

Über Eintrittswahrscheinlichkeiten von Windstau, Oberwasser und örtlichem Wind in einem Tidefluß am Beispiel der Elbe

VON WINFRIED SIEFERT

Zusammenfassung

In der Einleitung wird skizziert, von welchen Parametern und welcher Wahrscheinlichkeit bestimmter Größen die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Scheitelwasserstandes oder einer Sollhöhe eines Schutzwerkes in der Elbe abhängen. Mit den in Kap. 2.3 und 3.3 dargestellten Ergebnissen steht ein Rüstzeug zur Verfügung, mit dem diese für Hamburg ermittelt werden könnten. Der Sinn der Arbeit wird jedoch nicht darin gesehen, dies im einzelnen durchzuführen, sondern darzulegen, wie kompliziert es in einem Tidefluß ist, Eintrittswahrscheinlichkeiten zu bestimmen. Zugleich ist daraus zu folgern, daß es fast unmöglich ist, eine Bemessung entlang eines Tideflusses unter der Prämisse überall gleicher Eintrittswahrscheinlichkeit vorzunehmen, ganz abgesehen davon, wie eine „Bemessungswahrscheinlichkeit“ in dem Bereich 10^{-4} bis 10^{-6} definiert werden soll.

Nicht zuletzt aus diesem Grunde war die LÄNDERARBEITSGRUPPE (1988) bei der Ermittlung einer Bemessungsturmflut anders vorgegangen.

Summary

In the introduction, a description is given of the parameters and the probabilities of certain factors affecting the statistical occurrence of given water levels used to determine the design height of protective structures in the Elbe. The results found in chapters 2.3 and 3.3 provide a basis for obtaining these values for Hamburg. The goal of this paper is not to present this in detail but rather to document the complexity of calculating the occurrence-probabilities for estuaries. Consequently one can conclude that it is almost impossible to determine design heights over the reach of a tidal river using the hypothesis of identical occurrence probabilities. It is additionally unclear as to how one defines a design probability on the order of 10^{-4} to 10^{-6} .

This is one of the main reasons why the States Working Groupe (LÄNDERARBEITSGRUPPE, 1988) used a different technique for choosing the design storm surge.

Inhalt

Zusammenfassung	171
1. Einleitung.	172
2. Eintrittswahrscheinlichkeiten von Sturmfluten und Oberwasserzufluß	173
2.1 Vorbemerkungen	173
2.2 Bisherige Aussagen	174
2.2.1 Cuxhaven	174
2.2.2 Elbe oberhalb Cuxhavens	177
2.2.3 Hamburg	178
2.3 Neue Ergebnisse	178
3. Eintrittswahrscheinlichkeiten von Sturmfluthöhen und örtlichem Wind bzw. Seegang	183
3.1 Bemerkungen zur Bemessung auf Seegang	183
3.2 Maßgebende Windverhältnisse	186
3.3 Ergebnisse	187
4. Schriftenverzeichnis	189

1. Einleitung

Zur Bemessung der Deichhöhen an der Küste werden zwei grundsätzlich unterschiedliche Verfahren angewendet:

Entweder orientiert man sich an bisher eingetretenen Höchstwerten, zu denen u. U. gewisse Beträge addiert werden, oder man gibt eine bestimmte Eintrittswahrscheinlichkeit für einen Bemessungswert vor und berechnet den zugehörigen Wasserstand. Daneben gibt es dann noch Mischverfahren, die den Höchstwert zur Bemessung ermitteln, der sich nach der jeweils ungünstigeren der beiden oberen Methoden ergibt.

Diese Wege sind für die Küste selbst durchaus angebracht, sie sind aber nicht ohne weiteres auf die Hochwasserschutzanlagen an einem Ästuar übertragbar. Dies hat schon der KÜSTENAUSSCHUß (1969) gezeigt und ist später von der INGENIEURKOMMISSION (1974) und schließlich von der LÄNDERARBEITSGRUPPE (1988) berücksichtigt worden. Denn hier sind die Verhältnisse dadurch komplizierter, daß als zusätzlicher Parameter der Oberwasserzufluß den Wasserstand beeinflusst, und zwar nicht über die Länge des Ästuars gleichmäßig, sondern nach Oberstrom zunehmend. Hinzu kommen weitere Einflüsse wie etwa bauliche Veränderungen. Wie sie sich alle zusammen auf die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Wasserstandes bzw. einer Sollhöhe einer Schutzanlage auswirken, wird im folgenden beispielhaft für Hamburg gezeigt:

Die HThw-Höhe in Hamburg hängt ab von

- dem Ort in Hamburg,
 - dem Zustand der Elbe von See bis Geesthacht (Tiefe, Breite, Rauheit usw.),
 - dem Betrieb der Bauwerke (Sperrwerke vor den Nebenflüssen, Wehr Geesthacht, Entlastungspolder),
 - der Höhe und Haltbarkeit der HWS-Anlagen von See bis oberhalb Hamburgs, also von vier geographisch-topographischen bzw. bautechnischen Parametern sowie von
 - der HThw-Höhe in Cuxhaven, in Verbindung mit
 - dem Tide- bzw. Windstauverlauf in Cuxhaven von rd. 2 h vor $T_{nw_{Cux}}$ bis rd. 1 h nach Thw_{Cux} , d. h. von den astronomischen Tiden und den Windverhältnissen in der Deutschen Bucht,
 - dem Wind über der Elbe bis rd. 2 h vor $HThw_{Hbg}$,
 - dem Oberwasserzufluß Q_0 ,
- also von weiteren vier astronomischen, meteorologischen bzw. hydrologischen Parametern.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Wasserstandes in Hamburg hängt ab von

- der Eintrittswahrscheinlichkeit der für den gewählten Wasserstand zu erwartenden Höhe in Cuxhaven (= $HThw_{Cux}$),
- der Eintrittswahrscheinlichkeit der Höhendifferenz von Cuxhaven zum Ort der Betrachtung (als Ersatz für Tideverlauf in Cuxhaven und Wind über der Elbe; = $\Delta HThw$),
- der Eintrittswahrscheinlichkeit des Q_0 für die Sturmflut.

Voraussetzung ist dabei allerdings, daß die ersten vier obigen Parameter unverändert bleiben. Andernfalls werden die Zusammenhänge erheblich komplizierter.

Ob diese drei letzten Parameter voneinander abhängen, wurde mit drei verschiedenen Sturmflutkollektiven (199 Ereignisse aus 1901 bis 1990; 85 Ereignisse aus 1946 bis 1990; 43 Ereignisse aus 1976 bis 1990) untersucht. Die Regressionsrechnungen mit den beiden großen Datenkollektiven zeigen keine Zusammenhänge. Allenfalls für das Kollektiv aus den letzten

15 Jahren, nach weitgehender Fertigstellung der Baumaßnahmen, lassen sich (zufällig?) lose Zusammenhänge erkennen, die jedoch mit Vorsicht zu verwenden sind. So kann danach für Hbg-St. Pauli allenfalls mit großer Unsicherheit gesagt werden, daß ΔH_{Thw} bei 1000 m/s Q_0 -Zunahme um 12 ± 21 cm ansteigt.

Wenn davon auszugehen ist, daß diese drei Parameter voneinander unabhängig sind, ist für einen Bemessungswasserstand (BW) in Hamburg die Eintrittswahrscheinlichkeit $p(BW_{Hbg})$ über

$$p(BW_{Hbg}) = p(BW_{Cux}) \cdot p(\Delta BW_{Hbg} - Cux) \cdot p(Q_0)$$

zu ermitteln. Zu bedenken ist dabei aber auch, daß verschiedene Kombinationen von BW_{Cux} , ΔBW und Q_0 zu gleichen BW_{Hbg} führen können, woraus sich als endgültiges Ergebnis eine Summe von Eintrittswahrscheinlichkeiten $\sum p_i(BW_{Hbg})$ ergibt.

Für die Sollhöhe (SH) errechnet sich $p(SH)$ dagegen als Funktion von

- BW am Ort (wie oben für Hbg dargestellt) und
- Seegangseinfluß (als Funktion der Windverhältnisse am Ort) um die BW-Eintrittszeit.

Diese Parameter sind allerdings nicht vollständig unabhängig voneinander, hängen aber nur lose zusammen:

$$p(SH) = p(BW) \cdot \alpha \cdot p(V_{Wind}) \cdot \beta \cdot p(Ri_{Wind})$$

Es wird also deutlich, daß deterministische wie stochastische Bemessungsverfahren erhebliche Schwierigkeiten hinsichtlich einer klaren Aussage enthalten.

2. Eintrittswahrscheinlichkeiten von Sturmfluten und Oberwasserzufluß

2.1 Vorbemerkungen

Wenn eine ausreichend große Zahl bestimmter Ereignisse in einem Datensatz erfaßt worden ist, kann deren Häufigkeit festgestellt werden. So ist also (nach Brockhaus) die Häufigkeit eine Zahl (g), die angibt, wie oft ein bestimmtes Ereignis, z. B. eine bestimmte Augenzahl beim Würfeln oder bei Messung einer physikalischen Größe ein bestimmter Meßwert, bei n-maliger Möglichkeit seines Eintreffens (n-malige Messung) tatsächlich eintritt; als relative Häufigkeit dieses Ereignisses wird der Quotient g/n bezeichnet. Die Gesamtheit der sich ergebenden Zahlen g bildet die Häufigkeitsverteilung. Sie gibt an, welche Häufigkeiten den verschiedenen Werten einer Reihe von Ereignissen (bzw. einer Zufallsvariablen oder Variablen) zukommt.

Die graphische Darstellung der Häufigkeitsverteilung wird als Häufigkeitskurve bezeichnet. Bei Beobachtungen einer Variablen wird das Gebiet der Argumentwerte in Klassen meist gleicher Breite (Klassenintervall) eingeteilt und die sogenannte Klassenhäufigkeit angegeben. Durch Summierung der Klassenhäufigkeiten können Über- bzw. Unterschreitungswahrscheinlichkeiten unterer bzw. oberer Klassengrenzen festgestellt werden. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten sehr seltener Ereignisse werden dadurch zu ermitteln versucht, daß man Summenhäufigkeitskurven durch theoretische Verteilungsfunktionen anpaßt und letztere extrapoliert.

Der reziproke Wert der Eintrittswahrscheinlichkeit wird heute vielfach – und selbst für die Praxis oft mißverständlich – als Wiederkehrperiode bezeichnet.

Wenn mehrere Variable vorhanden sind, wie etwa in einem Tidefluß, dann müssen Häufigkeit und Eintrittswahrscheinlichkeit von Ereignissen unter Berücksichtigung aller

Windstau Cuxhaven

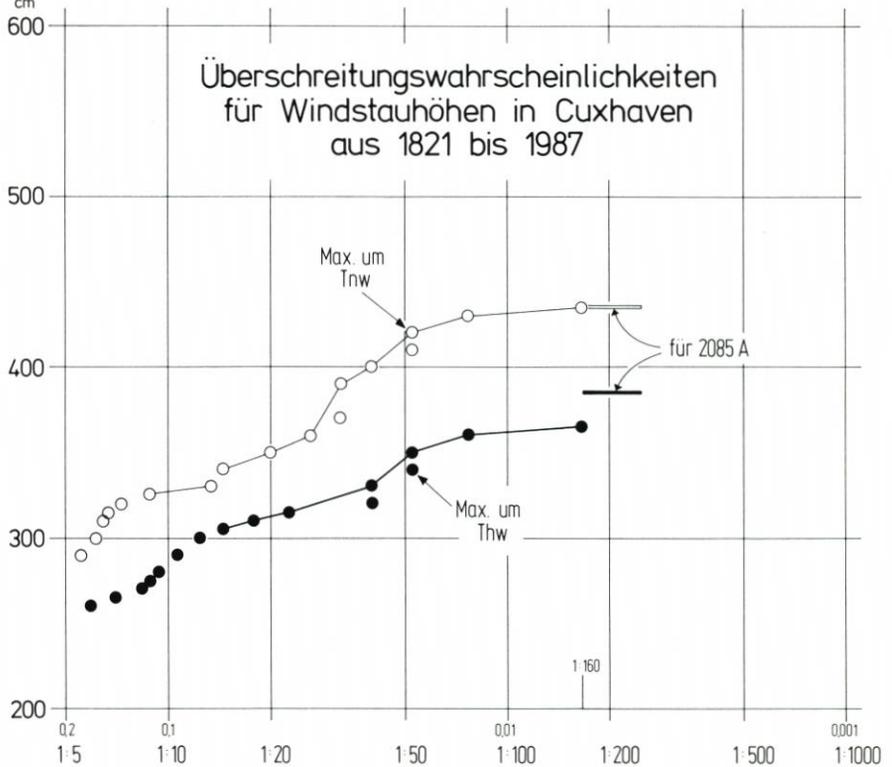


Abb. 1. Überschreitungswahrscheinlichkeiten für Windstauhöhen in Cuxhaven mit Angabe der für die Bemessungsturmflut 2085A verwendeten Werte (LÄNDERARBEITSGRUPPE, 1988)

Parameter bestimmt werden. Das ist bisher für kein deutsches Ästuar geschehen. Außerdem hängen beide vom verwendeten Datensatz (Auswahl der Daten und Datenzeitraum) ab, was nur selten bedacht und untersucht wird.

2.2 Bisherige Aussagen

2.2.1 Cuxhaven

Die bisherigen Aussagen gehen fast ausschließlich vom Scheitelwasserstand (HThw) einer Sturmflut aus, obwohl bekannt ist, daß man strenggenommen zunächst den stochastischen Anteil (Windstau) vom deterministischen (Tide) trennen muß. Siehe dazu SAS (1985) und LÄNDERARBEITSGRUPPE (1988). Entsprechend wurden in letzterer Arbeit die höchsten Windstauwerte als Datenbasis verwendet, wie sie um astron. Thw ± 1 h in Cuxhaven auftraten. Diese wurden im halblogarithmischen Maßstab aufgetragen und durch eine Gerade angenähert (Abb. 1). Genauso kann man natürlich mit den Maxima um $Tnw_{Cux} \pm 1$ h verfahren. Abb. 1 zeigt, daß sie höher liegen. Hier ist also der Zusammenhang zwischen Windstau und Tide offenbar.

Führt man diese Prozedur, die weitgehend unabhängig von Tideänderungen ist, für alle

Sturmfluten seit 1821 durch¹, so ergibt das zur Bemessungssturmflut 2085A gewählte Maximum von 385 cm eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 330 Jahren. Neben der Auswahl der Daten beeinflusst aber auch der Zeitraum, aus dem und wie daraus Daten gewählt werden, das Ergebnis:

Verwendet man lediglich die Windstaumaxima der 50 höchsten HThw von 1936 bis 1985, so erhält man eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von einmal in rd. 70 Jahren. Die Windstaumaxima der 50 Jahres-HThw von 1936 bis 1985 liefern: einmal in rd. 55 Jahren (Abb. 2). Ob man aber nun die Höchstwerte eines Kollektivs (wie WEMELSFELDER es etwa in den grundlegenden niederländischen Arbeiten und wie es auch HUNDT für Schleswig-Holstein gemacht haben) oder nur aus jedem gewässerkundlichen Jahr den Höchstwert (also Datengleich Jahresanzahl) nehmen soll/muß/darf, ist äußerst umstritten.

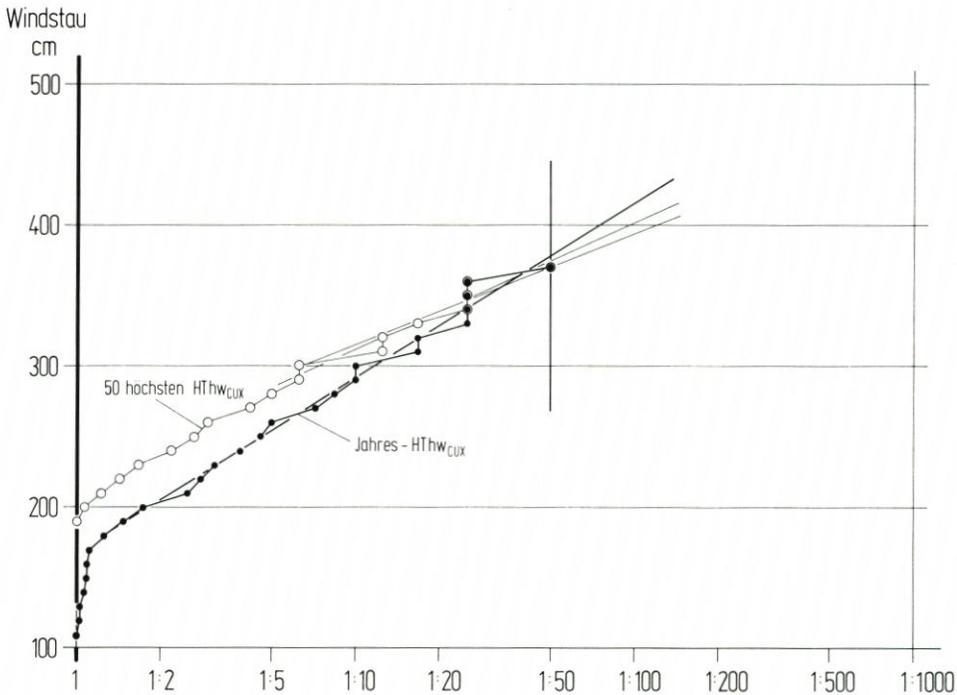


Abb. 2. Überschreitungswahrscheinlichkeiten für Windstauhöhen in Cuxhaven 1936 bis 1985 um HThw für die 50 höchsten HThw_{Cux} (oben) bzw. für die 50 Jahres-HThw_{Cux}

So weit, wie oben geschildert, gehen in unserem Lande die Untersuchungen ohnehin nicht ins Detail. Zur Bestimmung der jeweiligen Anpassungsfunktionen wurden bisher praktisch nur HThw als Daten verwendet. Dadurch wurde keine Trennung des stochastischen vom deterministischen Anteil erreicht. Wenn zudem nur die Jahresmaxima berücksichtigt werden, werden auch nicht alle hohen Ereignisse erfaßt. Zu letzterem sei an Hand der Sturmfluten von 1901 bis 1988 folgendes angemerkt:

- In Cuxhaven traten (unbeschickt!) in dieser Zeit 198 Scheitelhöhen über 3 m NN auf;

¹ Quellen für die Daten: SIEFERT (1969) und STROM- UND HAFENBAU (1985)

- wenn in einer Statistik nur die 88 Jahres-HThw berücksichtigt werden, so entfallen:
 98 Ereignisse mit HThw von 3,0 bis 3,5 m NN
 23 Ereignisse mit HThw von 3,5 bis 4,0 m NN
 6 Ereignisse mit HThw über 4,0 m NN
- berücksichtigt werden also nur 71 der 198 Ereignisse oder 36 %, dazu aber noch 17 Scheitelhöhen unter 3 m NN, was natürlich zu relativ steilen Anpassungsfunktionen im unteren Bereich führt (Abb. 2).
- Ein Argument zur Verwendung von Jahres-HThw ist die „Sicherstellung der Unabhängigkeit der Ereignisse voneinander“, d.h. daß nicht durch eine Großwetterlage mehrere Sturmfluten erzeugt werden, die dann alle in die Berechnung eingehen. Um dies zu vermeiden, müßte jedoch ein Zeitfenster verwendet werden (etwa: Unabhängigkeit ist erreicht, wenn Ereignisse mehr als 3 Mon. nacheinander auftreten). Wie dicht nämlich Jahres-HThw hydrologischer Jahre zusammenliegen, zeigt folgende Liste:
 07. 10. / 09. 11. 04 18. 10. / 01. 12. 36
 18. 09. / 12. 11. 14 19. 10. / 08. 12. 41
 26. 10. / 02. 12. 17 14. 10. / 22. 11. 63
 23. 10. / 02. 11. 21 03. 10. / 10. 11. 70
 10. 10. / 19. 12. 23 01. 10. / 31. 12. 77

Wenn man trotz all dieser Bedenken die sog. Wiederkehrperiode für den Wasserstand 5,65 m NN in Cuxhaven nach verschiedenen Zeitreihen und Anpassungsfunktionen (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) ermittelt, so ergibt sich das Bild der folgenden Tabelle:

Zeitreihe	Dauer Jahre	Wiederkehrper. für 5,65 m NN Jahre	Bemerkung
1786-1985	200	750	alle HThw > 4,4 m NN; beschießt auf 1980; vor 1856 unsicher
1856-1985	130	440	alle HThw > 4,2 m NN; beschießt auf 1980
1886-1985	100	200	Jahres-HThw; beschießt auf 2000; Jenkinson C
1936-1985	50	110	Jahres-HThw; beschießt auf 2000; Jenkinson C
1938-1987	50	100	Jahres-HThw; beschießt auf 2000; Jenkinson C
1936-1985	50	200	Jahres-HThw; beschießt auf 2000; lin. Regr. nach JENSEN (1987)
1936-1985	50	150	50 höchste Einzelwerte; beschießt auf 2000
1821-1987	167	330	Windstau-Statistik; Funktion für Thw-Stau 385 cm (Abb. 1)
1886-1985	100	300	HThw von jeweils 5 Jahren (20 Werte); beschießt auf 1980; nach MOTOR COLUMBUS (1986)
1717-1985	270	5000	wie vor, erweitert durch frühe Ereignisse; nach MOTOR COLUMBUS (1986)
1850-1975	125	500	Jahres-HThw; beschießt auf 1980; Pearson III nach PLATE (1983)

Ohne Berücksichtigung des Ausreißers liegen die Ergebnisse immerhin zwischen 100 und 750 Jahren. Und dabei ist festzustellen, daß keines ausgesprochen falsch ist, wobei die Ermittlung über den Windstau physikalisch anders ist.

Einen weiteren Anhalt liefert die von Experten vertretene Meinung, daß die Anpassungs-

funktionen längstens bis auf das Vierfache des Datenzeitraumes zuverlässig sind. Das macht Abb. 3 deutlich.

Meist findet man auch keine stichhaltige Begründung für die Wahl einer bestimmten Funktion oder Angaben über den Vertrauensbereich der extrapolierten Werte.

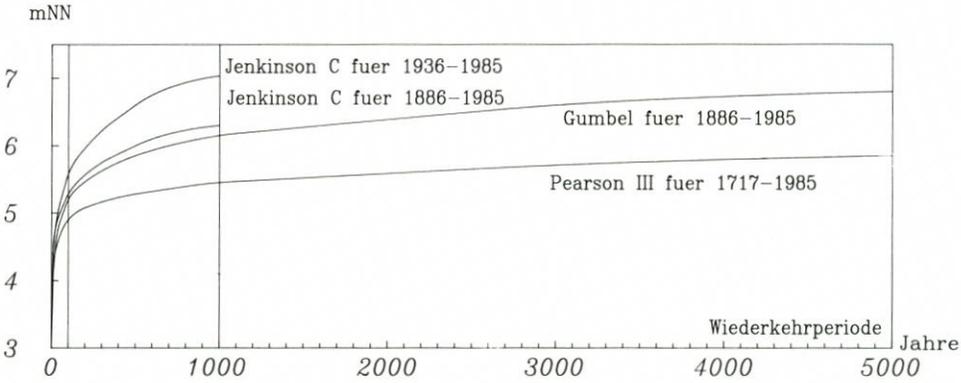


Abb. 3. Wiederkehrperioden für HThw_{Cux} bei linearer Abszisse

2.2.2 Elbe oberhalb Cuxhavens

Für den Bereich der Unterelbe, dessen HThw nicht (wesentlich) durch Q_0 beeinflusst wird, ist die Wiederkehrperiode länger als in Cuxhaven, da die örtlichen HThw (2085A) aus der ungünstigsten Windstaukurve in Cuxhaven stammen. Oder: wenn die Höhe 5,65 m NN in Cuxhaven erreicht wird, treten stromauf wahrscheinlich niedrigere HThw auf als bei der Bemessungssturmflut!

Für den Elbebereich, dessen HThw merklich durch Q_0 beeinflusst wird, muß die Wiederkehrperiode ferner durch Berücksichtigung des gemeinsamen Auftretens hohen Windstaus und großen Zuflusses ermittelt werden. Nach MANIAK (1987) sind beide unabhängig voneinander. Um einen Eindruck von dieser Tatsache zu gewinnen, sind seine Werte nach der log. Pearson III bzw. der ari. Pearson III-Verteilung für die HThw 1931/82 geeignet:

Wiederk.-Per. (Jahre)	HThw in cm NN					
	Cuxhaven		Hbg.-St. Pauli		Zollenspieker	
	log	ari	log	ari	log	ari
1000	608	598	818	788	739	730
200	542	538	702	691	664	661
100	513	511	654	648	631	630
50	484	484	606	605	599	598

Wenn auch für St. Pauli und Zollenspieker nicht der Einfluß der Baumaßnahmen berücksichtigt wurde, so zeigt dies doch schon, daß

bei gleicher Wiederkehrperiode hohe HThw in Zollenspieker deutlich niedriger als in Hamburg

sind. Andererseits bedeutet es folgendes: Der zum Wasserstand 5,65 m NN in Cuxhaven zugehörige Wert von 7,3 m NN in Hamburg hat eine Wiederkehrperiode von 400 bis 500 Jahren, der zugehörige von 7,6 m NN in Zollenspieker von weit über 1000 Jahren!

Auch sei darauf verwiesen, daß der für die Bemessungsturmflut gewählte Zufluß von $2200 \text{ m}^3/\text{s}$, der auf die Höhe der oberen Pegel, nicht aber auf die in Cuxhaven wirkt, in den 59 Jahren 1926/84 an 4 von 365 Tagen i. M. überschritten wurde, mithin also eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von höchstens $4/365 \approx 1:100$ hat. Mehrere Tage anhaltende Hochwasser dieser Größe treten nur alle paar Jahre auf.

2.2.3 Hamburg

Die Eintrittswahrscheinlichkeiten für Hamburg sind wesentlich schwieriger als für die Mündung zu bestimmen, weil sie u. a. von der Höhe von Windstau und Tide in Cuxhaven, vom Oberwasserzufluß der Elbe und von baulichen Veränderungen im Fluß abhängen. Letztere machen das Datenkollektiv inhomogen. Ohne diese Tatsache berücksichtigt zu haben, sind also Aussagen wie

- der Wasserstand 6,7 m NN hat eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von 1:1570 Jahre (Gutachten, Unabh. Komm. Sturmfluten, Freie und Hansestadt Hamburg, Baubehörde, 1965) oder
 - die „höchste denkbare Sturmflut“ erreicht 7,4 m NN, was einer Wiederkehrperiode von 600 bis 1000 Jahren entspricht (PLATE, 1983) oder
 - die Bemessungsturmflut 2085A mit 7,3 m NN hat eine Wiederkehrperiode von etwa 4000 Jahren (MOTOR COLUMBUS, 1986)
- recht fragwürdig.

Deswegen ist der bessere Weg, wenn man schon Wahrscheinlichkeiten für Hamburg ermitteln will, von den Randwerten auszugehen. Dazu sei auf die Ausführungen in der Einleitung verwiesen. Die LÄNDERARBEITSGRUPPE (1988) hat lediglich für Cuxhaven eine Eintrittswahrscheinlichkeit angegeben.

Für den Weg, einen langfristigen Bemessungswert festzulegen, stellt SAS (1985) Untersuchungen für (die mit Hamburg vergleichbare Lage von) Antwerpen vor. Er weist nach, daß wegen der Zunahme der Stürme in den letzten Jahren die Verwendung jährlicher HThw kritisch ist und daß die extrapolierten Höhen höher werden, je kürzer die gewählte Zeitreihe ist.

Schon GRAFF und BLACKMAN (1978) fordern, bei der Extremwertmethode eine möglichst lange Zeitreihe zu verwenden. Zuverlässige Extrapolationen erwarten sie bis „vielleicht zum Vierfachen der verwendeten Zeitreihe“, d.h. für eine Zeitreihe von 50 Jahren. Bis zur Wiederkehrperiode von 250 Jahren sind Aussagen möglich, nicht aber bis 1000 Jahre. Dabei ist ferner zu bedenken, daß man extreme Wasserstände physikalisch sinnvoll nur über entsprechende Stürme über der Nordsee bestimmen kann, wie dies SALIH et al. (1988) versuchen.

2.3 Neue Ergebnisse

Wie bereits in den Vorbemerkungen erwähnt, ist bei einer Vielzahl von Parametern deren Einfluß zur Bestimmung gemeinsamer Häufigkeiten zu berücksichtigen. Dies zeigen z. B. eine ganze Reihe britischer Arbeiten, vor allem aus dem INSTITUT OF OCEAN SCIENCES, aber auch SAS (1985) zur Überlagerung Tide/Windstau. Zur gemeinsamen Häufigkeit von Sturmfluthöhen und Oberwasser wird einleitend auf den Bericht der WMO (1988) verwiesen, woraus auch das Beispiel auf Abb. 4 stammt. Es zeigt für den Rhein von See (Hoek van

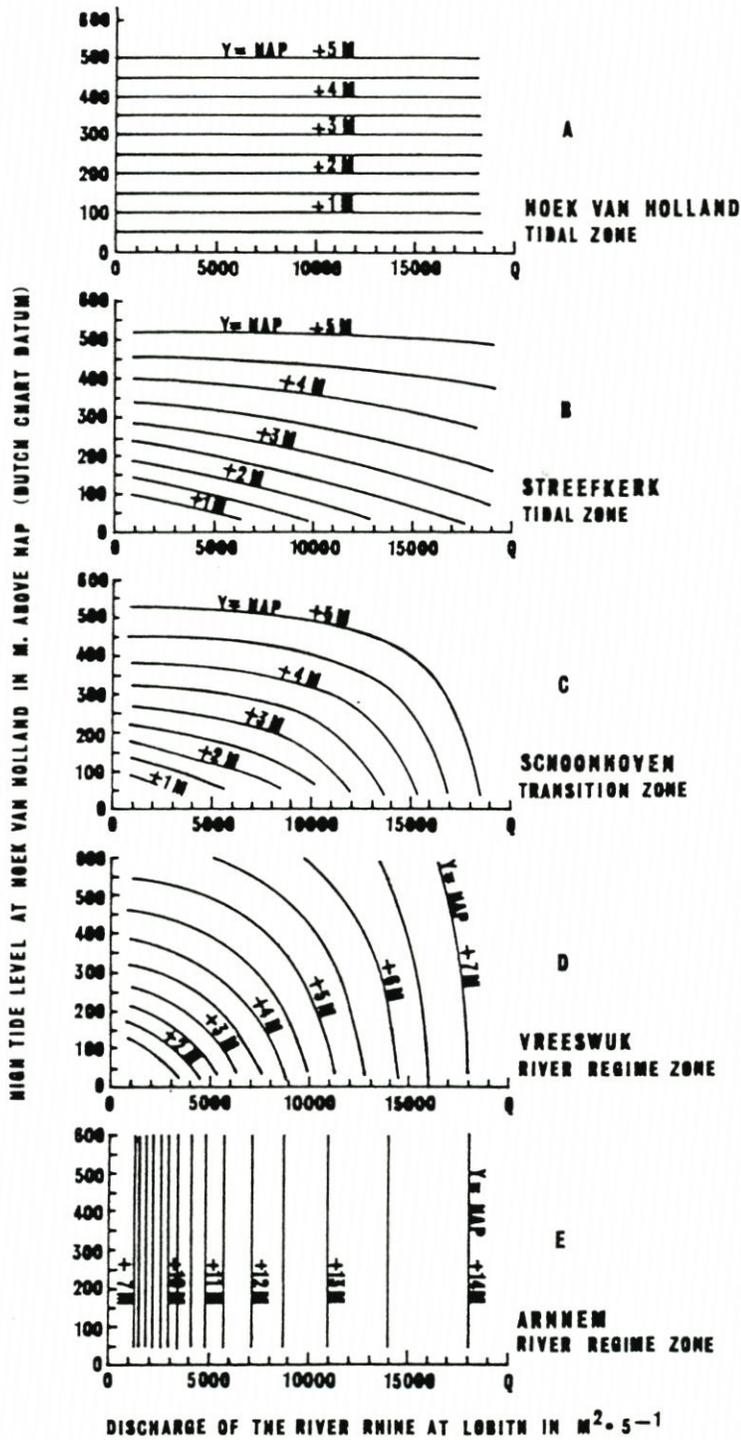


Abb. 4. Kombinationen von Abfluß (Abszisse) und Tidewasserstand an der Flußmündung für verschiedene Stationen am unteren Rhein (aus WMO, 1988, nach VAN DER MADE)

Holland) bis Arnheim sehr deutlich die sich ändernde Abhängigkeit der lokalen Wasserstände zunächst nur von der Tide, schließlich nur vom Oberwasser.

In der genannten Arbeit heißt es zur Ermittlung der gemeinsamen Wahrscheinlichkeit für zwei Variable u. a. etwa wie folgt:

Wenn das HThw an der Küste x und der Oberwasserzufluß y sind, so ist der Wasserstand z an einem interessierenden Punkt eine Funktion von x und y , wenn man vernachlässigt, daß auch die Geschichte von x und y eine Rolle spielt (was besonders für den Windstauverlauf gilt!). So kann die z -Verteilung aus den Verteilungen der Häufigkeit von x und y ermittelt werden, die mit $f(x)$ und $g(y)$ bezeichnet werden.

Wenn x und y unabhängig voneinander sind, so ist die Wahrscheinlichkeit für gleichzeitiges Auftreten von x und y

$$p(x, y) = f(x) \cdot g(y)$$

Wenn es eine Tendenz dahin gibt, daß z. B. hohe Sturmfluten dann auftreten, wenn auch hohe Q_0 häufig sind, sind x und y nicht mehr unabhängig voneinander, was zu berücksichtigen wäre. Aber auch dann kann eine Verteilung $p(x, y)$ gefunden werden (Abb. 5). Diese Darstellung selbst ist aber noch unzureichend, um die Verteilung der sich ergebenden z -Werte zu bestimmen. Auf Abb. 5 sind aber immerhin schon Linien gleicher z aus der Beziehung

$$z = h(x, y)$$

angegeben, die den Wasserstand bei z mit den Ausgangsparametern verbinden. Das Volumen unterhalb der Oberfläche $p(x, y)$ und jenseits der jeweiligen Linien, z. B. $z = z_1 = \text{const.}$, gibt die Wahrscheinlichkeit aller Kombinationen von x und y an, deren Wert z größer als z_1 wird. Daher ist dieses Volumen die Überschreitungswahrscheinlichkeit für z_1 . Entsprechende Schritte sind für jeden Wert z_i erforderlich.

Wenn für $h(x, y)$ keine geschlossenen Funktionen vorliegen, kann eine Lösung durch Einführung von diskreten Formen der x - und y -Verteilungen erreicht werden. So mögen z. B. 20 Wasserstandshöhen die Verteilung repräsentieren. Ihre Wahrscheinlichkeiten summieren sich zu 1. Die Zuflüsse werden entsprechend aufgelöst. Für jedes Paar x und y werden zwei Zahlen ermittelt:

1. die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von x und y als Produkt der einzelnen Wahrscheinlichkeiten,
2. der Wasserstand z , wie er sich aus x und y ergibt.

Dies wird für alle interessierenden z gemacht (Abb. 6) und ist die einzige exakte Methode. Wenn man z. B. die 10%-Überschreitungswahrscheinlichkeiten von x und y zu 0,01 kombiniert, so ist dies noch nicht die Wahrscheinlichkeit für z . Tatsächlich ist sie größer, weil es andere Kombinationen x/y gibt, die zu gleichen z führen. Auf die Bemessungssturmflut 2085A angewendet, bedeutet dies etwa:

- Wenn in Cuxhaven astron. Thw und Windstau um Thw unabhängig voneinander sind, ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von 385 cm Windstau etwa 1:330 Jahre, wie aus Abb. 1 hervorgeht;
- für den Wasserstand Thw (= 1,80 m NN) + 385 cm = 5,65 m NN gilt eine größere Wahrscheinlichkeit, weil er auch bei niedrigerem Windstau und Springtiden erreichbar ist, also etwa die 1:200 bis 1:300 Jahre, die sich über HThw-Verteilungsfunktionen ergeben;
- für das gemeinsame Auftreten von Windstau 385 cm in Cuxhaven und 2200 m³/s Oberwasserzufluß in Neu Darchau gilt

$$p(x, y) = f(x) \cdot g(y) < 1:1000$$

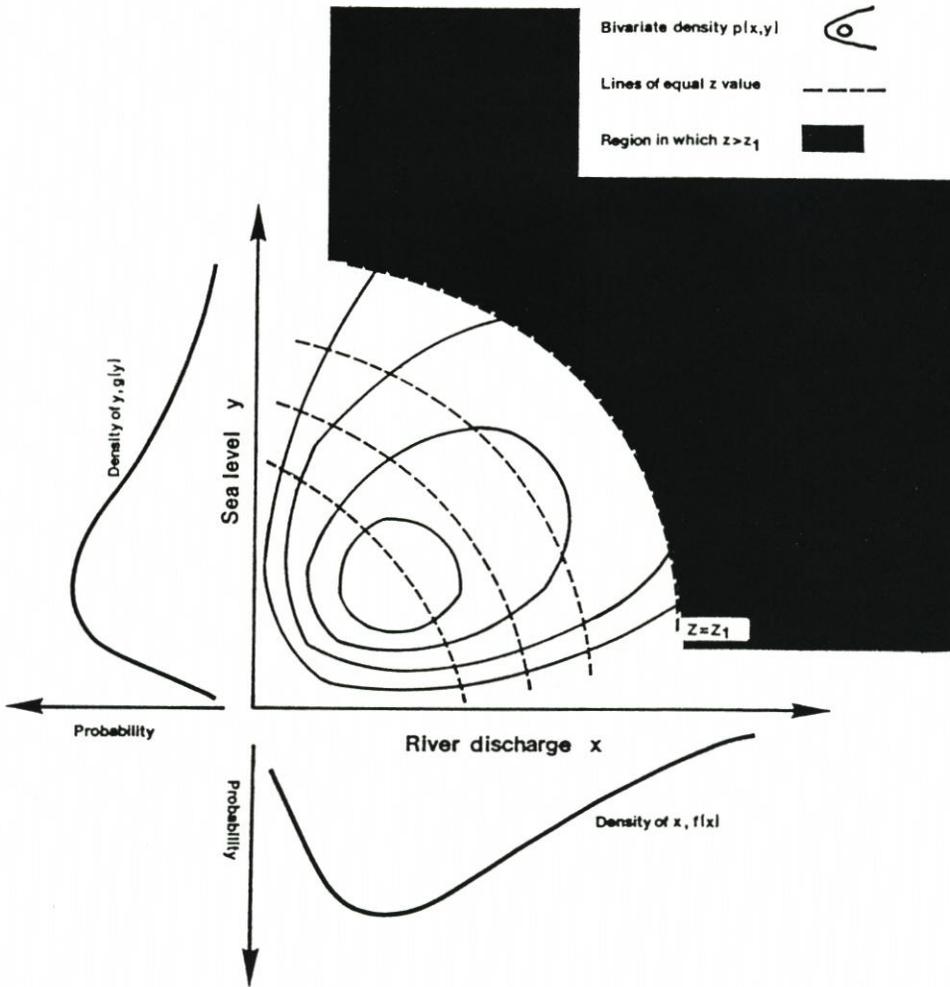
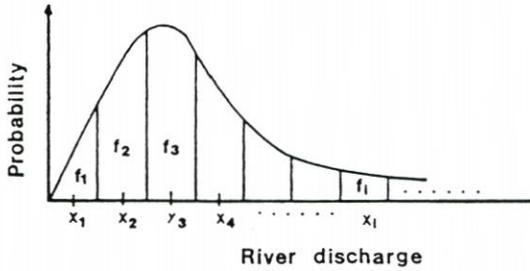


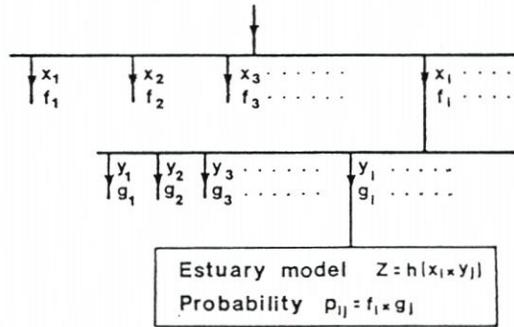
Abb. 5. Skizze zur Definition der Methode kombinierter Wahrscheinlichkeiten (aus WMO, 1988)

– für das Elbegebiet von Stade bis oberhalb von Geesthacht (bei gelegtem Wehr), in dem die Wasserstände z von beiden bestimmt werden, ist die Wahrscheinlichkeit des durch die Kombination $5,65 \text{ m NN}/2200 \text{ m}^3/\text{s}$ erzeugten Wasserstandes analog zu Abb. 6 größer. Letztere Zusammenhänge werden im folgenden mit einer Reihe von Abbildungen verdeutlicht:

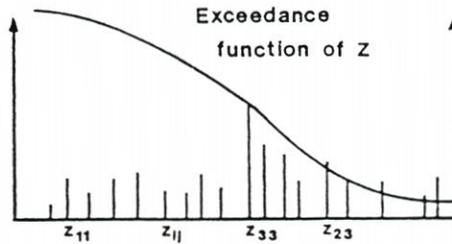
Abb. 7 zeigt die Verteilung und getrennte Häufigkeit von $H_{Thw_{Cux}}$ und Q_0 für die 43 Ereignisse seit 1976, also seit Abschluß der wesentlichen Baumaßnahmen. Die $H_{Thw_{Cux}}$ sind im übrigen weder hier noch auf den folgenden Darstellungen auf ein bestimmtes Jahr beschriftet. Abb. 8 ist entsprechend für 85 Ereignisse seit 1946 aufgebaut, erlaubt aber auch schon die Darstellung gemeinsamer Häufigkeiten. Angegeben ist jeweils auch die Lage des Wertepaares für die Bemessungssturmflut 2085A. Abb. 9 schließlich, für fast 200 Sturmfluten



- A. Conversion of discharge distribution to discrete form
[Similar procedure for sea level distribution]



- B. Sampling scheme for combining discharges and sea levels



- C. Use of p_{ij} and z_{ij} to form probability distribution for Z

Abb. 6. Wahrscheinlichkeitsverteilung über jeden gewünschten Wert z (aus WMO, 1988)

seit 1901, zeigt deutlich das Häufigkeitsgebirge mit seiner höchsten Erhebung zwischen $Q_0 = 300$ und $700 \text{ m}^3/\text{s}$ sowie $H_{Thw_{Cux}} = 820$ bis $860 \text{ cm NN} - 5 \text{ m}^2$.

Ganz so einfach sind die Verhältnisse in der Natur aber nicht, da die H_{Thw} elbaufwärts nicht nur von der H_{Thw} -Höhe in Cuxhaven, sondern auch von der dortigen Windstaukur-

² Daß hier überhaupt ein H_{Thw} -Maximum erkennbar wird, mag überraschen, ist aber durch die Datenauswahl begründet, wo nur solche Ereignisse berücksichtigt wurden, bei denen der Windstau im Verlauf der Tide 2 m Höhe überschritt.

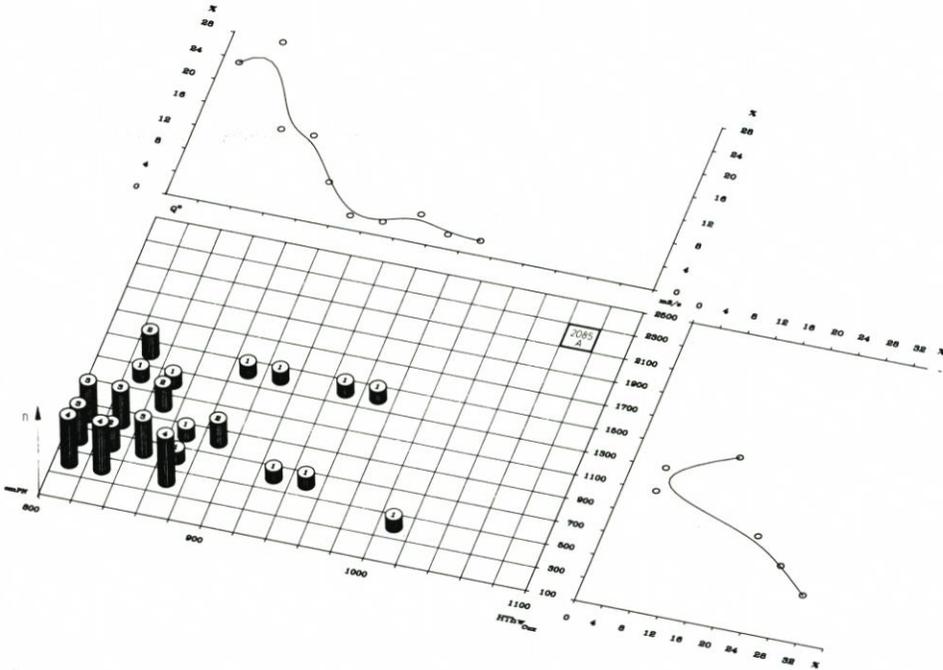


Abb. 7. Gemeinsame Häufigkeiten von $HThw_{Cux}$ und Oberwasserzufluß mit Angabe der Lage der Bemessungssturmflut 2085A; 43 Sturmfluten von 1976 bis 1990

venform abhängen. Für jedes $HThw_{Cux}$ gibt es also für jeden Ort elbaufwärts eine $\Delta HThw$ -Verteilung. Wie diese für Hamburg aussieht, zeigt Abb. 10 für 43 Ereignisse von 1976 bis 1990 (entspr. Abb. 7), da nur für diesen Zeitraum das Kollektiv etwa homogen ist. Der Schwerpunkt liegt bei rd. 1 m Differenz. Die gemeinsame Wahrscheinlichkeit für das Wertepaar der Bemessungssturmflut liegt auch hier weit unter 1:1000.

Fazit dieser Untersuchungen mag allein der Hinweis sein, daß die Wasserstände in einem Ästuar von verschiedenen Parametern lokal variabel abhängen und es somit unmöglich ist, für ein Ereignis eine Eintrittswahrscheinlichkeit für ein Ästuar anzugeben.

3. Eintrittswahrscheinlichkeiten von Sturmfluthöhen und örtlichem Wind bzw. Seegang

3.1 Bemerkungen zur Bemessung auf Seegang

Für die Elbe fehlen Seegangsmessungen wie auch zugehörige Bemessungsgrundlagen. Bei den ersten Abschätzungen mußte daher auf Beobachtungen (und Erinnerungsvermögen!) einiger Augenzeugen sowie auf Berechnungsverfahren für Tiefwasserwellen in Ozeanen zurückgegriffen werden. Da in der Elbe selbst die Voraussetzung „Tiefwasser“ gegeben ist, ist die Verwendung auch nicht abwegig. Allerdings finden wir auf der Elbe teilweise sehr kurze Streichlängen zur Erzeugung des Seegangs, die am Rande oder sogar außerhalb vorliegender Berechnungsdiagramme liegen. Sie liefern aber immerhin Ergebnisse, die mit den wenigen vorhandenen Erfahrungswerten einigermaßen übereinstimmen.

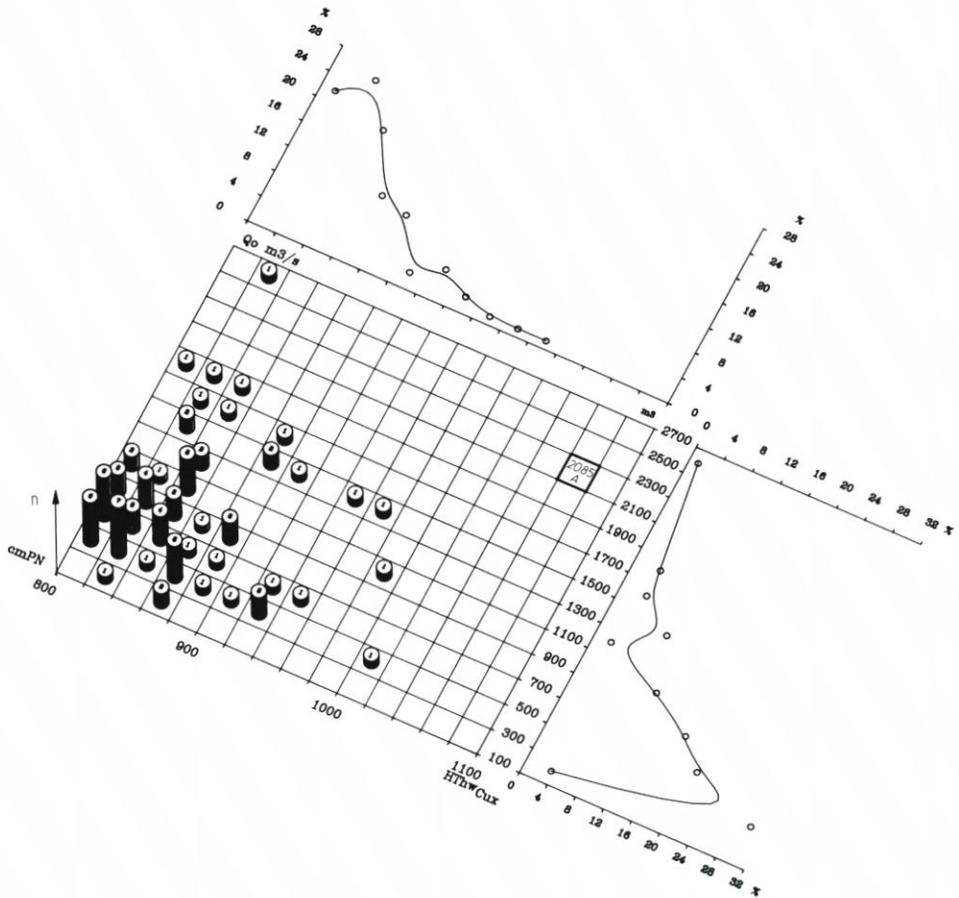


Abb. 8. Wie Abb. 7, aber für 85 Sturmfluten von 1946 bis 1990

Es ist z. B. zu berücksichtigen, daß sich der Seegang wegen der begrenzten Breite der Elbe nicht so wie auf dem Meer entwickeln kann. Dazu gibt es in der Literatur Hinweise zur Reduktion der berechneten Wellenhöhen bis auf weniger als den halben Wert, die nach neueren Untersuchungen aber ebenfalls unsicher sind. Da ein Seegangsmessprogramm noch nicht angelaufen war, wurde zunächst davon ausgegangen, daß berechnete kennzeichnende Wellenhöhen $H_{1/3}$ auf die Hälfte reduziert werden können (nach den vorhandenen Unterlagen „realistisch“), berechnete mittlere Wellenperioden \bar{T} dagegen belassen werden (eine sehr ungünstige Annahme). Aus Gesprächen mit Augenzeugen und durch Auswertung vorhandenen Filmmaterials ergaben sich die ungünstigsten Daten. Die darauf aufbauenden ersten Berechnungen bzw. Abschätzungen von Auf- und Überlauf wurden in Studien zusammengestellt (SIEFERT, 1987, 1989).

Maßgebend für die Deich- und Wandbemessung sind die HThw-Höhe und der dann auftretende Seegang. Weil zur Bestimmung des letzteren weltweit keine sicheren Berechnungsgrundlagen vorliegen, wurden parallel an zwei renommierte Institute³ gleichlautende

³ Delft Hydraulics: Wave Climate in the Lower Elbe near Hamburg, Feb. 1990. Dän. Hydraul. Inst.: Wave Climate Study in the Elbe River, Feb. 1990.

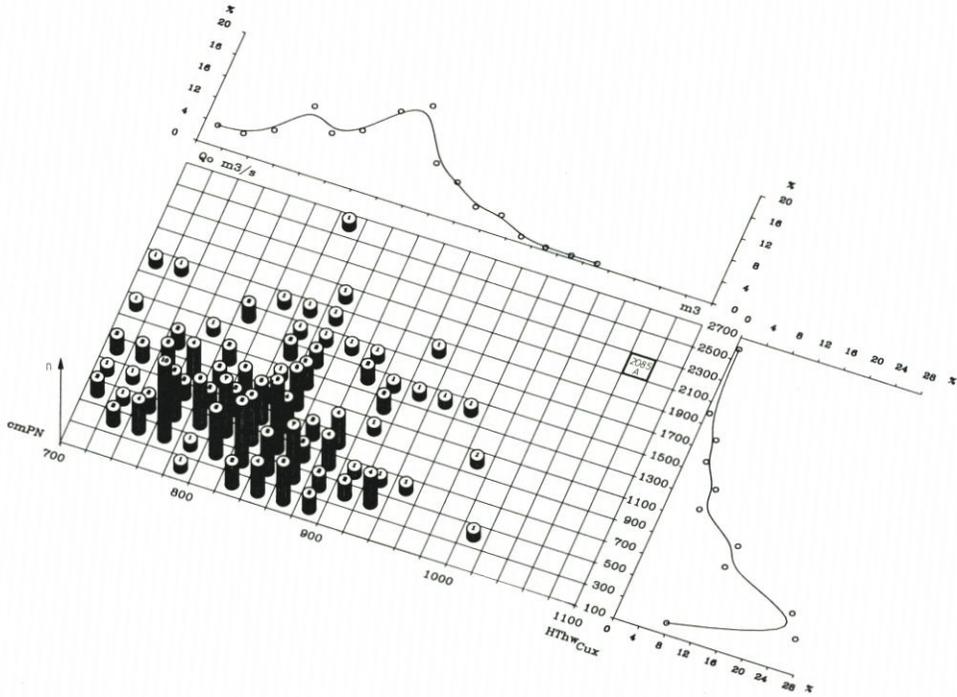


Abb. 9. Wie Abb. 7, aber für 199 Sturmfluten von 1901 bis 1990

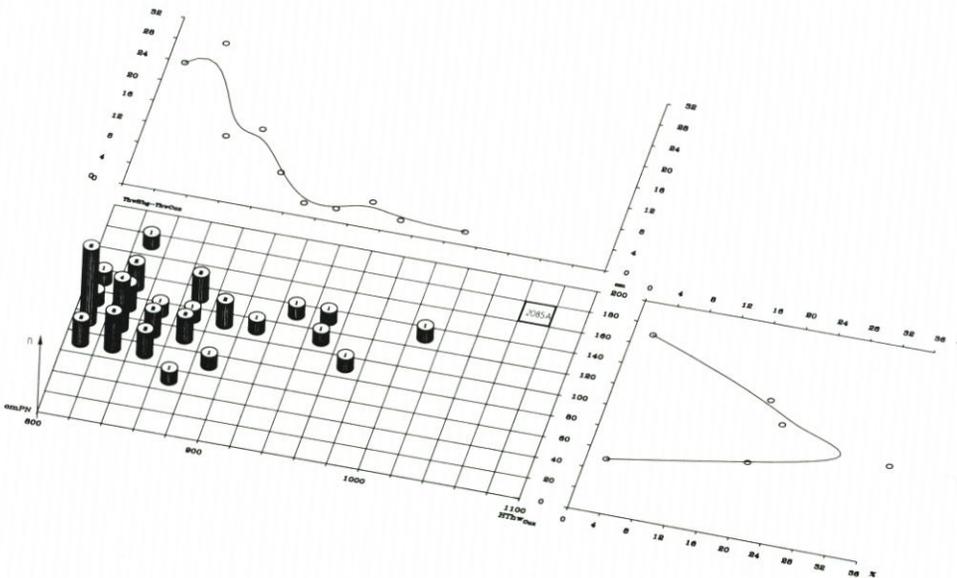


Abb. 10. Gemeinsame Häufigkeiten von HThw_{Cux} und ΔHThw (Hbg.-Cux) mit Angabe der Lage der Bemessungssturmflut 2085A; 43 Sturmfluten von 1976 bis 1990

Aufträge zur Berechnung des Seegangs vergeben, die Ergebnisse also auf unterschiedlichen Wegen numerisch gewonnen. Da sie recht gut übereinstimmen, sollten sie mit einiger Sicherheit als richtig angesehen werden. Es gibt ohnehin im Moment keine begründbare Alternative.

Die Untersuchungen wurden für den Elbabschnitt von der Lühemündung bis St. Pauli für örtlichen Wind von 15/20/25 m/s aus 270°/290°/310°⁴ in Auftrag gegeben. Der Seegang wurde in Spektren gerechnet, aus denen die kennzeichnende Wellenhöhe $H_{1/3}$ und die mittlere Periode \bar{T} bestimmt wurden.

3.2 Maßgebende Windverhältnisse

Da für den gesamten Tidebereich der Elbe bisher keine Seegangsmessungen bei Sturmfluten vorliegen, mußten zunächst grobe Schätzungen auf der Basis von Beobachtungen vorgenommen werden. Zur Verwendung der letzteren wie auch der inzwischen vorliegenden Modellrechnungen ist eine Aussage zum „maßgebenden Wind“ erforderlich, der vor dem HThw-Eintritt weht und den Bemessungsseegang erzeugt. Diese wurde 1987 wie folgt getroffen:

Wenn sich eine Bemessungssturmflut entwickeln soll, sind über der Deutschen Bucht Windstärken von 11 bis 12 Bft erforderlich. Das führt erfahrungsgemäß zu etwa 10 Bft (48 bis 55 kn oder 24,5 bis 28,4 m/s) in Hamburg. Die für die Elbe kritische Windrichtung ist 280° über der Deutschen Bucht. Dem entsprechen etwa 270° in Hamburg.

So wurde der maßgebende Wind über der Elbe in Hamburg in erster Näherung festgelegt zu

50 kn oder 25 m/s aus 270°.

Dieser wurde zwei Jahre später modifiziert zu

50 kn oder 25 m/s aus 260° bis 280°

(SIEFERT, 1989; dazu auch Abb.11). Inzwischen waren nach einer groben Sichtung der Windverhältnisse um die HThw-Eintrittszeit hoher Sturmfluten in Hamburg Zweifel an der Richtigkeit dieser Festlegungen aufgekommen. Sie schienen zu große Windgeschwindigkeiten anzusetzen. Deshalb wurde eine gutachtliche Stellungnahme des DEUTSCHEN WETTERDIENSTES, SEEWETTERAMT eingeholt⁵. Das Ziel dieses Gutachtens bestand darin, der Hansestadt Windwerte auf dem stadtnahen Abschnitt der Unterelbe zwischen dem Mühlenberger Loch und Stade zur Verfügung zu stellen.

Die Ableitung der Windverhältnisse auf der Unterelbe ist mit besonderen Schwierigkeiten verbunden, da aus diesem Bereich bisher keine repräsentativen Windmessungen zur Verfügung stehen. Selbst wenn es solche Messungen abseits des Stromes gäbe, bliebe immer noch das Problem, sie auf die Strommitte zu beziehen. Die geringe Rauheit der Wasseroberfläche der in dem genannten Bereich etwa 2 bis 3 km breiten Elbe bewirkt nämlich eine deutlich höhere Geschwindigkeit des bodennahen Windes, als sie in der Standardhöhe von 10 m über den angrenzenden Landgebieten gemessen würde.

Wegen der genannten Schwierigkeiten wurde die Bestimmung der Windverhältnisse über der Unterelbe mit einem numerischen Modell vorgenommen, das dem Seewetteramt seit

⁴ Zu der Zeit war der sich aus dem Windgutachten ergebende Sektor von 220° bis 300° noch nicht bekannt.

⁵ Gutachten vom Jan. 1990.

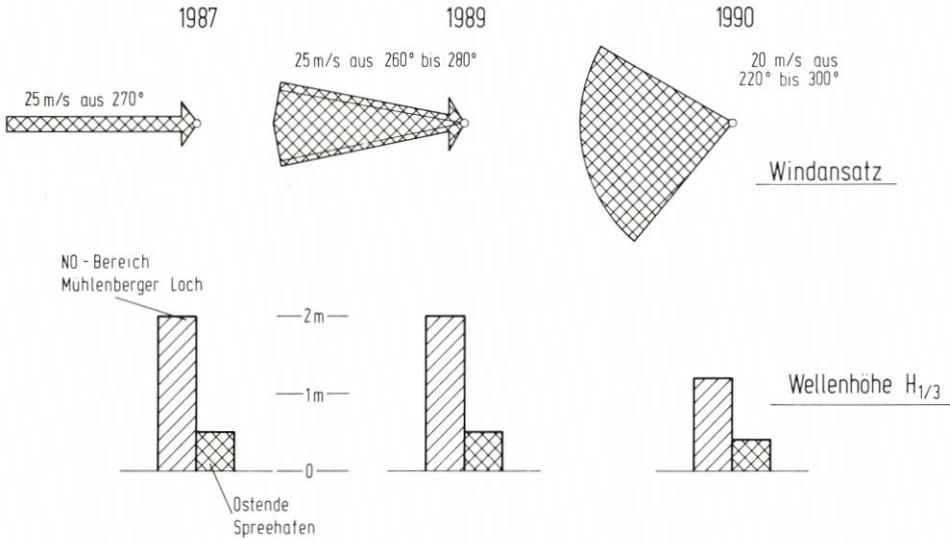


Abb. 11. Annahme zur Bestimmung des maßgebenden Seegangs in Hamburg

einiger Zeit zur Verfügung steht. Es entspricht nach Aussage des Amtes dem derzeitigen Stand der internationalen Modellierungstechnik und gestattet die Übertragung der langzeitlichen klimatologischen Windverhältnisse von einem Ort auf einen anderen. Dabei werden die Einflüsse der Umgebungsrauheit, der Topographie und eventueller Strömungshindernisse aus den Windverhältnissen des Ausgangsortes eliminiert und statt dessen die Umgebungsverhältnisse am Zielort eingerechnet.

3.3 Ergebnisse

Das Gutachten – mit seinen Ergänzungen für die Ereignisse im Jan. und Feb. 1990 – erlaubt die Bestimmung der Windverhältnisse für alle Sturmfluten seit 1954. Das sind nach STROM- UND HAFENBAU (1985), ergänzt bis 1990, rd. 80 Ereignisse. Dafür wurden folgende Parameter bestimmt und miteinander in Beziehung gesetzt:

- Windgeschwindigkeit (Stundenmittel) für Schweinsand um bzw. kurz vor HThw-Eintritt in Hamburg,
- Windrichtung entsprechend,
- Höhe des zugehörigen HThw in Cuxhaven.

Zur Bemessung ist derjenige Seegang entscheidend, der um den örtlichen HThw-Eintritt herrscht. Da er kurzfristig durch den örtlichen Wind entsteht, wurde die Berechnung wie oben beschrieben vorgenommen. Danach sind folgende Aussagen, unterstützt durch Abb. 12 bis 14, möglich:

- Geschwindigkeit und Richtung stehen in keinem Zusammenhang (Abb. 12);
- bei hohen Sturmfluten (über 4 m NN in Cuxhaven bzw. 5 m NN in Hamburg) tritt der Wind aus Richtung 220° bis 300° auf (Abb. 13);
- die Geschwindigkeiten (Stundenmittel) überschreiten 22 m/s bei keiner Sturmflut (Abb. 14);
- bedingt durch die Auswahl des Kollektivs, besteht ein gewisser Zusammenhang zwischen

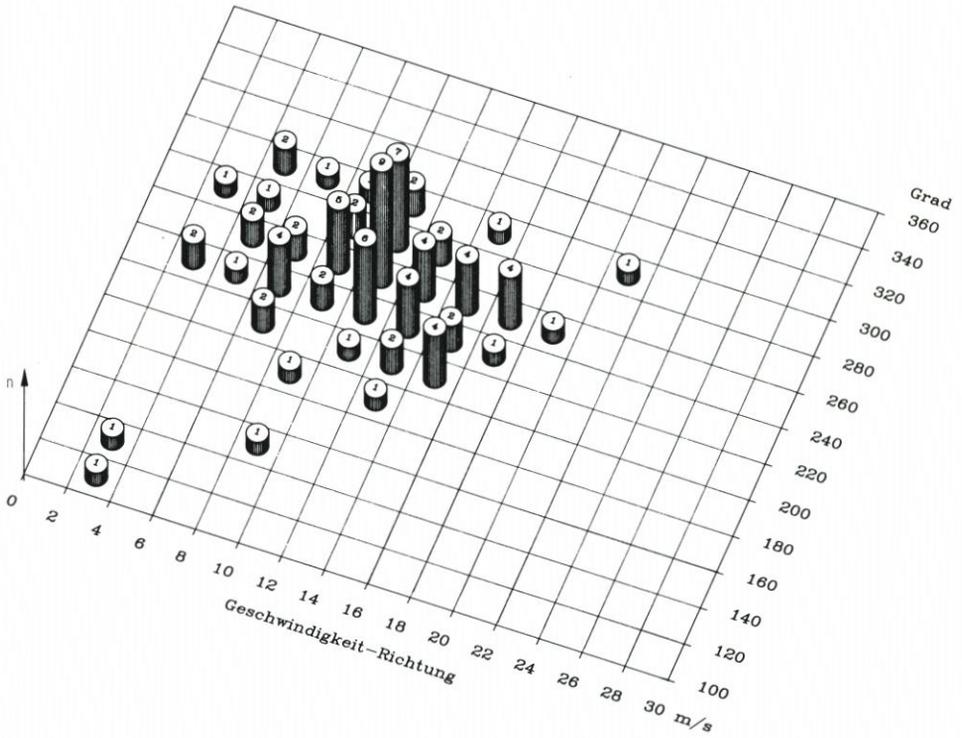


Abb. 12. Gemeinsame Häufigkeiten von Windgeschwindigkeit und -richtung auf der Elbe in Hamburg z. Zt. HThw_{Hbg}

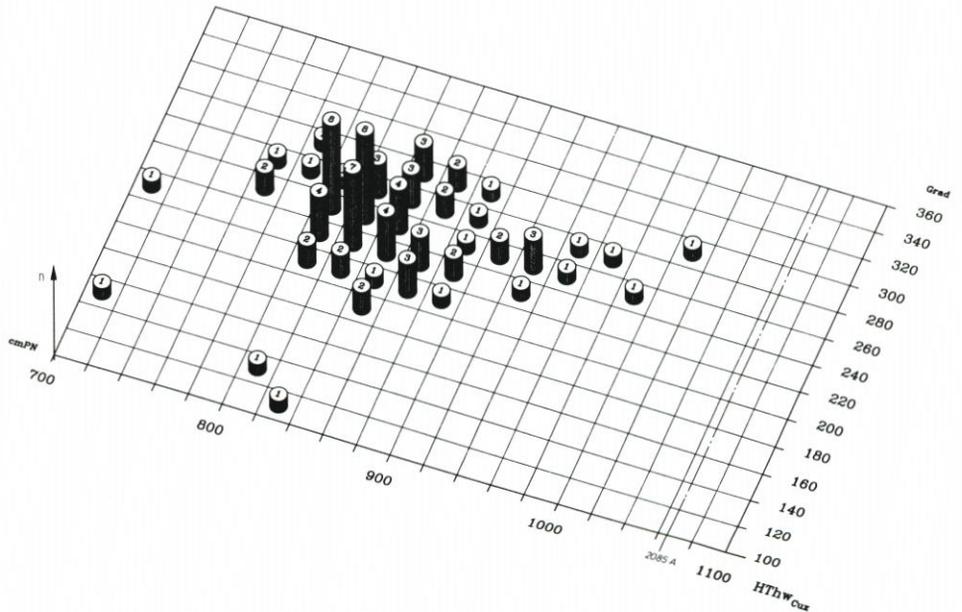


Abb. 13. Gemeinsame Häufigkeit von HThw_{Cux} und Windrichtung auf der Elbe in Hamburg z. Zt. HThw_{Hbg}

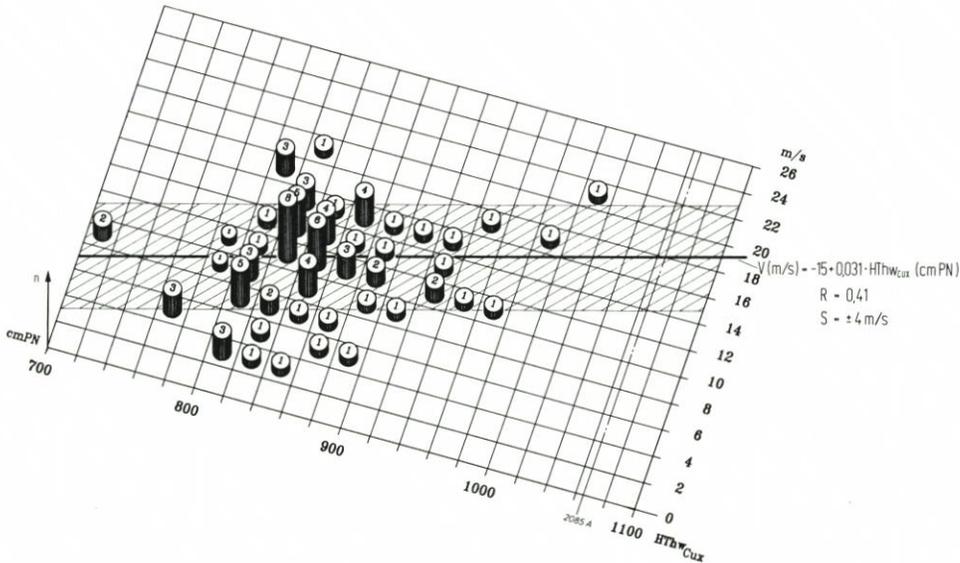


Abb. 14. Gemeinsame Häufigkeit von $HThw_{Cux}$ und Windgeschwindigkeit auf der Elbe in Hamburg z. Zt. $HThw_{Hbg}$

der $HThw$ -Höhe und der Geschwindigkeit zur $HThw$ -Zeit (Korr.-Koeff. aber nur 0,41; Standardabweichung ± 4 m/s);

– für die Bemessungssturmflut 2085A⁶ läßt sich – bei Anwendung der Regression auf Abb. 14 – eine mittlere Geschwindigkeit von 18 m/s ± 4 m/s ermitteln.

Insgesamt ist also festzustellen, daß für die Windverhältnisse in Hamburg um die Hochwasserzeit selbst schwerer Sturmfluten mit einem breiten Fächer an Kombinationen zwischen Richtung und Stärke gerechnet werden muß.

4. Schriftenverzeichnis

- GRAFF, J. u. BLACKMAN, D. L.: Analysis of maximum sea levels in southern England. Proc. 16th ICCE, Hamburg 1978, ASCE, New York, 1979.
- INGENIEURKOMMISSION: Erfahrungen und Folgerungen aus den Januar-Sturmfluten 1976 für den Küstenschutz in Niedersachsen. Die Küste, H. 33, 1979.
- JENSEN, J.: Anwendung der Jenkinson-Funktion zur Ermittlung von hydrologischen Bemessungsereignissen. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 94, 1987.
- KÜSTENAUSSCHUSS: Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse der ehemaligen Arbeitsgruppe „Sturmfluten“ und Empfehlungen ... Die Küste, H. 17, 1969.
- LÄNDERARBEITSGRUPPE: Bemessungswasserstände entlang der Elbe. Die Küste, H. 47, 1988.
- MANIAK, U.: Zusammentreffen von Sturmfluten und Hochwasser der Elbe. Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, 1987 (unveröff.).
- MOTOR COLUMBUS: Risikoanalyse der Hochwassergefährdung Hamburgs. 1986 (unveröff.).
- PLATE, E. J.: Zeitreihenuntersuchung der Sturmfluten im Mündungsbereich der Elbe. Die Küste, H. 38, 1983.
- SALIH, B. A., BURROWS, R. u. TICKELL, R. G.: Storm statistics in the North Sea. Proc. 21st ICCE, Malaga 1988, ASCE, 1989.

⁶ Aus dem Bericht der LÄNDERARBEITSGRUPPE (1988).

- SAS, M.: Frequency of occurrence of storm surges in an estuary: A stochastic approach. Proc. 19th ICCE, Houston 1984, ASCE, 1985.
- SIEFERT, W.: Die Sturmflut von 1825 in der Elbe. Hamb. Küstenf., H. 5, 1969.
- SIEFERT, W.: Über den Wellenaufschlag an den Hamburger Deichen (vorläufige Ermittlungen). Strom- und Hafenbau Hbg., Studie Nr. 65, 1987 (unveröff.).
- SIEFERT, W.: Untersuchungen zu Wellenauf- und -überlauf an Hamburger Hochwasserschutzanlagen bei der Bemessungsturmflut 2085A. Strom- und Hafenbau Hbg., Studie Nr. 68, 1989 (unveröff.).
- STROM- UND HAFENBAU: Sturmfluten von 1901 bis 1984 vor der südlichen Nordseeküste und in Hamburg. Hamb. Küstenforschung, H. 44, 1985.
- WMO: Hydrological aspects of combined effects of storm surges and heavy rainfall on river flow. WMO Oper. Hydr. Report No. 30, WMO-No. 704, Genf, 1988.