

# Wahrscheinlichkeiten und Häufigkeiten von Extremsturmfluten

Von Alfred Führböter

## Zusammenfassung

Die Nordsee stellt als Flachwassergebiet einen äußerst empfindlichen Indikator für Klimaänderungen dar, insbesondere für solche Wetterlagen, die Sturmfluten erzeugen können. Die Sturmflutkatastrophe in den Niederlanden im Jahre 1953, die Februarsturmflut 1962 an der deutschen Nordseeküste, der Adolph-Bermpohl-Orkan 1967 mit mittleren Windgeschwindigkeiten von 37 m/s über fünf Stunden, der extreme Kontinentalorkan im November 1972 mit schwersten Sturmschäden von Frankreich bis Polen, die Sturmflutkette im Herbst 1973 und die extremen Januarsturmfluten 1976 können als Anzeichen für Änderungen der meteorologischen Bedingungen gewertet werden. Es sollen im folgenden einige Gedankenmodelle vorgestellt werden, mit denen aus den Änderungen der beobachteten Häufigkeiten auch Änderungen der damit verbundenen Wahrscheinlichkeiten nachgewiesen werden können.

## Summary

*The North Sea, as a very shallow sea greatly affected by high winds, acts as an extremely sensitive indicator of climatic changes and especially of weather conditions which produce surges. The flood disasters in the Netherlands in 1953, in Germany in 1962, the Adolph-Bermpohl-Orkan (1967), with mean wind speed of 37 m/sec over 5 hours, the severe inland storm of November 1972 which damaged forests from France to Poland, the series of six bad floods in November/December 1973 and the two severe floods in January 1976 with the highest water levels ever registered in the German Bight all indicate some change in meteorological conditions.*

*The paper introduces some conceptual models which show how the frequencies and probabilities of severe storm surges are changing over time.*

Es ist bekannt, daß wegen der komplexen Überlagerungen der sturmfluterzeugenden Parameter wie Windgeschwindigkeit, -richtung, -dauer usw. mit dem Tidegeschehen keine exakte Angabe für einen höchstmöglichen Sturmflutwasserstand gegeben werden kann; es sind nur Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich. Bereits 1939 zeigte WEMELSFELDER, daß bei der Auftragung der beobachteten Häufigkeiten von Extremwasserständen (z. B. der jährlichen HThw) in einem halblogarithmischen Koordinatensystem der Bereich der höchsten Wasserstände (= geringste Häufigkeiten) eine nahezu lineare Beziehung zwischen Wasserstand und Häufigkeit aufweist; wird diese Gerade extrapoliert, so können dann die Wahrscheinlichkeiten von Wasserständen berechnet werden, die – im Mittel natürlich! – einmal in 100 Jahren, 500 Jahren usw. zu erwarten sind. Vorausgesetzt wird dabei, daß die betrachteten Ereignisse (= Sturmflutwasserstände) voneinander unabhängig sind und daß die sturmfluterzeugenden Zufallsprozesse zeitlich stationär sind. Weiterhin sind zur Anwendung dieses Verfahrens genügend lange Zeitreihen erforderlich. Lange Zeitreihen stehen an der deutschen Nordseeküste an den Pegeln *Cuxhaven* (1813 bis 1976,  $n = 164$  Werte), *Wilhelmshaven* (1854 bis 1976,  $n = 123$  Werte) und *Husum* (1876 bis 1976,  $n = 110$  Werte) zur Verfügung; bei diesen Pegeln kann angenommen werden, daß keine nennenswerten Beeinflussungen durch Baumaßnahmen usw. in den betrachteten Zeiträumen aufgetreten sind.

Abb. 1 zeigt für den Pegel *Cuxhaven* die halblogarithmische Darstellung der Häufigkeitsverteilung einmal der Originalwerte und ebenfalls der Werte, die mit dem Säkularanstieg (für

den Pegel *Cuxhaven*: 23 cm/Jahrhundert) auf das Jahr 1975 beschickt wurden; eine solche Beschickung ist für jeden Pegel notwendig, damit die bekannten langjährigen Trends ausgeschaltet werden, die nicht unmittelbar mit den aktualmeteorologischen Ursachen von Sturmfluten verbunden sind. Am Beispiel *Cuxhaven* ist zu sehen, daß durch diese Beschickung die Sturmflut von 1825 vom dritten auf den zweiten Platz rückt (Abb. 1); es werden im folgenden stets Werte verwendet, die mit dem Säkularanstieg des entsprechenden Pegels auf das Jahr 1975 beschickt wurden.

Abb. 1 zeigt beobachtete Häufigkeiten, aus denen die abstrakten Wahrscheinlichkeiten (nach POISSON, 1841) in Form einer mathematischen Verteilungsfunktion ermittelt werden sollen. Wie Abb. 1 zeigt, ordnen sich die zahlreichen Punkte im Bereich der niedrigeren Wasserstände (= große Häufigkeiten) gleichsam von selbst

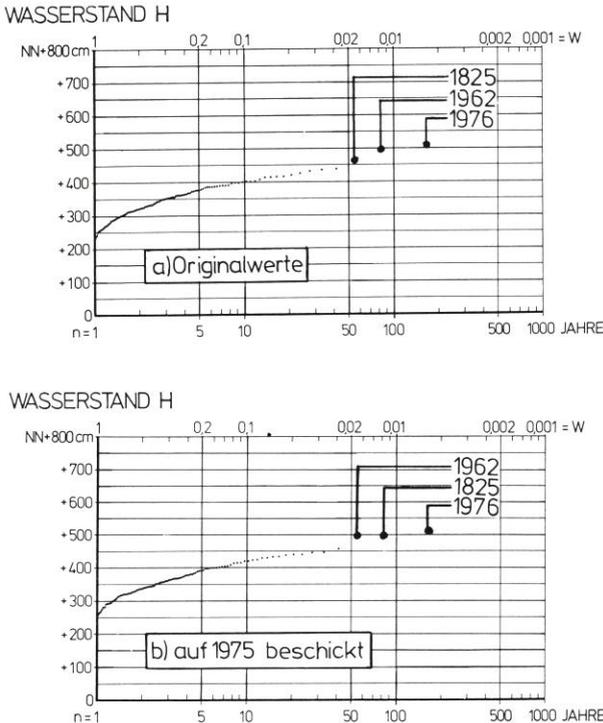


Abb. 1. Häufigkeitsfunktion der jährlichen HThw für den Pegel *Cuxhaven* von 1813 bis 1976 ( $n = 164$  Werte)  
 a) Originalwerte, b) auf 1975 beschickt

zu einer leicht gekrümmten Verteilungsfunktion an, während die zahlenmäßig geringere Gruppe der Werte für die hohen Wasserstände (Extremsturmfluten) sich asymptotisch der Funktion einer Geraden nähert (WEMELSFELDER, 1939).

Für den Bemessungswasserstand der Küstenschutzbauten wie Deiche usw. ist aber gerade die Gruppe der Extremereignisse und deren Verteilungsfunktion von Interesse, die nach WEMELSFELDER (1939) eine einfache Exponentialfunktion ist und daher im halblogarithmischen Koordinatensystem eine lineare Näherung ergibt; die Verteilung der niedrigeren Sturmfluten ist hier ohne Bedeutung. Es bedarf nun aber einer genaueren Definition dessen, was ein „Extremereignis“ exakt ist. Begriffsfestlegungen wie „schwere“ oder „sehr schwere“

Sturmflut entweder nach Wasserstand oder nach Häufigkeit helfen hier nicht weiter; in beiden Fällen wird mit einer willkürlichen Grenze ein Abschnitt der Häufigkeitsfunktion abgetrennt, beim Wasserstand durch eine waagerechte, bei der Häufigkeit durch eine senkrechte Trennlinie im Koordinatensystem (Abb. 1).

Bei einem Würfelspiel ist jedes „Ereignis“ als einzelner Wurf klar definiert, und eine Folge von Würfeln als „Kollektiv“ ist eine Anzahl von diskreten und voneinander unabhängigen Ereignissen, bei denen die „abstrakten Wahrscheinlichkeiten“ deduktiv bekannt sind. Bei Sturmfluten dagegen ist es offenkundig, daß z. B. die beiden Februarsturmfluten 1962, die Sturmflutfolge im Herbst 1973 oder die beiden Januarfluten 1976 keine unabhängigen Ereignisse im Sinne der Wahrscheinlichkeitstheorie sein können; sie stehen als Folgen von Großwetterlagen in engsten Zusammenhängen. Selbst wenn, wie auf Abb. 1, nur die jährlichen HThw als „Ereignisse“ gewertet werden, ist es nicht sicher, ob die Großwetterlagen in aufeinanderfolgenden Jahren voneinander unabhängig sind (vgl. z. B. v. Mises, 1972).

Die Frage, was ein „Extremereignis“ ist, kann aber in der Art beantwortet werden, daß nacheinander als „Ereignis“ das HThw einer Folge von  $N = 1, 2, 3 \dots$  bis zu  $N = 20$  Jahren gewertet wird und die dabei auftretenden Veränderungen der Häufigkeitsfunktionen (auf Abb. 1 mit  $N = 1$  Jahr) untersucht werden. Als signifikanter Indikatorwert für die Änderungen der Häufigkeitsfunktionen ist dabei der Wert  $H_{100}$  geeignet als der Wasserstand, der nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeit im Mittel einmal in einer Folge von 100 Jahren zu erwarten ist. Die Variation der Zahl der Jahre  $N$ , deren Höchstwasserstand (HThw) als Ereignis in das Kollektiv aufgenommen wird, liefert dann Funktionen  $H_{100}(N)$ , deren Verhalten wichtige Aufschlüsse über die Eigenschaften der Zeitreihen von  $n$  Jahren ergibt. Die Funktionen  $H_{100}(N)$ ,  $H_{50}(N)$  und  $H_{10}(N)$  zeigen für alle drei Küstenpegel (*Cuxhaven*, *Wilhelmshaven* und *Husum*) übereinstimmend ein Verhalten, bei dem für  $N > 5$  Jahre die Kurven auf asymptotische Grenzwerte konvergieren, die bis zu  $N = 20$  Jahre konstant bleiben. Dieses Verfahren liefert also einen Konvergenztest, bei dem die (linearen) Näherungsfunktionen im Bereich zwischen  $N = 5$  Jahre und  $N = 20$  Jahre nahezu unverändert bleiben (FÜHRBÖTER, 1976).

Abb. 2 zeigt die Funktionen  $H(N)$  mit ihrem Konvergenzverhalten für  $N > 5$  Jahre; auf den Abb. 3 (*Cuxhaven*), Abb. 4 (*Wilhelmshaven*) und Abb. 5 (*Husum*) sind die linearen Näherungsfunktionen als Ausgleichsgeraden für  $N = 5$ ,  $N = 10$ ,  $N = 15$  und  $N = 20$  Jahre dargestellt; es geht aus Abb. 3 bis 5 hervor, daß, unabhängig von der abnehmenden Zahl der Werte, die Lage der Geraden und ihre Anpassungsgüte fast unverändert bleiben; die mittleren Abweichungen  $\Delta H$  (nach der Methode der kleinsten Quadrate) betragen nur wenige Zentimeter.

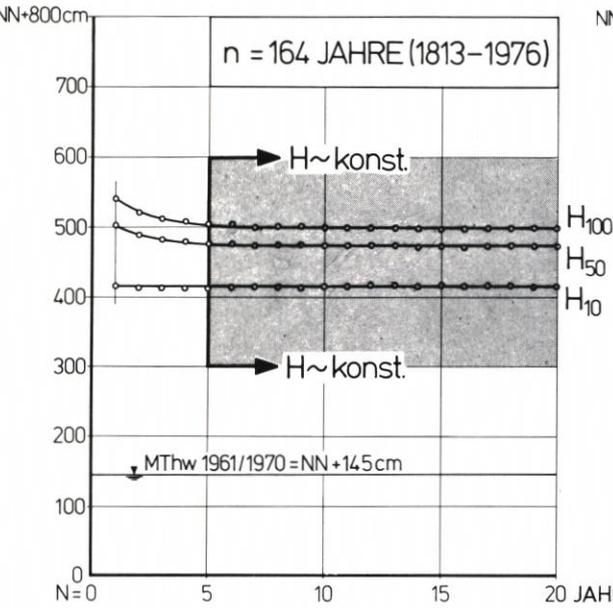
Die Ausgleichsgeraden, bei denen sich der „Jahrhundertwasserstand“  $H_{100}$  als Interpolation ergibt und höhere Wasserstände extrapoliert werden können, sind jetzt als die „abstrakten Wahrscheinlichkeiten“ im Sinne von POISSON zu verstehen.

Als wichtigstes Ergebnis der Konvergenzuntersuchungen (Abb. 2 bis 5) ist festzuhalten, daß jetzt ein „Extremergebnis“ als das HThw einer Folge von wenigstens  $N = 5$  Jahren definiert werden kann; außerdem wird dabei aber auch ein Verfahren gewonnen, das zu jeder genügend langen Zeitreihe von Jahren vergleichbare Ereignisse liefert (FÜHRBÖTER, 1976).

Damit ist jetzt auch die Möglichkeit gegeben, zeitliche Veränderungen dieser Wahrscheinlichkeiten zu untersuchen; es soll als signifikanter Wahrscheinlichkeitswert weiterhin der Wert  $H_{100}$  verwendet werden, der dann zu einer zeitabhängigen Funktion  $H_{100}(t)$  wird.

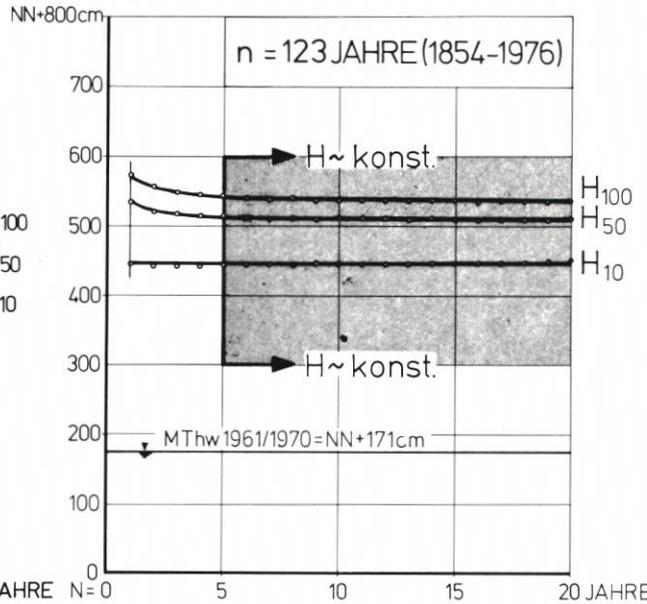
Liegt eine genügend lange Zeitreihe vor, so kann hier das Gedankenmodell *L a n g l e b i g e r C h r o n i s t* angewendet werden. Dieser beginnt z. B. beim Pegel *C u x h a v e n* seine Arbeit im Jahre 1862 mit einer Folge von  $n = 50$  Jahren (bei  $N = 5$  Jahre sind dieses 10

WASSERSTAND H



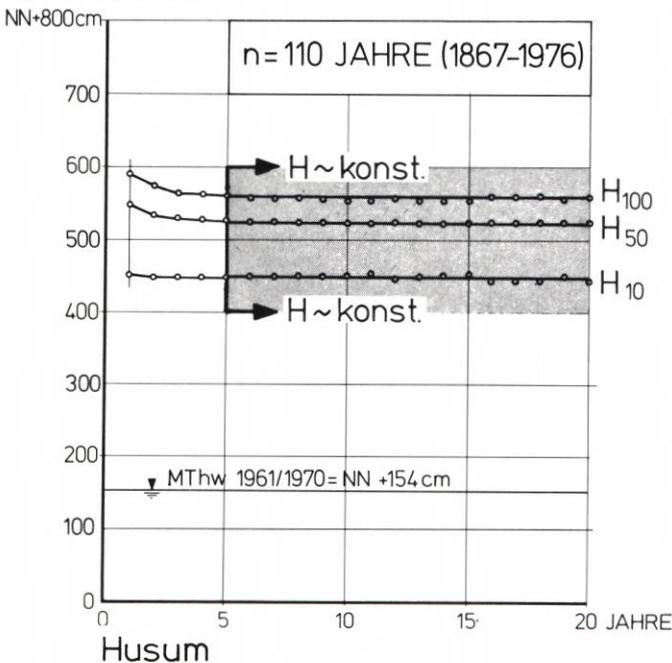
Cuxhaven

WASSERSTAND H



Wilhelmshaven

WASSERSTAND H



Husum

Abb. 2. Konvergenztest für die Funktion  $H(N)$  (Pegel Cuxhaven, Wilhelmshaven und Husum)

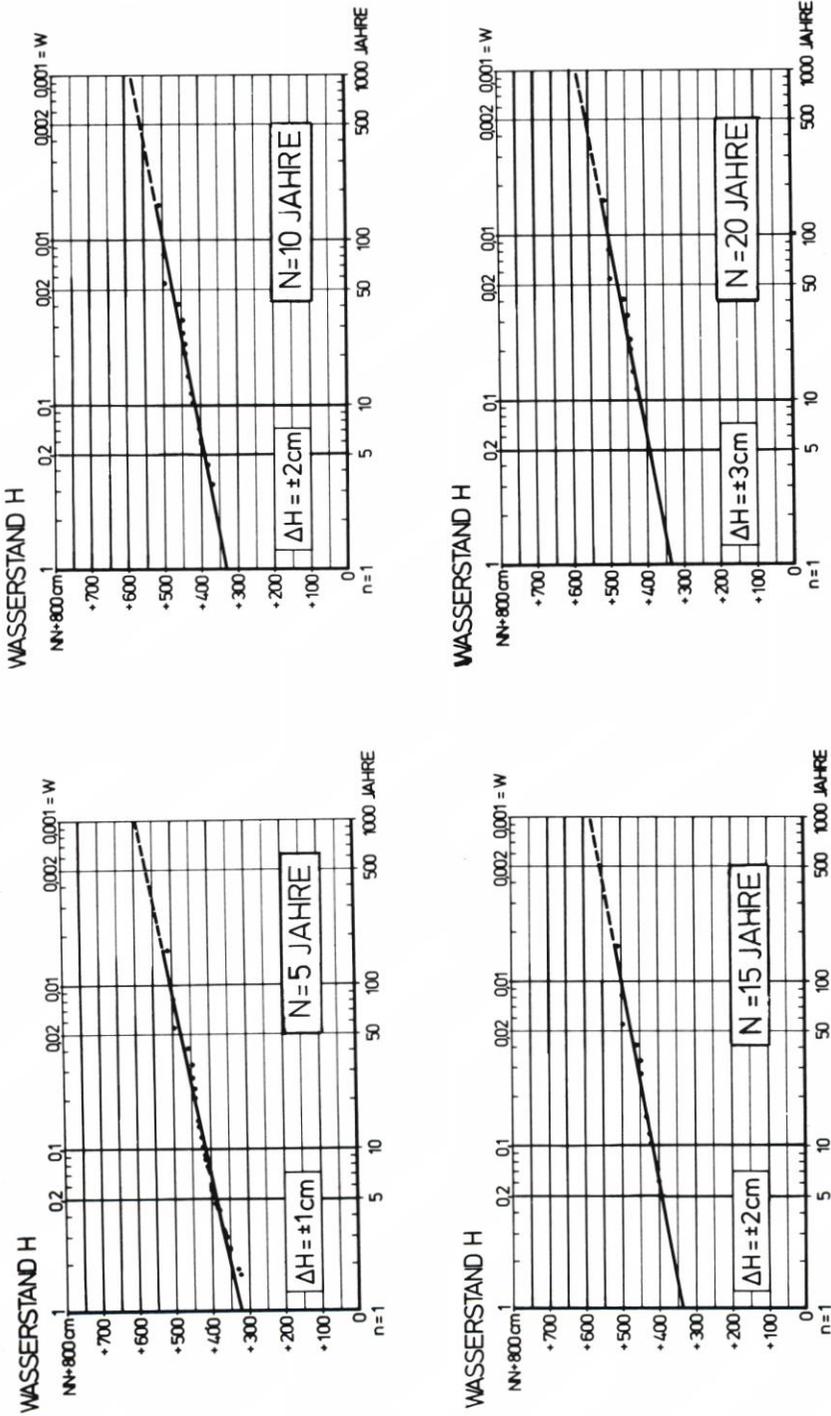


Abb. 3. Konvergenztest für den Pegel Cuxhaven (Ausgleichsgeraden)

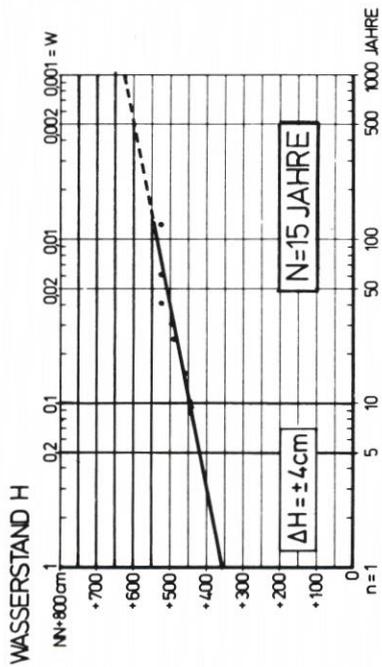
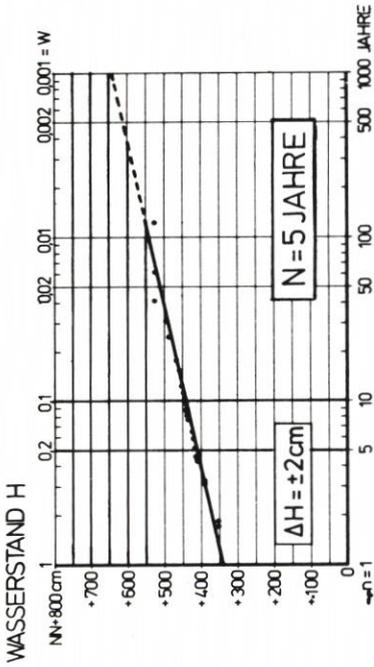
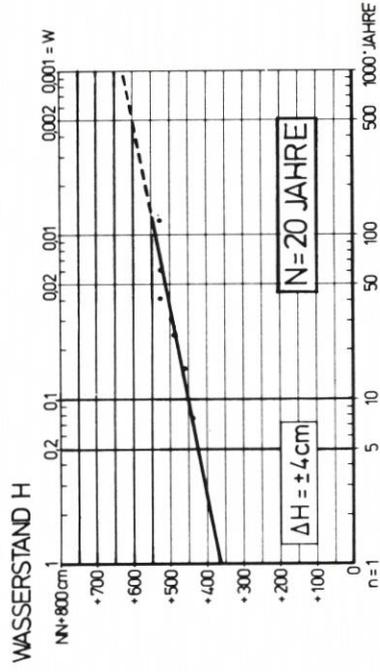
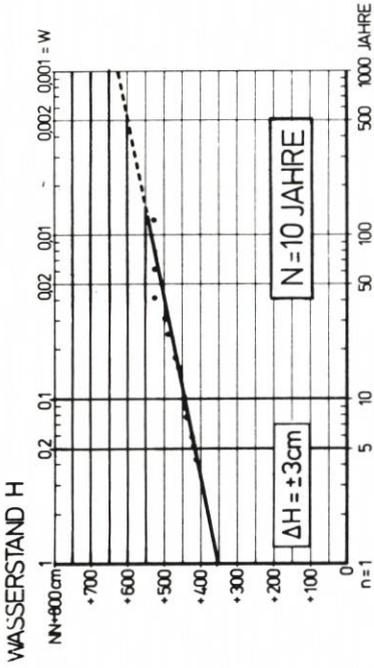


Abb. 4. Konvergenztest für den Pegel *Wilhelmshaven* (Ausgleichsgeraden)

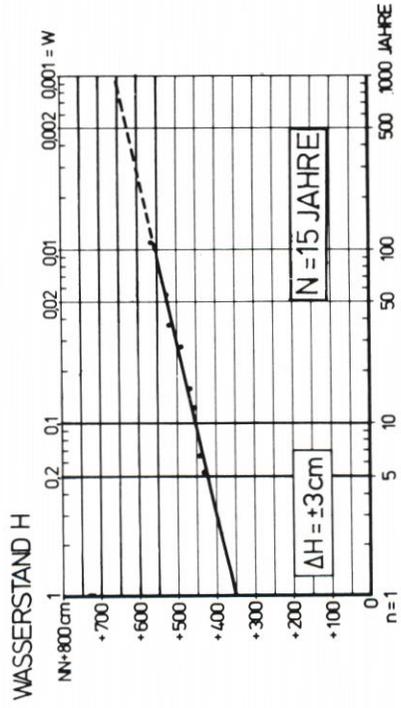
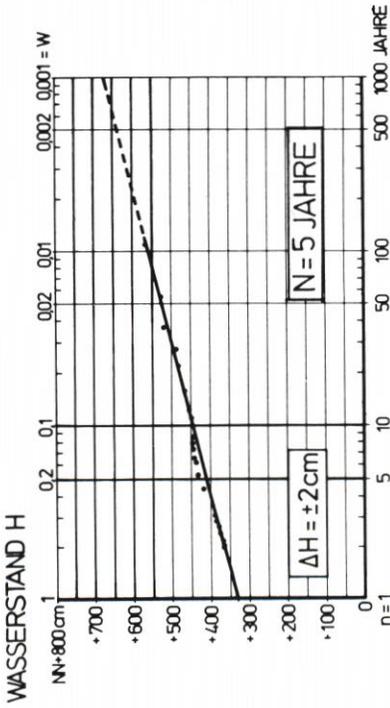
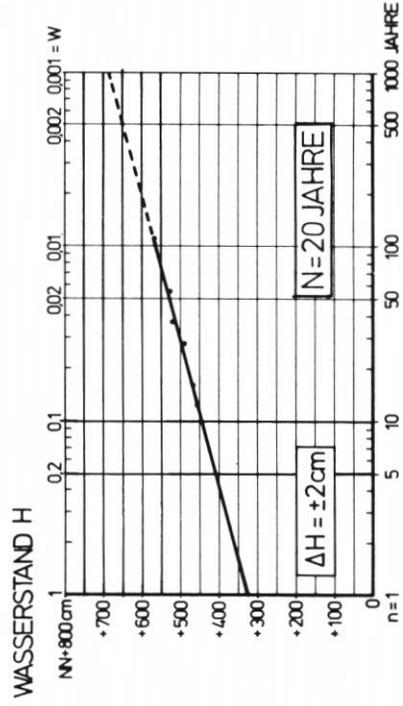
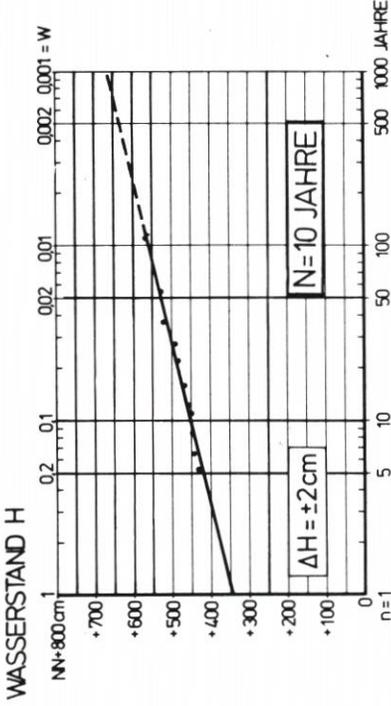


Abb. 5. Konvergenztest für den Pegel *Husum* (Ausgleichsgeraden)

Werte) und berichtigt dann jeweils nach weiteren 5 Jahren die gewonnenen Ergebnisse, bis er bei  $n = 164$  Jahren im Jahre 1976 die gesamte Zeitreihe in seine Berechnung einbezogen hat. Abb. 6 zeigt als Balkendiagramm die Häufigkeitswerte (HThw von  $N = 5$  Jahren) sowie die

WASSERSTAND  $H_{100}(t)$

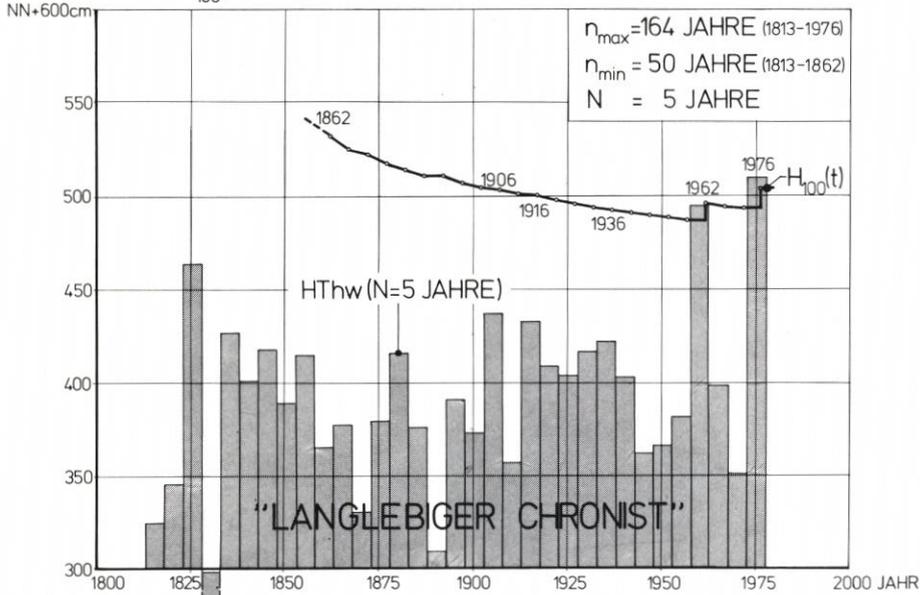


Abb. 6. Gedankenmodell „Langlebiger Chronist“ (Pegel Cuxhaven)

Funktion  $H_{100}(t)$ , die von 1862 bis 1961 eine monoton fallende Tendenz aufweist; die Sturmflutereignisse von 1962 und 1976 liefern dagegen Diskontinuitäten in Form positiver Sprünge, die jeweils etwa einen Dezimeter betragen.

Es ist leicht einzusehen, daß die Funktion  $H_{100}(t)$  nach Abb. 6 nicht die eines zeitlich stationären Prozesses sein kann; eine solche müßte mit zunehmender Länge der Zeitreihe abnehmende Sprunghöhen um einen gleichbleibenden Mittelwert aufweisen, wie es auf Abb. 7 schematisch dargestellt ist; auf Abb. 6 erscheinen aber Sprünge erst am Ende der Zeitreihe (FÜHRBÖTER, 1976). Im Gegensatz zu dem Langlebigen Chronisten beginnt der Zurückerinnende Chronist seine Arbeit im Jahre 1976 mit den  $n = 5$  Jahren stetig in die Vergangenheit zurück, bis er ebenfalls alle  $n = 164$  Werte der Zeitreihe erfaßt. Das Ergebnis zeigt Abb. 8; die Diskontinuitäten erscheinen hier entsprechend dem veränderten Verfahren bei anderen Sturmfluten als auf Abb. 6. Hier ist ein mit der Zeit zunehmender Trend festzustellen oder, umgekehrt gesehen, der Wasserstand  $H_{100}(t)$  wird umso niedriger, je länger die verwendete Zeitreihe wird; das instationäre Verhalten der Kurve auf Abb. 6 tritt auf Abb. 8 in reziproker Form auf.

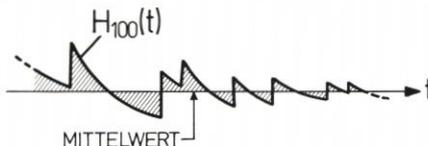


Abb. 7. Beispiel der Funktion  $H_{100}(t)$  für einen stationären Zufallsprozeß

WASSERSTAND  $H_{100}(t)$

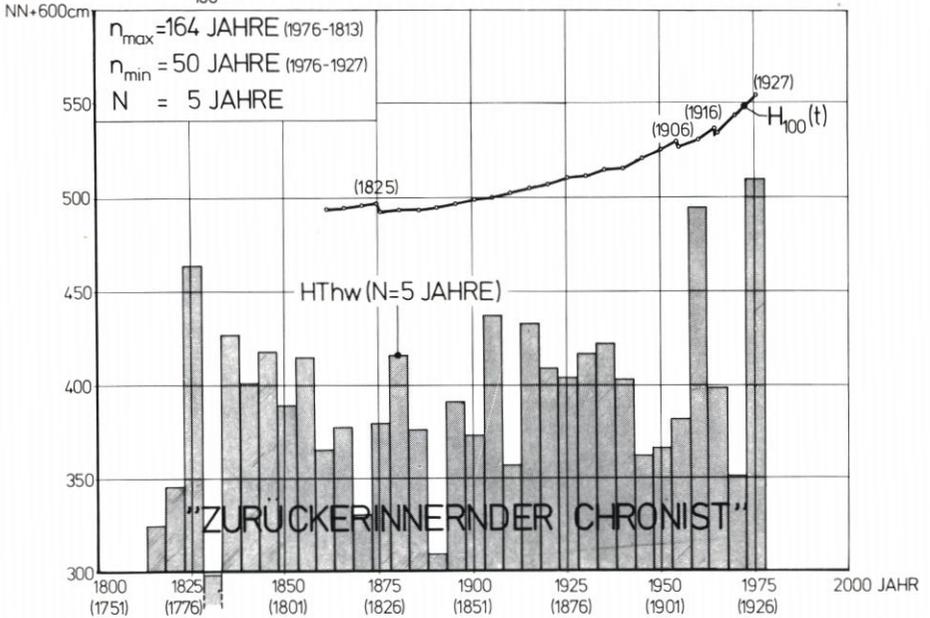


Abb. 8. Gedankenmodell „Zurückerrinnernder Chronist“ (Pegel Cuxhaven)

WASSERSTAND  $H_{100}(t)$

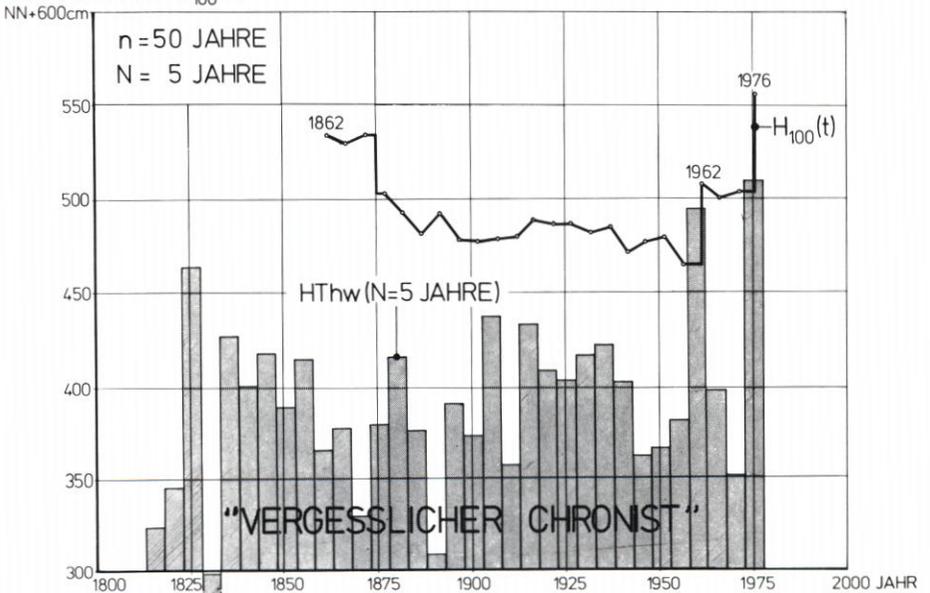


Abb. 9. Gedankenmodell „Vergesslicher Chronist“ (Pegel Cuxhaven)

Sowohl bei dem „Langlebigen Chronisten“ als auch bei dem „Zurückerrinnernden Chronisten“ tritt mit zunehmender Zeitreihe  $n$  eine veränderte Wichtung der Zufallsprozesse ein, die als meteorologische Ereignisse die Sturmfluten verursachen. Dieses vermeidet der *Vergeßliche Chronist*, der wie der „Langlebige Chronist“ seine Berechnungen im Jahre 1862 mit der Jahresreihe von  $n = 50$  Jahren von 1813 bis 1862 beginnt, nach jedem weiteren Zeitabschnitt von weiteren 5 Jahren aber den jeweils ältesten Wert, so 1866 den von 1813 bis 1817 „vergißt“, so daß bei seiner Auswertung jeweils nur die Ereignisse der letzten 50 Jahre berücksichtigt werden; so ist bei  $n = \text{konst.} = 50$  Jahren eine gleichbleibende Wichtung der Ereignisse vorhanden. Entsprechend dieser kürzeren Zeitreihe reagiert der „Vergeßliche Chronist“ wesentlich nervöser auf die Ereignisse, besonders auf die von 1962 und 1976; Abb. 9 zeigt, daß hier die Funktion  $H_{100}(t)$  mit zwei starken Diskontinuitäten um fast einen Meter ansteigt, während die in den Jahren von 1875 (hier wird die Sturmflut von 1825 „vergessen“) bis 1961 nur um wenige Dezimeter schwankt (FÜHRBÖTER, 1976).

Die Zeitreihen der Pegel *Wilhelmshaven* und *Husum* zeigen ein ähnliches Verhalten; von hohem Interesse ist, daß ähnliche Erscheinungen auch an der englischen Nordseeküste festgestellt werden. Abb. 10 zeigt das Verhalten der Wasserstände  $H_{250}$ ,  $H_{100}$ ,  $H_{50}$  und  $H_{10}$  für den Pegel *Immingham* nach GRAFF (1979); die zeitlich veränderlichen Zeitreihen „to base 1920“ entsprechen dabei dem Gedankenmodell „Langlebiger Chronist“, die „to base 1978“ dem des „Zurückerrinnernden Chronisten“.

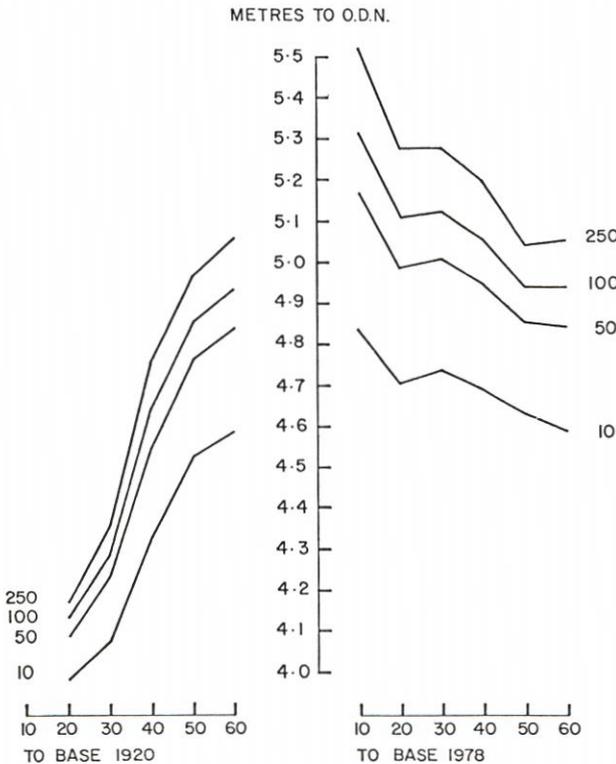


Abb. 10. Wasserstände  $H_{250}(t)$  bis  $H_{10}(t)$  für den Pegel IMMINGHAM nach GRAFF (1979)

GRAFF (1979) verwendete dabei die Näherungsfunktion von JENKINSON (1955). Auf Abb. 11 (nach WOLPERS, 1979) sind für den Pegel *Cuxhaven* ( $N = 5$  Jahre) die Werte  $H_{100}$  nach verschiedenen Wahrscheinlichkeitsfunktionen denen nach WEMELSFELDER (1939) und denen nach dem Konvergenztest mit  $N = 5$  Jahre (FÜHRBÖTER, 1976) gegenübergestellt. Es geht aus Abb. 11 hervor, daß weniger die Art der Wahrscheinlichkeitsfunktionen als die Länge der verwendeten Zeitreihe die Ergebnisse beeinflussen.

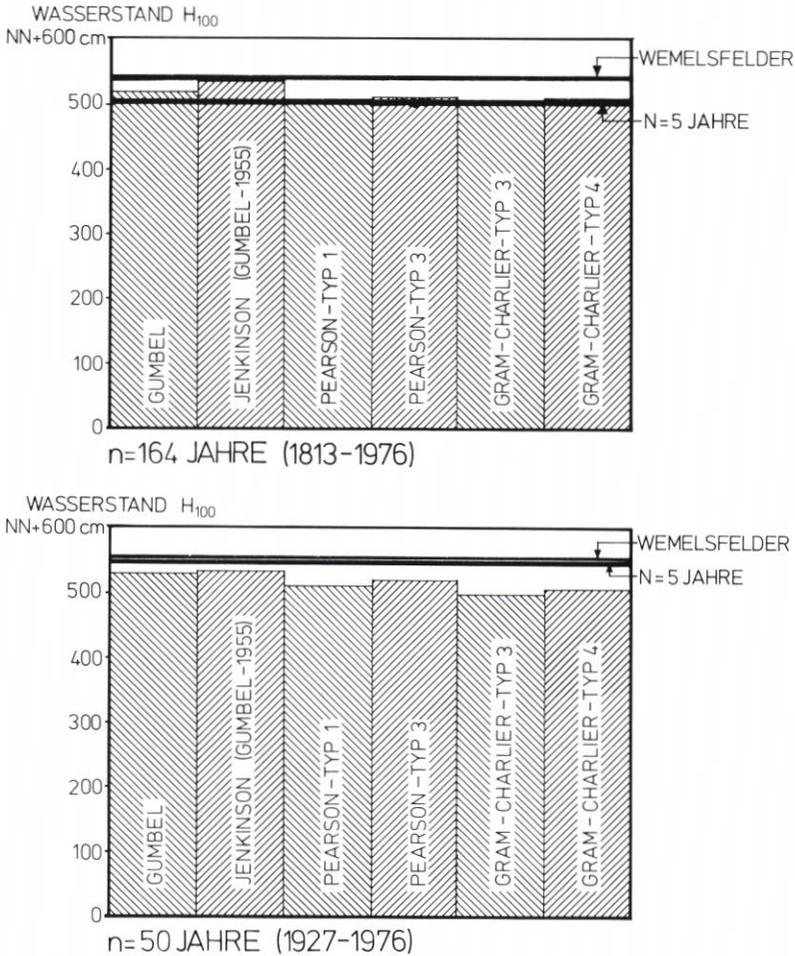


Abb. 11. Vergleich der Ergebnisse verschiedener Wahrscheinlichkeitsfunktionen für den Wert  $H_{100}$  (Pegel *Cuxhaven*, Werte auf 1975 beschriftet)

Dies veranschaulichen auch die Ausgleichsgeraden für  $n = 50$  Jahre von 1912 bis 1961, 1913 bis 1962 und 1927 bis 1976 für den Pegel *Cuxhaven* auf Abb. 12; die Gegenüberstellung zeigt, daß Unterschiede für  $H_{100}$  von fast einem Meter auftreten.

Wie eingangs bemerkt, sind in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts Anomalien in den Großwetterlagen aufgetreten, die zu einer zunehmenden Häufigkeit von Extremsturmfluten geführt haben; verbunden damit ist auch die Zunahme der Sturmflutwahrscheinlichkeiten. Für die zukünftige Entwicklung sind folgende drei Möglichkeiten denkbar (Abb. 13):

WASSERSTAND H

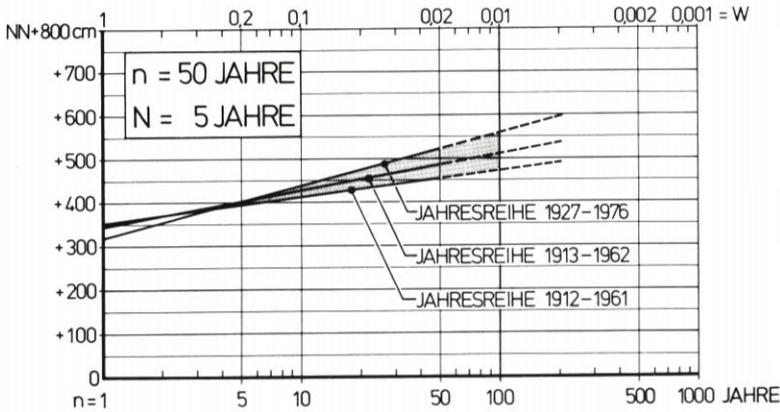


Abb. 12. Änderung des Wertes  $H_{100}$  bei Verwendung verschiedener Zeitreihen ( $n = 50$  Jahre, Pegel Cuxhaven)

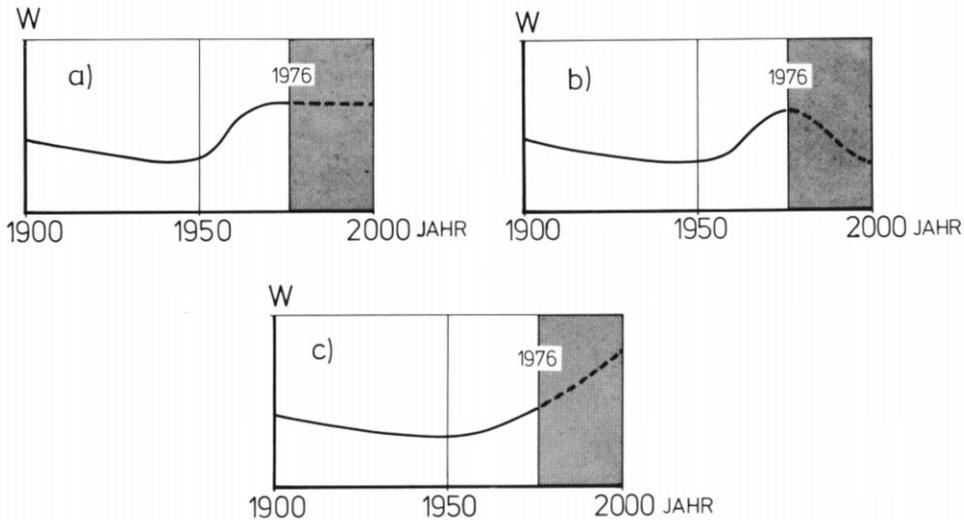


Abb. 13. Möglichkeiten zukünftiger Entwicklungen der Wahrscheinlichkeit  $W$  von Extremsturmfluten (schematisch)

a) Die Sturmflutwahrscheinlichkeit hat sich nach 1950 in Art eines Flip-Flop-Mechanismus sprunghaft geändert; es sind in der Zukunft höhere, aber gleichbleibende Sturmflutwahrscheinlichkeiten zu erwarten.

b) Die Sturmflutwahrscheinlichkeit fällt nach einem Maximum wieder auf die der ersten Jahrhunderthälfte zurück und

c) als gefährlichste Möglichkeit: Die Sturmflutwahrscheinlichkeit nimmt auch in Zukunft weiter zu.

Bei der zuletzt genannten Möglichkeit kann nicht ausgeschlossen, aber auch nicht bewiesen werden, daß an solchen Entwicklungen bereits anthropogene Einwirkungen auf das

Großklima der Erde beteiligt sind. Es kann von der Meteorologie her noch nicht vorausgesagt werden, welche Möglichkeit eintreten wird (vgl. dazu FLOHN, 1967, und LAMB, 1976); der Erforschung solcher Entwicklungen sollte aber auch von den Ingenieurwissenschaften her verstärkte Aufmerksamkeit gewidmet werden.

#### S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

- FLOHN, H.: Klimaschwankungen in historischer Zeit. Die Wissenschaft, Bd. 122, 1967.
- FÜHRBÖTER, A.: Über zeitliche Änderungen der Wahrscheinlichkeit von Extremfluten an der deutschen Nordseeküste. (On the Time-Dependent Changes of the Probability of Extreme Storm Floods at the German North Sea Coast.) Mitt. des Leichtweiss-Instituts der Techn. Univ. Braunschweig, Nr. 51, 1976.
- GRAFF, J.: Concerning the Recurrence of Abnormal Sea Levels (zur Veröffentlichung in „Coastal Engineering“ 1979 vorgesehen).
- JENKINSON, A. F.: The Frequency Distribution of the Annual Maximum (or Minimum). Values of Meteorological Elements. Quart. J. Roy. Meteorological Society, April 1955.
- LAMB, H. J.: Remarks on the Current Climatic Trend in its Perspective. Proceedings WMO/IAMAP, Symposium on Long-Term Climatic Fluctuation, Norwich, August 1975.
- v. MISES: Wahrscheinlichkeit, Statistik und Wahrheit. 4. Auflage, Springer-Verlag Wien, New York, 1972.
- POISSON, S. D.: Lehrbuch der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Deutsche Übersetzung von Dr. Schnuse, G. E. E. Meier Verlag, Braunschweig, 1841.
- WEMELSFELDER, P. J.: Wetmatigheden in het optreden van stormvloeden. De Ingenieur, Maart 1939.
- WOLPERS, F.: Über Wahrscheinlichkeitsverteilungen für extreme Sturmflutereignisse. (Zur Veröffentlichung in Mitt. des Leichtweiss-Inst. der Techn. Univ. Braunschweig, 1979 vorgesehen).