

# Wasserstandsänderung und Sturmfluthäufigkeit an der Elbemündung

Von Hans Rohde

## Abstract

The change of the middle highwater according to the water-gauge at Cuxhaven, the oldest water-mark along the German coast-line, is represented graphically. Related to the trendline of the overlapping 19 years' middle highwater the frequency of water-levels higher than middle highwater plus 1.5 m is investigated. The distribution of the frequencies of the high-water-levels for the months of the year is communicated.

## Inhalt

1. Vorbemerkungen	33
2. Änderung der mittleren Wasserstände	34
3. Häufigkeit der Tidehochwasserstände von 1,50 m und mehr über MThw	36
4. Häufigkeitsverteilung hoher Wasserstände über die einzelnen Monate des Jahres	38
5. Häufigkeit hoher Wasserstände in früheren Jahrhunderten	40
6. Zusammenfassung	41
7. Schriftenverzeichnis	42

## 1. Vorbemerkungen

In der Arbeit „Die Häufigkeit hoher Wasserstände an der Westküste von Schleswig-Holstein“ (ROHDE 1964) wurden statistische Auswertungen der höchsten Tidehochwasserstände der drei Westküstenpegel Tönning, Husum und Büsum miteinander verglichen. Die Art der Auswertung entsprach dabei der Arbeit von HENSEN (1938), die Untersuchungen wurden aber auf Wasserstände von 1,50 m und mehr über MThw beschränkt. Die vorliegende Arbeit soll die statistische Auswertung der Tidehochwasserstände am Pegel Cuxhaven bringen. Wie bei der Arbeit über die Sturmfluthäufigkeit an der Westküste sind die Untersuchungen auf die Überschreitung des MThw um 1,50 m abgestellt. Dadurch sind Vergleiche mit den Häufigkeitswerten der Westküste möglich. Der Pegel Cuxhaven ist der älteste Pegel an der deutschen Nordseeküste, die Aufzeichnungen liegen von 1843 an lückenlos vor. Von den deutschen Küstenpegeln sind nur die Ostseepiegel Swinemünde und Kolberg älter (GAYE 1951).

Als ältester Pegel an der deutschen Nordseeküste ist der Pegel Cuxhaven für statistische Untersuchungen besonders geeignet. Schon HENSEN (1938) betrachtet den Anstieg des MThw am Pegel Cuxhaven an Hand der 19jährigen übergreifenden Mittel. Er erfaßt dabei aber nur den Zeitraum von 1875 bis 1936. Für diesen Zeitraum gibt er auch Sturmfluthäufigkeiten an, und zwar sowohl für eine Überschreitung des 19jährigen Mittels um mehr als 1,20 m als auch für eine Überschreitung des Wasserstandes von PN + 730 cm. In einer späteren Arbeit bringt HENSEN (1955) eine sehr ausführliche Sturmflutstatistik für Cuxhaven für den Zeitraum 1841 bis 1940. Untersucht werden dabei die Verteilung der Sturmfluten über die Jahre, die Jahreszeiten, die Monate, die Tage des Jahres und die Tagesstunden. Als Sturmflut wird ein Thw von PN + 735 cm und mehr am Pegel Cuxhaven bezeichnet. Nach HENSEN hat sich gezeigt, daß durch die Annahme eines anderen „Sturmfluthorizontes“ die grundsätzlichen Ergebnisse nicht beeinflußt werden. Hinsichtlich der Sturmflutverteilung über bestimmte Zeitabschnitte ist diese Ansicht richtig, wie auch ein Vergleich der Häufigkeitsverteilung der Sturmfluten am Pegel Tönning über die Monate des Jahres zeigt (ROHDE 1964a und b). Bei Annahme eines festen „Sturmfluthorizontes“ ergibt sich aber wegen des säkularen Anstiegs des MThw immer eine Zunahme der Sturmfluthäufigkeit mit der Zeit. Da die Sturmfluten in der

Nordsee meteorologisch bedingt sind, kann sich aus der allgemeinen Angabe, daß die Sturmfluthäufigkeit zunimmt, der Fehlschluß ergeben, daß diese Zunahme meteorologisch bedingt sei. Es ist daher richtiger, die Sturmflutuntersuchungen nicht auf einen festen Horizont zu beziehen, sondern auf mittlere Jahreswasserstände. Die Häufigkeit von Sturmfluten an der Elbemündung behandelt auch LUCHT (1964). Er erfaßt mit seinen Untersuchungen alle Thw, die am Pegel Cuxhaven 101 cm und mehr über dem jeweiligen MThw gelegen haben. Dabei wird der Zeitraum von 1842 bis 1958 bzw. 1960 behandelt.

Da alle genannten Untersuchungen mit den in der Arbeit über die Häufigkeit hoher Wasserstände an der Westküste von Schleswig-Holstein (ROHDE 1964) nicht ohne weiteres verglichen werden können, hat sich der Verfasser entschlossen, das für Cuxhaven vorliegende Material in derselben Weise auszuwerten wie in der Arbeit über die Westküste. Für die Untersuchung der Sturmfluthäufigkeit werden nur die Aufzeichnungen des Pegels Cuxhaven seit dem 1. November 1863 herangezogen. 1863 wurde der schon seit 1841 als Lattenpegel bestehende Pegel zu einem „Stellpegel“ umgebaut. Der sich in einem Schacht bewegende Schwimmer wurde jeweils bei Tnw und Thw durch Sperrhaken festgehalten (HENSEN 1938). Erst 1899 wurde der Pegel Cuxhaven Schreibpegel. Da die Dämpfung in dem Schacht des Stellpegels etwa die gleiche gewesen sein dürfte wie bei dem späteren Schreibpegel, sind die Aufzeichnungen miteinander vergleichbar. Die Ablesegenauigkeit eines Lattenpegels ist bei Sturmfluten gering. Außerdem ist es fraglich, ob auch alle Nachthochwasser, besonders die bei geringer Sturmfluthöhe, durch Lattenpegelablesungen erfaßt worden sind. Aus diesen Gründen sind die Aufzeichnungen des Pegels Cuxhaven vor 1864 in der vorliegenden Arbeit für die Sturmflutuntersuchungen nicht verwendet worden. Alle Angaben in der vorliegenden Arbeit beziehen sich auf Abflußjahre (November — Oktober).

## 2. Änderung der mittleren Wasserstände

Wie in der Arbeit über die Sturmfluthäufigkeit an der Westküste (ROHDE 1964), sollen die Sturmfluthäufigkeiten an der Elbemündung auf die Überschreitung der ausgeglichenen übergreifenden 19jährigen Mittel des MThw bezogen werden. Abbildung 1 zeigt die Ganglinie der 19jährigen übergreifenden Mittel des MThw von Cuxhaven von 1843 bis 1965. Die Verwendung der Werte der Lattenpegelablesungen von 1843 bis 1863 für diese Untersuchungen ist zulässig, weil die meisten der Ablesungen unter normalen Verhältnissen vorgenommen wurden und Fehlablesungen infolge stark bewegten Wassers sich auf die Mittelbildung nur ganz gering auswirken. Von 1843/61 bis 1914/32 zeigt die Ganglinie — von einigen kurzzeitigen Schwankungen abgesehen — eine verhältnismäßig gleichmäßige Steigung. Anschließend knickt sie in einen bedeutend flacheren Verlauf um, den sie bis heute beibehalten hat. Nach der Methode der kleinsten Quadrate sind für die beiden Abschnitte mit deutlich unterschiedlicher Steigung die Ausgleichsgeraden berechnet. Die Berechnung der einen Ausgleichsgeraden erstreckt sich auf den Zeitraum 1843/61 bis 1919/37, die der anderen auf den Zeitraum 1913/31 bis 1947/65. Die Ausgleichslinien schneiden sich bei dem Abszissenwert 1919/37. Die erste Ausgleichslinie hat eine Steigung von 0,289 cm/Jahr, die zweite eine von 0,0853 cm/Jahr. Insgesamt zeigt die Ganglinie der 19jährigen übergreifenden Mittel des MThw von Cuxhaven bis zum Abszissenwert 1917/35 einen sehr ähnlichen Verlauf wie die Ganglinien der Westküstenpegel Büsum, Tönning und Husum. (Vergleiche Abb. 1 der Arbeit ROHDE 1964a.) Auf Abbildung 1 sind außer der Ganglinie des MThw und der Ausgleichslinie von Cuxhaven auch die Ausgleichslinien der genannten drei Westküstenpegel dargestellt. Allen vier Nordseepegeln ist der Anstieg des MThw um rund 0,3 cm im Jahr bis etwa zur Jahresreihe 1914/32 gemeinsam. Die Steigung der Ausgleichslinie

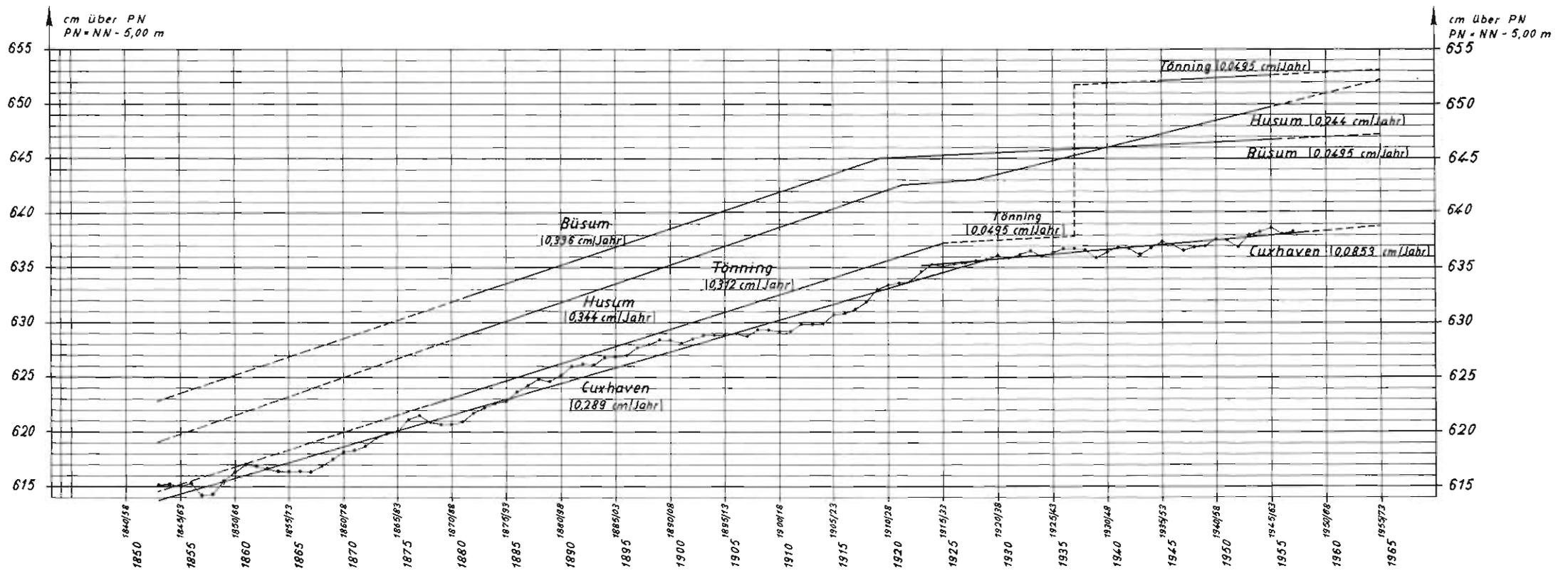


Abb. 1. 19jährige übergreifende Mittel des MThw für den Pegel Cuxhaven. Zum Vergleich die entsprechenden Ausgleichslinien für die Pegel Husum, Tönning und Büsum

für Cuxhaven ist mit 0,289 cm/Jahr am kleinsten, für Husum mit 0,344 cm/Jahr am größten. Der sehr ähnliche Verlauf der Ganglinien bei den 4 Pegeln läßt für Büsum, Tönning und Husum eine rückwertige geradlinige Extrapolation bis zu dem für 1852 gültigen Mittelwert von 1843/61, dem Anfangswert der Ermittlungen für Cuxhaven, zu (vgl. Abb. 1). Eine noch weitere Extrapolation ist dagegen nicht zulässig.

Den vier in der Deutschen Bucht untersuchten Pegeln ist der geringe Anstieg des MThw seit etwa 1920 gemeinsam. Für Büsum und Cuxhaven wird der geringe Anstieg von 1914/32 (1923) an, für Tönning und Husum von 1910/28 (1919) an spürbar. Die Ausgleichslinie verläuft für Büsum mit einer Steigung von 0,0495 cm/Jahr, die Steigung der Cuxhavener Ausgleichslinie ist mit 0,0853 cm/Jahr fast doppelt so groß. Der Anstieg des MThw von Tönning ist durch die Auswirkung der Eiderabdämmung verfälscht. Sieht man von der Auswirkung der Eiderabdämmung ab, die durch einen Sprung in der Ausgleichslinie der 19jährigen übergreifenden Mittel darzustellen ist, so hat die Ausgleichslinie für Tönning die gleiche Steigung wie die Linie für den Pegel Büsum. Ein etwas anderes Verhalten zeigt noch der Anstieg des MThw am Pegel Husum. Wie bei den anderen Westküstenpegeln verläuft die Ausgleichslinie zunächst sehr flach. Von 1918/36 an verläuft sie bis heute aber steiler. Die Steigung von 0,244 cm/Jahr ist fast fünfmal größer als für Büsum und Tönning und fast dreimal größer als für Cuxhaven. Dieses unterschiedliche Verhalten ist nicht vollständig zu erklären. Gewisse Unterschiede zwischen den einzelnen Pegeln ergeben sich schon aus den anderen örtlichen Verhältnissen. Auffallend ist dagegen für Husum, daß die Wasserstandshebung zunächst ähnlich erfolgt wie in Büsum, dann aber seit 1918/36 wieder sehr viel steiler. Der Beginn dieses Anstiegs fällt mit der Eindeichung des Finkhauskooges südlich der Mündung der Husumer Aue im Jahre 1935 und dem Ausbau des Dammes vom Festland nach Nordstrand auf sturmflutfreie Höhe (1933 bis 1935) zusammen. Der erste Nordstrander Damm war 1906 bis 1907 mit einer Kronenhöhe von 0,5 m über MThw gebaut worden, je nach Windrichtung konnte über ihn bei höheren Fluten ein Wasserstandsausgleich stattfinden. Außerdem unterlag dieser erste Damm „im Laufe der Jahre Sackungen und Beschädigungen, die teilweise das Ausmaß völliger Zerstörung annahmen“ (KNOP 1961). Er dürfte sich daher kaum auf das MThw des Pegels Husum ausgewirkt haben. Erst der sturmflutfreie Nordstrander Damm (1935) verhinderte einen Wasserstandsausgleich zwischen dem Heverstrom und der Holmer Fähre (nördlich von Nordstrand) und konnte zusammen mit der Eindeichung des Finkhauskooges einen verstärkten Anstieg des MThw am Pegel Husum bewirken. Wenn die genannten Baumaßnahmen die einzige Ursache wären, so müßte der steilere Anstieg der Ganglinie des 19jährigen MThw von Husum — ähnlich wie die Wirkung der Eiderabdämmung auf die entsprechende Ganglinie von Tönning (ROHDE 1964a) — seit 1936/54 abgeklungen sein. Die Wirkung der genannten Baumaßnahmen würde dann besser durch einen Sprung in der Ganglinie des 19jährigen MThw zum Ausdruck gebracht werden. Ein Abklingen des stärkeren Anstiegs des MThw am Pegel Husum ist bisher aber noch nicht eindeutig zu erkennen. Es müssen daher Ursachen vorliegen, deren Einfluß auf die Wasserstandshebung zur Zeit noch wirksam ist. Als solche Ursache kann die Verlandung der Nordstrander Bucht angesehen werden. Das Gebiet beiderseits des Nordstrander Dammes gehört seit Ausbau des Dammes auf sturmflutfreie Höhe zu einem der Hauptanwachsgebiete der nordfriesischen Küste. Besonders nach dem Kriege ist hier der Anwachs durch intensive Landgewinnungsarbeiten nachhaltig gefördert worden, so daß in absehbarer Zeit nördlich und südlich des Dammes Köge von je 500 ha eingedeicht werden können (WOHLENBERG und SNUIS 1955). Die fortschreitende starke Verlandung der Bucht bedingt eine Einschränkung des Flutraumes und könnte so zu einer im Vergleich zu den anderen genannten Westküstenpegeln stärkeren Hebung des MThw in Husum beitragen.

Auch an der Wasserstandsganglinie von Esbjerg ist von 1910/28 an nur noch ein geringer

Anstieg festzustellen (DIETRICH 1954). Ebenso steigt seit 1910/28 an einigen Ostseepegeln das Jahres-Mittelwasser geringer als vorher (GAYE 1951).

Als Ursache der Änderung der Wasserstände in der Nordsee wird heute nicht mehr eine Küstensenkung, sondern eine echte Wasserstandshebung angenommen. Welche Einflüsse im einzelnen für Wasserstandsänderungen maßgebend sein können, ist von DIETRICH (1954) zusammenfassend dargestellt worden. Der geringe Anstieg des Wasserstandes in Esbjerg seit 1910/28 ist nach DIETRICH auf eine gleichzeitige Abnahme des Staueffekts des Windes zurückzuführen, während der geologisch-eustatische Effekt stetig ansteigt. Als eine mögliche Ursache des Anstiegs des geologisch-eustatischen Effekts ist nach DIETRICH (1954) das Abschmelzen der Gletscher und des Inlandeises von Grönland und der Antarktis anzusehen. Interessant sind in diesem Zusammenhang auch die Angaben von RODEWALD (1965) über die Erwärmung des arktischen Beckens. Danach ist die Wassertemperatur im Nordpolgebiet seit den ersten Messungen, die NANSEN 1894/95 bei der „Fram“-Drift vorgenommen hat, ständig angestiegen, die Eisstärke hat abgenommen. Die seit den dreißiger Jahren häufiger durchgeführten Temperaturmessungen lassen einen geringeren Anstieg erkennen als vorher. Dieser Erscheinung entspricht der geringere gleichzeitige Wasserstandanstieg an den genannten Pegeln der Nord- und Ostsee, ihr widerspricht allerdings der stetige Anstieg von 1890 bis 1950 des geologisch-eustatischen Effekts für Esbjerg. Es ist nicht das Ziel der vorliegenden Arbeit, die Ursachen der Wasserstandsänderungen zu ergründen. Es sollte vielmehr gezeigt werden, daß die Wasserstandsänderung bei den genannten Nordseepegeln gleichsinnig verläuft und daß für die Änderungstendenzen mehrere Ursachen in Frage kommen können.

### 3. Häufigkeit der Tidehochwasserstände von 1,50 m und mehr über MThw

Einzelne besonders hohe Sturmfluten an der Elbemündung in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts werden von LEPPIK (1950) untersucht. Es sind fast ausnahmslos Sturmfluten, deren Scheitelhöhen in Cuxhaven über  $PN + 850$  cm lagen. Die von SCHELLING (1952) für die Westküste betrachteten Sturmfluten nach 1900 sind, mit Ausnahme der Sturmflut vom November 1911, auch in der Arbeit von LEPPIK behandelt. An der Westküste als besonders schwer registrierte Sturmfluten sind im allgemeinen auch für die Elbemündung besonders schwere. Infolge der unterschiedlichen örtlichen Lage der Westküstenpegel und des Pegels Cuxhaven zu den Windrichtungen bei Sturmfluten ist die Relation der Scheitelhöhen zueinander unterschiedlich. Die Sturmflut vom März 1906 ist z. B. an der Elbemündung nach den Sturmfluten von 1962 und 1825 die höchste, an den Pegeln Tönning und Husum wird sie von zahlreichen anderen übertroffen. Bei einem Vergleich der Ganglinie des HThw von Cuxhaven (Abb. 2) mit den entsprechenden Darstellungen für Tönning, Husum und Büsum (ROHDE 1964a, Abb. 2, 3 und 4) lassen sich zahlreiche Abweichungen in den Relationen der Scheitelhöhen untereinander feststellen. In der oberen Darstellung der Abbildung 2 ist auch die Ganglinie der 19jährigen Mittel des HThw eingetragen. Bis zum Mittelwert 1914/32 (1923) steigt die Ganglinie um etwa 50 cm an, während nach Abbildung 1 der Anstieg des MThw im gleichen Zeitraum nur 15 cm beträgt. Anschließend bleibt das MHThw etwa konstant, um von 1930/48 an etwas abzufallen. Das MHThw des gesamten Zeitraumes von 1864 bis 1966 liegt auf  $PN + 832$  cm. Vergleichbar mit den drei Westküstenpegeln Husum, Tönning und Büsum ist das MHThw der Jahresreihe 1916/63. Es ist bezogen auf  $PN = NN - 500$  cm für Husum 874 cm, Tönning 870 cm, Büsum 850 cm (ROHDE 1964) und Cuxhaven 846 cm. Der Wasserstand von MThw 1,50 m wird in Cuxhaven im Zeitraum 1916 bis 1963 insgesamt 157mal erreicht oder überschritten, also etwas häufiger als in Büsum (145mal) und erheblich seltener als in Husum (222mal)

### HThw am Pegel Cuxhaven

• = 19 jährige übergreifende Mittel

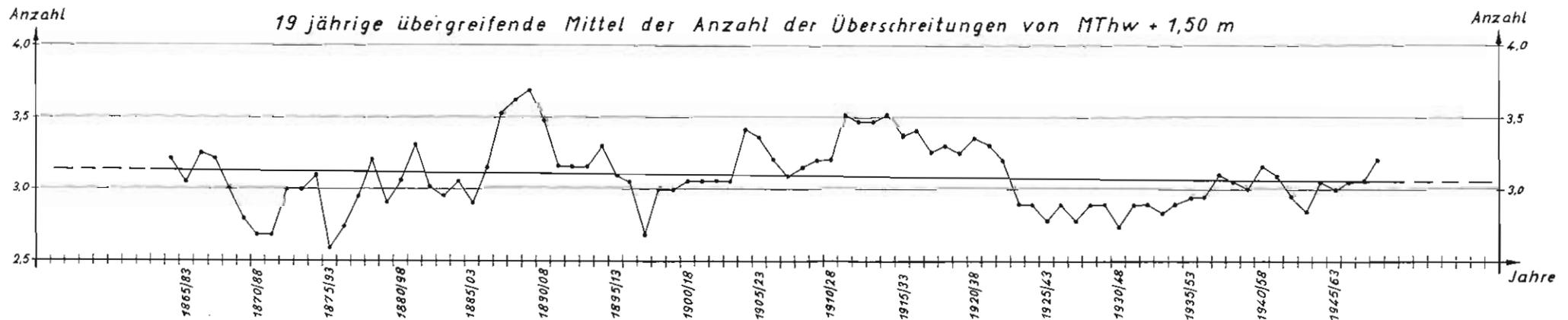
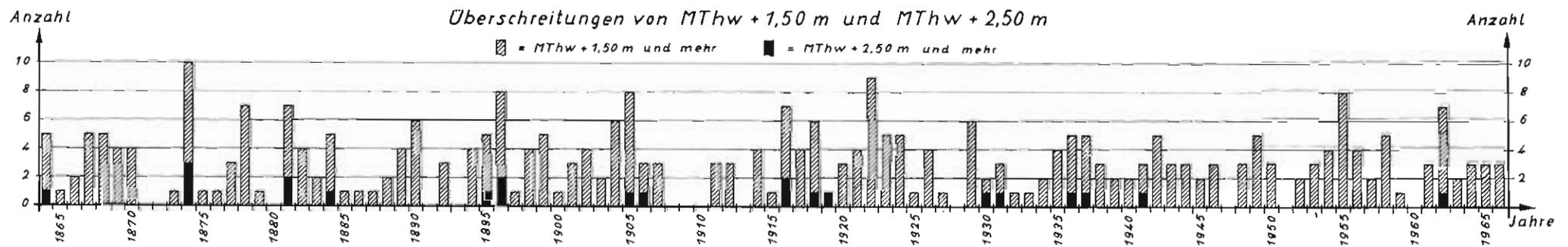
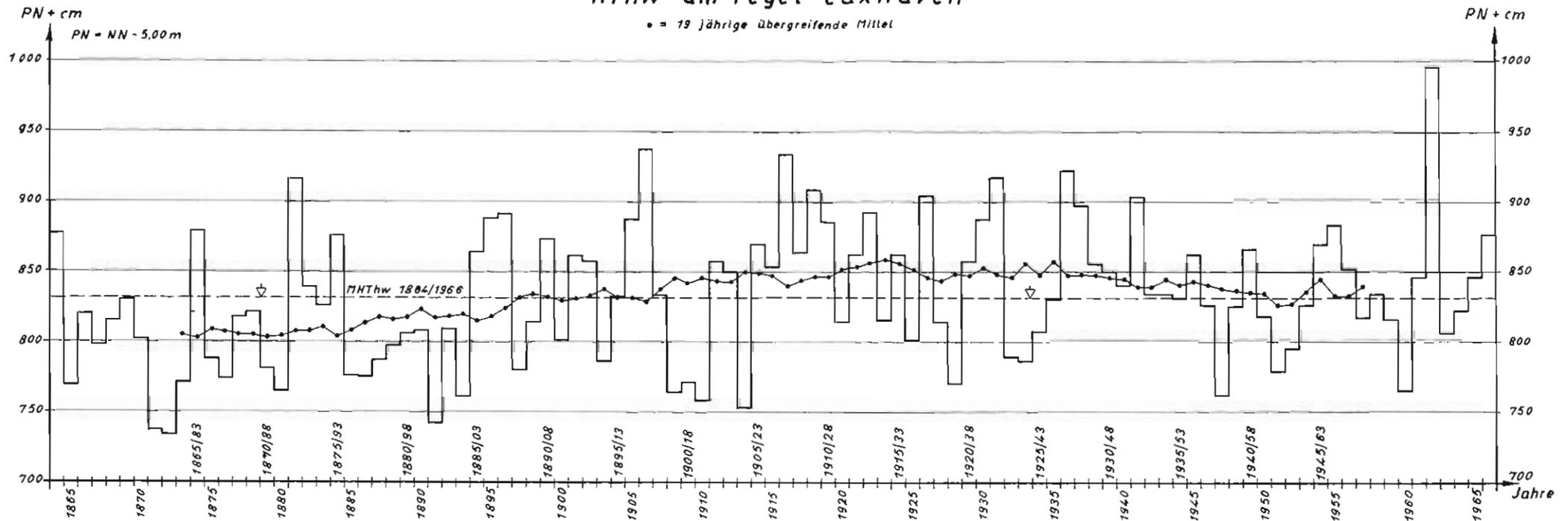


Abb. 2. Ganglinie des HThw Pegel Cuxhaven, Häufigkeit der Überschreitung von MThw + 1,50 m und MThw + 2,50 m, 19jährige übergreifende Mittel der Anzahl der Überschreitungen von MThw + 1,50 m im Jahr

und Tönning (200mal). Diese Unterschiede sind durch die unterschiedliche örtliche Lage der Pegel bedingt. Wie Büsum am Eingang der weiten Meldorfer Bucht, liegt Cuxhaven am Beginn des weiten Mündungstrichters der Elbe. Hier sind die Reflexionserscheinungen geringer als in Husum, Tönning oder an den oberhalb von Cuxhaven gelegenen Elbepegeln.

Die Häufigkeit der Überschreitung der Wasserstände von 1,50 m und 2,50 m über MThw in jedem Jahr ist auf der mittleren Darstellung der Abbildung 2 angegeben. Als MThw ist für jedes Jahr nach Abbildung 1 das MThw gewählt, das sich aus der Ausgleichsline der Ganglinie der übergreifenden 19jährigen MThw ergibt. Jedem Jahr ist dabei das 19jährige Mittel aus den jeweils vorhergegangenen und den nachfolgenden 9 Jahren zugeordnet. Über das Jahr

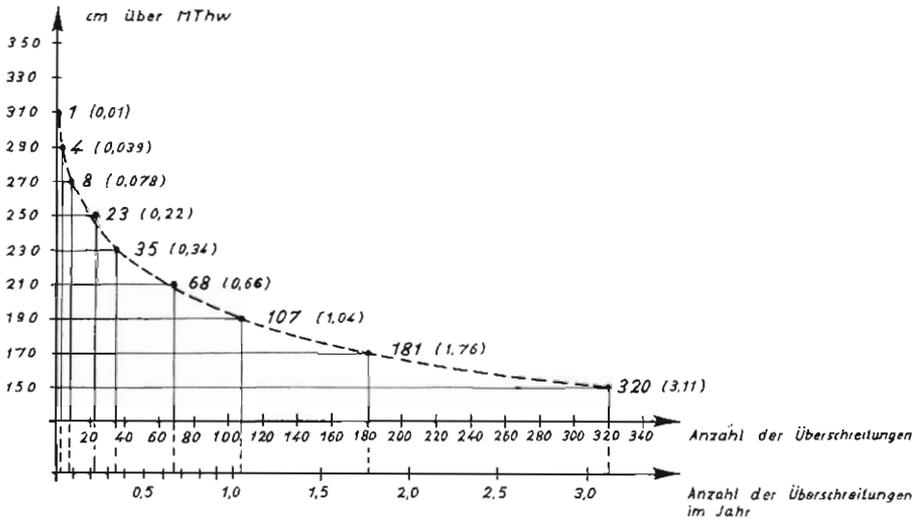


Abb. 3. Häufigkeit der Wasserstände von MThw + 1,50 m und mehr am Pegel Cuxhaven von 1864 bis 1966

1956 (Mittel 1947/65) hinaus wurde die Ausgleichsline geradlinig extrapoliert. Eine entsprechende Untersuchung hat HENSEN (1938) für den Zeitraum 1875/93 (1884) bis 1918/36 (1927) und die Überschreitung von MThw + 1,20 m durchgeführt. Die untere Darstellung auf Abbildung 2 zeigt die Ganglinie der übergreifenden 19jährigen Mittel der Häufigkeiten der Überschreitung von MThw + 1,50 m. Diese Darstellung entspricht den Ganglinien b, c und d der Abbildung 5 der Arbeit über die Sturmfluthäufigkeit an der Westküste (ROHDE 1964) und der unteren Darstellung der Abbildung 2 der Arbeit von HENSEN (1938). Die in Abbildung 2 der vorliegenden Arbeit eingetragene, nach der Methode der kleinsten Quadrate berechnete Ausgleichsline hat in dem Zeitraum von 1864/82 bis 1947/65 eine leicht fallende Tendenz von  $n = 3,13$  im Jahr auf  $n = 3,06$  im Jahr. Die Sturmfluthäufigkeit ist also erheblich geringer als bei den Westküstenpegeln Husum und Tönning und etwas größer als beim Pegel Büsum. Bemerkenswert ist, daß bei allen Pegeln die Überschreitungshäufigkeit des Wasserstandes von MThw + 1,50 m im Mittel geringer geworden ist. Diese Abnahme der Häufigkeiten ist in den langen Beobachtungszeiträumen der Pegel Tönning und Cuxhaven, besonders bei Cuxhaven, allerdings nur gering. Der Anstieg der Ausgleichsline der Überschreitungshäufigkeit von MThw + 1,20 m nach HENSEN (1938) ist auf den anders gelagerten Beobachtungszeitraum zurückzuführen, der die Zeiten relativ geringer Häufigkeiten vor 1875/93 und nach 1918/36 nicht erfaßt. Nach Abbildung 2 sind zwei Zeitabschnitte mit einer relativ großen Häufigkeit der

Überschreitung von MThw + 1,50 m zu erkennen: von 1886/1904 bis 1895/1913 und von 1910/1928 bis 1922/1940. Diese Zeitabschnitte sind auch in der Untersuchung von HENSEN erkennbar. An der Westküste von Schleswig-Holstein hat sich eine relativ große Sturmfluthäufigkeit in dem erstgenannten Zeitabschnitt nicht bemerkbar gemacht, Beobachtungen stehen allerdings nur für den Pegel Tönning zur Verfügung. Die relativ große Sturmfluthäufigkeit in dem 2. Zeitabschnitt ist dagegen an allen drei Westküstenpegeln ausgeprägt (ROHDE 1964a).

In der Zeit vom 1. November 1863 bis 31. Oktober 1966 (103 Jahre) wurde das nach Abschnitt 2 ermittelte MThw am Pegel Cuxhaven insgesamt 320mal um 1,50 m und mehr überschritten. Diese 320 Wasserstände wurden nach Stufen von jeweils 20 cm ausgezählt und die Häufigkeitskurve in Abbildung 3 dargestellt. Die Abszissenachse zeigt sowohl die absolute Anzahl der Überschreitungen als auch die auf ein Jahr bezogene Überschreitungshäufigkeit. An den Kurvenverlauf sind die absoluten Überschreitungszahlen und in Klammern die relativen angeschrieben. Bis zur Überschreitungshöhe von MThw + 2,50 m sind die auf das Jahr bezogenen Überschreitungshäufigkeiten von Cuxhaven denen von Büsum fast gleich. Die Überschreitungshäufigkeiten von MThw + 2,70 m, 2,90 m und 3,10 m liegen unter der in einer halblogarithmischen Darstellung eingetragenen Ausgleichsgeraden der relativen Überschreitungshäufigkeiten von Büsum (vgl. dazu Abb. 7 des Aufsatzes ROHDE 1964a). Die in halb-logarithmischer Darstellung für die relative Häufigkeit der Überschreitung der Wasserstände von MThw + 1,50 m und mehr am Pegel Cuxhaven gezeichnete Ausgleichsgerade würde im oberen Bereich parallel zu der entsprechenden von Tönning verlaufen. Nur der Scheitelwasserstand der Sturmflut vom 16. Februar 1962 lag in Cuxhaven mehr als 3,10 m über MThw (HHThw = MThw 1953/71 + 3,57 m). Nach anderen Gesichtspunkten gibt LUCHT (1964) Sturmfluthäufigkeiten für Cuxhaven an. Als Bezugshorizont wählt er das jeweilige Jahres-MThw und als Sturmfluten bezeichnet er alle Thw, die das MThw des betreffenden Jahres um mehr als 101 cm überschreiten. Seine Untersuchungen umfassen insgesamt 1332 derartige Sturmfluten, deren Häufigkeitsverteilung auf die Höhen über PN + 710 cm angegeben wird.

Im Gegensatz zu den Westküstenpegeln liegt der Pegel Cuxhaven an der Mündung eines Flusses mit einem sehr großen Niederschlagsgebiet ( $F_N = 146\,540 \text{ km}^2$ ) und entsprechend großem Oberwasserabfluß. Es muß daher die Frage gestellt werden, ob ein Zusammenhang zwischen dem Oberwasserabfluß — gemessen am Pegel Darchau — und der Sturmfluthöhe in Cuxhaven besteht. Ein solcher Zusammenhang konnte jedoch nicht festgestellt werden. Auch Untersuchungen von WALDEN (1966) kommen zu dem Ergebnis, daß Sturmfluten nicht bevorzugt mit hohem Oberwasser der Elbe zusammenfallen.

#### 4. Häufigkeitsverteilung hoher Wasserstände über die einzelnen Monate des Jahres

Die im Abschnitt 3 ermittelten 320 Sturmfluten, deren Scheitel die Höhe von MThw + 1,50 m erreichten oder überschritten, wurden nach den Monaten ihres Eintretens ausgezählt. Das Ergebnis ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Ordinaten geben sowohl die absoluten als auch die relativen Häufigkeiten an. Der Wasserstand von MThw + 1,50 m wird im Dezember weitaus am häufigsten erreicht oder überschritten. Dann folgen November und Januar, danach Februar und Oktober. In den Monaten Mai, Juni und Juli wurde der Wasserstand von 1,50 m nicht erreicht. Die Häufigkeitsverteilung des Wasserstandes  $\geq$  MThw + 1,50 m über die Monate ist fast symmetrisch. An den Westküstenpegeln besteht dagegen keine so weitgehende Symmetrie (ROHDE 1964). Dieses unterschiedliche Verhalten ist auf die unterschiedliche örtliche

Lage der einzelnen Pegel zu den die Sturmfluten erzeugenden Winden zurückzuführen. In Tönning und Büsum erzeugt z. B. Südwest-Sturm einen höheren Stau als in Cuxhaven und Husum. Gerade in den Herbstmonaten sind aber die Südwest-Windlagen besonders häufig (DIETRICH 1954). Trotz der unterschiedlichen örtlichen Lage der Pegel ist den Westküstenpegeln wie auch den Pegeln Cuxhaven und Wilhelmshaven (LÜDERS 1936) die größte Sturmfluthäufigkeit im Dezember gemeinsam, die Spitze ist für Cuxhaven allerdings am stärksten ausgeprägt. Der Dezember bleibt auch der Monat mit der größten Sturmfluthäufigkeit, wenn man die Auswertung nach anderen Gesichtspunkten durchführt, wie es in den Arbeiten von HENSEN (1955) und LUCHT (1964) geschehen ist. Die folgende Tabelle vergleicht die relative Häufigkeitsverteilung der Sturmfluten über die Monate des Jahres nach Abbildung 4 dieser Arbeit mit der von HENSEN und LUCHT angegebenen. Die Unterschiede zwischen den Angaben dieser Verfasser sind nur gering, da die Bezugshorizonte sehr ähnlich sind — PN + 735 cm entspricht MThw (1931/35) + 100 cm — und bei der großen Zahl der Sturmfluten die geringfügigen Unterschiede in den Bezugshorizonten keine Rolle mehr spielen. Größere Unterschiede in der Häufigkeitsverteilung bestehen dagegen, wie die Tabelle zeigt, wenn man die Verteilung der Häufigkeit der Sturmfluten von  $\geq$  MThw + 1,01 m (LUCHT) mit der von  $\geq$  MThw + 1,50 m vergleicht. Eine ganz andere Häufigkeitsverteilung über die Monate tritt auch ein, wenn man die Sturmfluten von  $\geq$  MThw + 1,90 m, + 2,30 m oder + 2,70 m betrachtet. Diese Häufigkeitsverteilung ist auch in Abbildung 4 dargestellt. Auffallend ist, daß die höheren Sturmfluten im November seltener sind als im Dezember und Oktober, die Verteilungskurve weist zwei Maxima auf. Das gleiche Verhalten zeigt auch die Häufigkeitsverteilung an der Westküste (ROHDE 1964). Auch die von HENSEN (1955) angegebenen 5tägigen Summen der Stauhöhen der Sturmflut-Thw über PN + 735 cm zeigen im November ein sehr deutliches Minimum, dem ein Minimum des Luftdruckgradienten im Nordatlantik etwa entspricht. Das

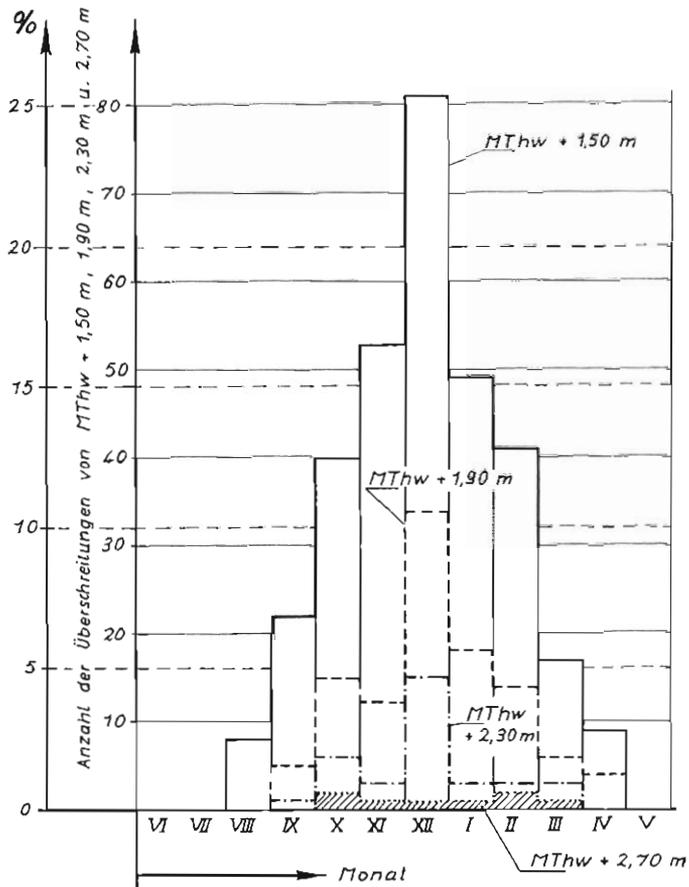


Abb. 4. Verteilung der Wasserstände von mehr als MThw + 1,50 m, MThw + 1,90 m, MThw + 2,30 m und MThw + 2,70 m über die Monate des Jahres. Cuxhaven 1864 bis 1966

Häufigkeit der Sturmfluten von  $\geq$  MThw + 1,01 m (LUCHT) mit der von  $\geq$  MThw + 1,50 m vergleicht. Eine ganz andere Häufigkeitsverteilung über die Monate tritt auch ein, wenn man die Sturmfluten von  $\geq$  MThw + 1,90 m, + 2,30 m oder + 2,70 m betrachtet. Diese Häufigkeitsverteilung ist auch in Abbildung 4 dargestellt. Auffallend ist, daß die höheren Sturmfluten im November seltener sind als im Dezember und Oktober, die Verteilungskurve weist zwei Maxima auf. Das gleiche Verhalten zeigt auch die Häufigkeitsverteilung an der Westküste (ROHDE 1964). Auch die von HENSEN (1955) angegebenen 5tägigen Summen der Stauhöhen der Sturmflut-Thw über PN + 735 cm zeigen im November ein sehr deutliches Minimum, dem ein Minimum des Luftdruckgradienten im Nordatlantik etwa entspricht. Das

Zeitraum	Höhe	Zahl der Thw = 100 ‰	Häufigkeitsverteilung je Monat in Prozent											
			VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V
1841—1940 (nach Hensen 1955)	$\geq + 735$ cm NN — 500 cm	920	1,1	1,3	3,5	8,0	13,2	14,4	18,6	17,9	11,2	7,4	2,9	0,5
1842—1957 (nach LUCHT 1964)	$\geq$ jäh. MThw + 101 cm	1332	1,9	1,1	4,1	7,9	13,0	14,4	17,8	16,2	12,0	7,6	3,5	0,5
1864—1966	$\geq$ 19jäh. MThw + 150 cm	320	0	0	2,5	6,9	12,5	16,6	25,3	15,3	12,8	5,3	2,8	0
1864—1966	$\geq$ 19jäh. MThw + 190 cm	107	0	0	0	4,7	14,0	11,2	31,7	16,8	12,2	5,6	3,8	0
1864—1966	$\geq$ 19jäh. MThw + 230 cm	35	0	0	0	2,9	17,2	11,4	43,0	8,5	8,5	8,5	0	0

Verteilung der Sturmfluten über die Monate des Jahres.

Verhältnis der Sturmfluthäufigkeiten von Dezember zu Oktober bleibt für  $\geq$  MThw 1,50 m, 1,90 m und 2,30 m fast konstant. Der Scheitelwasserstand von MThw + 2,70 m ist im Zeitraum von 1864 bis 1966 im Oktober und Februar je zweimal und je einmal im November, Dezember, Januar und März überschritten worden.

Wie im Abschnitt 3 bereits ausgeführt wurde, besteht für Cuxhaven kein Zusammenhang zwischen dem Oberwasserabfluß und der Sturmflutscheitelhöhe. Diese Verhältnisse ändern sich im Flußlauf der Elbe oberhalb von Cuxhaven. Oberhalb des Hamburger Hafengebietes werden die Wasserstände besonders stark vom Oberwasserabfluß beeinflusst. Die schweren Sturmfluten mit einer großen Scheitelhöhe in Cuxhaven wirken sich elbeaufwärts bis über Hamburg hinaus aus. Besonders gefährlich ist es daher für das obere Tidegebiet der Elbe, wenn schwere Sturmfluten mit einem hohen Oberwasserabfluß zusammentreffen. In welchen Monaten dafür die größte Wahrscheinlichkeit besteht, ergibt ein Vergleich von Abbildung 4 mit Abbildung 5. In Abbildung 5 ist, gemittelt über den Zeitraum von 1926 bis 1965, der monatliche Abfluß in Darchau (Elbe-km 537) dargestellt. Die mittleren monatlichen Abflüsse sind in den Monaten Januar, Februar und Mai relativ hoch, im März und April besonders hoch, besonders niedrig sind sie im September und Oktober. Im April und Mai ist die Sturmfluthäufigkeit besonders gering, während sie im Januar und Februar relativ groß ist. Die relativ größte Wahrscheinlichkeit des Zusammentreffens einer höheren Sturmflut mit einem hohen Oberwasserabfluß ist also in den Monaten Januar, Februar und März gegeben.

##### 5. Häufigkeit hoher Wasserstände in früheren Jahrhunderten

Auch für das Elbegebiet gibt es Zusammenstellungen über die im Laufe der Jahr-

hunderte eingetretenen bemerkenswerten hohen Wasserstände, wobei es sich fast ausschließlich um solche handelt, bei denen große Schäden durch Überschwemmungen eingetreten sind. In einem dreibändigen Werk „Chronologische Geschichte der großen Wasserfluthen des Elbstroms seit tausend und mehr Jahren“ versucht C. G. PÖTZSCH (1784) möglichst vollständig alle hohen „Wasserfluthen“ des Elbegebietes zu erfassen, über die in irgendwelchen Quellen berichtet wird. Dabei handelt es sich überwiegend um Schadenshochwässer, die infolge hohen Oberwasserabflusses im tidefreien Elbegebiet eingetreten sind. Nur die letzten Abschnitte der Bände 1 und 2 handeln „von besonderen Wasserfluthen des Elbstroms, die blos im Niedersächsischen in den Gegenden um Hamburg, bey Stürmen durch zurückgetretenen Fluthen aus der See entstanden sind“, also von Sturmfluten. PÖTZSCH hat dabei vorwiegend Chroniken und andere historische Quellen aus Hamburg ausgewertet. Ein Vergleich mit der in der Arbeit über die Häufigkeit hoher Wasserstände an der Westküste (ROHDE 1964) gegebenen Zusammenstellung der Sturmfluten in früheren Jahrhunderten ergibt, daß die Zusammenstellung mehr Sturmfluten enthält und daß die meisten der von PÖTZSCH aufgeführten Fluten auch in der o. a. Zusammenstellung erfaßt sind. Bei den Fluten, die nur in dem Werk von PÖTZSCH aufgeführt sind und nicht in der Arbeit über die Westküste, handelt es sich meistens um solche, die im Hamburger Raum durch hohen Oberwasserabfluß verursacht wurden. Das Hamburger Stadtgebiet war vor den großen Hafenbauten im Stromspaltungsgebiet und dem Elbeausbau unterhalb der Stadt (HENSEN 1955) noch verhältnismäßig stark durch hohe Oberwasserabflüsse gefährdet. Hohe Oberwasserabflüsse können dagegen für das Gebiet der Elbemündung auch früher keine besonders hohen Wasserstände verursacht haben. Das Werk von PÖTZSCH (1784) bringt daher für die Beurteilung der Häufigkeit hoher Wasserstände in der Elbemündung keine neuen Gesichtspunkte. Die Angaben über die Häufigkeit hoher Wasserstände in früheren Jahrhunderten an der Westküste von Schleswig-Holstein (ROHDE 1964) können daher — unter den bei derartigen Arbeiten ohnehin notwendigen Vorbehalten — auch für die Elbemündung als gültig angesehen werden.

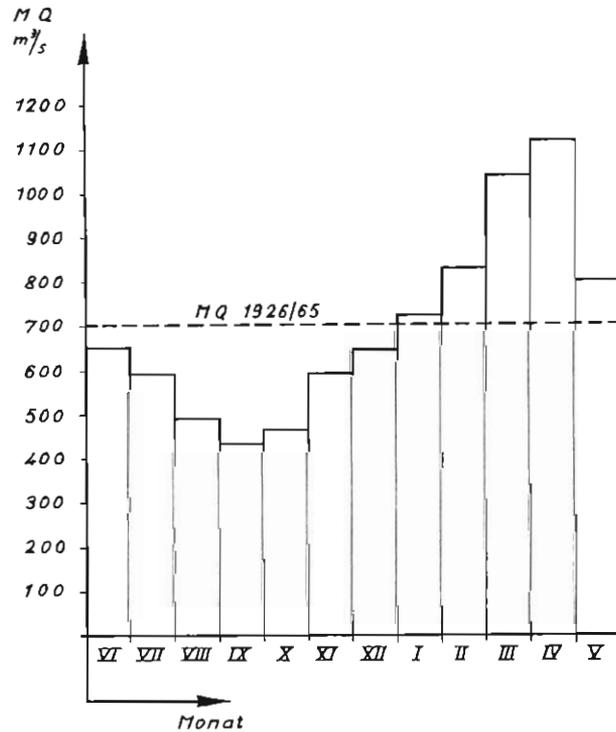


Abb. 5. Ganglinie der mittleren monatlichen Abflüsse in Darchau 1926 bis 1965

## 6. Zusammenfassung

Für Häufigkeitsuntersuchungen sind die Aufzeichnungen des Pegels Cuxhaven, des ältesten deutschen Pegels an der Nordseeküste, besonders geeignet. Um die Überschreitung bestimmter

hoher Wasserstände über MThw ermitteln zu können, war zunächst die Veränderung des MThw am Pegel Cuxhaven zu untersuchen. Für den Zeitraum von 1852 bis 1928 ergibt sich ein gleichmäßiger Wasserstandsanstieg von etwa 0,3 cm im Jahr, anschließend verläuft die Ausgleichslinie der Ganglinie der übergreifenden 19jährigen Mittel des MThw wesentlich flacher. Dieses Verhalten entspricht der Veränderung des MThw an der Westküste Schleswig-Holsteins (ROHDE 1964a) und Jütlands (DIETRICH 1954).

Die Häufigkeit der Überschreitung des Wasserstandes MThw + 1,50 m ist im Laufe des Untersuchungszeitraumes — dargestellt in übergreifenden 19jährigen Mitteln — Schwankungen ausgesetzt, die sich etwa zwischen  $n = 2,5$  im Jahr und  $n = 3,7$  im Jahr bewegen. Im Mittel ergibt sich eine geringe Abnahme in der Häufigkeit der Überschreitung von MThw + 1,50 m, eine Beobachtung, die auch an den Westküstenpegeln gemacht wurde (ROHDE 1964a). Es wird eine Häufigkeitskurve für die Überschreitung der Wasserstände am Pegel Cuxhaven von MThw + 1,50 m bis MThw + 3,10 m angegeben. Die Verteilung der Wasserstände von MThw + 1,50 m und mehr über die Monate des Jahres wird untersucht. Am weitaus häufigsten ist MThw + 1,50 m im Dezember überschritten worden. Die Häufigkeitsverteilung ist fast symmetrisch und weicht damit etwas von der entsprechenden Häufigkeitsverteilung an der Westküste ab. Die Überschreitungshäufigkeit von MThw + 1,90 m und MThw + 2,30 m ist im November geringer als im Oktober und Dezember.

## 7. Schriftenverzeichnis

- DIETRICH, G.: Ozeanographisch-meteorologische Einflüsse auf Wasserstandsänderungen des Meeres am Beispiel der Pegelbeobachtungen von Esbjerg. Die Küste, H. 2, 1954.
- GAYE, J.: Wasserstandsänderungen in der Ostsee in den letzten 100 Jahren. Schriften des Naturwissenschaftlichen Vereins für Schleswig-Holstein. Bd. XXV 1951.
- HENSEN, W.: Über die Ursachen der Wasserstandshebung an der deutschen Nordseeküste. Die Bautechnik, H. 1, 1938.
- 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.
- KNOP, F.: Untersuchungen über Gezeitenbewegungen und morphologische Veränderungen im nordfriesischen Wattgebiet als Vorarbeiten für Dammbauten. Mitteilungen aus dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau und Grundbau der Technischen Hochschule Braunschweig, H. 1, 1961.
- LEPPIK, E.: Die Sturmfluten in der Elbmündung in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Besondere Mitteilungen zum Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch. Hamburg 1950.
- LUCHT, F.: Hydrographie des Elbe-Aestuars. Archiv für Hydrobiologie, Supplement-Bd. XXIX, 1964.
- LÜDERS, K.: Die Sturmfluten der Nordsee in der Jade. Die Bautechnik, H. 13 u. 15, 1936.
- PÖTZSCH, C. G.: Chronologische Geschichte der großen Wasserfluthen des Elbstroms. Band 1 u. 2, Dresden 1784 u. 1786.
- RODEWALD, M.: Wie steht es um die Erwärmung des Arktischen Beckens? Deutsche Hydrographische Zeitschrift, H. 6, 1965.
- ROHDE, H.: a) Die Häufigkeit hoher Wasserstände an der Westküste von Schleswig-Holstein. Die Küste 1964.
- ROHDE, H.: b) Sturmfluten und Hochwassermarken. Wasser und Boden, H. 8, 1964.
- SCHELLING, H.: Die Sturmfluten an der Westküste von Schleswig-Holstein. Die Küste, H. 1, 1952.
- WALDEN, H.: Zusammenhang zwischen Sturmfluten, Elbe-Hochwassern und Wetterlage? Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, H. 1, 1966.
- WOHLENBERG, E. und SNUIS, H.: Anwachs, Landgewinnung und Deichbau in Nordfriesland. Schriften des Nissenhauses in Husum, Nr. 3, 1955.