

Sturmfluten in der Elbe und an der deutschen Nordseeküste in diesem Jahrhundert

Eine Untersuchung zu den Sturmflutereignissen des Jahres 1973

Von Horst Nasner und Hans-Werner Partenscky

Inhalt

I. Einleitung	97
II. Langjährige Änderungen der mittleren Wasserstände	99
A. Die Elbe bei Cuxhaven und Hamburg-St. Pauli	99
1. Allgemeines	99
2. Mittlere Tidewasserstände	99
B. Die Verhältnisse bei mittleren Tiden an der deutschen Nordseeküste	101
III. Sturmflutwasserstände in der Elbe	103
A. Vorbemerkungen	103
B. Sturmflutwasserstände an den Pegeln Cuxhaven und Hamburg-St. Pauli von 1901 bis 1973	103
IV. Häufigkeiten hoher Wasserstände an der deutschen Nordseeküste	106
A. Vorbemerkungen	106
B. Sturmflutwasserstände in Wilhelmshaven und in Cuxhaven	107
C. Vergleich verschiedener Tidepegel	107
1. Sturmfluten in den Jahren 1901 bis 1973	107
2. Vergleich der Sturmfluthäufigkeiten mit langfristigen Mittelwerten	109
V. Schlußbemerkung	112
VI. Schriftenverzeichnis	112

Summary

In the following paper, the development of the mean tidal conditions and storm tides in the german coastal and tidal area, is investigated on several tidal gauges. It can be stated in summary, that storm tides and also the frequency of extremely high water levels have increased in recent years in the entire german coastal region. This holds good without qualification for the island of Helgoland. A connection between the storm tide frequency and level and construction measures in the tidal rivers and in the coastal region, could not be determined.

I. Einleitung

Sturmfluten sind Naturereignisse, auf deren Häufigkeit und Intensität der Mensch keinen Einfluß hat. Nach den Sturmflutkatastrophen 1953 in Holland und 1962 in Deutschland ist nach eingehenden wissenschaftlichen Untersuchungen mit den heute zur Verfügung stehenden technischen und wirtschaftlichen Mitteln alles getan worden, um eine Wiederholung der Sturmflutschäden, wie sie im Jahre 1962 in den deutschen Tide-ästuarien und an der Nordseeküste auftraten, weitgehend zu vermeiden. Die in den vergangenen Jahren ausgeführten Hochwasserschutzmaßnahmen im Bereich der deutschen Nordseeküste haben sich bei der ungewöhnlichen Serie hoher Sturmfluten im November und Dezember 1973 bewährt.

So waren die hinter den nach 1962 verbesserten und verstärkten Hochwasserschutzanlagen im Bereich der Hansestadt Hamburg lebenden Menschen bei keiner der im Jahre 1973 aufgetretenen Sturmfluten gefährdet.

Zu materiellen Schäden kam es in den nicht gegen Sturmfluten geschützten Bereichen des Hamburger Hafens bei den dort angesiedelten Industriebetrieben, die wegen ihrer Lage aus hafentplanerischen, hafentbetrieblischen und finanziellen Erwägungen bei den nach 1962 geplanten und ausgeführten neuen Hochwasserschutzmaßnahmen nicht berücksichtigt werden konnten (LAUCHT, 1966). In den außendeichs verbliebenen Bereichen muß deshalb heute ebenso wie vor 1962 mit dem Risiko gelegentlich auftretender Schäden durch Sturmflutereignisse gerechnet werden.

Nach den Sturmflutereignissen des Jahres 1973 wurde u. a. in der Presse vielfach die Meinung vertreten, daß die Häufigkeit der hohen Sturmfluten in Hamburg auf die in der Elbe in den vergangenen Jahren durchgeführten Hochwasserschutzmaßnahmen, wie der Anlage von Sperrwerken in den Nebenflüssen der Elbe, den neuen Linienführungen der Deiche und den Vordeichungen, zurückzuführen ist. Dagegen sprechen schon allein die umfangreichen Untersuchungen an hydraulischen und hydrodynamisch-numerischen Modellen, die unabhängig voneinander übereinstimmende Ergebnisse im Zusammenhang mit den nach 1962 geplanten Hochwasserschutzmaßnahmen geliefert haben und nach denen sich der geringe Einfluß aller nach 1962 geplanten Baumaßnahmen auf die Sturmflut-scheitelwasserstände in Hamburg ergeben hat. Über die Ergebnisse der Versuche an dem hydraulischen Versuchsmodell der Elbe, das im Franzius-Institut der Technischen Universität Hannover in den Jahren von 1962 bis 1969 betrieben wurde, wird noch an anderer Stelle ausführlich berichtet werden. Es sei hier nur erwähnt, daß sich die Hochwasserschutzbauwerke nach den Modellversuchen insgesamt nicht nennenswert auf die Sturmflut-scheitelwasserstände in Hamburg auswirken.

In dem folgenden Beitrag werden die Änderungen der Wasserstände in der Elbe und an der deutschen Nordseeküste in diesem Jahrhundert sowie die Auswirkungen von Baumaßnahmen untersucht. Für den Bereich der Elbe wird die Entwicklung der Sturmflut-

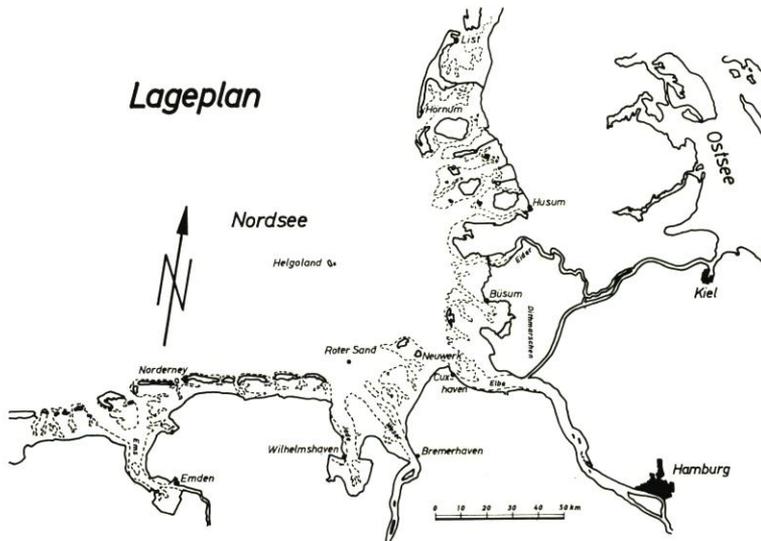


Abb. 1

wasserstände in Cuxhaven und Hamburg analysiert. Darüber hinaus wird die Entwicklung des Sturmflutgeschehens im deutschen Küstengebiet der Nordsee ermittelt (Abb. 1). Die erforderlichen und verwendeten Planunterlagen wurden dankenswerterweise von den Wasser- und Schiffsdirektionen Aurich, Bremen und Hamburg, den Wasser- und Schiffsämtern Hamburg, Tönning und Wilhelmshaven sowie vom Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein zur Verfügung gestellt.

II. Langjährige Änderungen der mittleren Wasserstände

A. Die Elbe bei Cuxhaven und Hamburg-St. Pauli

1. Allgemeines

Im folgenden werden die Wasserstandsganglinien für die Pegel Cuxhaven und Hamburg-St. Pauli für den Zeitraum von 1901 bis 1973 dargestellt. Weiter zurückgehende Untersuchungen sind im Schrifttum zu finden (HENSEN, 1955; LAUCHT, 1956; ROHDE, 1968, 1971; GISZAS, 1969; SIEFERT, 1970). In dem betrachteten Zeitraum sind, abgesehen von kleineren Baumaßnahmen von nur örtlicher Bedeutung, die nachstehend aufgeführten umfangreicheren Eingriffe innerhalb des Tidegebietes der Elbe vorgenommen worden (HENSEN, 1955):

1. der Ausbau der Elbe von Altona bis Brunshausen (Stadersand), der von der Jahrhundertwende bis etwa 1914 ausgeführt wurde;
2. der Ausbau der Elbestrecke von der Ostemündung bis Freiburg in den Jahren 1925 bis 1936;
3. die Regelung der Elbe bei der Insel Pagensand in den Jahren 1928 bis 1936;
4. der abschnittsweise, im wesentlichen seit 1879 vorgenommene Ausbau des Hamburger Hafens und
5. die Niedrigwasserregelung der Elbe im oberen Tidegebiet seit 1933.

Durch den Bau der Staustufe Geesthacht in den Jahren 1957 bis 1960 ist eine sprunghafte Änderung der Wasserstände in der oberen Tideelbe eingetreten. Schon vor dem 1. Weltkrieg konnte fast überall zwischen Hamburg und Cuxhaven eine Wassertiefe in der Elbe von 10 m unter MT_{Nw} erreicht werden (ROHDE, 1971). Der 11-m-Ausbau wurde in den Jahren 1957 bis 1961 ausgeführt und der 12-m-Ausbau bis 1969 beendet. Bereits 1962 war fast überall eine Wassertiefe von 12 m unter KN in der Unterelbe vorhanden.

2. Mittlere Tidewasserstände

In Abbildung 2 sind die Jahresganglinien der M_{Thw}, MT^{1/2}_w und MT_{Nw} für die Pegel Cuxhaven und Hamburg-St. Pauli für die Abflußjahre 1901 bis 1973, zusammen mit der Ganglinie des Oberwassers und der Wasserstandsdifferenz der M_{Thw} zwischen den beiden Pegeln, dargestellt. Um die jahreszeitlichen Schwankungen auszugleichen, wurden für alle Werte 19jährige, übergreifende Mittel von 1901/19 bis 1955/73 gebildet.

Interessant ist, daß nicht nur die Jahresganglinien des Pegels Hamburg-St. Pauli, sondern auch die des Pegels Cuxhaven, wenn auch in abgeschwächter Form, der Oberwasserganglinie entsprechen. Umfangreiche Untersuchungen von WISMER (ROHDE, 1971) haben ergeben, daß sich ein Einfluß des Oberwassers auf die Tidekennwerte in Cuxhaven nicht erkennen läßt. Ein Vergleich der M_{Thw}-Ganglinien für die Pegel Cuxhaven und

Wilhelmshaven, wo die Wasserstände nur einem sehr geringen Einfluß von Binnenzuflüssen unterworfen sind, zeigt einen durchweg übereinstimmenden Verlauf an beiden Pegeln (HENSEN, 1959). Es besteht demnach offenbar ein Zusammenhang zwischen den aperiodischen Erscheinungen (Wind, Luftdruck usw.), die die Wasserstände im Mündungsgebiet der Elbe beeinflussen, und den Faktoren, die den Abfluß der Elbe vom Binnenland her bestimmen.

Aus den Auftragungen in Abbildung 2 geht hervor, daß sich das MThw, $MT^{1/2w}$ und MTnw in Cuxhaven von 1910 bis 1960 um 11 cm, 9 cm bzw. 8 cm erhöht haben

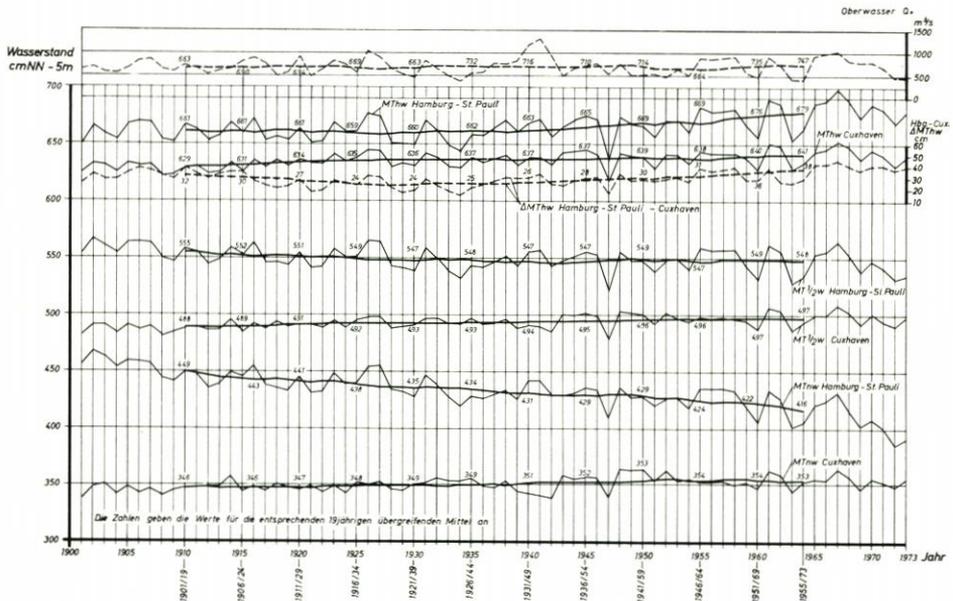


Abb. 2. Wasserstände an den Pegeln Cuxhaven und Hamburg-St. Pauli; Wasserstandsunterschiede und Oberwasser der Elbe; Jahresganglinien und 19jährige übergreifende Mittelwerte

(19jährige übergreifende Mittel). Das bedeutet eine relative Erhöhung des Wasserspiegels ($MT^{1/2w}$) bei Cuxhaven um etwa 9 cm in 50 Jahren. Dieser allgemein als „säkulare Wasserstandshebung“ bezeichnete Anstieg des Ruhewasserspiegels ist auch an anderen Pegeln der deutschen Nordseeküste untersucht worden (HENSEN, 1959; ROHDE, 1964, 1968). Der säkulare Anstieg ist an den einzelnen Küstenpegeln unterschiedlich groß. Bei einer Extrapolation ergibt sich für Cuxhaven ein Anstieg des $MT^{1/2w}$ von 18 cm in 100 Jahren. Mit einer Zurückrechnung bis etwa 1800 wurde ein Wert von 24 cm in 100 Jahren ermittelt (SIEFERT, 1970). Küstensenkung und Meeresspiegelhebung sind offenbar langfristigen Schwankungen unterworfen, so daß eine Extrapolation für eine relativ kurze Beobachtungszeit nur mit Vorbehalt durchgeführt werden kann.

Die MThw-Werte für den Pegel Hamburg-St. Pauli bleiben von 1910 bis 1938 etwa konstant (661 cm NN - 5 m), das $MT^{1/2w}$ fällt im gleichen Zeitraum um 8 cm (von 555 cm auf 547 cm NN - 5 m) und das MTnw um 18 cm (von 449 cm auf 431 cm NN - 5 m). In der folgenden Zeit bis 1964 steigt das MThw um knapp 7 cm in 10 Jahren bis auf den Wert von 679 cm NN - 5 m. Das $MT^{1/2w}$ in Hamburg-St. Pauli ändert sich dagegen kaum noch und das MTnw fällt bis auf 416 cm NN - 5 m (Abb. 2).

Die Tidehübe in Hamburg-St. Pauli und Cuxhaven haben sich als Folge der Rege-

lungsmaßnahmen in der Elbe immer mehr einander angeglichen. Durch die stärkere Hebung des MThw (12 cm) gegenüber der des MTnw (7 cm) vergrößerte sich der Tidehub in Cuxhaven von 1901/19 (1910) bis 1955/73 (1964) um 5 cm auf 288 cm, während in Hamburg-St. Pauli der Tidehub durch Senkung des MTnw um 33 cm und Hebung des MThw um 18 cm von 212 cm auf 263 cm vergrößert wurde (Abb. 2). Die Differenz in den Tidehüben der beiden Pegel hat von $283 \text{ cm} - 212 \text{ cm} = 71 \text{ cm}$ (1910) auf $288 \text{ cm} - 263 \text{ cm} = 25 \text{ cm}$ (1964) abgenommen. Für die Veränderung der Wasserstände in Hamburg sind im wesentlichen die säkulare Wasserstandshebung, die Zunahme der Wasserflächen im Hamburger Hafengebiet und der Ausbau und die Vertiefung der Elbe zwischen Cuxhaven und Hamburg maßgebend (HENSEN, 1955). Im ersten Teil des Beobachtungszeitraumes sind die Senkungen des Tnw und die Hebungen des Thw in Hamburg-St. Pauli durch den Zuwachs an Hafensflächen in Hamburg abgemindert worden. Die Erhöhungen des MThw am Pegel Hamburg-St. Pauli sind mit darauf zurückzuführen, daß seit 1930 praktisch keine neuen Hafensflächen in Hamburg mehr geschaffen wurden. Die Hebung des MThw in Hamburg seit 1938 läßt sich nicht im einzelnen analysieren. Die Ursache ist sowohl in den seitdem ausgeführten Regelungsmaßnahmen als auch in der säkularen Wasserstandshebung zu suchen. Durch die Zunahme des Oberwassers der Elbe von 1955 bis 1964 um rd. $100 \text{ m}^3/\text{s}$ wird das MThw in Hamburg ebenfalls erhöht und die Differenz zu Cuxhaven vergrößert. Das ΔMThw Hamburg-Cuxhaven entspricht für das Abflußjahr 1973 mit $679 \text{ cm} - 639 \text{ cm NN} - 5 \text{ m} = 40 \text{ cm}$ dem Mittelwert der Jahresreihe 1955/73 (Abb. 2).

Der Unterschied der MThw-Scheitelwerte zwischen den Pegeln Cuxhaven und Hamburg-St. Pauli hat sich von 1910 (1901/19) bis 1964 (1955/73) nur von 32 cm auf 38 cm vergrößert, während sich der Unterschied der MTnw-Scheitel im gleichen Zeitraum von 103 cm auf 63 cm verringert hat (Abb. 2). Die Ausbaumaßnahmen in der Elbe haben sich demnach, wie zu erwarten, bedeutend stärker auf die Niedrigwasserstände als auf die Hochwasserstände ausgewirkt.

B. Die Verhältnisse bei mittleren Tiden an der deutschen Nordseeküste

Zur Ermittlung langfristiger Wasserstandsänderungen wurden in Abbildung 3 die 19jährigen übergreifenden Mittel der MThw von 1901/19 bis 1955/73 für verschiedene Pegel aufgetragen. Die folgenden Pegel wurden dabei berücksichtigt (Abb. 1): Roter Sand (ab 1965 Leuchtturm Alte Weser), Norderney, Emden, Wilhelmshaven, Bremerhaven, Cuxhaven, Hamburg-St. Pauli, Büsum und Husum. Im unteren Teil der Abbildung 3 wurden die Änderungen der Wasserstandsdimensionen zum Pegel Cuxhaven dargestellt. Die Werte für Hamburg-St. Pauli, in Verbindung mit den Wasserstandsänderungen in Cuxhaven, wurden bereits vorstehend diskutiert. Auf die Wasserstände am Pegel Hamburg-St. Pauli wird deshalb im folgenden nicht mehr eingegangen.

An allen untersuchten Pegeln zeigt sich eine Wasserstandserhöhung im Beobachtungszeitraum. Sie betragen im einzelnen:

am Pegel	cm
1. Husum	12
2. Büsum	6
3. Cuxhaven	12
4. Roter Sand (Alte Weser)	11
5. Bremerhaven	11

6. Wilhelmshaven	16
7. Norderney	12
8. Emden	6

Ähnliche Untersuchungen von ROHDE (1964, 1968) für die Pegel Husum, Tönning, Büsum und Cuxhaven, die weit bis in das vorige Jahrhundert zurückreichen, haben ergeben, daß sich der Anstieg des Wasserspiegels seit einigen Jahrzehnten verlangsamt hat. Die Größenordnung der Gesamterhöhungen an den betrachteten 8 Pegeln ist in diesem Jahrhundert relativ gering, so daß nicht näher auf sie eingegangen zu werden braucht. Es soll hier auch nicht die Frage näher untersucht werden, zu welchen Anteilen die Wasserstandshebungen dem Anstieg des Ruhewasserspiegels der Weltmeere oder einer Küstensenkung zuzuschreiben sind.

Wenn auf Grund der relativ geringen Wasserstandserhöhungen Schlüsse auch nur mit Vorbehalt gezogen werden können, so läßt sich doch feststellen, daß sich die Bedingungen am Pegel Cuxhaven nicht ungünstiger als in anderen Bereichen der deutschen Nordsee-

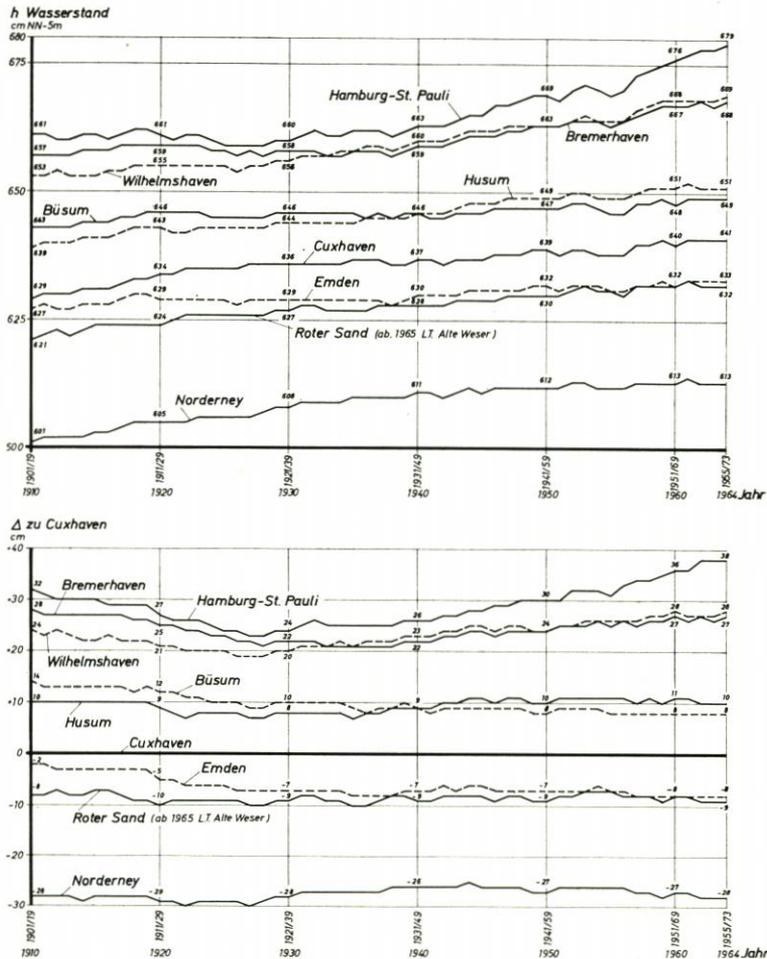


Abb. 3. Mittlere Tidehochwasserstände an einigen deutschen Tidepegeln und Wasserstands-differenz zum Pegel Cuxhaven; 19jährige übergreifende Mittelwerte

küste entwickelt haben. Ein Vergleich mit den Pegeln im Küstenvorfeld (Roter Sand, Norderney) zeigt, daß die Differenz der MThw zu Cuxhaven bei geringen Schwankungen gleich geblieben ist (Abb. 3, untere Diagramme). Gegenüber den Pegeln Büsum und Emden ist die Wasserstandshebung in Cuxhaven doppelt so groß. Das absolute Maß der zusätzlichen 6 cm in Cuxhaven gegenüber Büsum und Emden ist jedoch ebenso unbedeutend, wie der um 4 cm geringere Gesamtbetrag gegenüber Wilhelmshaven.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß sich die Wasserstände an der deutschen Nordseeküste und im Küstenvorfeld in diesem Jahrhundert für mittlere Tideverhältnisse nur geringfügig erhöht haben. Für einen Zeitraum von 50 Jahren sind es im Mittel rd. 10 cm.

III. Sturmflutwasserstände in der Elbe

A. Vorbemerkungen

Im Gegensatz zu den vorstehenden Untersuchungen für mittlere Tiden, die nach Abflußjahren ausgewertet wurden, handelt es sich bei den Auswertungen der Sturmfluten um Kalenderjahre. Von 1901 bis 1969 wurden alle Sturmfluten mit einem Wasserstand von mehr als 767 cm NN – 5 cm und ab 1970 alle Wasserstände von mehr als 768 cm NN – 5 m am Pegel Cuxhaven berücksichtigt. Das entspricht den Sturmflutscheitelwerten für Cuxhaven, die um 1,28 m (bzw. 1,29 m) über dem MThw in Cuxhaven von 1973 ($MThw_{CUX 1973} = 639 \text{ cm NN} - 5 \text{ m}$) lagen.

Die Gesamtzahl der Sturmfluten für Cuxhaven in der Zeit von 1901 bis 1973 beträgt 392. Die jährlichen Schwankungen der Häufigkeiten und mittleren Sturmflutscheitelwasserstände (MHThw) wurden durch Bildung 19jähriger übergreifender Mittelwerte ausgeglichen.

In der Jahresreihe 1902/20 traten mit 73 Sturmfluten die wenigsten Ereignisse (3,84/Jahr), in der Jahresreihe 1955/73 mit 126 die meisten Sturmflutereignisse (6,63/Jahr) auf.

Die relativ geringe Anzahl der Sturmfluten führt bei der Bildung von 19jährigen übergreifenden Mitteln der Sturmfluten zu gewissen Schwierigkeiten, da in 3 Jahren (1909, 1910 und 1937) keine Sturmtiden in Cuxhaven eintraten. Zeiträume, die diese Jahre mit erfassen, sind bei der Mittelbildung derart berücksichtigt worden, daß die Summe der Wasserstände von 19 Jahren nicht durch 19, sondern durch 17 (für 1901/19 bis 1909/27) bzw. durch 18 (für 1910/28 und 1919/37 bis 1937/55) dividiert wurde. Grundsätzlich wird das Ergebnis dadurch jedoch nicht beeinträchtigt.

B. Sturmflutwasserstände an den Pegeln Cuxhaven und Hamburg-St. Pauli von 1901 bis 1973

Im Zusammenhang mit dem Tidegeschehen in der Elbe interessiert die Frage, wie sich die Wasserstände in Hamburg in Abhängigkeit der Scheitelwerte in der Elbemündung verändert haben. Dazu wurden in Abbildung 4 die mittleren Wasserstände bei Sturmfluten (MHThw) am Pegel Cuxhaven und die zugehörigen Werte für Hamburg-St. Pauli aufgetragen. Außerdem wurde das zugehörige mittlere Oberwasser der Elbe für die Sturmfluten der einzelnen Jahre sowie die Wasserstandsdifferenz ($\Delta MHThw$ Hamburg-

Die gleiche Größenordnung der Wasserstandsdifferenzen zeigt, daß Sturmfluten heute im Mittel um das Maß höher in Hamburg auflaufen, um das sich das MThw erhöht hat. Für die Jahresreihe 1955/73 (1964) im Vergleich zur Jahresreihe 1936/54 (1945) liegt die relative Erhöhung gegenüber Cuxhaven bei 10 cm (Abb. 4). Über die Ursachen der Wasserstandserhöhungen ist bereits vorstehend im Abschnitt II berichtet worden. Die etwa gleich großen Wasserstandsdifferenzen zwischen den Pegeln Hamburg-St. Pauli und Cuxhaven bei mittleren Tiden und bei Sturmfluten zeigen unabhängig von – aber in Übereinstimmung mit – den eingangs erwähnten Ergebnissen der Modellversuche, daß sich die Hochwasserschutzmaßnahmen in der Elbe nicht nennenswert auf die Sturmflutscheitelwasserstände ausgewirkt haben können. Wenn die nur bei Sturmfluten wirksam werden den Schutzbauwerke die Wasserstände ungünstig (erhöhend) beeinflussen würden, müßte die Wasserstandsdifferenz zwischen Hamburg und Cuxhaven in den letzten Jahren des Beobachtungszeitraumes bei Sturmfluten (ausgezogene Linie in Abb. 4) stärker zugenommen haben als bei mittleren Tiden (gestrichelte Linie in Abb. 4). Dies ist jedoch nicht der Fall.

Es ist bekannt, daß einzelne Sturmfluten zu Wasserstandsdifferenzen zwischen Hamburg und Cuxhaven führen können, die stark von den langjährigen Mittelwerten abweichen. Die 14 Fluten, die im Jahre 1973 in Cuxhaven den Wasserstand von 768 cm NN – 5 m überschritten haben, führten bei einem MThw_{CUX} von 832 cm NN – 5 m zu einer Wasserstandsdifferenz zwischen Hamburg-St. Pauli und Cuxhaven von 63 cm. Das ist ein um 24 cm höherer Wert als der Mittelwert der Jahresreihe 1955/73 von 39 cm (Abb. 4). Bei der Vielzahl der Parameter, die für den Ablauf einer Sturmflut verantwortlich sind (SIEFERT, 1968), liegt diese höhere Differenz gegenüber dem Mittelwert der Jahresreihe 1955/73 jedoch durchaus noch in den zu erwartenden Grenzen.

Die vorstehend beschriebenen Auswertungen der Sturmfluten dieses Jahrhunderts (1901 bis 1973) in der Elbe zeigen, daß seit 1912 (1903/21) die Wasserstandsdifferenz Hamburg/Cuxhaven bei mittleren Tiden und bei Sturmfluten um nicht mehr als 3 cm voneinander abweicht. Dies bestätigt die gute Brauchbarkeit der von SIEFERT (1968) entwickelten Beziehung für die Vorhersage des Sturmflutscheitelwasserstandes in Hamburg aus dem Verlauf der Windstaukurve in Cuxhaven. Nach SIEFERT ergibt sich der Sturmflutscheitelwasserstand am Pegel Hamburg-St. Pauli zu:

$$HThw_{St. P.} = MThw_{St. P.} + W + \Delta W_{E, d} + \Delta W_{Q_0} \text{ in cm NN} - 5 \text{ m}$$

Als Grundlage dient dabei das MThw_{St. P.} der letzten 10 Jahre.

Der Wert $W = f(\alpha, h)$ mit $\alpha =$ Anstiegsneigung und $h =$ Scheitelhöhe der Windstaukurve in Cuxhaven wird aus einem Diagramm ermittelt.

Ebenfalls aus einem Diagramm wird $\Delta W_{E, d} = f(E, d, \alpha)$ abgelesen. E ist die zeitliche Lage der Windstaukurve zur vorausberechneten Tide und d die Scheiteldauer der Windstaukurve in Cuxhaven.

Zur Bestimmung von ΔW_{Q_0} wird der mittlere Abfluß Q_0 der Vorwoche am Pegel Neu Darchau verwendet. Dabei gilt nach SIEFERT:

$$\Delta W_{Q_0} = 0,026 (Q_0 - 800) \text{ in cm}$$

Die angegebene Gleichung besagt in Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus Abbildung 4, daß bei Gleichheit der Sturmflutparameter (W , $\Delta W_{E, d}$ und ΔW_{Q_0}) eine Sturmflut, die z. B. heute in Cuxhaven den gleichen Windstau erzeugt wie im Jahre 1940 (bei gleichen Oberwasserbedingungen), in Hamburg-St. Pauli einen Scheitelwasserstand erzeugt, der um das Maß höher liegt, um das sich das MThw_{St. P.} seit 1940 erhöht hat.

An einer Vielzahl von in der Elbe seit 1914 aufgetretenen Sturmfluten ist die An-

wendbarkeit des Sturmflutvorhersageverfahrens von SIEFERT für Hamburg nachgewiesen worden (SIEFERT, 1968, 1974). Es sind demnach bis zu 10 Stunden vor dem Eintritt des Sturmflutscheitelwasserstandes in Hamburg frühzeitige Warnungen möglich. 4 Stunden vor dem Eintritt des Scheitelwasserstandes in Hamburg kann dessen Höhe nach SIEFERT auf ± 12 cm genau angegeben werden. Durch die Tatsache, daß dieses Vorhersageverfahren nach dem Verlauf der Windstaukurve in Cuxhaven und den Oberwasserbedingungen der Elbe entwickelt wurde und für die letzten 60 Jahre Ergebnisse mit einer guten Genauigkeit liefert, zeigt sich erneut, daß sich die in den vergangenen Jahren ausgeführten Hochwasserschutzbauwerke an der Elbe nicht entscheidend auf die Sturmflutwasserstände in Hamburg ausgewirkt haben können. Sehr hohe Wasserstände in Hamburg und ihre Häufigkeit sind deshalb allein auf die Einflüsse von See her zurückzuführen.

Wie sich die Sturmfluthäufigkeit an der deutschen Nordseeküste und im Küstenvorfeld in diesem Jahrhundert entwickelt hat, soll im folgenden beschrieben werden.

IV. Häufigkeiten hoher Wasserstände an der deutschen Nordseeküste

A. Vorbemerkungen

Die folgenden Betrachtungen gehen über den Bereich der Elbe hinaus und schließen Pegel im gesamten deutschen Nordseeküstengebiet von Emden bis List ein. Die Sturmflutwerte für den Pegel Emden wurden einer Arbeit von DIETZE (Wasser- und Schifffahrtsdirektion Aurich) entnommen.

Insgesamt wurde die Sturmfluthäufigkeit in der Zeit von 1901 bis 1973 für 10 Pegel im deutschen Küstengebiet der Nordsee bestimmt. Das gleichzeitige Auftreten von Sturmfluten an verschiedenen Pegeln wurde dabei nicht näher untersucht. Es ist bekannt, daß der Schwerpunkt einzelner Sturmfluten konzentriert in bestimmten Bereichen der Deutschen Bucht liegen kann (SCHULZ, 1962). Unter anderem läßt sich dies schon allein durch die unterschiedlichen Zugbahnen der Sturmtiefs und zum Teil stark voneinander abweichenden Windrichtungen und Geschwindigkeiten über der Nordsee erklären (LEPPIK, 1950). Zur allgemeinen Beurteilung veränderter Verhältnisse im deutschen Küsten- und Tidegebiet ist es nicht erforderlich, die unterschiedliche Höhe der Wasserstände einzelner Sturmfluten an den Tidepegeln zu untersuchen. Die Lage der im folgenden betrachteten Tidepegel ist aus Abbildung 1 ersichtlich.

Bei den zur Verfügung stehenden Sturmflutlisten sind für die einzelnen Pegel verschiedene Überschreitungswasserstände zugrunde gelegt worden. Bei den meisten Pegeln liegt der entsprechende Bezugswasserstand allerdings so hoch, daß wegen der geringen Anzahl von Ereignissen eine analoge Auswertung der mittleren Sturmflutwasserstände, wie für die Pegel Cuxhaven und Hamburg-St. Pauli, nicht durchgeführt wurde. Es können jedoch allein aus der Änderung der Sturmfluthäufigkeit und Überschreitungshäufigkeit bestimmter Wasserstände Rückschlüsse gezogen werden, wie sich die Situation im deutschen Küstengebiet entwickelt hat. Der Bezugswasserstand ist dabei von untergeordneter Bedeutung.

Lediglich für den Pegel Wilhelmshaven wurde eine Aufstellung vom Wasser- und Schifffahrtsamt Wilhelmshaven mit insgesamt 470 Sturmfluten wie für den Pegel Cuxhaven ausgewertet. Es wurden dabei alle Sturmtiden, die in Wilhelmshaven in der Zeit von 1901 bis 1973 einen Wasserstand von 777 cm NN – 5 m und mehr erreichten, be-

rücksichtigt. Im Abflußjahr 1973 lag das MThw in Wilhelmshaven auf $MThw_{Wilh. 1973} = 668 \text{ cm NN} - 5 \text{ m}$.

B. Sturmflutwasserstände in Wilhelmshaven und in Cuxhaven

Aus Abbildung 5 ist ersichtlich, daß nicht nur die vorstehend bereits erwähnten Ganglinien der mittleren Tidewasserstände der Pegel Wilhelmshaven und Cuxhaven in der Tendenz gut übereinstimmen. Auch die Ganglinien der mittleren Sturmfluthöhen und -häufigkeiten entsprechen einander. In den Jahren 1909, 1910 und 1937 traten an beiden Pegeln keine Sturmfluten auf, während im Jahre 1967 insgesamt die größte Anzahl – in Wilhelmshaven 19 und in Cuxhaven 17 – an Sturmtiden zu verzeichnen ist (Abb. 5). Im Jahre 1973 waren es in Wilhelmshaven ebenfalls 19 und in Cuxhaven 14 Sturmflut-

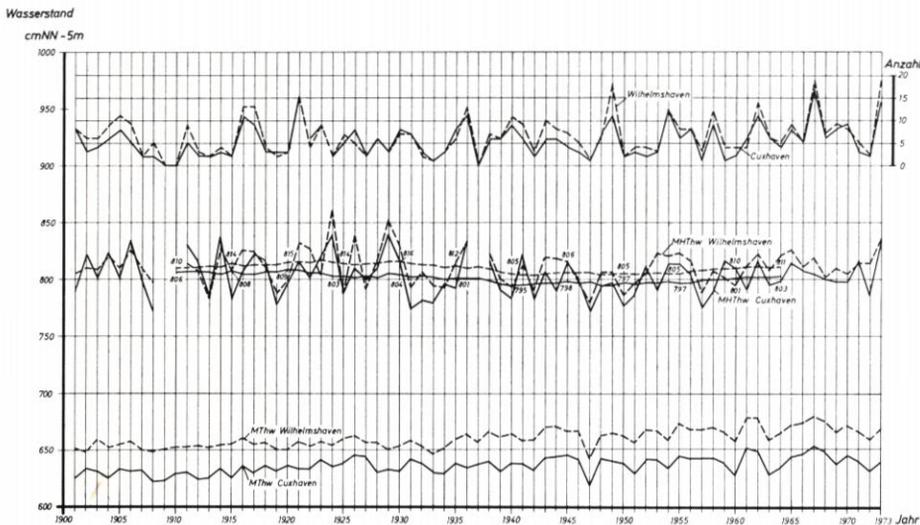


Abb. 5. MThw und MHThw an den Pegeln Cuxhaven und Wilhelmshaven und Anzahl der Sturmfluten von 1901 bis 1973

ereignisse. Die Höhe der Scheitelwasserstände stimmt ebenfalls an beiden Pegeln für die einzelnen Jahre gut überein. Die langjährigen Mittelwerte zeigen deutlich für die beiden Pegel, daß etwa in der Zeit von 1931/49 (1940) bis 1946/64 (1955) im Mittel niedrigere Sturmflutscheitelwasserstände zu verzeichnen waren, als zu Beginn und zum Ende des Beobachtungszeitraumes. Die Differenzen der MHThw zwischen den beiden Pegeln haben sich in diesem Jahrhundert nicht wesentlich verändert (Abb. 5, mittleres Diagramm). Die langfristigen Schwankungen können demnach nur auf veränderliche meteorologische Bedingungen zurückgeführt werden.

C. Vergleich verschiedener Tidepegel

1. Sturmfluten in den Jahren 1901 bis 1973

In Abbildung 6 sind für insgesamt 10 Pegel Scheitelwasserstände, die von 1901 bis 1973 einen bestimmten, in Abbildung 6 eingetragenen Wasserstand überschritten haben,

angegeben (im folgenden „Sturmfluten“ genannt). Zusätzlich sind (schraffiert) Sturmfluten eingetragen, die an den einzelnen Pegeln nur sehr selten eingetreten sind. Diese Sturmfluten werden im folgenden „extreme Sturmfluten“ genannt. Die Bezugswasserstände für die einzelnen Pegel sind ebenfalls in Abbildung 6 eingetragen.



Abb. 6. Sturmfluthäufigkeit im deutschen Küsten- und Tidegebiet von 1901 bis 1973

Für den Pegel Hörnum lagen erst seit 1928 ununterbrochen Beobachtungen vor, für Helgoland standen Zahlenwerte von 1911 bis 1917 und ab 1925 mit Unterbrechungen (1945 bis 1949) zur Verfügung.

Trotz der willkürlich festgelegten Überschreitungswasserstände lassen die Auftragungen in Abbildung 6 erkennen, daß an der gesamten deutschen Nordseeküste und selbst auf Helgoland besonders sturmflutreiche und besonders „ruhige“ Jahre zu verzeichnen sind. In den Jahren 1910, 1915, 1919, 1927, 1931 bis 1934, 1937, 1946 und 1947, 1950 und 1951, 1957 und 1959 ist z. B. an keinem der untersuchten Pegel eine Sturmflut im oben definierten Sinne aufgetreten.

Bei Berücksichtigung aller Pegel waren die Sturmfluten in den Jahren 1936, 1954 und 1973 besonders zahlreich. Für diese 3 Jahre ergeben sich folgende Häufigkeiten:

Jahr	Anzahl der „Sturmfluten“	Anzahl der „extremen Sturmfluten“
1936	48	20
1954	36	10
1973	53	44

Wie die Zusammenstellung zeigt, sind im Jahre 1973 nicht nur die meisten Sturmfluten in diesem Jahrhundert aufgetreten, sondern fast alle diese Sturmfluten sind auch „extrem hoch“ aufgelaufen. Die extremen Sturmfluten sind außerdem an allen 10 Pegeln bei den gleichen Tiden aufgetreten. Bis auf den Pegel List sind an allen übrigen Pegeln

noch nie so häufig extreme Sturmfluten in einem Jahr registriert worden, wie im Jahre 1973 (Abb. 6).

Die Ursachen für die Sturmflutserie des Jahres 1973 sind allein in den außergewöhnlichen sturmflutbegünstigenden meteorologischen Bedingungen zu suchen, die zu der entsprechenden Häufung schwerer Stürme geführt haben (RODEWALD, 1974).

2. Vergleich der Sturmfluthäufigkeiten mit langfristigen Mittelwerten

Im folgenden werden nur die Sturmfluten dieses Jahrhunderts betrachtet. Mit den Sturmfluten des vorigen Jahrhunderts in der Elbe haben sich verschiedene Autoren befaßt (HENSEN, 1955; LAUCHT, 1967; NEHLS, 1896; ROHDE, 1968; SIEFERT, 1969). Allgemein läßt sich feststellen, daß schon im letzten Jahrhundert die Sturmfluthäufigkeit in der Elbe

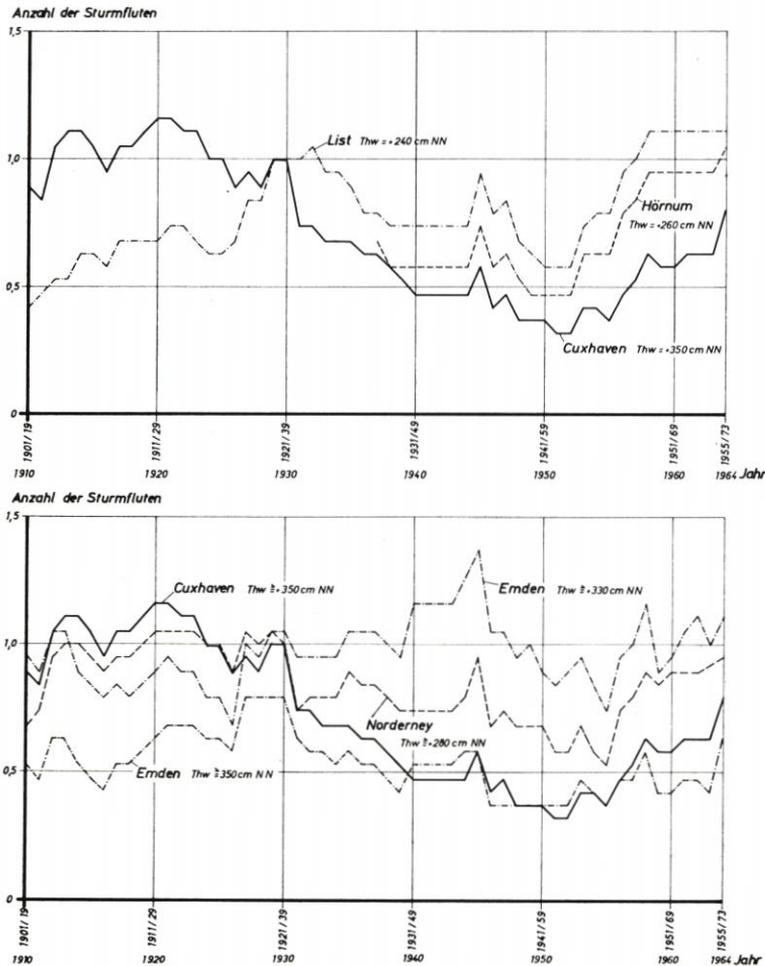


Abb. 7. Sturmfluten an einigen deutschen Tidepegeln; 19jährige übergreifende Mittelwerte

unregelmäßigen Schwankungen unterworfen war. Relativ stark betroffen war die Hansestadt Hamburg in den Jahren von 1845 bis 1855 mit insgesamt 7 Sturmfluten von mehr als 900 cm NN – 5 m (LAUCHT, 1967; NEHLS, 1896). Allein durch die Erhöhung des Ruhewasserspiegels der Weltmeere wären diese Fluten heute höher aufgelaufen als im vergangenen Jahrhundert (HENSEN, 1962; SIEFERT, 1969).

Es wurde eingangs bereits dargelegt, daß der Kern einer Sturmflut in ganz bestimmten Bereichen der Deutschen Bucht konzentriert ist. Ein gewisser Zusammenhang zwischen den Pegeln Husum, Büsum und Cuxhaven läßt sich jedoch nachweisen. In diesem Jahrhundert sind in Husum insgesamt 31 „extreme Sturmfluten“ mit Wasserständen von mindestens 900 cm NN – 5 m aufgetreten, in Cuxhaven waren es insgesamt 13. Davon sind in Cuxhaven 12 Sturmfluten bei den gleichen Tiden eingetreten, bei denen auch in Husum „extreme Sturmflutwasserstände“ von 900 cm NN – 5 m und mehr registriert wurden. Alle 17 „extremen Sturmfluten“ in Büsum von 1901 bis 1973 sind aufgetreten, wenn bei der gleichen Sturmtide in Husum mehr als 900 cm NN – 5 m erreicht wurde. Dieser Zusammenhang ist auch noch für Bremerhaven und Wilhelmshaven nachweisbar (er wird jedoch schwächer).

Um die Entwicklung der Sturmfluthäufigkeit in diesem Jahrhundert zu erfassen, wurden für alle Pegel langjährige Mittel gebildet und miteinander verglichen. Die Ergebnisse der Auswertungen sind in den Abbildungen 7 und 8 aufgetragen.

Aus den Erläuterungen zu Abbildung 6 läßt sich bereits erkennen, daß die Sturmfluthäufigkeit in der Deutschen Bucht nach 1959 zugenommen haben könnte, da seit dieser Zeit mindestens an einem der in Abbildung 6 ausgewerteten Pegel eine Sturmflut pro Jahr aufgetreten ist. Dies war vor 1959 in diesem Jahrhundert über einen so langen Zeitraum noch nicht der Fall.

Im oberen Teil der Abbildung 7 wurde die Anzahl der „Sturmfluten“ und „extremen Sturmfluten“ von 1901/19 bis 1955/73, die am Pegel Cuxhaven und an den nördlich davon gelegenen Pegeln Büsum und Husum sowie in Bremerhaven und Wilhelmshaven registriert wurden, graphisch aufgetragen.

Es zeigt sich eine Übereinstimmung bei den Pegeln Cuxhaven, Büsum und Husum bezüglich der Sturmfluthäufigkeit. Bis 1921/39 ändert sich die Anzahl der Sturmfluten an allen 5 Pegeln nur wenig, danach nimmt die Häufigkeit bis 1931/49 ab. Für Cuxhaven und die beiden Pegel an der Westküste Schleswig-Holsteins wird der kleinste Wert für die Jahresreihe 1943/61 erreicht. Allen 5 Pegeln gemeinsam ist der relativ starke Anstieg in den letzten 12 Jahren des Beobachtungszeitraumes.

Bei den „extremen Sturmfluten“ ($Thw = 900 \text{ cm NN} - 5 \text{ m}$ für alle 5 Pegel) zeigen die Linienzüge für die 5 Pegel noch eine einheitlichere Tendenz (Abb. 7, oberes Diagramm). Dies kann damit erklärt werden, daß sich die Wasserstände im deutschen Küstengebiet bei sehr schweren Sturmfluten großräumiger aneinander angleichen. Es findet eine Art „Auspiegelung“ der Wasserstände statt. Nachdem an allen Pegeln die Häufigkeit „extremer Sturmfluten“ von 1916/34 bis 1943/61 zunächst abgenommen hatte, ist für die Jahresreihe 1955/73 etwa wieder die Häufigkeit, die bereits in den Jahresreihen von 1912/30 bis 1916/34 beobachtet wurde, erreicht.

Selbst ein Vergleich der Sturmfluthäufigkeiten bei Cuxhaven und Helgoland für verschiedene Bezugswasserstände (Abb. 7, unteres Diagramm) zeigt die gleiche Tendenz. Hiermit ist nachgewiesen, daß der gewählte Bezugswasserstand von untergeordneter Bedeutung ist. Seit 1921/39 ist zunächst eine Abnahme der Sturmfluthäufigkeiten zu verzeichnen, während ab 1943/61 eine deutliche Zunahme registriert wurde. Auch das Auftreten extrem hoher Wasserstände hat seit dieser Zeit zugenommen (Abb. 7).

Der Vollständigkeit halber wurden in Abbildung 8 noch die Sturmfluthäufigkeiten in Cuxhaven mit denen in List und Hörnum (Abb. 8, oberes Diagramm) sowie mit denen in Norderney und Emden (Abb. 8, unteres Diagramm) verglichen. Wie die Auftragungen ergeben, zeigen auch die langjährigen, übergreifenden Mittelwerte für die Pegel der Insel

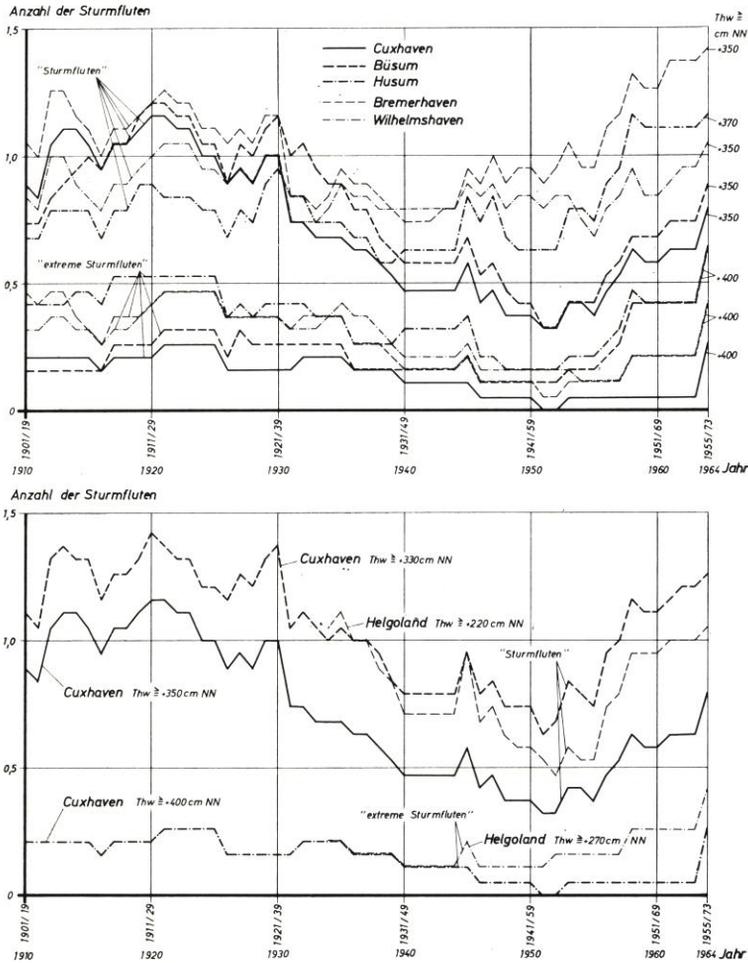


Abb. 8. Sturmfluten in Cuxhaven und an den Pegeln im Norden und Westen der Deutschen Bucht; 19jährige übergreifende Mittelwerte

Sylt (Hörnum und List) die gleiche Tendenz wie der Pegel Cuxhaven. Selbst für die entfernt liegenden Pegel Norderney und Emden ist die Änderung der Sturmfluthäufigkeit noch der für Cuxhaven ermittelten Tendenz ähnlich.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß im gesamten deutschen Küstengebiet die Sturmfluthäufigkeit und auch die Häufigkeit extrem hoher Wasserstände in den letzten Jahren zugenommen hat. Dies gilt uneingeschränkt auch für die Insel Helgoland, wobei in diesem Falle als extrem hohe Wasserstände Thw-Werte von 770 cm NN – 5 m und mehr festgelegt wurden, da sie dort entsprechend selten auftreten.

V. Schlußbemerkung

Nach den Sturmflutkatastrophen im Jahre 1953 in Holland und im Februar 1962 im norddeutschen Küstenbereich sind Hochwasserschutzmaßnahmen im gesamten deutschen Küstengebiet und an den deutschen Tideflüssen nach den neuesten Erkenntnissen und sorgfältigen Voruntersuchungen ausgeführt worden. Bei der außergewöhnlichen Serie hoher Sturmfluten im November und Dezember 1973 haben sich die inzwischen fertiggestellten Hochwasserschutzbauwerke und Deichlinien bewährt.

Allgemein kann festgestellt werden, daß die MThw-Werte in diesem Jahrhundert an den untersuchten 10 Küstenpegeln stetig zugenommen haben. Die durch aperiodische Einflüsse verursachten Sturmflutwasserstände und -häufigkeiten zeigen einen anderen Verlauf. Wie die Auswertungen ergeben haben, entspricht die Häufigkeit hoher Wasserstände im Mittel heute wieder den Verhältnissen zu Beginn dieses Jahrhunderts. In dem dazwischenliegenden Zeitraum hatten sich vorübergehend weniger Sturmfluten mit niedrigeren mittleren Scheitelwasserständen eingestellt.

Mit Sicherheit ist die Zunahme der Sturmfluthäufigkeit in den letzten Jahren und die Häufung schwerer Sturmfluten im Jahre 1973 nicht auf bauliche Maßnahmen im Küstenbereich (z. B. Ausbaumaßnahmen in der Elbe oder anderen Tideflüssen) zurückzuführen. Es ist vielmehr bekannt, daß seit längerer Zeit großräumige Änderungen der atmosphärischen Wetterlagen beobachtet und registriert wurden. In welchem Maße dadurch die Häufigkeit von sturmfluterzeugenden Starkwinden im Bereich der Nordsee zugenommen hat, müßte von zuständiger Seite noch eingehend wissenschaftlich untersucht werden.

VI. Schriftenverzeichnis

- DIETZE, W.: Über den Begriff „Sturmflut“. Zwischen Ems u. Jade, Mitt. WSD Aurich, Nr. 1, 1974.
- GISZAS, H.: „Wasserstandsaufzeichnungen von der Elbe aus den Jahren 1811 bis 1813“, Hamburger Küstenforschung, Heft 5, 1969.
- HENSEN, W.: „Stromregelungen, Hafengebäuden, Sturmfluten in der Elbe und ihr Einfluß auf den Tideablauf“. Hamburg – Großstadt und Welthafen, Festschrift zum XXX. Deutschen Geographentag, Kiel, 1955.
- HENSEN, W.: „Gutachtliche Äußerung über die Frage der technischen Mittel zur Vertiefung der Elbe auf 12 m unter SKN“, unveröffentlicht, 1959.
- HENSEN, W.: „Kurzbericht über den Ablauf der Sturmflut in der Elbe vom 16./17. Februar 1962. Bericht des vom Senat der Freien und Hansestadt Hamburg berufenen Sachverständigenausschusses zur Untersuchung des Ablaufs der Flutkatastrophe, 1962.
- LAUCHT, H.: „Zustand und Entwicklungsmöglichkeiten des Hamburger Stromspaltungsgebietes der Elbe“. Mitteilungen der Hannoverschen Versuchsanstalt für Grundbau und Wasserbau, Franzius-Institut der Technischen Hochschule Hannover, Heft 9, 1956.
- LAUCHT, H.: „Hochwasserschutz im Hafen Hamburg, Teil 1“. Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft, Bd. 29, 1966.
- LAUCHT, H.: „Über hohe Sturmfluten und ihre Häufigkeit in Hamburg“. Schriftenreihe der Behörde für Wirtschaft und Verkehr der Freien und Hansestadt Hamburg, Heft Nr. 4, 1967.
- LEPPIK, E.: „Die Sturmfluten in der Elbemündung in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts“. Besondere Mitteilungen zum deutschen gewässerkundlichen Jahrbuch, Nr. 1, Hamburg 1950.
- NEHLS, Ch.: „Die Sturmfluten in der Elbe“, Magdeburg 1896.
- RODEWALD, M.: „Die historische Nordsee-Sturmserie vom November/Dezember 1973“. Der Seewart. Nautische Zeitschrift für die deutsche Seeschifffahrt, Deutsches Hydrographisches Institut, Bd. 35, Heft 4, August 1974.

- ROHDE, H.: „Die Häufigkeit hoher Wasserstände an der Westküste von Schleswig-Holstein“. Die Küste, Jahrgang 12, 1964.
- ROHDE, H.: „Wasserstandsänderungen und Sturmfluthäufigkeit an der Elbemündung“. Die Küste, Heft 16, 1968.
- ROHDE, H.: „Eine Studie über die Entwicklung der Elbe als SchiffsstraÙe“. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der Technischen Universität Hannover, Heft 36, 1971.
- SCHULZ, H.: „Verlauf der Sturmfluten vom Februar 1962 im deutschen Küsten- und Tidegebiet der Nordsee“. Die Küste, Jahrgang 10, 1962, Heft 1.
- SIEFERT, W.: „Sturmflutvorhersage für den Tidebereich der Elbe aus dem Verlauf der Windstaukurve in Cuxhaven“. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der Technischen Universität Hannover, Heft 30, 1968.
- SIEFERT, W.: „Die Sturmflut von 1825 in der Elbe“. Hamburger Küstenforschung, Heft 5, 1969.
- SIEFERT, W.: „Die Tideverhältnisse der Elbe seit 1786“. Deutsche gewässerkundliche Mitteilungen, Jahrgang 14, Heft 5, 1970.
- SIEFERT, W.: „Erste Erfahrungen mit einem neuen Sturmflut-Vorhersageverfahren“. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Technischen Universität Hannover, Heft 40, 1974.