliederung nach den im Wasser kenntlich werdenden Erscheinungen vorgenommen und es müssen Abhängigkeiten gesucht werden, die es ermöglichen, Abschätzungen vorzunehmen.

1. Die Wasserstände vom 16./17. Februar 1962 im Vergleich mit früheren Sturmfluten

Betrachtet man die Reihe der Sturmfluten, die für die deutsche Nordseeküste gefährliche Ausmaße annahmen, und ihre Auswirkungen, so erkennt man, daß die Küstenanwohner im Verlauf der Zeit immer wieder vor die Frage gestellt wurden: Bietet die Höhe der Deiche nach den „letzten" Erfahrungen noch einen ausreichenden Schutz?

Seit unserer Zeitrechnung nahm die Höhe der Katastrophenfluten bezogen auf das Festland zu (Woebcken 1924), wie es an den ständigen Erhöhungen der Warfen und später der Deiche erkennbar ist. Die Frage, ob eine Landsenkung oder ein Anstieg des mittleren Wasserstandes, ob eine Veränderung des Tidehubs an der deutschen Nordseeküste oder ein Anstieg einzelner gefährlicher Fluten stattfand, ob mehrere oder alle Faktoren eine Rolle hierbei spielen, soll im folgenden dahingestellt bleiben. Nicht Vermutungen, sondern die gemessenen Wasserstände sollen als Grundlage für weitere Betrachtungen dienen.

Seit 1843 sind am Pegel Cuxhaven regelmäßig Wasserstandsmessungen durchgeführt worden. Beim Referat Gezeiten des Deutschen Hydrographischen Instituts wurden hieraus jährliche mittlere Hoch- und Niedrigwasserwerte errechnet und hiervon 19jährige, übergreifende Mittel gebildet.

In der Abbildung 1 sind diese für Cuxhaven gebildeten 19jährigen übergreifenden mittleren Hoch- und Niedrigwasserwerte aufgetragen und rechnerisch geglättet worden. Man

Die Küste, 10 Heft 1 (1962), 55-68

erkennt deutlich das Ansteigen der mittleren Hoch-, aber auch der Niedrigwasserwerte im Verlauf des letzten Jahrhunderts.

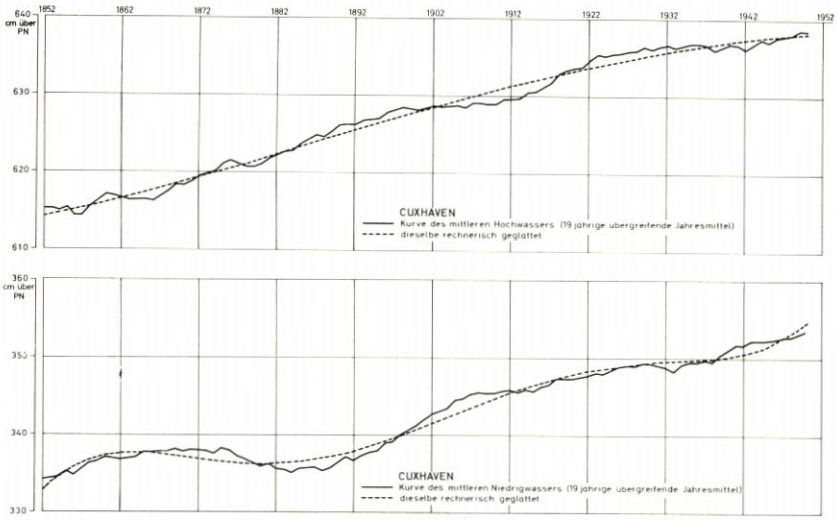

Abb. 1. Säkularer Anstieg des mittleren Hochwassers und des mittleren Niedrigwassers, beobachtet am Pegel Cuxhaven

Tabelle 1

Die Wasserstände der Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 im Vergleich mit den bisher bekannten Höchstwerten

Höchstwerte seit	Ort	HHThw Datum	HHThw Höhe über PN m	Thw am 16./17. 2. 1962 über PN m	HHTnw[3]) Datum	HHTnw[3]) Höhe über PN m	Tnw am 16. 2. 62 über PN m	Tnw am 17. 2. 62 über PN m
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1825	Husum	4. 2. 1825	10,09[1])	10,21	10. 2. 1949	8,17	6,98	6,48
1825	Büsum	4. 2. 1825	10,05	9,94	10. 2. 1949	7,80	6,71	6,62
1825	Cuxhaven	4. 2. 1825	9,66	9,96	15. 10. 1881	7,49	6,67	6,69
1825	Brunsbüttelkg.	4. 2. 1825	10,15	10,27	24. 2. 1911	6,80	7,50	7,18
1825	Hamburg	4. 2. 1825	10,24	10,70	15. 10. 1881	8,20	7,79	7,80
1825	Bremerhaven	4. 2. 1825	10,04	10,35	23. 12. 1894	7,97	6,74	7,08
		13. 3. 1906	9,89					
1889	Bremen	13. 3. 1906	9,55[2])	10,41	6. 1. 1926	8,21	7,09	7,67
1889	Wilhelmshaven	13. 3. 1906	10,06	10,22	23. 12. 1894	7,35	5,90	6,30
1889 / 1929	Borkum	13. 3. 1906	8,82	8,83	19. 10. 1935	6,30	5,85	6,43
1889	Emden	13. 3. 1906	10,18	9,76	23. 12. 1894	7,69	6,04	6,50

[1]) Hypothetischer Wert eines zeitgenössischen Pegelstandes.
[2]) Wasserstand am 1. 1. 1855 in Bremen 11,05 m, durch Oberwasser beeinflußt.
[3]) Die HHTnw-Werte sind nicht repräsentativ, da ältere Niedrigwasserbeobachtungen nicht vorliegen.

Im folgenden sind alle Angaben der Jahre 1852 bis 1952, die sich auf mittleres Hochwasser (MThw) oder mittleres Niedrigwasser (MTnw) beziehen, auf den in Abbildung 1 dar-

Die Küste, 10 Heft 1 (1962), 55-68

gestellten rechnerisch geglätteten Wert des jeweiligen Jahres bezogen. Eine Extrapolation bis 1825 wurde nicht vorgenommen. Für diesen Zeitraum ist der Wert von 1852 verwendet worden.

In der Tabelle 1 wurden nun die bisher höchsten gemessenen Hoch- und Niedrigwasserwerte den Werten der Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 gegenübergestellt, und zwar bezogen auf Pegelnull (PN), welches 5,00 m unter Normalnull (NN) liegt.

Die Werte der Tabelle 1 lassen erkennen, daß die Hochwasserstände des 16./17. Februar 1962 die bisher bekannten Höchstwerte nicht wesentlich überschreiten, wenn man den Anstieg des MThw aus Abbildung 1 berücksichtigt. Beim Niedrigwasser liegen die am 16. und 17. Februar 1962 beobachteten Wasserstände an der Küste wesentlich unter den bekannten Höchstwerten, dagegen liegen die entsprechenden Werte in den Flußgebieten etwa gleich hoch. Das liegt an der Verformung der an der Mündung eintretenden Wasserstandskurve innerhalb des Flußlaufes. Z. B. zeigte der Sturmflutverlauf vom 10. Februar 1949 an der Küste noch ein Niedrigwasser extremer Höhe, während schon in Brunsbüttelkoog, aber auch in Hamburg, nur ein langsam ansteigendes Hochwasser über zwei Tiden zu beobachten war (s. Abb. 4).

Tabelle 2

Sturmfluten in Cuxhaven seit 1825
mit Wasserständen höher als 9,0 m PN

Datum	m ü. PN	m ü. MThw
4. 2. 1825	9,66	3,55
21. 10. 1845	9,18	3,07
1. 1. 1855	9,16	3,01
15. 10. 1881	9,16	2,94
13. 3. 1906	9,36	3,06
13. 1. 1916	9,32	3,00
17. 2. 1916	9,10	2,78
2. 12. 1917	9,06	2,73
10. 10. 1926	9,05	2,70
23. 11. 1930	9,18	2,83
18. 10. 1936	9,22	2,85
19. 10. 1941	9,03	2,66
16. 2. 1962	9,96	3,56

Die Tabelle 2 enthält die Wasserstandsangaben seit 1825 von Sturmfluten in Cuxhaven, die 4,0 m NN (9,0 m über PN) überschritten haben.

Den Angaben der Tabelle ist zu entnehmen, daß die Sturmfluten von 1825 und 1962 einander in ihrer Höhe, bezogen auf MThw, gleichen. Aber auch diese Betrachtungsweise sagt noch nichts über die Stau-Anteile aus, die zu derartigen Wasserständen führten. Bei der Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 gilt es, folgende Stauwerte in Cuxhaven zu unterscheiden:

Höchster beobachteter Stau (s. Abb. 8)	3,85 m
Stau z. Z. des beobachteten Hochwassers	3,75 m
Stau z. Z. des astronomischen Hochwassers	3,63 m
Stau (H. W. beobachtet — H. W. astronomisch)	3,70 m

Von entsprechenden Stauwerten bei der Sturmflut vom 3./4. Februar 1825 sind die ersten drei unbekannt. Es läßt sich nur noch der Stau (HW beobachtet — HW astronomisch) abschätzen. Die Sturmflut fand fast zur Springzeit statt. Das astronomische Hochwasser dürfte etwa 2 bis 3 dm über MThw gelegen haben. Daraus ergäbe sich ein Hochwasserstau von 3,3 m.

Betrachtet man nun die höchsten Wasserstände an der Unterelbe in der Tabelle 3 (Werte von der Wasser- und Schiffahrtsdirektion Hamburg angegeben), so wird bei beiden Sturmfluten die Aufsteilung der Wasserstände im Flußgebiet deutlich. Der Stau nimmt von Cuxhaven elbeaufwärts zu. Die Wasserstände bezogen auf PN erreichen 1825 bei Glückstadt, 1962 bei Schulau ihren Höchstwert. In einer besonderen Spalte sind die Differenzen der örtlichen Höhen gegen den Pegelstand bei Cuxhaven aufgeführt. Zu der Aufsteilung 1962 führte, wie wir wissen, die füllige Wasserstandskurve bei Cuxhaven (Hensen 1962).

Die Küste, 10 Heft 1 (1962), 55-68

Tabelle 3

Extreme Wasserstände auf der Elbe 1825 und 1962

	Höhe gegen Cuxhaven cm	4. Febr. 1825 PN m	über MThw m	Höhe gegen Cuxhaven cm	16./17. Febr. 1962 PN m	über MThw m
Cuxhaven	0	9,66	3,55	0	9,96	3,56
Otterndorf	19	9,85		17	10,13	
Brunsbüttelkoog	49	10,15		31	10,27	
Brokdorf	—	—		37	10,33	
Glückstadt	86	10,52		64	10,60	
Kollmar	74	10,40		71	10,67	
Grauerort	59	10,25		74	10,70	
Brunshausen (Stadersand*))	48	10,14		78	10,74*)	
Lühort	48	10,14		79	10,75	
Schulau	59	10,25		91	10,87	
Seemannshöft	54	10,20		81	10,77	
Hambg. St. Pauli	58	10,24	3,64	74	10,70	4,00

*) Brunshausen bis 1931, ab 1931 Stadersand.

Die unterschiedliche Lage der Scheitelpunkte ist unter anderem vielleicht auch mit den Flußregulierungen seit 1825 zu erklären. Natürlich werden Entlastungen durch Deichbrüche und nicht zuletzt die individuelle Form der Wasserstandskurven bei Cuxhaven eine wesentliche Rolle gespielt haben.

Eine andere Art der Betrachtung extremer Wasserstände bieten Häufigkeitsverteilungen. Schon früher sind Häufigkeitsverteilungen von Hochwasserständen gegeben worden. Es sei auf die in der „Küste" erschienene Aufstellung von HUNDT (1954) hingewiesen.

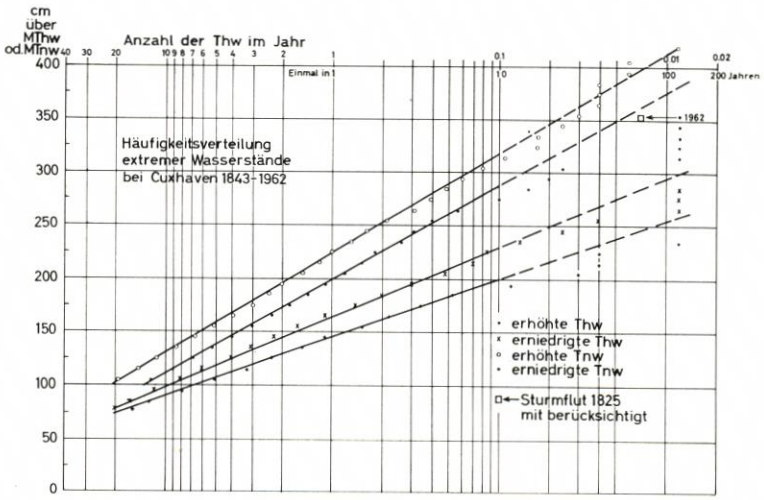

Abb. 2. Summenhäufigkeiten bei Cuxhaven beobachteter extremer Wasserstände für den Zeitraum 1843 bis 1962

In der Abbildung 2 sind nun Häufigkeitsverteilungen, bezogen auf MThw und MTnw aus Abbildung 1, dargestellt, und zwar für

Die Küste, 10 Heft 1 (1962), 55-68

erhöhte Hochwasser
erhöhte Niedrigwasser
erniedrigte Hochwasser
erniedrigte Niedrigwasser.

Dieser Darstellung liegen Wasserstandsbeobachtungen der Jahre 1843 bis 1962 zugrunde.

Mit der Abbildung 3 soll gezeigt werden, welchen Schwankungen eine Darstellung der Abbildung 2 durch die Wahl des Zeitraums unterworfen ist. Es wurden die Zeiträume von je 50 Jahren gewählt. Für diese Zeiträume wurde jeweils eine Häufigkeitsverteilung für erhöhte Hochwasserstände aufgestellt, und zwar für 1843 bis 1892, 1844 bis 1893 usw. bis 1913 bis 1962. Die Abbildung 3 gibt sowohl die mittlere Lage als auch die extremen Streuwerte wieder.

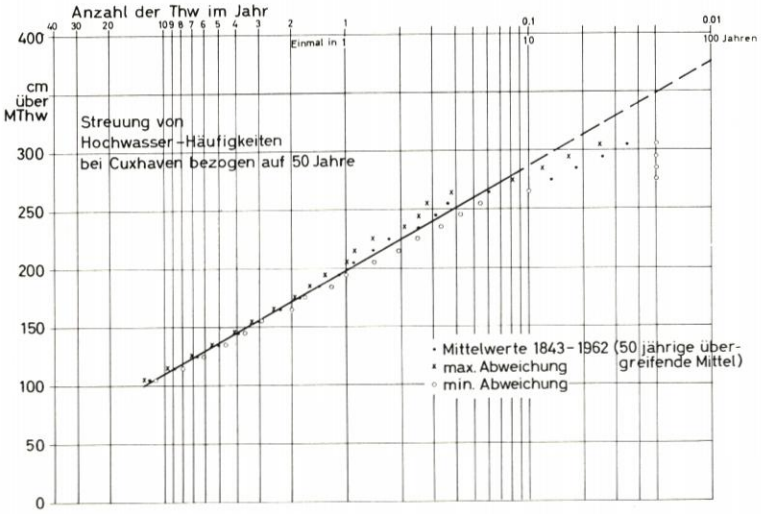

Abb. 3. Mittelwerte 50jähriger Hochwasser-Summenhäufigkeiten und ihre Schwankungsbreite

Die ausgezogene Gerade ist der Abbildung 2 für erhöhte Hochwasser entnommen. Durch diese Darstellung dürfte erneut erwiesen sein, daß eine Extrapolation über den beobachteten Zeitraum hinaus fragwürdig ist.

An dieser Stelle sei ebenfalls darauf hingewiesen, daß eine Häufigkeit von einmal in zehn Jahren keine Wahrscheinlichkeit von 10 % bedeutet, sondern eine Wahrscheinlichkeit, die erst über die Wahrscheinlichkeitsrechnung (s. WEMELSFELDER 1939) errechnet werden muß. Diese besagt, daß ein Wasserstand aus der Häufigkeitsverteilung mit a % Wahrscheinlichkeit unterschritten und mit (100-a) % vielleicht beträchtlich überschritten wird.

Betrachtet man in der Abbildung 2 die Lage der vier Geraden zueinander, so erkennt man, daß bei gleicher Häufigkeit die höchsten Werte in folgender Reihenfolge erreicht werden:

1. Niedrigwasser Erhöhung
2. Hochwasser Erhöhung
3. Hochwasser Erniedrigung
4. Niedrigwasser Erniedrigung.

Unter der Voraussetzung, daß

1. alle bei Stürmen auftretenden Windrichtungen und -stärken im Mittel über den beobachteten Zeitraum gleich verteilt vorkommen und

Die Küste, 10 Heft 1 (1962), 55-68

2. der Zeitraum von 1843 bis 1962 groß genug ist, daß alle Windrichtungen und -stärken auf Hoch- und Niedrigwasser verteilt gleichmäßig vorkommen,

kann man die Abweichungen vom MThw und MTnw auch mit dem Windstau gleichsetzen und findet so die von TOMCZAK (1960) auf andere Weise nachgewiesene „Tide-Abhängigkeit" des Windstaus bestätigt. Die Tide-Abhängigkeit des Windstaus besagt, daß, sowohl durch den Einfluß der Wassertiefe als auch durch das Trockenfallen der Watten, ein nicht unwesentlicher Stauunterschied zwischen Hoch- und Niedrigwasserstau besteht, und zwar bei auflandigen und ablandigen Winden. Der Tatsache einer Tide-Abhängigkeit des Staus muß bei Aufstellung einer Formel zur Ermittlung des Windstaus Rechnung getragen werden (KOOPMANN 1962).

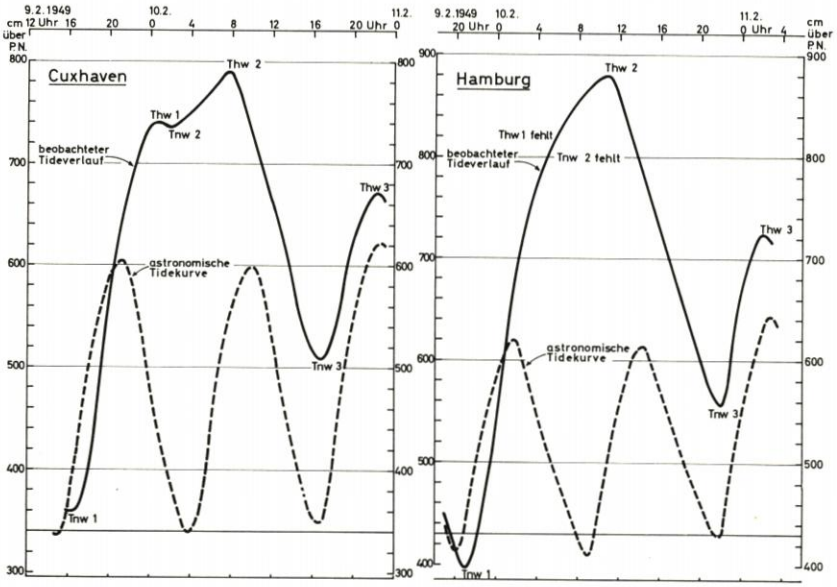

Abb. 4. Veränderung und Aufsteilung der Sturmflutkurve von Cuxhaven bis Hamburg am 9./10. Februar 1949
(Zum Vergleich wurde das Kartennull von Cuxhaven mit dem Kartennull von Hamburg in eine Ebene gebracht)

Man erkennt aus dem Verlauf der Geraden der Abbildungen 2 und 3, daß die Sturmfluten vom 16./17. Februar 1962 und die vom 3./4. Februar 1825 nicht aus dem allgemeinen Rahmen fallen. Die aus den Erhöhungen dieser beiden Sturmfluten errechneten Häufigkeitswerte (s. Abb. 2 □ 1825, · 1962) passen sich gut dem Verlauf der übrigen Werte an. Nimmt man wie HUNDT (1954) für Husum auch die für Cuxhaven angenähert abzuleitenden Erhöhungen älterer Sturmfluten hinzu (seit 1634), so lägen die Häufigkeitswerte dieser Beobachtungen gut auf der Geraden. Sie lägen etwa bei einer Häufigkeit einmal in 80 Jahren, während Werte einmal in 100 Jahren und darüber noch fehlen.

Über die Sturmflut vom 3./4. Februar 1825, die, wie wir gesehen haben, recht gut mit der des 16./17. Februar 1962 vergleichbar war, schreibt CARL WOEBCKEN (1924) in seiner Chronik: „Der Wind war nicht so stark wie am 15. November 1824." Auch wir können sagen, daß der Wind am 16./17. Februar 1962 an der Küste, ja sogar über der gesamten Deutschen Bucht nicht so stark war, wie wir ihn von anderen Stürmen kennen, die keine annähernd so hohen Wasserstände verursachten.

Die Küste, 10 Heft 1 (1962), 55-68

2. Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 im Vergleich mit der Sturmflut vom 12. Februar 1962

Wie nachgewiesen werden konnte, ist für den Stau an der deutschen Nordseeküste in erster Linie der mittlere Wind über der Deutschen Bucht maßgebend. Tomczak (1960) zeigte, daß bei einer Zeitverspätung von 3½ Stunden die beste Korrelation zwischen mittlerem Wind über der Deutschen Bucht und dem Windstau gegeben ist. Um so erstaunlicher ist es, daß bei den mittleren Windstärken von 9 Beaufort am 16./17. Februar 1962 derartige Wasserstände erreicht

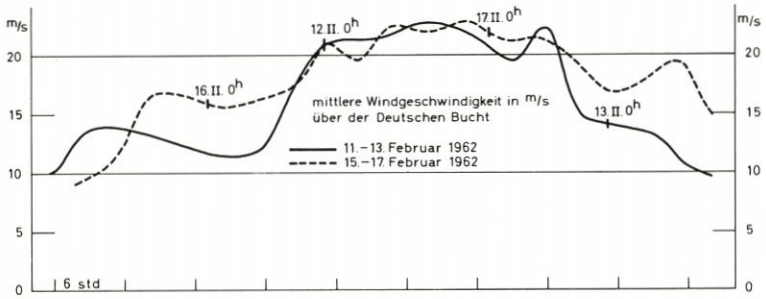

Abb. 5. Vergleich der mittleren Windgeschwindigkeiten in m/s über der Deutschen Bucht (11.—13. gegen 15.—17. Februar 1962)

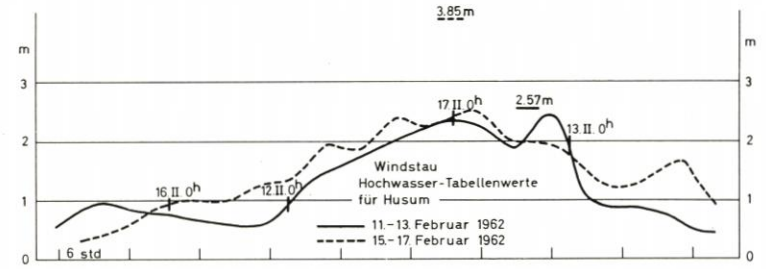

Abb. 6. Vergleich der den mittleren Windgeschwindigkeiten aus Abbildung 5 entsprechenden Hochwasserstau-Werte für Husum (11.—13. gegen 15.—17. Februar 1962)

wurden. Allen Küstenanwohnern war noch der Sturm vom 12. Februar 1962, der Wasserstände zwischen 2 und 2½ m MThw erzeugte, in guter Erinnerung, und nun führte ein zwar länger andauernder, aber nicht merklich heftigerer Sturm zur Katastrophenflut.

In der Abbildung 5 sind die mittleren Windgeschwindigkeiten in m/s über der Deutschen Bucht aufgetragen, und zwar zum Vergleich die Windgeschwindigkeiten der aufeinanderfolgenden Sturmfluten vom 12. Februar und der vom 16./17. Februar 1962. Die ausgezogene Linie bezieht sich auf den 12. und die gestrichelte auf den 16./17. Februar 1962. Man erkennt an dem Verlauf der mittleren Windgeschwindigkeiten, daß sie nicht sehr voneinander verschieden sind. Die Böigkeit bei beiden Stürmen war auch angenähert gleich groß. Ein Unterschied lag in der Windrichtung, diese war am 12. Februar vorwiegend WSW, am 16./17. dagegen überwiegend WNW.

Da die Windrichtung einen nicht unwesentlichen Einfluß auf den Windstau ausübt, mußte, um beide Stürme in ihrer Wirkung vergleichen zu können, ein Ort der deutschen Nordseeküste

Die Küste, 10 Heft 1 (1962), 55-68

gewählt werden, bei welchem die Stauwerte bei WSW bis WNW, wie sie aus den Tabellen von Tomczak (1955) abzuleiten sind, nur geringe Unterschiede aufweisen.

Aus diesem Grund ist in der Abbildung 6 der Windstauanteil für Husum aufgetragen, wie er sich nach den Werten von Tomczak mit 3½stündiger Verzögerung aus dem Wind der Abbildung 5 ergibt.

Die Tide-Abhängigkeit des Staus wurde hierbei nicht berücksichtigt, um einen besseren absoluten Vergleich der Windwirkung beider Stürme anschaulich zu machen.

Aus dem Vergleich der beobachteten mittleren Windgeschwindigkeiten in Abbildung 5 und der ermittelten Hochwasserstauwerte in Abbildung 6 scheint es, daß beide Stürme angenähert die gleiche Sturmflutgefahr für Husum in sich bargen. Beide Stürme unterschieden sich aber in ihrer Intensität über der nördlichen Nordsee. Am 16. Februar 1962 herrschte dort ein unvergleichlich heftigerer Sturm.

In der Abbildung 6 sind die bei beiden Sturmfluten beobachteten Hochwasserstauwerte eingetragen. Man erkennt, daß der Stau von 2,57 m am 12. Februar mit dem Tabellenwert 2,45 m sehr gut übereinstimmt, während der Hochwasserstau von 3,85 m am 16. Februar 1,3 m über

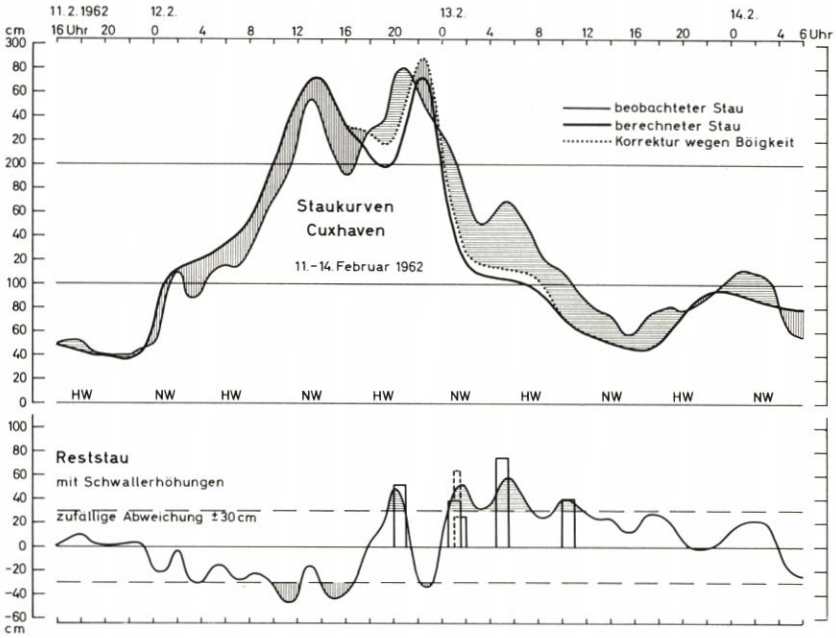

Abb. 7. Staukurve und Reststau mit Schwallerhöhungen. Beobachtet am Pegel Cuxhaven bei der Sturmflut vom 12. Februar 1962

dem Tabellenwert (2,55 m) liegt. Nach der Darstellung in den Abbildungen 5 und 6 ist kaum ein Unterschied beider Sturmflutwasserstände bei Husum zu erwarten, und doch weichen die beobachteten Stauwerte um mehr als 1 m voneinander ab.

In den Abbildungen 7 und 8 sind zum Vergleich die bei beiden Sturmfluten beobachteten Stauwerte in Cuxhaven eingetragen (dünne Linien). Der den Stürmen in Abhängigkeit der Tide entsprechende Windstau wurde auf die von Tomczak (1960) veröffentlichte Weise errechnet und ebenfalls aufgetragen (dick ausgezogene Linien). Der Böigkeit und der Inhomogenität des Windfeldes wurde ebenfalls Rechnung getragen (Koopmann 1962), wie durch die punk-

Die Küste, 10 Heft 1 (1962), 55-68

tierten Linien dargestellt. Die Fehlbeträge wurden schraffiert und im unteren Teil jeder Abbildung als Reststau aufgetragen. Dieser Reststau fordert, sobald er dem Betrage nach größer als 30 cm ist, eine Erklärung. In beiden Fällen (Abb. 7 und 8) kann diese durch Schwallerhöhungen gegeben werden.

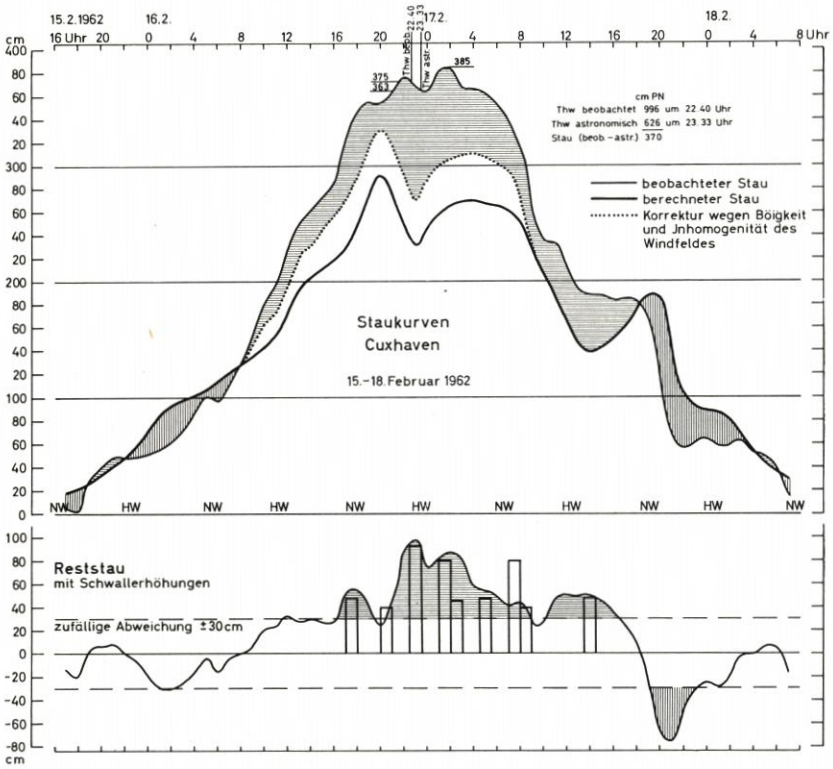

Abb. 8. Staukurve und Reststau mit Schwallerhöhungen, beobachtet am Pegel Cuxhaven bei der Sturmflut vom 16./17. Februar 1962

Den an der englischen Ostküste beobachteten *external surges**) sind Schwallerhöhungen in der Deutschen Bucht eindeutig zuzuordnen. In der Arbeit von KOOPMANN (1962) wurde eine Beziehung zwischen *external surges* und Schwallerhöhungen in der Deutschen Bucht nachgewiesen, und zwar:

erste Erhöhung bei Cuxhaven etwa 8½ Std. nach Maximum bei Aberdeen mit rund ⅓ der beobachteten Erhöhung in Immingham;

zweite Erhöhung bei Cuxhaven etwa 13½ Std. nach Maximum bei Aberdeen mit rund ⅔ der beobachteten Erhöhung in Immingham;

dritte Erhöhung bei Cuxhaven etwa 20½ Std. nach Maximum bei Aberdeen mit rund ⅓ der beobachteten Erhöhung in Immingham (Höhe sehr unsicher).

Die Abbildung 9 zeigt die Schwallerhöhung vom 16. Februar 1962. Die beobachteten Stauwerte von Aberdeen, Tyne, Immingham, Lowestoft und Harwich sind aufgetragen. Diese an der englischen Ostküste gemessenen positiven Abweichungen von den Vorausberechnungen traten

*) „external surges" sind wellenförmige, fortschreitende Wasserstandserhöhungen, die vom Atlantischen Ozean in die Nordsee eindringen und dann wie freie Wellen weiterlaufen.

Die Küste, 10 Heft 1 (1962), 55-68

bei starken ablandigen Winden auf, sie sind also durch negativen Windstau überlagert und wahrscheinlich zu gering.

Darunter ist der Reststau von Cuxhaven aufgetragen. Aus derartigen Kurvenzusammenstellungen wurden obige Beziehungen abgeleitet. Auch bei der Sturmflut vom 12. Februar 1962 wurde an der englischen Ostküste eine *external surge* beobachtet, aber mit geringerer Intensität. In den Abbildungen 7 und 8 ist nun zur statistisch ermittelten „Sollzeit" mit den jeweiligen Erwartungshöhen in Form einer Balkendarstellung der Schwallverlauf in Cuxhaven beim Reststau eingetragen. Man erkennt, daß trotz der Überlagerung der aufeinanderfolgenden Wellen die Abweichungen über 30 cm beim Reststau gut wiedergegeben sind. Der in der Abbildung 7 am 12. Februar von 4.00 bis 16.00 Uhr zu beobachtende negative Reststau ist auch an den englischen Pegeln als Vorläufer der *external surge* zu beobachten.

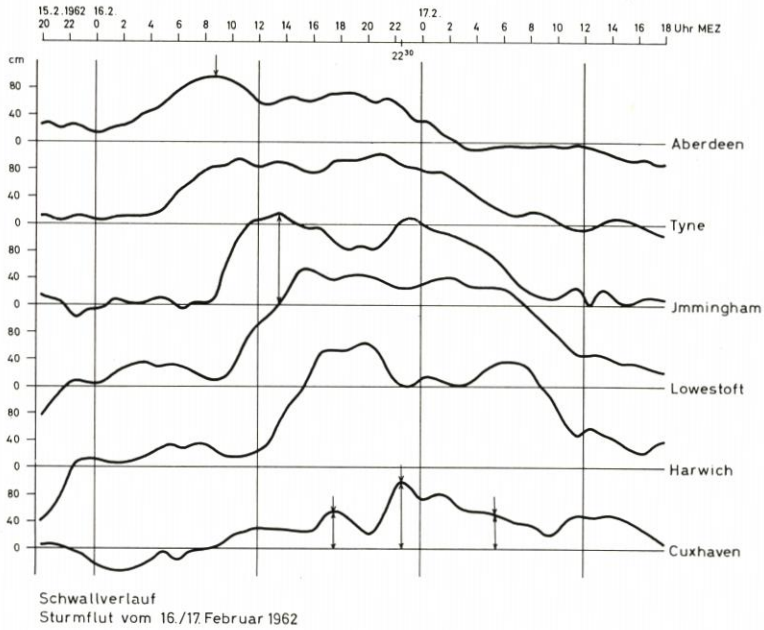

Abb. 9. Schwallverlauf am 16./17. Februar 1962 („external surge" an der englischen Ostküste und Reststau bei Cuxhaven)

Die derzeitige Gezeitenvorausberechnung liefert sehr genaue Höhen- und Zeitangaben für Hoch- und Niedrigwasser. Die bislang benutzten stündlichen Zwischenwerte hingegen werden noch nach einem Verfahren interpoliert, bei welchem Abweichungen der so berechneten stündlichen Zwischenwerte gegenüber den tatsächlichen astronomischen Werten durchaus auftreten können. Diese Abweichungen können naturgemäß nur zwischen den Extremwerten auftreten. Überdies sind sie wegen der stets gleich angewandten Berechnungsmethode oft periodisch. Es ist daher meistens möglich, derartige Abweichungen nachträglich zu eliminieren.

Betrachtet man die Kurvendarstellungen in den Abbildungen 7 und 8, so erkennt man, daß die Hauptursache der Katastrophenwasserstände durch ungünstiges Eintreffen der Schwallerhöhung zur Zeit des Hochwassers begründet werden kann. Die Tideabhängigkeit des Staus läßt eine Abnahme des Windstaus zur Zeit des Hochwassers erwarten. Der Tabellenstau in beiden Abbildungen und der beobachtete Stau in Abbildung 7 zeigen dies deutlich. In der Abbildung 8 steigt der beobachtete Stau dagegen noch an, obwohl die Tabellenstauwerte abnehmen.

Die Küste, 10 Heft 1 (1962), 55-68

Schwallerhöhungen der in den Abbildungen 7 und 8 gezeigten Größe sind selten. Sie treffen überdies nicht nur zur Zeit des Hochwassers, sondern zu jeder Zeit des Tideverlaufs ein. Die ausgeprägte Schwallerhöhung des 16./17. Februar 1962 ist aber wohl, wie man sieht, nicht nur für die extreme Höhe, sondern auch für den verfrühten Eintritt des Hochwassers und auch für das lange Andauern der hohen Wasserstände verantwortlich zu machen. Eine auf diese Weise entstandene füllige Wasserstandskurve an der Küste führte dann zur Aufsteilung der

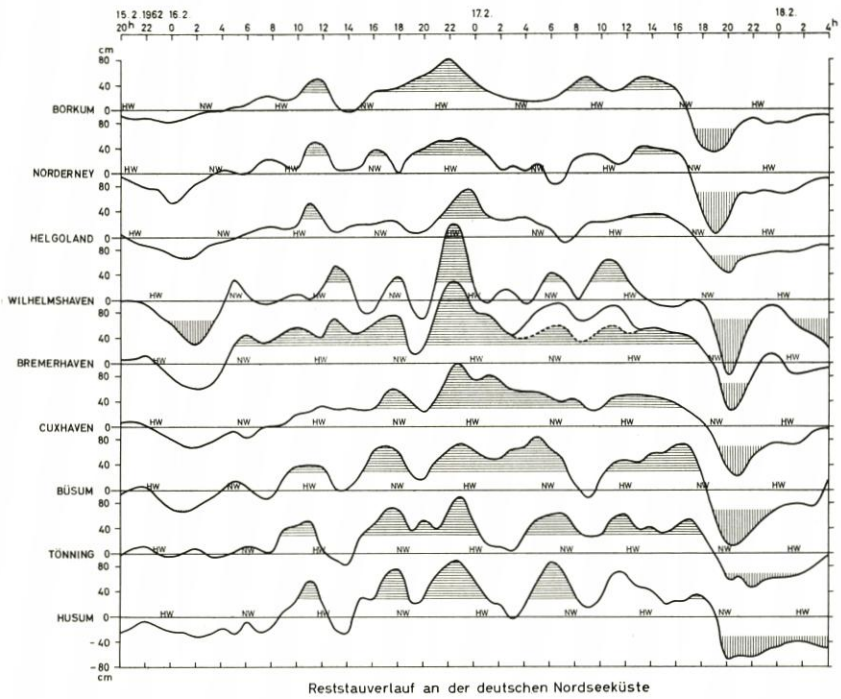

Abb. 10. Reststauverlauf an der deutschen Nordseeküste am 16./17. Februar 1962

Wassermassen zu Höchstwasserständen in den tideabhängigen Flußläufen. In dem trichterförmigen Verlauf der Elbe erreichten die Wasserstände ungeachtet der Deichbrüche eine Höhe von 4,0 m über MThw bei Hamburg, mit einem Maximalwert bei Schulau von 4,3 m über MThw.

Da die statistisch ermittelte Beziehung Windstau/mittlerer Wind über der Deutschen Bucht nur für Cuxhaven gilt, während die übrige deutsche Nordseeküste an Cuxhaven angeschlossen ist, muß noch gezeigt werden, daß neben der guten Übereinstimmung bei Cuxhaven auch an der übrigen Küste die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 hinreichend durch die angewandte Methode erfaßt wurde. Deshalb wurde für neun Meldepegel die stündliche Anschlußberechnung durchgeführt und der verbleibende Reststau ermittelt. Dieser wurde in der Abbildung 10 aufgetragen, und zwar für Borkum, Norderney, Helgoland, Wilhelmshaven, Bremerhaven, Cuxhaven zum Vergleich und für Büsum, Tönning und Husum. Man erkennt in den Hauptschwingungen eine plausible Übereinstimmung aller Meldepegel mit Cuxhaven bis auf Bremerhaven. Dort mußte der Reststau vom 17. Februar 1962 von 3 Uhr bis 13 Uhr reduziert werden (gestrichelte Linie). Das würde bedeuten, daß bei starkem WNW der Tabellenstau zu geringe Werte ergäbe. In der Tat ergibt die Berechnung nach KOOPMANN (1962) für Bremerhaven bei

Die Küste, 10 Heft 1 (1962), 55-68

WNW durch das ausgedehnte Wattenvorland höhere Werte als die nach der Anschlußtabelle von TOMCZAK (1952) ermittelten Windstauwerte, die der Reststauberechnung von Abbildung 10 zugrunde liegen. In diesem Fall wird man durch neue Korrelation über einen längeren Zeitraum eine Verbesserung erwarten dürfen. Daß die Reststauwerte an den drei Insel-Pegeln wie zu erwarten geringer sind als bei den übrigen, tritt deutlich hervor. Ebenso ist ein Unterschied zwischen ostfriesischer und nordfriesischer Küste zu erkennen. Es darf an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, daß die gezeigten Reststau-Schwankungen ungewöhnlich groß waren. Sie sind durch den Schwallverlauf, der mit den an der englischen Ostküste beobachteten Erhöhungen in enger Beziehung steht, zu erklären. Zwischen beiden Sturmfluten am 12. und 16./17. Februar 1962 mit ihren Schwallerhöhungen, war der Reststau gering (kleiner als ± 30 cm). Der Stau entsprach also während dieser Zeit den Windstautabellenwerten. Außerdem lagen zwischen beiden Sturmfluten auch Wasserstände, die der Gezeitenvorausberechnung entsprachen. Es ist also mit Sicherheit anzunehmen, daß die Sturmflut vom 12. Februar die vom 16./17. Februar 1962 in keiner Weise beeinflußt hat.

3. Die Ursachen der hohen Wasserstände

Das Wettergeschehen in seiner Gesamtheit ist verantwortlich für die Abweichungen der Wasserstände von dem astronomisch bedingten Gezeitenverlauf. Die Gezeitenvorausberechnung für das fragliche Hochwasser in der Nacht vom 16. zum 17. Februar 1962 an der deutschen Nordseeküste lag etwa 1 dm unter dem mittleren Hochwasser. Man darf also für die extremen Wasserstände jener Nacht nur das Wettergeschehen verantwortlich machen. Will man Maßzahlen oder Vergleichswerte erhalten, die man für jede Art von Abschätzung benötigt, so muß eine Unterteilung des Wettergeschehens nach den im Wasser kenntlich werdenden Auswirkungen vorgenommen werden. In der Arbeit von KOOPMANN (1962) wurde diese Methode explizit dargelegt. Ein Teilergebnis liegt in Abbildung 8 vor. Will man eine Zerlegung des Hochwasserstandes bei Cuxhaven vornehmen, so kann man zu folgenden Werten kommen. Die Gezeitenvorausberechnung ergab 6,26 m PN, das sind 14 cm unter MThw. Der höchste Stand wurde mit 9,96 m gemessen, das sind 3,56 m über MThw oder 3,70 m über der Vorausberechnung. Man kann annehmen, daß sich diese 3,70 m etwa folgendermaßen zusammensetzen:

	Cuxhaven	übrige Küste
Windstau über der Deutschen Bucht	2,2 m	1,6 bis 2,6 m
Statischer Luftdruck	0,2 m	0,2 m
Böigkeit	0,1 m	0,1 bis 0,2 m
Inhomogenes Windfeld	0,3 m	0,3 m
Schwallerhöhung	0,9 m	0,5 bis 1,2 m
	3,7 m	3,0 bis 3,9 m

Aus dieser Zusammenstellung geht deutlich hervor, daß der Windstauanteil (mittlerer Wind Deutsche Bucht) rund $^2/_3$ des gesamten Staus ausmachte. So wenig ist in der Tat sehr selten. Einen wesentlichen Anteil am Zustandekommen der hohen Wasserstände nimmt die Schwallerhöhung ein, aber auch der Anteil aus dem stärkeren Windfeld über der Nordsee sowie die Böigkeit und der statische Luftdruck müssen berücksichtigt werden; denn erst so kann man den Gesamtstau ermitteln.

Die Küste, 10 Heft 1 (1962), 55-68

4. Sind höhere Wasserstände denkbar?

Nach der Hollandkatastrophe vom 1. Februar 1953 machte man sich nicht nur in den Niederlanden ernste Gedanken über mutmaßliche Wasserstände, vor denen man sich zu schützen hätte. In Deutschland erstellte die Arbeitsgruppe „Sturmflut vom 1. 2. 1953" des Küstenausschusses Nord- und Ostsee eine Empfehlung, einen „maßgebenden Sturmflutwasserstand" in folgender Weise zu ermitteln: An Pegeln mit ausreichendem Beobachtungszeitraum sollte der bisher größte beobachtete Unterschied zwischen eingetretenem und vorausberechnetem Hochwasserstand zum heute höchstmöglichen astronomischen Hochwasser addiert werden, unter Berücksichtigung des säkularen Anstiegs.

Diese Empfehlung, auf die Werte der Tabelle 1 angewandt, läßt erkennen, daß abgesehen von Bremen und Hamburg der „maßgebende Sturmflutwasserstand" von vor 1962 höher lag, als die Wasserstände der Sturmflut vom 16./17. Februar 1962.

Es liegt nun die Frage nahe, warum entlang der deutschen Nordseeküste die ermittelten „maßgebenden Sturmflutwasserstände" in keinem Falle erreicht, dagegen im Flußgebiet der Weser und Elbe sogar überschritten wurden, obwohl kein außergewöhnliches Oberwasser dazu beigetragen hat. Eine Antwort ist in dem Verlauf der Sturmflut-Wasserstandskurve zu suchen. Der maximale Stau trat, wie erwähnt, an der Küste nicht zur Zeit des Hochwassers ein. Ein lang anhaltendes Hochwasser war die Folge. Eine derart füllige Wasserstandskurve hat aber eine Aufsteilung in trichterförmigen Flußmündungen zur Folge (Hensen 1955). Bei extremen Wasserständen nimmt man im allgemeinen an, daß die ungünstige Superposition von Ereignissen noch gerade jenen Wasserstand zuwege bringt, also zur Zeit des Hochwassers alle ungünstigen Ereignisse zusammentreffen, daß mithin die stärkste Windwirkung genau auf das astronomische Hochwasser trifft, eine mögliche Schwallerhöhung ebenfalls mit ihrem Maximum zur selben Zeit durchläuft und so fort. Ein derartiges Zusammentreffen würde eine zwar sehr hohe aber magere Wasserstandskurve zur Folge haben, diese aber erbrächte auch in den Flußläufen nur unwesentliche Abweichungen der Wasserstände von denen an der Küste.

Die Fülligkeit der Wasserstandskurve an der deutschen Nordseeküste mit den beobachteten Aufsteilungen der Wasserstände in Weser und Elbe gibt zu denken, zu denken daran, daß ein ungünstigeres Zusammentreffen der an der Wasserstandserhöhung beteiligten Faktoren zu einer zwar mageren, aber im Gipfelpunkt höheren Wasserstandskurve an der Küste hätte führen können. Man erkennt auf diese Betrachtungsweise, daß nicht etwa nur ungünstige Verhältnisse zur Katastrophenhöhe im Elbegebiet führten, sondern daß vielmehr die Küste vor möglichen höheren Wasserständen bewahrt blieb.

Die oben angeführte Empfehlung zur Ermittlung eines „maßgebenden Wasserstandes" würde für Cuxhaven unter sinngemäßer Berücksichtigung der Wasserstände im Elbegebiet ohne säkularen Anstieg und ohne Wellenauflauf 11 m PN oder 6 m über NN ergeben. Ginge man von bekannten Einzelwerten aus (etwa: $3^1/_2$ m für den Windstau bei Cuxhaven, da äquivalente Werte beobachtet sind; 1 m für Schwallerhöhung bei Thw; für die Gezeit $^1/_2$ m über MThw; „freie Wellen", durch Luftdruckschwankungen in Resonanz erzeugt, sind bei Thw mit $^3/_4$ m bei Tnw sogar mit $1^3/_4$ m beobachtet; hinzu käme der statische Luftdruck, die Böigkeit usw.), so würden alle Faktoren zusammengenommen den Wert von 11 m PN überschreiten. Es ist aber bestimmt nicht richtig, wollte man einen höchstmöglichen Wasserstand durch Superposition aller bekannten und denkbaren Einzelergebnisse definieren, denn alle Erscheinungen beeinflussen einander. Die Gezeitenwelle, die durch die Vorausberechnung gegeben ist, gilt streng nur für die Bedingungen hinsichtlich der Wassertiefe, der mittleren jahreszeitlichen Verhältnisse usw., für die sie berechnet ist. Von den Schwallerhöhungen in der Deutschen Bucht und den „freien Wellen" ist die Abhängigkeit von der Tide bekannt. Überdies reicht das Beobachtungsmaterial

Die Küste, 10 Heft 1 (1962), 55-68

nicht aus, um extreme meteorologische Verhältnisse auszuweisen. Es wird deshalb das beste sein, weiterhin mit einem „gut denkbaren Wasserstand" zu rechnen und zu überlegen, was man schützen will und welchen Aufwand man für vertretbar hält. Es wäre aber falsch, den Küstenanwohner in Sicherheit zu wiegen, denn man muß sich bewußt bleiben, daß jede Sturmflut unbekannte Gefahren in sich bergen kann.

5. Schriftenverzeichnis

1. Deutsches Hydrographisches Institut: Gezeitentafeln für das Jahr 1962. Band 1, Europäische Gewässer. Hamburg 1961.
2. Hensen, W.: Stromregelungen, Hafenbauten, Sturmfluten in der Elbe und ihr Einfluß auf den Tideablauf. Hamburg, Großstadt und Welthafen. Ferdinand Hirt. Kiel 1955.
3. Hensen, W.: Gedanken über den Deichbau. Hansa 99, Nr. 13, 1962.
4. Hundt, C.: Maßgebende Sturmfluthöhen für das Deichbestick der schleswig-holsteinischen Westküste. Die Küste 3, H. 1/2, 1955.
5. Koopmann, G.: Wasserstandserhöhungen in der Deutschen Bucht infolge von Schwingungen und Schwallerscheinungen, angewandt auf die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962. Dtsch. Hydrogr. Z. 15, H. 5, 1962.
6. Küstenausschuss Nord- und Ostsee: Stellungnahme des Küstenausschusses Nord- und Ostsee, Untergruppe „Sturmflut vom 1. Februar 1953" zu Anfragen der Landesregierung Schleswig-Holsteins und Niedersachsens, betr. Sturmflutuntersuchungen. Kiel 11. 3. 1954. (Arch. Landesst. Gewässerkunde Kiel, unveröffentlicht.)
7. Rodewald, M.: Zur Entstehungsgeschichte der Sturmflutwetterlagen in der Nordsee im Februar 1962. Die Küste 10, H. 2, 1962.
8. Roediger, G.: Meteorologische Betrachtungen zur Hamburger Sturmflutkatastrophe vom 16./17. Februar 1962. Naturwiss. Rdsch. 15, H. 7, 1962.
9. Tomczak, G.: Der Einfluß der Küstengestalt und des vorgelagerten Meeresbodens auf den windbedingten Anstau des Wassers an der deutschen Nordseeküste zwischen Ems und Elbe. Dtsch. Hydrogr. Z. 5, H. 5/6, 1952.
10. Tomczak, G.: Was lehrt uns die Holland-Sturmflut 1953? Die Küste 3, H. 1/2, 1955.
11. Tomczak, G.: Über die Genauigkeit der Sturmflutvorhersage für die deutsche Nordseeküste. Dtsch. Hydrogr. Z. 13, H. 1, 1960.
12. Wemelsfelder, P. J.: Wetmatigheden in het optreden van stormvloeden. De Ingenieur 54, H. 9, 1939.
13. Woebcken, C.: Deiche und Sturmfluten an der Nordseeküste. Friesen Verlag. Bremen-Wilhelmshaven 1924.