

Sturmflutwahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste nach verschiedenen Anpassungsfunktionen und Zeitreihen

VON ALFRED FÜHRBÖTER, JÜRGEN JENSEN, MICHAEL SCHULZE, ANDREA TÖPPE

Zusammenfassung

Auf die Häufigkeitsverteilungen von Sturmfluten werden 7 verschiedene Anpassungsfunktionen (PEARSON III und LOG PEARSON III, GUMBEL und LOG GUMBEL, EXPONENTIAL, JENKINSON B und C) angewendet; die Häufigkeitsverteilungen gehören zu den 5 Pegeln WILHELMSHAVEN, CUXHAVEN, BÜSUM, HUSUM und DAGEBÜLL, die sämtlich Hundertjahresreihen aufweisen, die in zwei Teilzeitreihen von je 50 Jahren aufgelöst werden können, so daß insgesamt 3 Zeitreihen für jeden Pegel zur Verfügung stehen. Es werden aus den Anpassungsfunktionen die Wasserstände H_{100} und H_{1000} ausgewertet, die mittleren Wiederkehrintervallen von 100 bzw. 1000 Jahren entsprechen; außerdem werden die Differenzen $H_{1000}-H_{100}$ mitgeteilt. Es zeigte sich, daß an den einzelnen Pegeln bei den verschiedenen Anpassungsfunktionen und Zeitreihen die Ergebnisse für H_{100} nur in einer Bandbreite von 0,5 m streuen; bei den Werten für H_{1000} liegt die Streuung zwischen 1 und 2 m, die Differenzen $H_{1000}-H_{100}$ bewegen sich zwischen 1 und 2 m. Dabei wird deutlich, daß die zweite Fünfzigjahresreihe fast immer höhere Wasserstände als die erste Fünfzigjahresreihe liefert. Es wird die Frage der Anpassungsgüte diskutiert und abschließend auf die Zunahme der Sturmflutwahrscheinlichkeiten hingewiesen.

Summary

Seven probability distributions (PEARSON III, LOG PEARSON III, GUMBEL, LOG GUMBEL, EXPONENTIAL and JENKINSON B and C) were fitted to complete one hundred years of record data from five tide gauges along the German North Sea coast (WILHELMSHAVEN, CUXHAVEN, BÜSUM, HUSUM and DAGEBÜLL). These were analysed as one 100 year and two sequential 50 year records at each station. From each record the water levels with a 100 and 1000 year return period, H_{100} and H_{1000} , were estimated as well as the difference $H_{1000}-H_{100}$. The results show that for the different probability distributions the predicted H_{100} -values ranges within 0,5 m and H_{1000} between 1 and 2 m. The analysis shows a different trend for the records of the first 50 years compared to the latest 50 years. These results are discussed in the light of goodness of fit of the various distributions. On the basis of the results it is shown that the extreme storm surge water levels are likely to increase.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Aufgabenstellung	164
2. Beschickung auf das Jahr 2000	166
3. Häufigkeitsverteilungen und Wahrscheinlichkeitsfunktionen (Verteilungsfunktionen)	168
4. Ergebnisse für die Werte H_{100} und H_{1000} an den einzelnen Pegeln für die sieben verschiedenen Anpassungsfunktionen mit je drei Zeitreihen	176
5. Anpassungsgüte der Verteilungsfunktionen im Bereich der 10 höchsten Wasserstände	179
6. Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse	180
7. Schriftenverzeichnis	185

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Die bekannten Wahrscheinlichkeitsverfahren der Hydrologie (vgl. z. B. RAUDKIVI, 1979, oder MANIAK, 1988) gehen sämtlich von Häufigkeitsanalysen aus, bei denen die eingetretenen Ereignisse einer Zeitreihe der Höhe nach geordnet und über die beobachtete Häufigkeit aufgetragen wurden. Die Häufigkeiten, die auch als Wiederkehrintervalle interpretiert werden können, werden dabei meist im logarithmischen Maßstabe über das Merkmal des Ereignisses linear aufgetragen. Dieses Merkmal ist bei Sturmfluten der höchste Sturmflutwasserstand eines bestimmten Zeitraumes; durch WEMELSFELDER (1939) wurden für die Niederlande und durch HUNDT (1955) für die deutsche Nordseeküste die Sturmflutwasserstände erstmalig einer solchen Analyse unterworfen.

Die Summe der einzelnen Ereignisse einer Zeitreihe bildet das Kollektiv, auf das sich die Häufigkeitsanalyse aufbaut. Bei einer strengen Wahrscheinlichkeitsanalyse wird gefordert, daß die Ereignisse, aus denen das Kollektiv besteht, voneinander unabhängig sind wie etwa die einzelnen Würfe bei einem Würfelspiel (vgl. v. MISES, 1972). Wie allgemein bekannt, sind die Ursachen von Sturmfluten in stochastischen, d. h. zufallsbedingten Sturmereignissen, zu suchen, die aber ihrerseits mit bestimmten Großwetterlagen verknüpft sind, bei denen eine Häufung von Sturmfluten innerhalb weniger Wochen und Monate auftreten kann; dies war an der deutschen Nordseeküste in den letzten Jahrzehnten in den Monaten November und Dezember 1973, im Januar 1976 und während des Winters 1982/1983 der Fall. Es ist einleuchtend, daß die während solcher sturmflutwirksamen Großwetterlagen eingetretenen Sturmfluten nicht als unabhängig voneinander angesehen werden können; im weiteren Sinne kann jeder Winter als eine ursächliche Folge von Großwetterlagen angesehen werden. Da die stärkste Sturmflutaktivität in die Wintermonate fällt, liegt es daher nahe, als unabhängige Ereignisse diejenigen anzusehen, die sich in aufeinanderfolgenden Wintern abspielen, wobei das hydrologische Jahr (vom 1. November des Vorjahres bis zum 31. Oktober des Hauptjahres) als geeigneter Zeitabschnitt zur Erfassung der sturmaktiven Wintermonate angesehen werden darf.

In diesem Sinne wird unter dem Kollektiv der Sturmfluten die Anzahl der HThw zu den einzelnen hydrologischen Jahren einer Zeitreihe verstanden. Auch hier ist zwar keine vollkommene Unabhängigkeit der Ereignisse voneinander gewährleistet, weil auch die Großwetterlagen aufeinanderfolgender Jahre gewisse Abhängigkeiten aufweisen (vgl. z. B. FÜHRBÖTER, 1976), die aber auf jeden Fall wesentlich schwächer als die innerhalb eines Winters sein werden (vgl. SIEFERT, 1978).

Ist für einen Pegel nach diesen Gesichtspunkten zu einer bestimmten Zeitreihe die Häufigkeitsverteilung gewonnen worden, so besteht die nächste Aufgabe nach POISSON (1841) darin, aus der beobachteten Häufigkeit die sog. abstrakte Wahrscheinlichkeit zu berechnen.

Dies kann in erster Näherung dadurch geschehen, daß visuell durch die Häufigkeitsverteilung eine Ausgleichskurve gelegt wird, wie es auch von WEMELSFELDER (1939) und HUNDT (1955) ausgeführt wurde. Eine genaue Betrachtung aber, besonders in Hinblick auf Extrapolationen über den beobachteten Zeitraum hinaus, macht die Anwendung von mathematischen Anpassungsfunktionen (Verteilungsfunktionen) erforderlich, deren freie Parameter optimal an die vorliegenden Häufigkeitsverteilungen angepaßt werden müssen.

Es gibt keine verbindliche theoretische Begründung dafür, welche der vielen bekannten Anpassungsfunktionen optimal für eine Häufigkeitsverteilung geeignet ist, die ein Kollektiv von Sturmfluten beschreibt; diese Frage kann nur pragmatisch für den speziellen Fall gelöst werden.

Hierin liegt eine der Aufgaben der vorliegenden Arbeit, nämlich zu prüfen, welche Ergebnisse verschiedene Anpassungsfunktionen für ausgewählte Pegel an der deutschen Nordseeküste für das gegenwärtige Datenmaterial (bis zum hydrologischen Jahr 1987) liefern.

Hierzu sind Pegel mit mindestens hundertjährigen Zeitreihen erwünscht, die dann für eine detaillierte Analyse in zwei Teilzeitreihen von je 50 Jahren zerlegt werden können, so daß damit insgesamt drei Zeitreihen zur Verfügung stehen:

1. Zeitreihe: 1888 bis 1987 = 100 Jahre
2. Zeitreihe: 1888 bis 1937 = 50 Jahre
3. Zeitreihe: 1938 bis 1987 = 50 Jahre

Es sollen hier nur Festlandpegel behandelt werden; eine weitere Forderung außer der nach den vorhandenen Jahresreihen ist die, daß der einzelne Pegel durch menschliche Eingriffe keine wesentlichen hydrologischen Änderungen erfahren hat; dieses ist näherungsweise für die

1. Pegel WILHELMSHAVEN
2. Pegel CUXHAVEN
3. Pegel BÜSUM
4. Pegel HUSUM
5. Pegel DAGEBÜLL

der Fall (vgl. JENSEN, 1984 und 1985). Auf Tafel 1 sind diese Werte für die fünf Pegel sowohl in unbeschnittener als auch in beschnittener Form (vgl. Abschnitt 2) zusammengestellt. Diese fünf Pegel sollen im folgenden mit den drei genannten Zeitreihen mit verschiedenen Anpassungsfunktionen untersucht werden.

Von den Ergebnissen sind vor allem die Werte

$$H_{100}$$

als diejenigen Wasserstände von Interesse, die nach der gewählten Anpassungsfunktion mit einer Wahrscheinlichkeit von 1:100, d. h. mit einem mittleren Wiederkehrintervall von 100 Jahren, zu erwarten sind. Es sei hier daran erinnert, daß die zugehörigen Risikofunktionen weitaus kleinere Erwartungszeiten als 100 Jahre enthalten (vgl. dazu JENSEN, 1985); es wird außerdem weiterhin vorausgesetzt, daß die stochastischen Parameter des Kollektives, d. h. die Sturmflutaktivitäten, unverändert bleiben; dann kann ausgesagt werden, daß der Wasserstand H_{100} bei genügend langer Zeitreihe gleichbleibender Sturmflutaktivität im langjährigen Mittel einmal in 100 Jahren auftreten wird.

Der Wert H_{100} ist auch insofern von Wichtigkeit, weil er als einer der Richtwerte für den Bemessungswasserstand gilt, dem die Deichbestecke zugrunde gelegt werden (vgl. z. B. PETERSEN, 1955); auf die Frage der Bemessungswasserstände (vgl. auch LÜDERS, 1971, und SCHERENBERG, 1988) soll aber in dieser Arbeit nicht eingegangen werden.

Der Wert H_{100} ergibt sich aus einer Jahrhundertreihe als ein Wert an der Grenze zwischen Interpolation und Extrapolation; bei einer Fünfzigjahresreihe entsteht er aus der Extrapolation auf den doppelten Zeitraum, was in der Hydrologie als durchaus zulässig gilt. Bei dem Wert

$$H_{1000}$$

der – im Mittel – einmal im Jahrtausend auftreten kann, ist dieses nicht mehr der Fall, es handelt sich hier um eine numerisch-formale Auswertung der Anpassungsfunktion unter der Annahme, daß die stochastischen Parameter der zugrundeliegenden Häufigkeitsverteilung über derart lange Zeiträume konstant bleiben.

Immerhin werden z. B. in den Niederlanden nicht nur Werte von H_{100} , sondern auch von

H_{5000} und $H_{10\ 000}$ den Küstenschutzbauwerken zugrunde gelegt; die Gründe hierfür sind bekannt und brauchen an dieser Stelle nicht erörtert zu werden. Wenn hier aber die Werte H_{1000} mitgeteilt werden, so geschieht es einmal aus dem Grunde, daß die Anpassungsfunktionen auch darauf geprüft werden sollen, wieweit sie in extremen Extrapolationsbereichen übereinstimmen oder divergieren, zum anderen deshalb, weil nicht ausgeschlossen werden kann, daß auch in nächster Zukunft einmal ein solches seltenes Ereignis auftritt, wie es in der letzten Vergangenheit in den Niederlanden und in Südengland 1953 und an der Ostsee 1872 der Fall war. Mit der zugehörigen Differenz

$$H_{1000} - H_{100}$$

soll außerdem der Spielraum angegeben werden, in dem sich extrem seltene Ereignisse mit den Wahrscheinlichkeiten zwischen 1:100 und 1:1000 einstellen können.

Damit ist die Aufgabenstellung umrissen; für die Anwendung der Verfahren ist es aber notwendig, den Säkularanstieg aus den einzelnen Zeitreihen zu eliminieren, was durch eine Beschickung auf das Jahr 2000 geschehen soll (vgl. Abschnitt 2).

2. Beschickung auf das Jahr 2000

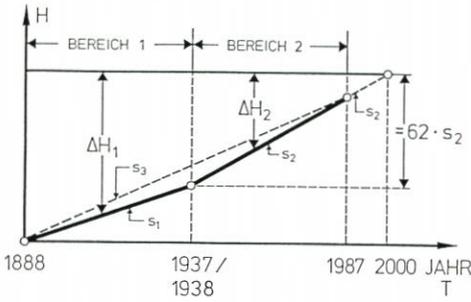
Die Zeiträume der jährlichen HThw bedürfen einer Beschickung auf einen bestimmten Zeitpunkt, weil durch den bekannten Säkularanstieg dem stochastischen (zufallsbedingten) Sturmflutgeschehen ein deterministischer Trend überlagert wird. Es soll ebenfalls berücksichtigt werden, daß dieser Säkularanstieg an den einzelnen Pegeln verschieden sein kann und auch außerdem zeitlichen Schwankungen unterworfen ist (JENSEN, 1984, FÜHRBÖTER u. JENSEN, 1985, FÜHRBÖTER, 1986). Dies kann näherungsweise nach Abb. 1 so geschehen, daß – jedesmal nach der Methode der kleinsten Quadrate – getrennt für die Fünfzigjahresreihen 1888 bis 1937 und 1938 bis 1987 die jeweiligen Teilanstiege s_1 und s_2 ermittelt werden. Die Beschickungen werden dabei durchgehend auf das Jahr 2000 vorgenommen unter der Annahme, daß sich der Säkularanstieg s_2 der Jahresreihe 1938 bis 1987 (= 50 Jahre) bis zur Jahrtausendwende linear fortsetzt. Eine etwaige Beschleunigung des Säkularanstieges in den letzten Jahrzehnten (FÜHRBÖTER u. JENSEN, 1985, FÜHRBÖTER, 1986) wird also hier nicht berücksichtigt.

Wie aus Abb. 1 hervorgeht, sind damit die Beschickungsfunktionen getrennt für zwei Bereiche aufzustellen, nämlich für den Bereich 1 für die Jahresreihe 1888 bis 1937 und den Bereich 2 für die Jahresreihe 1938 bis 1987. Die zugehörigen Werte ΔH_1 und ΔH_2 ergeben sich nach Abb. 1; sie geben die Höhen an, um die die Sturmfluthöhen zu den einzelnen Jahreszahlen T vergrößert werden müssen, um auf das Jahr 2000 bezogen werden zu können. Die Beschickung geht dabei davon aus, daß unter den gleichen meteorologischen und astronomischen Bedingungen eine Sturmflut aus der Vergangenheit im Jahre 2000 um denjenigen Betrag höher auflaufen würde, der dem Säkularanstieg des Pegels von der Zeit des Eintrittes der Sturmflut bis zum Jahre 2000 entspricht. Es ist zwar bekannt, daß der Windstau wasserstandsabhängig ist und z. B. bei Tideniedrigwasser wesentlich höher als bei Tidehochwasser werden kann; hier handelt es sich aber im Vergleich zum Tidehub um derart kleine Wasserstandsänderungen, daß die lineare Übertragung erlaubt ist.

Wie aus der Tafel auf Abb. 1 hervorgeht, ist der aus der Jahresreihe 1888 bis 1937 extrapolierte Säkularanstieg s_1 meist kleiner als der aus der Jahresreihe 1938 bis 1987 mit s_2 ; der Vollständigkeit halber ist außerdem der Gesamtanstieg s_3 für die Jahrhundertreihe 1888 bis 1987 auf Abb. 1 angegeben. Wie aus Abb. 1 hervorgeht, würde die Verwendung des

Tafel 1.
Jahrhundertreihe 1888 bis 1987 der jährlichen
HThw und der auf das Jahr 2000 beschickten
Werte BHThw für die Pegel WILHELMS-
HAVEN, CUXHAVEN, BÜSUM, HUSUM
und DAGEBÜLL

Jahr	Pegelstationen									
	Wilhelmsh.		Cuxhaven		Büsum		Husum		Dagebüll	
	HThw	BHThw	HThw	BHThw	HThw	BHThw	HThw	BHThw	HThw	BHThw
1888	291	320	296	328	354	383	325	363	310	343
1891	325	353	307	338	334	362	355	391	285	317
1892	330	358	306	337	314	342	317	354	270	303
1893	310	338	240	271	222	260	246	283	195	227
1894	325	353	307	338	334	362	355	391	285	317
1895	320	348	259	289	272	300	285	321	238	270
1896	400	427	362	392	370	397	435	471	335	367
1897	395	422	386	416	394	421	395	430	350	382
1898	400	427	389	418	356	383	361	396	355	387
1899	390	317	277	306	244	271	290	325	220	252
1899	344	371	311	340	308	334	345	379	275	307
1899	359	385	370	398	336	362	345	379	305	337
1900	314	340	298	326	300	326	321	355	255	286
1901	395	421	359	387	342	368	349	382	285	316
1902	355	381	356	384	354	379	371	404	305	336
1903	310	335	285	312	272	297	320	353	235	266
1904	375	400	331	358	342	367	385	417	315	346
1905	405	430	386	413	344	369	379	411	275	306
1906	307	332	284	312	264	288	327	359	245	276
1907	350	374	332	358	324	348	344	375	280	311
1908	295	319	262	288	278	302	297	328	270	301
1909	335	359	270	295	286	310	291	322	265	295
1910	290	314	256	281	316	339	375	405	365	399
1911	373	397	356	381	314	337	363	393	255	285
1912	343	366	350	375	390	413	465	495	385	415
1913	280	303	251	275	268	291	284	315	245	275
1914	371	394	348	372	374	396	374	403	300	330
1915	358	381	352	376	360	382	398	427	330	360
1916	480	502	432	455	443	465	508	536	415	445
1917	349	371	362	385	370	392	439	467	335	365
1918	455	477	409	432	386	408	436	464	335	364
1919	371	393	384	406	366	387	434	461	305	334
1920	318	339	313	335	306	327	341	368	285	314
1921	378	399	361	383	318	339	353	380	280	309
1922	435	458	391	413	367	388	391	417	305	334
1923	334	355	314	335	360	380	422	448	385	414
1924	387	408	361	382	356	376	402	428	295	324
1925	291	311	300	321	331	351	325	350	270	299
1926	412	432	403	423	406	426	435	460	365	394
1927	320	340	313	333	334	353	394	416	315	343
1928	289	309	269	289	278	297	301	325	260	288
1929	404	423	356	375	370	389	414	438	345	373
1930	432	451	386	405	384	403	349	373	270	298
1931	416	435	416	435	409	427	422	445	365	393
1932	399	318	288	307	285	303	367	390	315	343
1933	315	334	285	303	274	292	313	336	248	276
1934	305	323	306	324	312	330	362	384	310	338
1935	352	370	329	347	313	330	394	416	365	393
1936	423	441	422	439	333	350	475	497	404	431
1937	427	445	399	416	388	405	410	431	318	345
1938	368	385	355	372	360	377	377	398	338	365
1939	323	340	350	366	394	410	470	491	425	452
1940	343	360	340	356	355	371	380	400	325	351
1941	389	406	403	419	375	391	346	366	290	316
1942	325	341	334	350	365	381	363	383	320	346
1943	402	418	334	349	328	343	336	355	283	308
1944	403	418	331	346	344	349	343	361	292	317
1945	392	407	362	377	345	360	374	393	280	304
1946	336	351	324	339	310	325	325	343	251	275
1947	251	266	262	276	286	300	335	353	276	299
1948	351	366	325	339	310	324	356	374	312	335
1949	354	372	364	380	400	414	422	434	328	350
1950	383	397	318	331	304	317	328	345	275	297
1951	273	287	279	292	283	296	293	310	246	268
1952	307	320	295	308	303	316	335	351	289	310
1953	345	358	326	339	309	322	302	318	292	313
1954	362	375	349	381	372	384	411	427	355	375
1955	434	447	382	394	365	377	393	408	329	349
1956	357	369	351	363	350	362	389	404	331	350
1957	343	355	318	328	324	336	321	336	270	289
1958	380	392	333	344	321	332	310	324	263	281
1959	385	396	315	326	316	327	333	347	284	302
1960	295	306	264	275	279	290	297	311	242	260
1961	364	377	345	356	346	357	369	382	310	327
1962	521	532	495	505	493	503	521	534	456	473
1963	341	351	305	315	298	308	338	351	262	278
1964	329	339	320	330	330	340	347	359	300	316
1965	390	400	344	353	344	353	341	352	288	303
1966	379	389	374	383	402	412	432	444	376	391
1967	414	423	399	408	407	416	439	450	367	382
1968	381	390	344	353	354	363	442	453	387	401
1969	340	349	312	320	308	316	323	334	276	290
1970	348	356	351	359	358	364	364	376	308	321
1971	349	357	323	331	312	320	327	337	277	290
1972	349	357	338	346	331	339	356	366	288	300
1973	307	315	259	266	286	293	296	305	256	268
1974	454	461	439	446	433	440	463	472	370	381
1975	372	379	354	361	371	378	423	431	344	355
1976	484	491	510	516	514	520	566	574	446	457
1977	326	332	315	321	318	324	342	350	276	286
1978	472	478	390	396	380	386	414	421	352	362
1979	326	332	323	334	327	333	375	382	298	307
1980	339	335	313	317	340	345	379	386	340	349
1981	358	363	349	354	355	360	382	388	319	327
1982	431	436	451	456	471	476	515	521	472	480
1983	404	409	403	408	404	409	435	441	382	389
1984	354	358	354	358	383	387	409	414	376	383
1985	330	334	327	331	343	347	354	359	328	335
1986	334	338	340	344	361	365	417	422	361	367
1987	309	313	298	302	314	322	336	340	285	291



BEREICH 1 zwischen 1888 und 1937 :

$$\Delta H_1 = s_1 (1938 - T) + s_2 \cdot 62$$

BEREICH 2 zwischen 1938 und 1987 :

$$\Delta H_2 = s_2 (2000 - T)$$

H in cm
 s in cm/100 Jahre
 T = Jahreszahl
 62 = 2000 - 1938

Pegelstandort	Säkularanstieg s [cm/100 Jahre]		
	1888 - 1937 s ₁	1938 - 1987 s ₂	1888 - 1987 s ₃
Wilhelmshaven	23	28	27
Cuxhaven	30	27	24
Büsum	24	27	18
Husum	33	34	30
Dagebüll	11	44	26

Abb. 1: Zur Beschickung der Sturmflutwasserstände auf das Jahr 2000

Gesamtanstieges s_3 zu kleine Werte bei der Beschickung auf das Jahr 2000 ergeben; diese Unterschiede können Beträge über einen Dezimeter ergeben.

- Alle im folgenden verwendeten Werte sind einheitlich nach den Angaben auf Abb. 1 auf das Jahr 2000 beschickt. -

3. Häufigkeitsverteilungen und Wahrscheinlichkeitsfunktionen (Verteilungsfunktionen)

Die Kollektive aus den einzelnen Jahresreihen ergeben zunächst einfache Häufigkeitsverteilungen, die sich als Punktfolgen zu den einzelnen Wiederkehrintervallen darstellen. Werden sie in einem einfachlogarithmischen Koordinatensystem mit dem Merkmal (Wasserstandshöhe) in linearer Auftragung auf der Ordinate dargestellt, so ordnen sie sich meist in Form einer leicht gekrümmten Kurve ein; liegen alle Punkte auf einer Geraden, so liegt der einfache Fall einer logarithmischen Verteilung bzw. einer Exponentialfunktion vor.

Als Beispiel solcher Häufigkeitsverteilungen sind für die Jahresreihen 1888 bis 1987 (= 100 Jahre) und 1888 bis 1937 sowie 1938 bis 1987 (= jeweils 50 Jahre) diese Punktfolgen für den Pegel HUSUM auf Abb. 2 dargestellt, wobei die drei höchsten Sturmfluten des jeweiligen Kollektivs besonders hervorgehoben wurden. Abb. 2 zeigt visuell folgende Erscheinungen:

1. Bei der Hundertjahresreihe 1888 bis 1987 (Abb. 2 oben) liegen die Punkte des Kollektivs einschließlich der Extremwerte (1916, 1962 und 1976) annähernd auf einer Geraden,

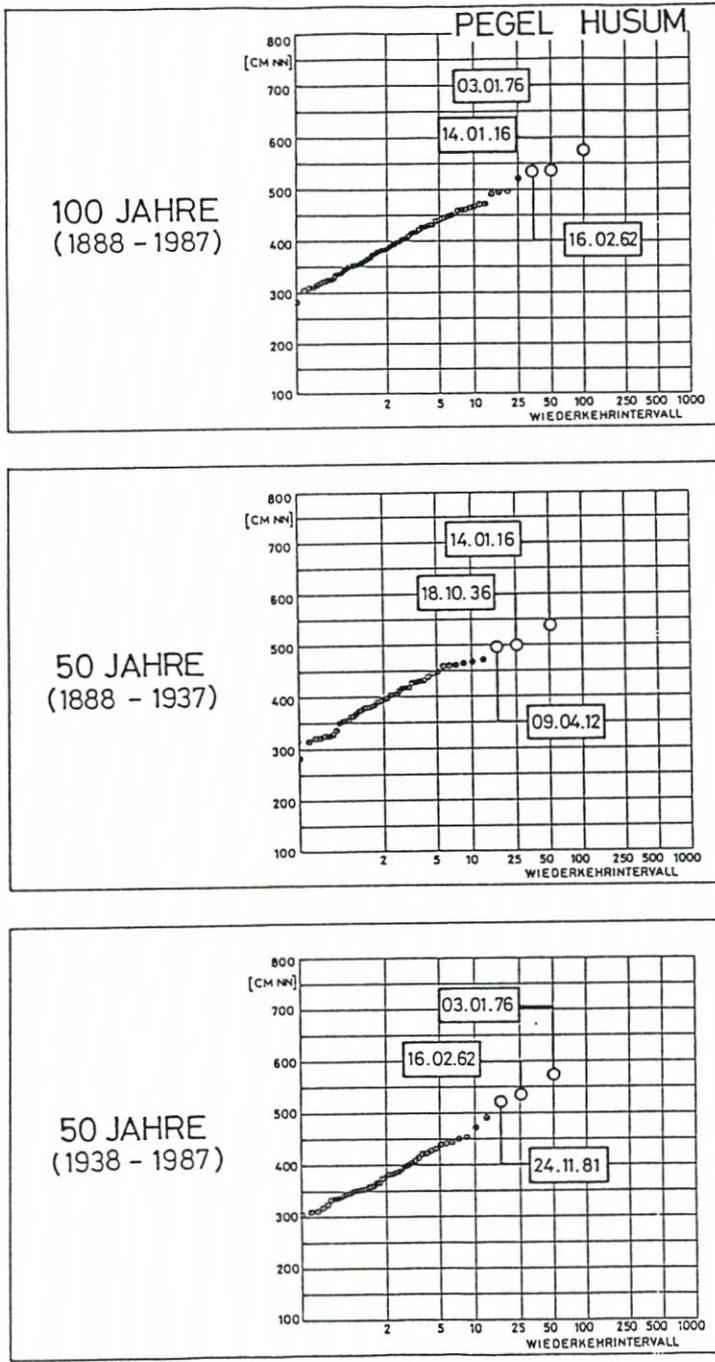


Abb. 2: Pegel HUSUM: Häufigkeitsverteilungen der HThw der Jahresreihen 1888 bis 1987 (100 Jahre, oben), 1888 bis 1937 (50 Jahre, Mitte) und 1938 bis 1987 (50 Jahre, unten) (beschickt auf das Jahr 2000)

2. bei der ersten Fünfzigjahresreihe 1888 bis 1937 (Abb. 2 Mitte) folgen die Punkte einer leicht nach unten gekrümmten Kurve und
3. bei der letzten Fünfzigjahresreihe 1938 bis 1987 (Abb. 2 unten) liegt deutlich eine Verteilung vor, die einer nach oben gekrümmten Kurve entspricht.

Hiermit deutet sich bereits an, daß in den einzelnen Zeitreihen gewisse Änderungen in der Zusammensetzung der Kollektive aufgetreten sind.

Für die Extrapolation auf die Werte H_{100} und H_{1000} ist es nötig, aus den beobachteten Häufigkeiten mathematische Wahrscheinlichkeiten zu berechnen (POISSON, 1841). Hierzu dienen die Verteilungs- oder Anpassungsfunktionen, von denen in der hydrologischen Statistik eine große Anzahl verwendet werden.

Es soll nicht im einzelnen auf die Eignung bzw. Nichteignung sämtlicher bekannter Verteilungs- oder Anpassungsfunktionen eingegangen werden, sondern es werden hier nur Funktionen verwendet, die bereits nach einer Vorauswahl von JENSEN (1985) ausgesucht wurden und die auch in früheren Untersuchungen für die deutsche Nordseeküste verwendet wurden (FÜHRBÖTER et al., 1982 und 1987, FÜHRBÖTER, 1988):

1. PEARSON-III-Verteilung
2. Log.-PEARSON-III-Verteilung
3. GUMBEL-Verteilung
4. Log.-GUMBEL-Verteilung
5. EXPONENTIAL-Verteilung
6. JENKINSON-Verteilung, Verfahren B
7. JENKINSON-Verteilung, Verfahren C

Die Verteilungsfunktionen werden allgemein in Form einer Dichtefunktion $f(x)$ bzw. als Integral der Dichtefunktion $F(x)$ angegeben.

Diese Anpassungsfunktionen der HThw-Zeitreihen können in die hydrologische Grundgleichung:

$$x = \bar{x} + k_T \cdot s_x$$

umformuliert werden. Der normierte Abszissenwert k_T ist dabei abhängig von der gewählten Verteilungsfunktion, der Form der Wahrscheinlichkeitsdichte und von der Unterschreitungswahrscheinlichkeit. Für die HThw-Zeitreihen wird der T-jährliche Wasserstand mit:

$$HThw_T = \overline{HThw} + k_{Tvert} \cdot s_{HThw}$$

berechnet.

Die o. a. Verteilungsfunktionen sowie die Berechnung deren Parameter sind der folgenden Zusammenstellung zu entnehmen:

1. und 2.: PEARSON-III-Verteilungen

Die PEARSON-III-Verteilung ist eine dreiparametrische, unsymmetrische Verteilung.

$$\text{Verteilungsfunktion: } F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{C_2 C_1}{\Gamma \cdot C_1} \cdot (x - C_3)^{(C_1 - 1)} \cdot e^{-C_2 \cdot (x - C_3)}$$

Die Parameter C_1 , C_2 , C_3 werden nach der Momentenschätzmethode berechnet:

$$C_1 = \frac{4}{C_s^2}$$

$$C_2 = \frac{2}{s_x \cdot C_s}$$

$$C_3 = \bar{x} \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{s_x}{\bar{x} \cdot C_s}\right) \quad \text{für } C_s > 0$$

$$\text{bzw. } C_3 = \bar{x} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{s_x}{\bar{x} \cdot C_s}\right) \quad \text{für } C_s < 0$$

3. und 4.: GUMBEL-Verteilungen

Die GUMBEL-Verteilung (EXTREMAL-TYP-I-Verteilung) ist eine zweiparametrische, unsymmetrische Verteilung mit einer konstanten Schiefe von $C_s = 1,1396$ (linksschief).

Verteilungsfunktion: $F(x) = e^{-e^{-(C_1 \cdot (x - C_2))}}$

Die Parameter C_1 und C_2 werden nach der Momentenschätzmethode berechnet:

$$C_1 = \frac{\pi}{\sqrt{6} \cdot s_x}$$

$$C_2 = \bar{x} - \gamma \cdot \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot s_x$$

Dabei ist die Euler-Konstante γ der asymptotische Grenzwert des Mittelwertes \bar{y}_N der reduzierten Variablen:

$$y_T = C_1 \cdot (x - C_2)$$

bei unendlich großem Umfang der Stichprobe, aus der die Maximalwerte gezogen wurden, die die Extremwertverteilung bilden und $\pi/\sqrt{6}$ entspricht dem asymptotischen Grenzwert der Standardabweichung s_N der reduzierten Variablen (TÖPPE, 1988).

Log.-PEARSON- und Log.-GUMBEL-Verteilung

Die Log.-PEARSON- und Log.-GUMBEL-Verteilungen ergeben sich durch Logarithmieren der Variablen x , d. h. $z = \log$ oder $\ln x$.

5.: EXPONENTIAL-Verteilung

Die EXPONENTIAL-Verteilung ist eine einparametrische, unsymmetrische Verteilungsfunktion.

Verteilungsfunktion: $F(x) = 1 - e^{-(C_1 \cdot x)}$

Der Parameter wird nach der Momentenschätzmethode berechnet:

$$C_1 = \frac{1}{\bar{x}}$$

6. und 7.: JENKINSON-Verteilungen

JENKINSON (1955) gibt eine geschlossene Lösung der Extremalverteilungen Typ I, II und III an. Diese Verteilung ist eine zweiparametrische, unsymmetrische Verteilungsfunktion (siehe JENSEN 1985, 1987).

Verteilungsfunktion: $F(x) = e^{-(1 - \frac{x}{C_2})^{1/C_1}}$

Die Berechnung der Parameter erfolgt entsprechend der Momentenschätzmethode:

$$C_2 = s_x + \sqrt{(2C_1)! - (C_1!)^2}$$

$$C_1 = \frac{\ln(s_x/s_{x_2})}{\ln 2}$$

6. JENKINSON-Verfahren B:

Bei dem JENKINSON-Verfahren B wird die Fakultät von C_1 ($C_1!$) empirisch mit einer Näherungsrechnung abgeschätzt:

$$C_1! = e^{(-\gamma \cdot C_1 + (\pi^2/12) \cdot C_1^2)}$$

7. JENKINSON-Verfahren C:

Der Funktionswert x für eine gegebene Stichprobe kann bei der JENKINSON-Verteilung wie folgt angegeben werden:

$$x_T = \bar{x} + C_2 \cdot (C_1! - e^{-C_1 \cdot y_T})$$

mit

$$y_T = -\ln \ln \left(\frac{T}{T-1} \right)$$

Diese Gleichung kann bei Vernachlässigung von $C_1!$ in die dreiparametrische Funktion:

$$x_T = \bar{x} + C_2 \cdot (C_1 - e^{C_3 \cdot \ln \ln \left(\frac{T}{T-1} \right)})$$

umgeschrieben werden.

Nach der Methode der kleinsten Abstandsquadrate werden die Parameter C_1 , C_2 und C_3 mit einer Optimierungsrechnung bestimmt. Gegenüber der Ausgangsgleichung nach JENKINSON wird bei dieser Methode (Verfahren C) der funktionale Zusammenhang zwischen den Parametern C_3 und C_1 ($= C_3!$) vernachlässigt. Eine eingehende Darstellung des Näherungsverfahrens ist bei JENSEN (1987) angegeben.

Diese Anpassungsfunktionen werden auf die Häufigkeitsverteilungen der fünf Pegel mit den drei Zeitreihen angewendet. Als Beispiele sind auf den Abb. 3 (Hundertjahresreihe 1888 bis 1987), Abb. 4 (Fünzigjahresreihe 1888 bis 1937) und Abb. 5 (Fünzigjahresreihe 1938 bis 1987) für den Pegel CUXHAVEN die sieben gewählten Anpassungsfunktionen den jeweiligen Häufigkeitsverteilungen gegenübergestellt. Auch aus Abb. 3 bis 5 geht hervor, daß die Häufigkeitsverteilungen in den drei Zeitreihen entsprechend Abb. 2 (für den Pegel HUSUM) kennzeichnende Unterschiede aufweisen, wobei die letzte Fünzigjahresreihe 1938 bis 1987 wiederum die stärkste nach oben gerichtete Krümmung aufweist; ebenso aber ist zu ersehen, daß die Anpassungsfunktionen in den verschiedenen Bereichen der Wiederkehrintervalle durchaus verschiedene Anpassungsgüten im Bereich der seltenen Ereignisse aufweisen, die durch die höchsten Wasserstände mit den kleinsten Häufigkeiten (= Wahrscheinlichkeiten) definiert sind; dies soll im einzelnen in den folgenden Abschnitten behandelt werden.

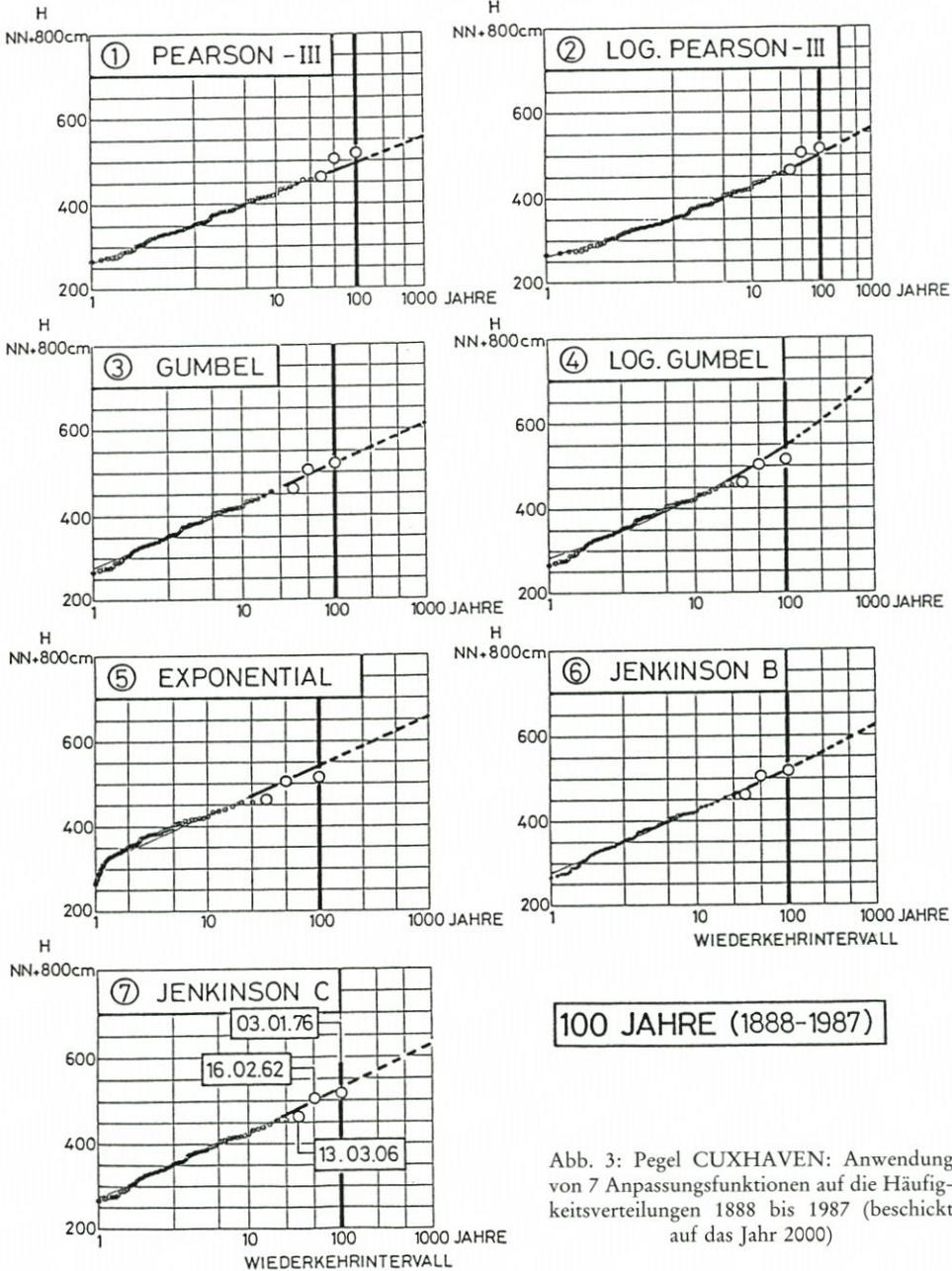


Abb. 3: Pegel CUXHAVEN: Anwendung von 7 Anpassungsfunktionen auf die Häufigkeitsverteilungen 1888 bis 1987 (beschildert auf das Jahr 2000)

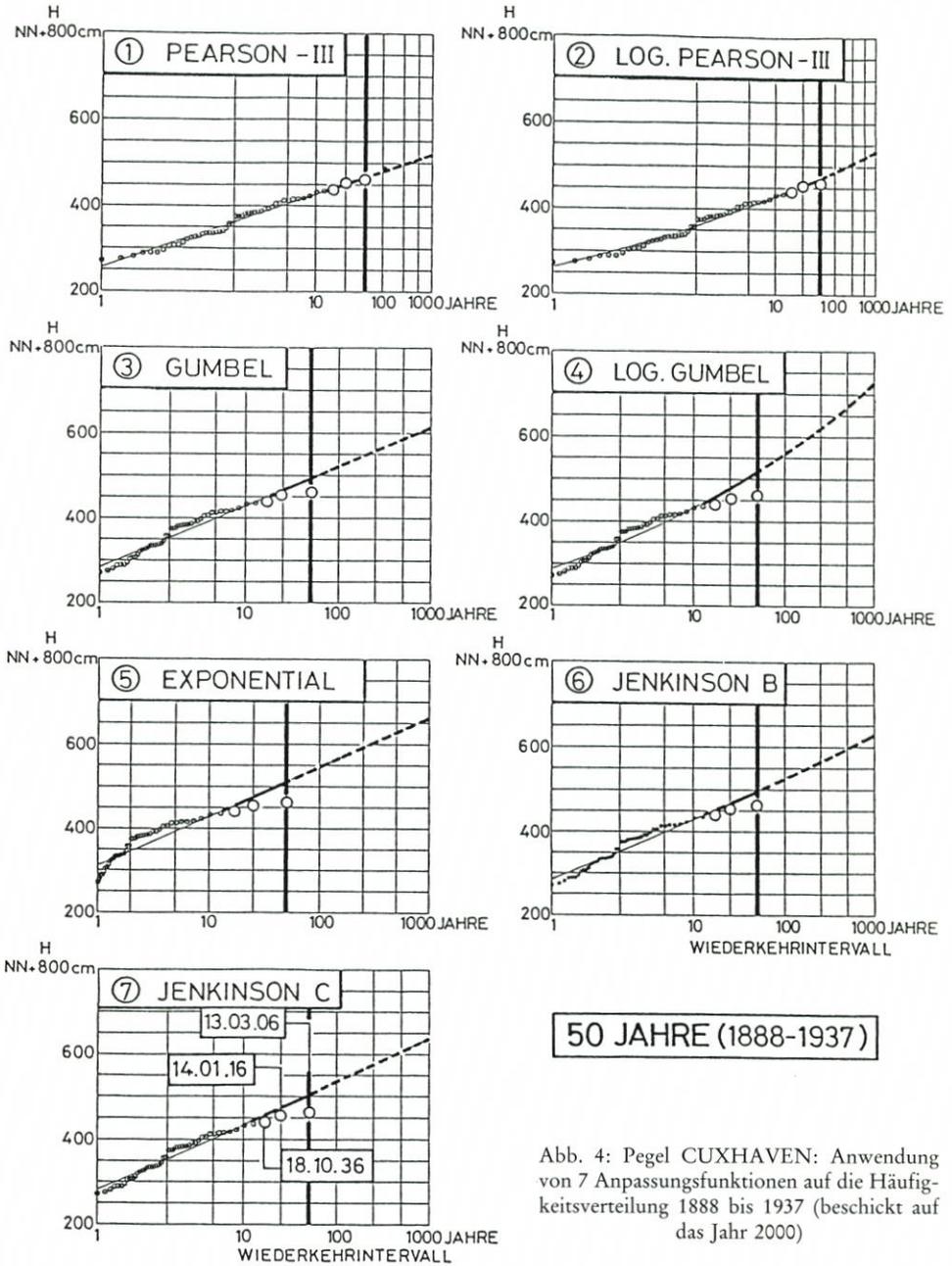


Abb. 4: Pegel CUXHAVEN: Anwendung von 7 Anpassungsfunktionen auf die Häufigkeitsverteilung 1888 bis 1937 (beschickt auf das Jahr 2000)

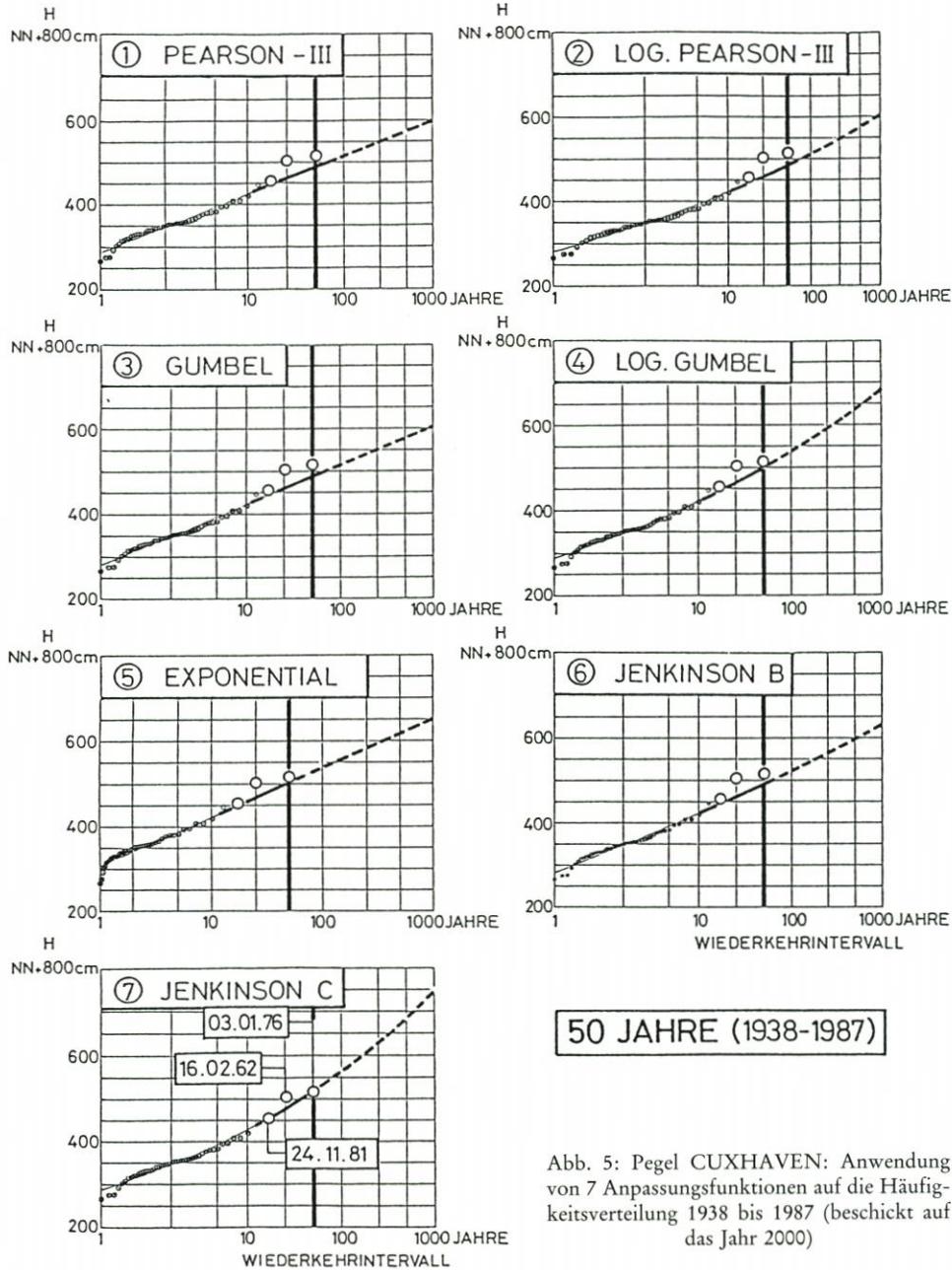


Abb. 5: Pegel CUXHAVEN: Anwendung von 7 Anpassungsfunktionen auf die Häufigkeitsverteilung 1938 bis 1987 (beschickt auf das Jahr 2000)

4. Ergebnisse für die Werte H_{100} und H_{1000} an den einzelnen Pegeln für die sieben verschiedenen Anpassungsfunktionen mit je drei Zeitreihen

Für die fünf ausgesuchten Pegel mit den drei Zeitreihen von 1888 bis 1987 (= 100 Jahre) sowie den beiden Teilzeitreihen 1888 bis 1937 und 1938 bis 1987 (= jeweils 50 Jahre) werden aus den sieben Anpassungsfunktionen die Werte H_{100} und H_{1000} sowie die jeweilige Differenz $H_{1000}-H_{100}$ ermittelt; die Ergebnisse sind auf Abb. 6 (Pegel WILHELMSHAVEN), Abb. 7 (Pegel CUXHAVEN), Abb. 8 (Pegel BÜSUM), Abb. 9 (Pegel HUSUM) und Abb. 10 (Pegel DAGEBÜLL) aufgetragen.

Ein Vergleich der Ergebnisse sowohl für H_{100} als auch für H_{1000} für die einzelnen Anpassungsfunktionen zeigt für alle Pegel (Abb. 6 bis 10), daß die beiden PEARSON-Funktionen (1 und 2) die niedrigsten Wasserstände liefern und deutlich von den übrigen Anpassungsfunktionen abweichen. Es geht auch aus den grafischen Darstellungen auf Abb. 3 bis 5 für den Pegel CUXHAVEN hervor, daß im Bereich der seltenen Ereignisse die Werte der Häufigkeitsverteilungen meist oberhalb der Anpassungskurve liegen. Trotz relativ guter Anpassungsgüte liegt hier im oberen Bereich eine systematische Abweichung zur unsicheren Seite vor; JENSEN (1985) hat gezeigt, daß diese Erscheinung bei fast allen Pegeln und Zeitreihen festzustellen ist.

Bei den GUMBEL-Funktionen (3 und 4) tritt durch die Berücksichtigung des Stichprobenumfanges eine Verbesserung der Anpassung und weitere Erhöhung der Werte H_{100} und H_{1000} ein; so erhöht sich z. B. für die Zeitreihe von 1888 bis 1937 am Pegel WILHELMSHAVEN der Wert H_{100} um 19 cm auf NN + 570 cm und H_{1000} um 29 cm auf NN + 677 cm.

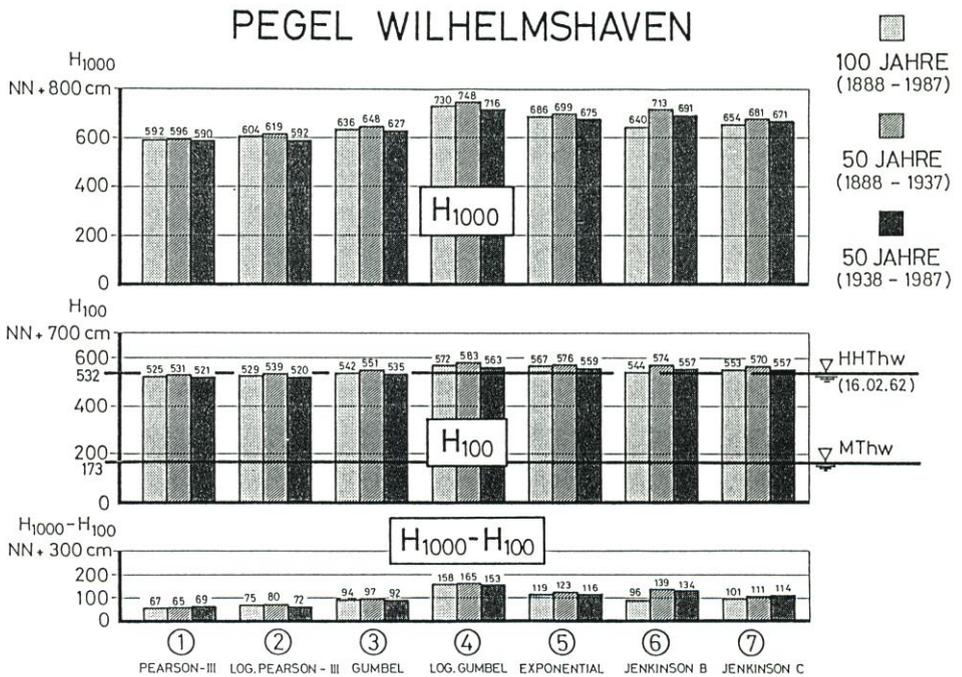


Abb. 6: Pegel WILHELMSHAVEN: Wasserstände H_{1000} , H_{100} und Differenz $H_{1000}-H_{100}$ für verschiedene Anpassungsfunktionen und Zeitreihen (alle Werte beschriftet auf das Jahr 2000)

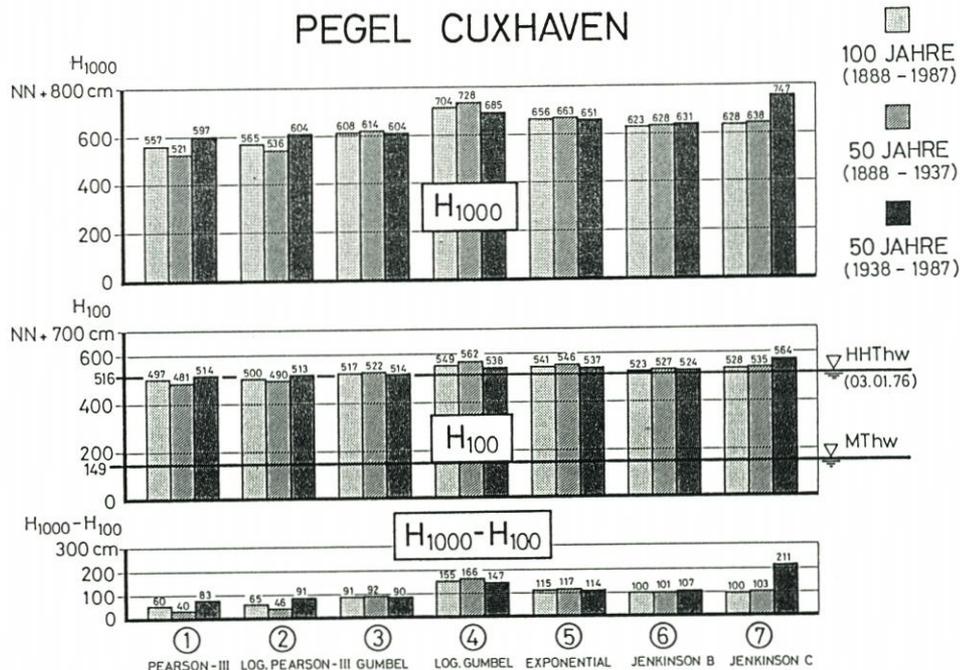


Abb. 7: Pegel CUXHAVEN: Wasserstände H_{1000} , H_{100} und Differenz $H_{1000}-H_{100}$ für verschiedene Anpassungsfunktionen und Zeitreihen (alle Werte beschriftet auf das Jahr 2000)

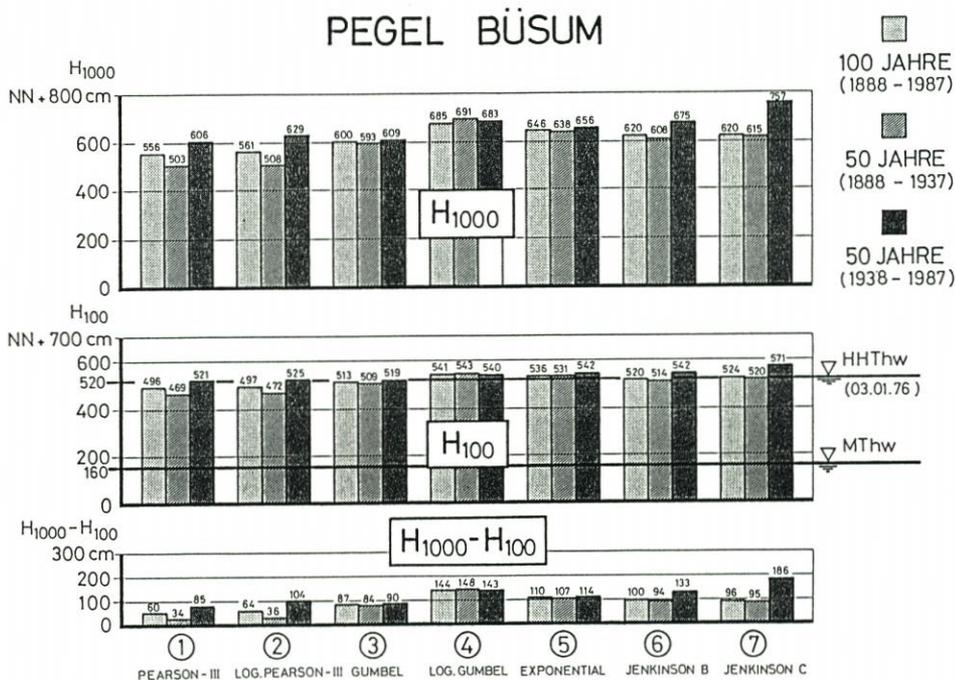


Abb. 8: Pegel BÜSUM: Wasserstände H_{1000} , H_{100} und Differenz $H_{1000}-H_{100}$ für verschiedene Anpassungsfunktionen und Zeitreihen (alle Werte beschriftet auf das Jahr 2000)

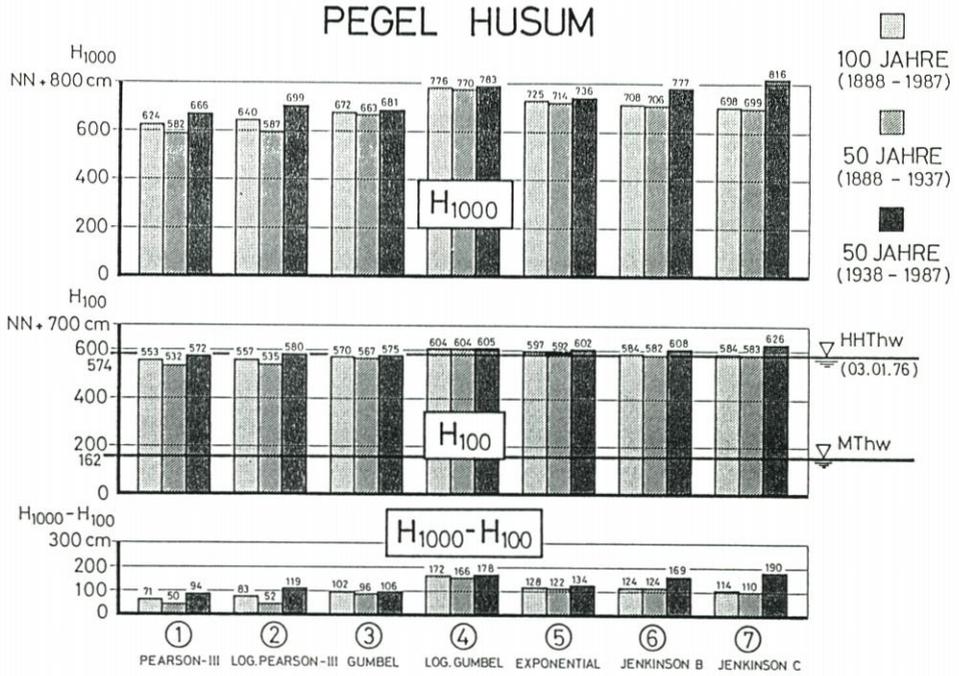


Abb. 9: Pegel HUSUM: Wasserstände H_{1000} , H_{100} und Differenz $H_{1000}-H_{100}$ für verschiedene Anpassungsfunktionen und Zeitreihen (alle Werte beschriftet auf das Jahr 2000)

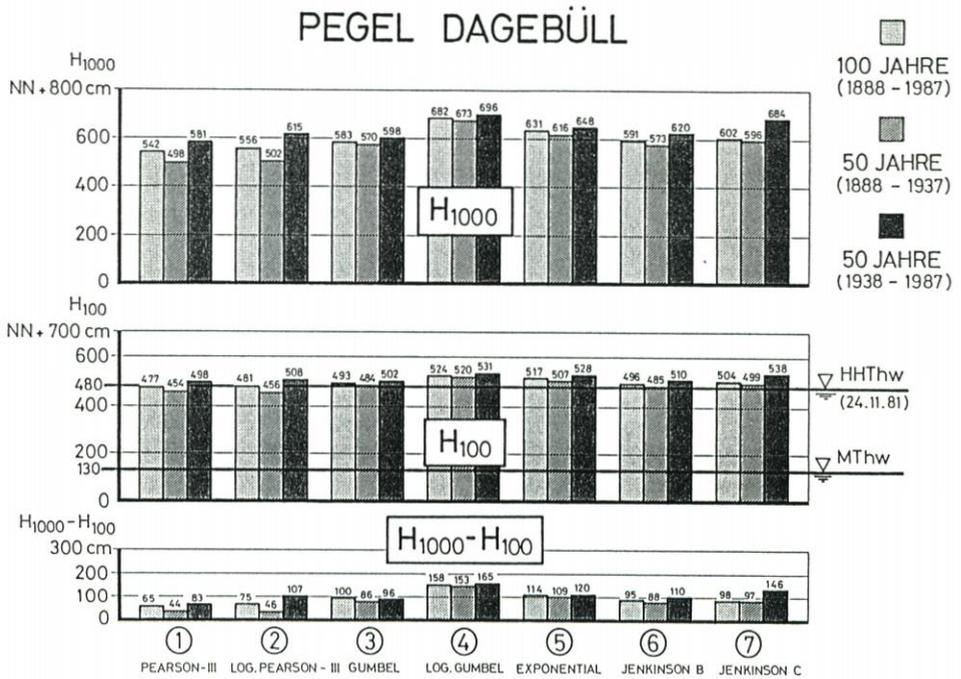


Abb. 10: Pegel DAGEBÜLL: Wasserstände H_{1000} , H_{100} und Differenz $H_{1000}-H_{100}$ für verschiedene Anpassungsfunktionen und Zeitreihen (alle Werte beschriftet auf das Jahr 2000)

Auf die Frage der Anpassungsgüte wird im folgenden Abschnitt eingegangen; werden die Ergebnisse für die einzelnen Pegel und Zeitreihen zusammengefaßt – wobei von den PEARSON-Funktionen abgesehen wird – so können folgende Feststellungen getroffen werden:

1. Die Unterschiede bei den Werten H_{100} zwischen den Ergebnissen der einzelnen Anpassungsfunktionen liegen bei allen Pegeln und Zeitreihen fast immer unter 0,5 m.
2. Die Unterschiede bei den Werten H_{1000} zwischen den Ergebnissen der einzelnen Anpassungsfunktionen liegen bei allen Pegeln und Zeitreihen zwischen 1 und 2 m.
3. Die Wasserstandsdifferenz $H_{1000}-H_{100}$ liegt bei allen Pegeln und Zeitreihen zwischen 1 und 2 m, nur einmal wird der Wert von 2 m überschritten (Pegel CUXHAVEN, Abb. 7: $H_{1000}-H_{100} = 211$ cm).

Der Vergleich der Werte H_{100} mit dem HHThw der letzten 100 Jahre ist zwar nur der Vergleich mit einem einzelnen Zufallswert, dennoch zeigt die Gegenüberstellung auf Abb. 6 bis 10, daß dieser Wert zu dem Wertevorrat der errechneten Werte paßt, wobei die errechneten Werte meist etwas höher als die eingetretenen Werte liegen (mit der erwähnten Ausnahme der PEARSON-Funktion).

5. Anpassungsgüte der Verteilungsfunktionen im Bereich der 10 höchsten Wasserstände

Bei den Ergebnissen für die einzelnen Pegel und Zeitreihen auf Abb. 6 bis 10 stellt sich die Frage, wie weit eine Bewertung der einzelnen Verteilungsfunktionen in bezug auf ihre Anpassungsgüte möglich ist; von Wichtigkeit ist dabei hier nicht die Anpassungsgüte im Bereich der häufigen Ereignisse, sondern im Bereich der höchsten Wasserstände.

Hierzu könnten Konfidenzanalysen o. ä. herangezogen werden (vgl. z. B. TÖPPE, 1988); es kann aber auch ein einfaches Verfahren verwendet werden, bei dem die mittlere Abweichung ΔH der höchsten 10 Werte der Häufigkeitsverteilungen von den entsprechenden Anpassungsfunktionen als Maß für die Anpassungsgüte bei hohen Wasserständen gewählt wird. Bei den Hundertjahresreihen werden dabei 10 %, bei den Fünfzigjahresreihen 20 % sämtlicher Werte erfaßt. Visuelle Vergleiche dieser höchsten Werte mit den entsprechenden Funktionen wurden bereits bei JENSEN (1985) durchgeführt.

Wie die Abb. 6 bis 10 zeigen, liegen die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der einzelnen Verteilungsfunktionen immerhin noch bei rd. 0,5 m; für die Anwendung ist es wichtig zu wissen, ob die Verteilungsfunktionen mit hohen H_{100} -Werten zu denen mit den besten oder schlechtesten Anpassungsgüten zu rechnen sind oder umgekehrt. Zur Klärung dieser Frage kann eine Gegenüberstellung dienen, bei der zu jeder Anpassungsfunktion über die mittlere Abweichung ΔH der obersten 10 Werte der zugehörige Wert H_{100} aufgetragen wird. Für die Jahrhundertreihe 1888 bis 1987 ist diese Auftragung auf Abb. 11 dargestellt; niedrige Abweichungen bedeuten dabei gute, große Abweichungen schlechtere Anpassungsgüten.

Es geht aus Abb. 11 wiederum hervor, daß sich die beiden PEARSON-Funktionen (1 und 2) mit ihren niedrigen Werten für H_{100} (bis zu 2 Dezimetern unter dem eingetretenen Wert des HHThw) abweichend von den übrigen Funktionen verhalten. Für diese kann aber gesagt werden, daß bei allen Pegeln in nahezu gleicher Reihenfolge diejenigen Verteilungsfunktionen die kleinsten Abweichungen ΔH (= besten Anpassungsgüten) aufweisen, bei denen die kleinsten Werte H_{100} auftreten.

Wird die gleiche Auftragung für die ersten Teilzeitreihen von 50 Jahren (1888 bis 1937) vorgenommen, so ändert sich das Bild (mit Ausnahme des Pegels Wilhelmshaven) kaum (Abb.

12), auch die Reihenfolge der Verteilungsfunktionen in bezug auf die Anpassungsgüte bleibt annähernd die gleiche wie bei der Jahrhundertreihe 1888 bis 1987 (Abb. 11).

Wird aber diese Gegenüberstellung für die letzte Teilzeitreihe von 1938 bis 1987 durchgeführt, so ergibt sich ein völlig gegenläufiges Bild; hier liefern diejenigen Funktionen die höchsten Wasserstände H_{100} , die die beste Anpassungsgüte (= kleinste Werte von ΔH) aufweisen (Abb. 13). Entsprechend hat sich auch die Reihenfolge der Verteilungsfunktionen in bezug auf die Anpassungsgüte gegenüber Abb. 11 und 12 geändert. Die beiden PEARSON-Funktionen (1 und 2) ordnen sich hier zwar der Anpassungsgeraden an, weisen aber hohe ΔH -Werte und damit geringe Anpassungsgüten auf (Abb. 13).

Aus Abb. 11 bis 13 geht zunächst als wichtigstes hervor, daß es keine Anpassungsfunktion gibt, die allgemein als die günstigste für alle Zeitreihen angegeben werden kann. Außerdem zeigt aber die Gegenüberstellung von Abb. 12 und Abb. 13 in qualitativer Darstellung, was am Beispiel der Häufigkeitsverteilungen für die verschiedenen Zeitreihen am Pegel HUSUM bereits auf Abb. 2 visuell hervorgeht, daß nämlich das Kollektiv der Sturmfluten der letzten 50 Jahre (1938 bis 1987) erhebliche Abweichungen von denen früherer Zeitreihen aufweist.

6. Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse

Die auf Abb. 6 bis 10 aufgezeigten Streuungen in den Ergebnissen für H_{100} und H_{1000} innerhalb der verschiedenen Anpassungsfunktionen sind, wie erwähnt, unvermeidlich, weil jede Anpassungsfunktion eben nur eine Näherung an die jeweilige Häufigkeitsverteilung sein kann. Bei dem Vergleich der Zeitreihen jedoch ist festzustellen, daß für die Pegel CUXHAVEN, BÜSUM, HUSUM und DAGEBÜLL fast durchweg bei allen Anpassungsfunktionen die letzte Fünfzigjahresreihe 1938 bis 1987 die höchsten Werte liefert.

Dies tritt besonders bei denjenigen Verteilungsfunktionen in Erscheinung, die aufgrund ihrer mathematischen Struktur diejenigen Häufigkeitsverteilungen am besten nähern, die (vgl. Abb. 2 unten) eine deutlich nach oben gerichtete Krümmung aufweisen, wie es bei fast allen Pegeln (auch den hier nicht beschriebenen) für die Jahresreihe 1938 bis 1987 der Fall ist.

Das gilt insbesondere für die JENKINSON-C-Verteilung, die als dreiparametrische Funktion sowohl nach oben als auch nach unten gekrümmte Häufigkeitsverteilungen auch im Bereich der Extremwerte in guter Näherung wiedergibt (JENKINSON, 1955). Quantitativ wird dies durch Abb. 13 bestätigt, wo bei der Jahresreihe 1938 bis 1987 (= 50 Jahre) bei allen Pegeln die JENKINSON-C-Verteilung die kleinste Abweichung und damit die beste Anpassungsgüte für die obersten 10 Wasserstände des Kollektives liefert (mit Ausnahme des Pegels WILHELMSHAVEN, wo sie aber auch dicht an der Spitze liegt, Abb. 13).

Werden die Zeitreihen 1888 bis 1987 (= 100 Jahre) und 1888 bis 1937 (= 50 Jahre) betrachtet, so zeigen in bezug auf die Anpassungsgüte hier zwar fast überall die GUMBEL- und die JENKINSON-B-Funktionen die besten Anpassungsgüten, an dritter Stelle und in unmittelbarer Nähe der erstgenannten Funktionen (3 und 6) folgt aber auch hier die JENKINSON-C-Funktion (7) (Abb. 11 und 12).

Es ist von Interesse, die zeitliche Entwicklung des Sturmflutwasserstandes H_{100} zu verfolgen, was nach dem Gedankenmodell „Vergeßlicher Chronist“ (FÜHRBÖTER 1976) geschehen kann. Hier wird die JENKINSON-C-Funktion mit einem Zeitfenster von 50 Jahren bis 1937 fortlaufend für jedes folgende Jahr bis zum Jahre 1987 angewendet und der Wert H_{100} bestimmt; die Ergebnisse für die fünf untersuchten Pegel sind auf Abb. 14 dargestellt.

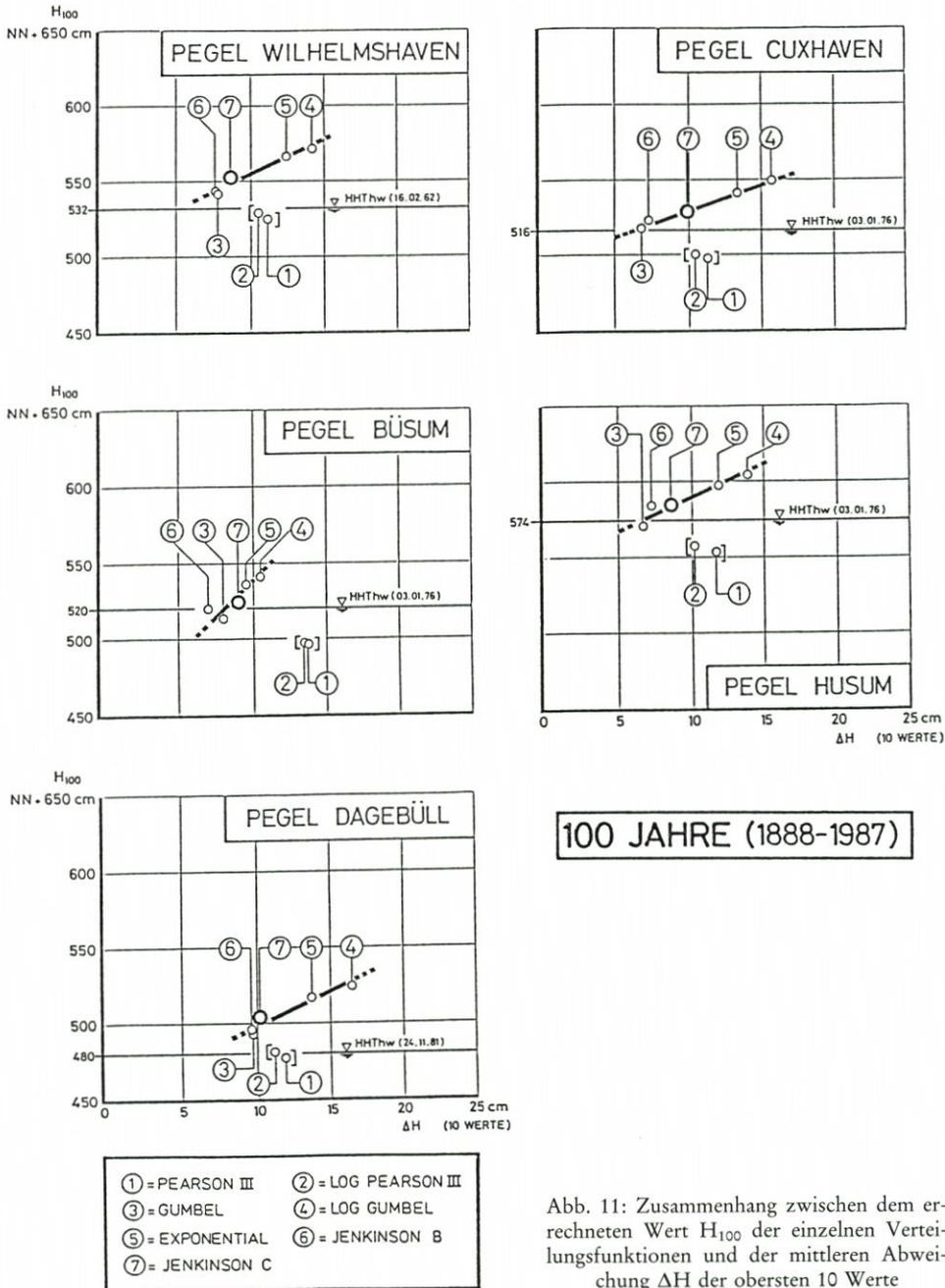
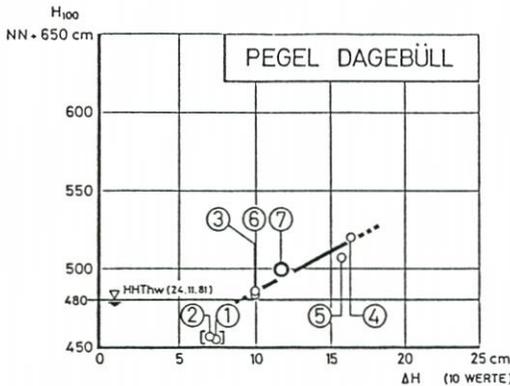
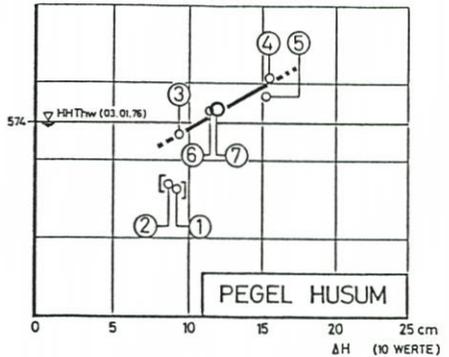
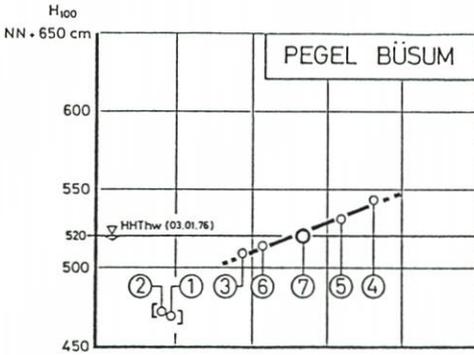
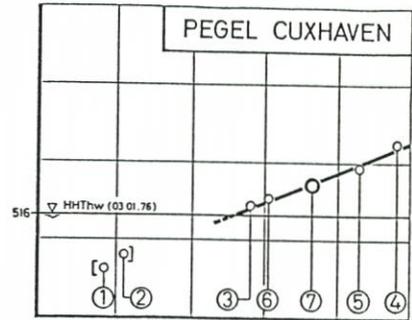
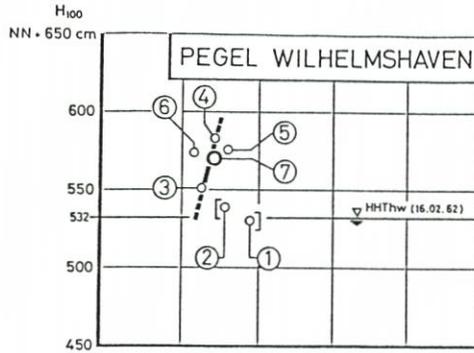


Abb. 11: Zusammenhang zwischen dem errechneten Wert H_{100} der einzelnen Verteilungsfunktionen und der mittleren Abweichung ΔH der obersten 10 Werte

Hier ist nur bei dem Pegel WILHELMSHAVEN eine unregelmäßige Streuung im Dezimeterbereich in den letzten 50 Jahren festzustellen; die Pegel CUXHAVEN, BÜSUM und HUSUM dagegen weisen ab 1962 Diskontinuitäten in Form positiver Sprünge besonders für die Jahre 1962 und 1976 auf (Abb. 14). Bei dem Pegel CUXHAVEN ist dabei PLATE



50 JAHRE (1888-1937)

- ① = PEARSON III ② = LOG PEARSON III
- ③ = GUMBEL ④ = LOG GUMBEL
- ⑤ = EXPONENTIAL ⑥ = JENKINSON B
- ⑦ = JENKINSON C

Abb. 12: Zusammenhang zwischen dem errechneten Wert H_{100} der einzelnen Verteilungsfunktionen und der mittleren Abweichung ΔH der obersten 10 Werte

(1983) beizupflichten, der in seiner Auswertung bis zum Jahre 1975 keine signifikante Änderung der Sturmflutwahrscheinlichkeiten nachweisen konnte; wie aber Abb. 14 zeigt, ändert sich das Bild in den darauffolgenden Jahren. Bei dem Pegel DAGEBÜLL dagegen tritt der stärkste Sprung nach dem Jahre 1981 auf.

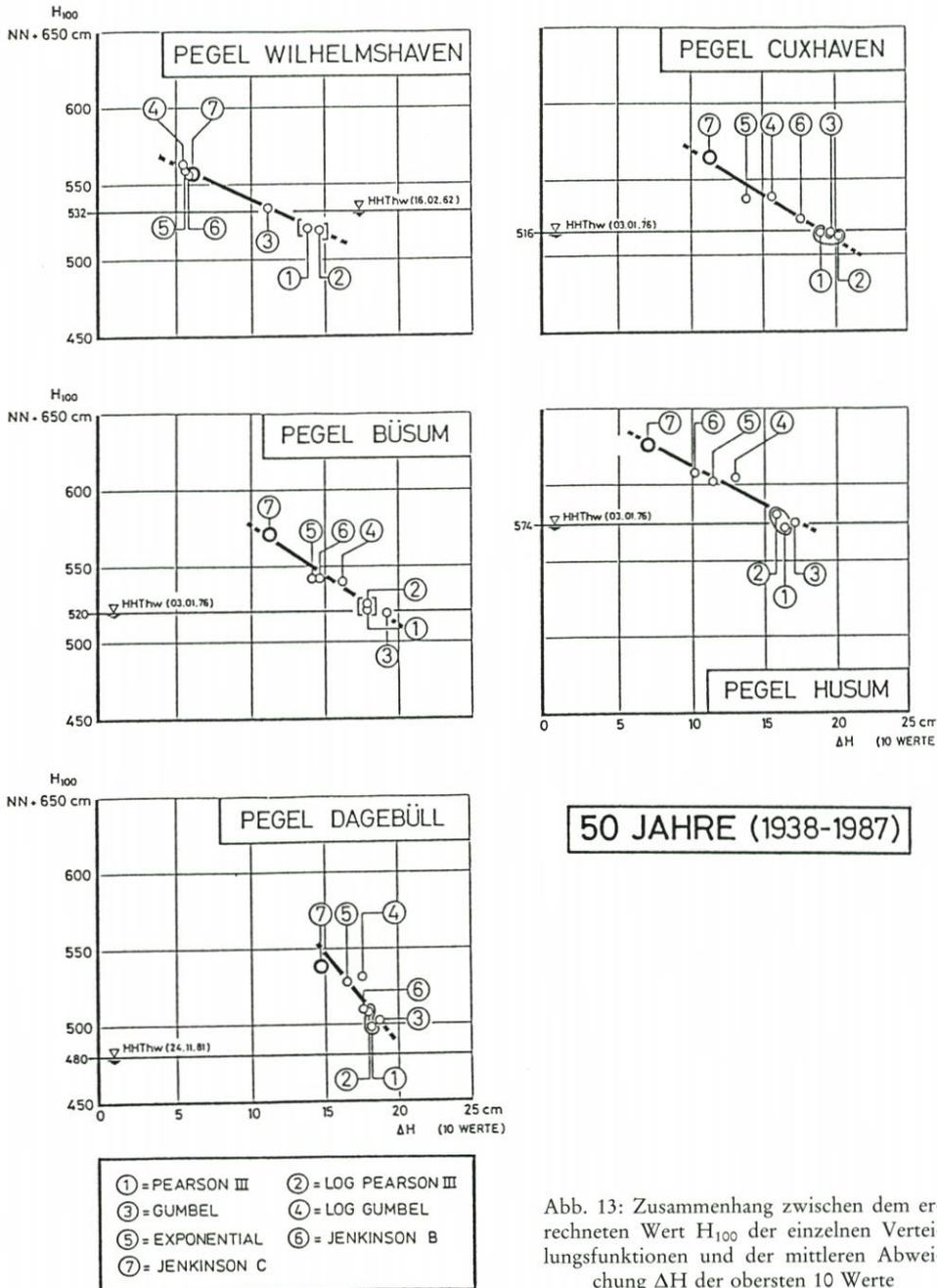


Abb. 13: Zusammenhang zwischen dem errechneten Wert H_{100} der einzelnen Verteilungsfunktionen und der mittleren Abweichung ΔH der obersten 10 Werte

Außerdem ist auf Abb. 14 eine Anwendung der Exponentialfunktion in der Variation nach FÜHRBÖTER (1976) dargestellt, bei der als Kollektiv nur die HTHw von Folgen von je fünf Jahren verwendet werden, wodurch eine bessere Anpassung der Funktion an die Extremwerte erreicht wird. Abb. 14 zeigt zwar Abweichungen im Dezimeterbereich zu den

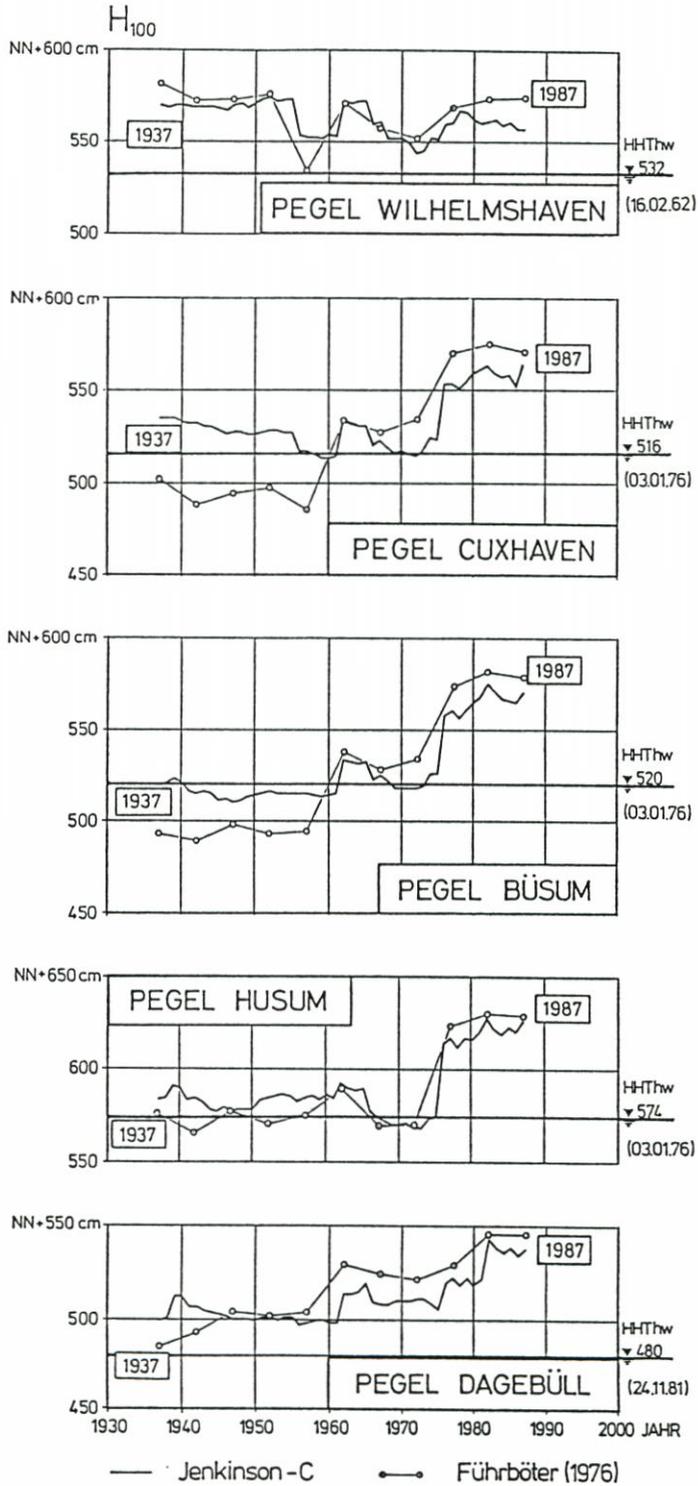


Abb. 14: Zeitliche Entwicklung des Wertes H_{100} in den letzten 50 Jahren vor 1987 (Extrapolation aus einer Zeitreihe von 50 Jahren, alle Werte beschickt auf das Jahr 2000)

Ergebnissen der JENKINSON-C-Funktion, im übrigen aber besteht durchaus eine Übereinstimmung im Verlauf der Kurven (Abb. 14).

Die Veränderungen der Sturmflutwahrscheinlichkeiten – hier durch den Wert H_{100} ausgedrückt – sind eine unmittelbare Folge des Sturmflutgeschehens der letzten Jahrzehnte. So wurde an allen fünf Pegeln mit der Februarsturmflut 1962 ein neues HHThw erzeugt; auch die Sturmflutkette vom November/Dezember 1973 lieferte bei allen Pegeln hohe HThw-Werte in die Kollektive aller Pegel. Östlich der Wesermündung wurde während der Sturmflutfolge vom Januar 1976 am 03.01.1976 das HHThw von 1962 bereits wieder übertroffen; am 24. 11. 1981 trat nochmals ein neues HHThw für die nördlichsten Pegel ein (Pegel DAGEBÜLL, Abb. 14). Zuletzt erbrachte der sturmflutreiche Winter 1982/1983 ebenfalls an allen Pegeln hohe Wasserstände.

Als Extremereignis ist auch die Hollandsturmflut von 1953 zu nennen; im Zusammenhang damit müssen auch zwei meteorologische Extremereignisse der letzten Jahrzehnte gesehen werden, nämlich der ADOLPH-BERMPOHL-Orkan von 1967 mit den höchsten je gemessenen Windgeschwindigkeiten auf der Nordsee und der Katastrophenorkan vom 12. 11. 1972, der auf dem Kontinent von Nordfrankreich bis Polen eine Spur schwerster Zerstörungen, vor allem in den Wäldern hinterließ. Der erstere Orkan führte nur deshalb nicht zu einer Extremsturmflut, weil sein Maximum in die Niedrigwasserzeit fiel, der letztere wegen seiner extrem südlichen Zugbahn.

Daß auch in den letzten Jahrzehnten an der deutschen Nordseeküste ein überdurchschnittlich hoher Anstieg der MThw-Werte festzustellen ist (vgl. z. B. FÜHRBÖTER u. JENSEN, 1985), braucht nicht unbedingt mit der verstärkten Sturm- und Sturmflutaktivität zusammenzuhängen, andererseits kann eine gemeinsame Ursache nicht ausgeschlossen werden. Auf jeden Fall sind exakt-quantitative Kausalketten z. Z. nicht verfügbar, die eine verbindliche Extrapolation auf die Zukunft erlauben.

Vom Sturmflutgeschehen her gesehen, besteht Einigkeit darüber, daß in den letzten Jahrzehnten eine Häufung von Extremsturmfluten an der Nordseeküste stattgefunden hat, deren Folge in der statistischen Auswertung eine Erhöhung der Sturmflutwahrscheinlichkeit ist. Ob dieser Prozeß wieder abklingt oder ob gar eine Zunahme zu erwarten ist, kann derzeit nicht exakt vorausgesagt werden (vgl. FÜHRBÖTER, 1979); in erster Näherung kann aber davon ausgegangen werden, daß das Kollektiv der letzten 50 Jahre auch für die nächste Zukunft bestimmend bleibt.

7. Schriftenverzeichnis

- FÜHRBÖTER, A.: Über zeitliche Änderungen der Wahrscheinlichkeit von Extremsturmfluten an der deutschen Nordseeküste. Mitt. des Leichtweiß-Instituts der Technischen Universität Braunschweig, H. 51, 1976.
- FÜHRBÖTER, A.: Wahrscheinlichkeiten und Häufigkeiten von Extremsturmfluten. Die Küste, H. 34, 1979.
- FÜHRBÖTER, A.: Veränderungen des Säkularanstieges an der deutschen Nordseeküste. Wasser und Boden, 38. Jahrgang, H. 9, 1986.
- FÜHRBÖTER, A.: Über die Wahrscheinlichkeit von Extremsturmfluten an der Westküste Schleswig-Holsteins (Stand 1987) (unveröff.), 1988.
- FÜHRBÖTER, A., DETTE, H. H. u. JENSEN, J.: Zeitliche Veränderungen im Auftreten von Extremsturmfluten an der niedersächsischen Nordseeküste. (unveröff.), 1982.
- FÜHRBÖTER, A. u. JENSEN, J.: Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht. Die Küste, H. 42, 1985.
- FÜHRBÖTER, A.; DETTE, H. H., JENSEN, J. u. SCHULZE, M.: Statistische Betrachtungen zu den Bemessungswasserständen an der niedersächsischen Nordseeküste. (unveröff.), 1987.

- HUNDT, G.: Maßgebliche Sturmfluthöhen für das Deichbestick der schleswig-holsteinischen Westküste. Die Küste, Doppelheft 1/2, 1955.
- JENKINSON, A. F.: The Frequency Distribution of the Annual Maximum (or Minimum) Values of Meteorological Elements. Chapter by Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 81, 1955.
- JENSEN, J.: Ungewöhnliche Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste. Mitt. des Leichtweiß-Instituts der Technischen Universität Braunschweig, H. 83, 1984.
- JENSEN, J.: Über instationäre Entwicklungen der Wasserstände an der deutschen Nordseeküste. Mitt. des Leichtweiß-Instituts der Technischen Universität Braunschweig, H. 88, 1985.
- JENSEN, J.: Anwendungen der JENKINSON-Funktion zur Ermittlung von meteorologischen Bemessungsereignissen. Mitt. des Leichtweiß-Instituts der Technischen Universität Braunschweig, H. 98, 1987.
- LÜDERS, K.: Über die Gültigkeitsdauer des „Bemessungswasserstandes für Seedeiche“ an der niedersächsischen Nordseeküste. Jahresbericht 1969, Band XXI, Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz Norderney, 1971.
- MANIAK, U.: Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, 1988.
- v. MISES: Wahrscheinlichkeit, Statistik und Wahrheit. Springer Verlag, Wien, New York, 4. Auflage, 1972.
- PETERSEN, M.: Über die Grundlagen zur Bemessung der schleswig-holsteinischen Landesschutzdeiche. Die Küste, Doppelheft 1/2, 1955.
- PLATE, E. J.: Zeitreihenuntersuchung der Sturmfluten im Mündungsbereich der Elbe. Die Küste, H. 38, 1983.
- POISSON, S. D.: Lehrbuch der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Deutsche Übersetzung von Dr. Schnuse. G. E. E. Meier Verlag, Braunschweig, 1841.
- RAUDKIVI, A. J.: Hydrology, An Advanced Introduction to Hydrological Processes and Modelling. Pergamon Press, Frankfurt, 1979.
- SCHERENBERG, R.: Generalplan „Deichverstärkung, Deichverkürzung und Küstenschutz in Schleswig-Holstein“. Wasser und Boden, H. 2, 1988.
- SIEFERT, W.: Über das Sturmflutgeschehen in Tideflüssen. Mitt. des Leichtweiß-Instituts der Technischen Universität Braunschweig, H. 63, 1978.
- TÖPPE, A.: Wahrscheinlichkeit von Extremwasserständen an der niedersächsischen Nordseeküste (unveröff.), 1988.
- WEMELSFELDER, P. J.: Wetmatigheden in het optreden van stormvloed. De Ingenieur, No. 9, 1939.