

# Sturmflutanalyse und -vorhersage über die Windstaukurven

Von Winfried Siefert

## Zusammenfassung

Üblicherweise wurden bisher bei Sturmflutuntersuchungen fast ausschließlich die Scheitelhöhen (HThw) beurteilt. Um eine vollständige Analyse durchführen zu können, ist die Kenntnis des gesamten Sturmflutablaufes unerlässlich. Die dazu erforderliche Entwicklung sog. Windstaukurven eröffnet neue Möglichkeiten der Analyse und Vorhersage. Dies wird in der Grundkonzeption und an einigen Beispielen erläutert.

## Summary

*Up to now investigations of storm surges have usually been based only on analysis of high water levels. To make a full analysis, however, it is necessary to have information on the whole course and development of the complete surge event. The examination of the so called surge curves (Windstaukurven) which is required for this purpose opens new possibilities of analysis and prediction. The basic principles involved are explained and some examples are presented.*

## Inhalt

1. Einleitung . . . . .	87
2. Grundkonzeption . . . . .	89
3. Wechselwirkung zwischen langen Wellen . . . . .	90
4. Statistik mit verschiedenen Kollektiven . . . . .	93
5. Zukunft der Sturmflutvorhersagen . . . . .	96
6. Schlußfolgerungen . . . . .	101
7. Schriftenverzeichnis . . . . .	101

## 1. Einleitung

Die Höhe hoher Sturmfluten kann an der südlichen Nordseeküste 4 bis 5 m über das mittlere Hochwasser (MThw) auflaufen. Schon lange gab es Sturmflutwarnungen, die sich allerdings für die deutsche Küste darauf beschränkten, pauschale Angaben über die zu erwartende Höhe auf der Basis von Wetterprognosen und viel Erfahrung zu machen. Aussagen über eine genaue Eintrittszeit oder etwa den Ablauf der Sturmflut waren bisher nicht möglich.

Nach den schlechten Erfahrungen während der schweren Sturmfluten im Januar 1976 zog die Freie und Hansestadt Hamburg die Konsequenzen und rief einen eigenen Sturmflutwarndienst (WADI) ins Leben, der regionale Vorhersagen nur für die Betriebe im Hamburger Hafen macht (SIEFERT, 1977). Inzwischen gibt es darüber hinaus ein regionales Vorhersageverfahren für Cuxhaven (CHRISTIANSEN und SIEFERT, 1979). Beide erlauben es, Aussagen über den Tide a b l a u f zu machen und nicht nur über die HThw-Höhe. Grundlage ist die Analyse der sog. Windstaukurve:

Der Windeinfluß, der sich an einem Küstenort bemerkbar macht, wird allgemein als *Windstau* bezeichnet. Die sog. *Windstaukurve* kann gebildet werden als

- Differenzkurve zwischen der *eingetretenen* und der für dieselbe Zeit *vorausberechneten astronomischen Tide*; sie enthält damit alle Abweichungen von derjenigen Gezeit, die die astronomischen und topographischen Einflüsse einschließt (meist von Ozeanographen und vom Deutschen Hydrographischen Institut verwendet);
- Differenzkurve zwischen der *eingetretenen* und der für dieselbe Zeit *vorausberechneten mittleren Tide*; diese enthält damit zusätzlich zu der oben definierten Kurve auch noch astronomische Anteile, im wesentlichen die halbmonatlichen (meist von Wasserbauern und vom Warndienst des Strom- und Hafenbau Hamburg verwendet (Abb. 1)).

Die Bezeichnung „Windstaukurve“ ist also in beiden Fällen nicht ganz richtig. Neutraler wäre vielleicht die in der Ozeanographie gebräuchliche Bezeichnung „Residuum“. Da der Windeinfluß jedoch der dominierende ist, ist sie zu vertreten.

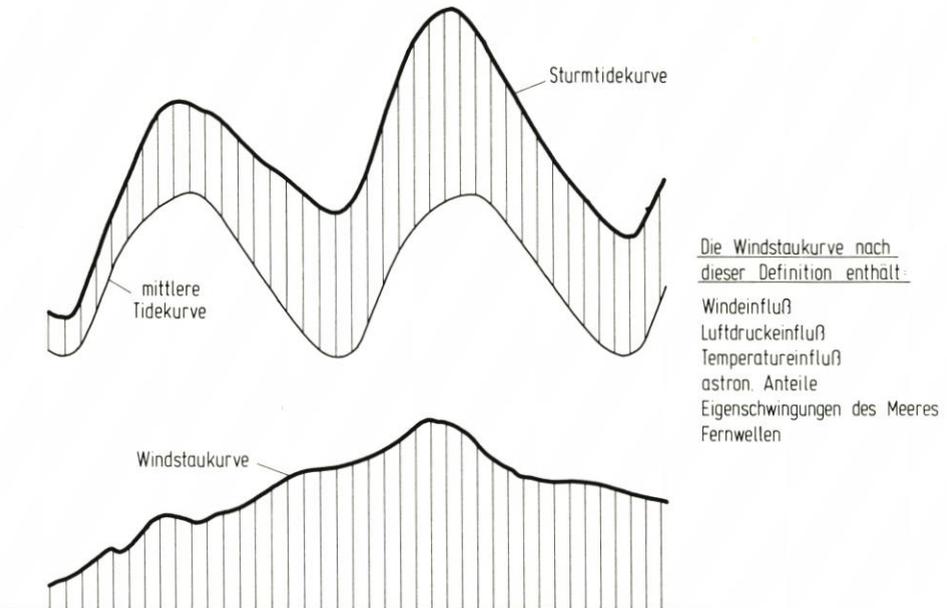


Abb. 1. Definition der Windstaukurve

Nach umfangreichen Modellversuchen für die Elbe mit schematisierten Windstaukurven (SIEFERT, 1968) wurden inzwischen Daten von etwa 130 Sturmfluten analysiert, die seit 1901 in der Elbe auftraten. Dabei wurde jedes Ereignis als „Sturmflut“ eingestuft, bei dem im Verlaufe der Sturmflut zu irgendeiner Tidephase (also nicht nur zur HThw-Zeit) die Differenz zwischen gelaufener und mittlerer Tide in Cuxhaven mehr als 2 m betrug. Mittlerweile konnte die Datensammlung in Teilen auf Ems und Weser ausgedehnt werden.

Die Unterlagen eignen sich nicht nur zur Erstellung recht genauer Sturmflutvorhersagen, sondern natürlich auch zu statistischen Untersuchungen, deren Ergebnisse bei bestimmten Fragestellungen besser helfen als die herkömmlichen Auswertungen über Jahresmittel oder jährliche Höchstwerte, so z. B. in der Frage nach der Ursache einer Häufung hoher Sturmfluten.

## 2. Grundkonzeption

Das Sturmflutgeschehen in einem begrenzten Gebiet, z. B. einem Tidefluß, kann betrachtet werden als Ergebnis des Zusammenwirkens verschiedener Rand- und Eigenwerte eines Systems. Randwerte treten am oberen und unteren Rand des begrenzten Bereiches auf, also in diesem Beispiel an der oberen Tidegrenze und an der Mündung. Sie werden durch Kräfte und Vorgänge außerhalb des Gebietes gesteuert.

Die wichtigsten Einflußfaktoren auf den Sturmflutablauf sind:

a) Randwerte von unterhalb der Mündung:

Tide (astronomisch)  
Windstau  
Fernwellen  
säkularer Meeresspiegelanstieg

b) Eigenwerte des Flußgebietes:

Lage, Querschnitte  
Ausbauten im Fluß (Vertiefungen, Regulierungen)  
Hafenbauten  
Eindeichungen  
Absperrung von Nebenflüssen  
Deichbrüche  
Boden-Eigenschaften  
(Coriolis-Effekt)

}

Geometrie  
und  
Rauhigkeit

c) Randwert von oberhalb der Tidegrenze:

Oberwasserabfluß

Die Einflüsse der genannten Faktoren auf den Ablauf einer Sturmflut sind unterschiedlich groß. Die wichtigsten werden im folgenden kurz kommentiert:

**Windstau:** Die ungestörte Tide wird bei entsprechendem Wind überlagert vom Windstau. Bedeutungsvoll ist nicht allein die Höhe des Windstaus, sondern auch die Eintrittszeit seines Maximums. 4,4 m Windstau um die vorausberechnete Tideniedrigwasser- (Tnw-) Zeit führt z. B. in Cuxhaven nur zu einem Wasserstand (HThw) von rd.  $4,4 - 3,0 = 1,4$  m über mittlerem Tidehochwasser (MThw). Tritt dieser Windstau aber zur vorausberechneten Thw-Zeit ein, wird ein wesentlich höherer Wasserstand erreicht. Da die Windstauhöhe allerdings bei gleichem Wind mit zunehmender Wassertiefe abnimmt, würde nach TOMCZAK (1952) derselbe Wind bei Thw nur  $\frac{2}{3}$  bis  $\frac{1}{5}$  der Windstauhöhe aufbauen, die bei Tnw erreicht würde.

**Fernwellen:** Sie entstehen wahrscheinlich im nördlichen Atlantik durch Luftdruckunterschiede und laufen dann als Einzelwellen oder in Gruppen von wenigen Wellen in die Nordsee ein. Höhen bis rd. 1 m wurden gemessen.

**Säkularer Meeresspiegelanstieg:** Die Höhe des Meeresspiegels gegenüber dem Land hat in den letzten beiden Jahrhunderten bei Cuxhaven um 25 cm je 100 Jahre zugenommen.

**Bauliche Veränderungen im Flußgebiet:** Die Veränderungen in einem Fluß (Fahrwasservertiefung, Beseitigung von Barren, Begradigungen, Abdeichung von Nebenrinnen, Bau von Hafenbecken usw.) haben insbesondere einen Einfluß auf den Ablauf der Normaltiden, wie er sich z. B. in Ems, Weser und Elbe in den letzten Jahrzehnten deutlich durch die Absenkung des Tnw bei gleichzeitiger Erhöhung des Thb zeigt. Auch der Sturm-

flutablauf bleibt nicht unbeeinflusst, da durch diese verschiedenen Baumaßnahmen die hydrologischen Gegebenheiten verändert werden.

**Eindeichungen, Absperrung von Nebenflüssen:** Durch diese Maßnahmen wird der Ablauf der Normaltide i. allg. nicht verändert, da sie erst bei erhöhten Wasserständen wirksam werden. Bei Sturmfluten wird dagegen der Flutraum verringert, da das einlaufende Wasser nicht mehr in die Deichvorländer und Nebenflüsse vordringt, was zu erhöhten Wasserständen führen kann.

**Deichbrüche:** Der Einfluß von Deichbrüchen wird naturgemäß erst bei entsprechend hohen Wasserständen und daher nur im Scheitelbereich einer Sturmflut eintreten. Die Wirkung auf den Sturmflutablauf im Tidefluß ist insgesamt dennoch relativ klein.

**Oberwasserabfluß:** Der Oberwasserabfluß beeinflusst ebenfalls das Sturmflutgeschehen, vornehmlich im oberen Tidegebiet, da hier die Oberwassermengen noch relativ groß im Verhältnis zu den Tidewassermengen sind.

Die Nordsee ist ein Randmeer des Atlantischen Ozeans. Die hier durch die astronomischen Verhältnisse entstehenden Tiden laufen von Norden und durch die Straße von Dover in das Randmeer ein. Dort werden diese Wellen umgeformt, und zwar durch die Beckenform, die Tiefenverhältnisse und die Coriolisbeschleunigung.

Die theoretische Behandlung dieser Verhältnisse ist bei DIETRICH (1957) nachzulesen. Sie erläutert die Bildung von sog. KELVINwellen sowie von Amphidromien. Die Tiden setzen sich entspr. der unterschiedlichen Wirkung der einzelnen Gestirne auf die Bewegung des Wassers auf der Erde aus mehreren Partialtiden zusammen.

Die Sturmflutvorhersagen gehen davon aus, daß der Windeffekt an der deutschen Küste dominierend von dem Windfeld über der Deutschen Bucht hervorgerufen wird. Die Verzögerung zwischen Wind- und Wasserstandsänderungen liegt hier bei etwa 3 Stunden, ähnlich derjenigen vor der niederländischen Küste.

Eine Windstaukurve unterliegt ebenso wie eine Tidekurve von Ort zu Ort gewissen Veränderungen. Das Zusammenwirken beider Erscheinungen kann nicht als statischer Zustand, sondern muß als dynamisches Problem behandelt und der Windstau als ein der Tide entsprechendes Phänomen gedeutet werden. Da er sich ähnlich wie Tidewellen verhält, wird in diesem Zusammenhang von WINDSTAUwellen ausgegangen. Das hat zur Folge, daß bei der Untersuchung (und auch der Vorhersage) von Sturmfluten die Überlagerung mehrerer langer Wellen mit allen Konsequenzen analysiert werden muß. Dieser Weg ist bisher nur zögernd besprochen worden. Es sei aber erwähnt, daß z. B. die für Ostende und Antwerpen jetzt bestehende Vorhersagemöglichkeit von einer Analyse der Tidekurve ausgeht, die quasi ein Vorstadium der Windstauanalyse darstellt (VERSCHAVE, 1977). Auf ähnlicher Basis arbeiten seit einigen Jahren Kollegen in Großbritannien (PRANDLE und WOLF, 1978).

### 3. Wechselwirkung zwischen langen Wellen

Wie bei Oberflächenwellen ist auch bei langen Wellen ein Phänomen festzustellen, das den Ablauf von Sturmfluten – besonders in Küstennähe und in Tideflüssen – maßgeblich bestimmt: die Wechselwirkung zwischen Wellen einzelner Systeme. Da die Fortschrittsgeschwindigkeit der Wellen im Flachwasser praktisch nur von der Wassertiefe (und nicht etwa von der Wellenhöhe) abhängt, kann eine Welle, die auf den Hang einer Vorläuferin aufläuft, diese in einer Art „Huckepack-Effekt“ einholen (Abb. 2), da die auflaufende (zweite) Welle in etwas größerer Wassertiefe als die erste läuft. Dies führt beim Seegang meist zu einem Brechen übersteiler Wellen. Bei langen (Tide- und Windstau-) Wellen kann eine solche

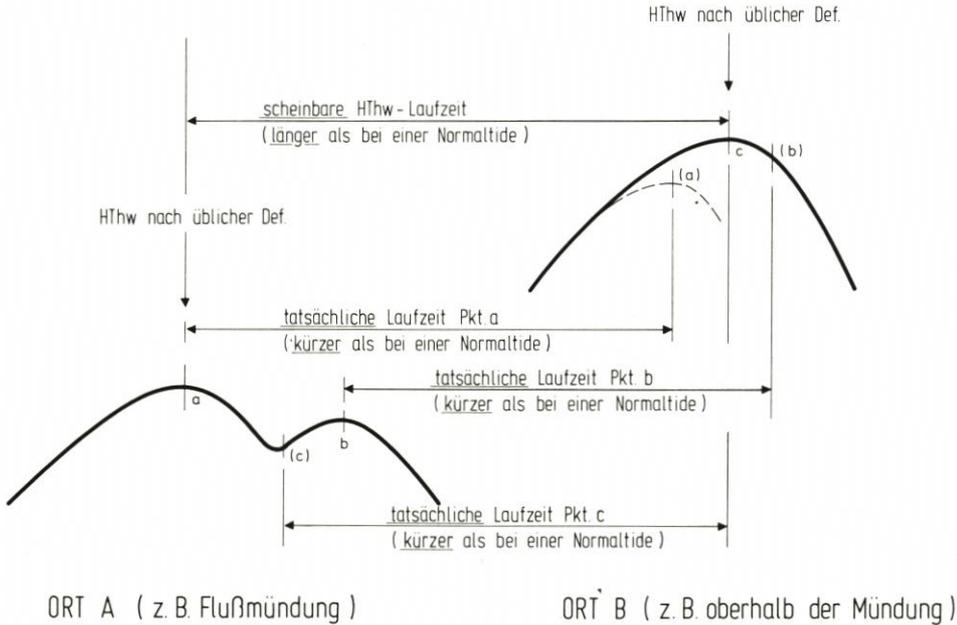


Abb. 2. Beispiel für die Formänderung von Sturmdekurven zwischen zwei Orten

Überlagerung, gerade in Flüssen, zum Extremfall sehr hoher Scheitelwasserstände führen, wenn beide Wellen unterschiedlich schnell laufen und damit Phasenlage und Form verändern. Kann man im Mündungsbereich eines Tideflusses die Tide- und Windstauwellen noch trennen, da der „Huckepack-Effekt“ im Entstehungsgebiet der Windstauwellen noch relativ klein ist, so ist dies im Oberlauf sicherlich unzulässig, wenn man dabei nicht die individuellen Geschwindigkeiten der Partialwellen berücksichtigt. Solange diese individuellen Geschwindigkeiten im Flusse nicht bekannt sind, entbehrt es jeder physikalischen Grundlage, etwa für Bremen oder Hamburg Windstaukurven auszuwerten. So berichtet PRANDLE (1974) von numerischen Untersuchungen, die bereits für Southend in der Themsemündung eine Erhöhung der Windstaukurve durch Wechselwirkungs-Einfluß von rd. 0,9 m ergaben. Dabei wird der Gesamtverlauf der Windstaukurve an der Mündung qualitativ nur wenig geändert, im Oberlauf der Themse dagegen stark.

Es sei allerdings darauf hingewiesen, daß bis zur quantitativen Lösung der auf Abb. 2 aufgezeigten Zusammenhänge eine Fülle von Datenmaterial auszuwerten ist. Immerhin lassen die Beispiele erkennen, welche Wege möglich sind, in Zukunft das Tidegeschehen in einem Fluß besser zu verstehen. Für die Elbe wird an einer solchen Analyse bereits gearbeitet. So wäre es auch unter Berücksichtigung des „Huckepack-Effektes“ möglich, zu erklären, warum Sturmfluten meistens „langsamer“ als Normaltiden laufen\*).

Ein anderes Beispiel für eine sinnvolle Anwendung von Windstauanalysen: Die Abnahme der mittleren Thw- und Tnw-Eintrittszeitdifferenzen in den Tideflüssen – deutlich festzustellen in der Elbe etwa ab 1965 und in der Ems etwa ab 1955 – muß zumindest teilweise auf Ausbauten (Fahrwasservertiefung, Beseitigung von Barren und Krümmungen)

\*) Die landläufige Meinung unter Nichtfachleuten, daß Sturmfluten schneller als Normaltiden seien, ist auf den Irrtum zurückzuführen, daß hohe Wellen schneller laufen müßten.

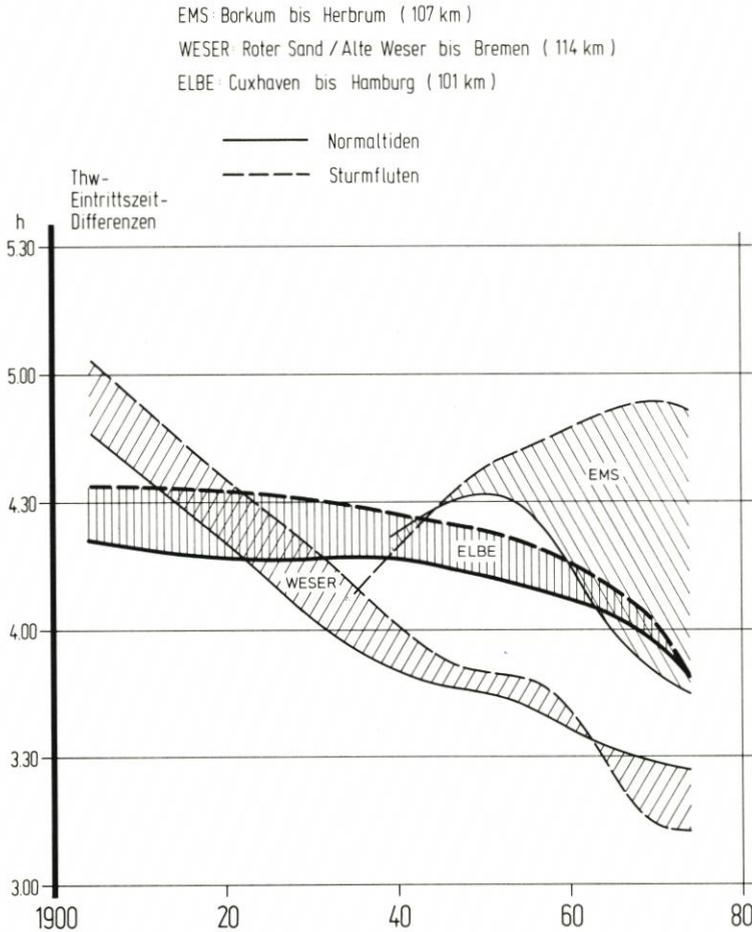


Abb. 3. Entwicklung der Thw-Eintrittszeit-Differenzen in Tideflüssen von 1900 bis heute (generalisiert)

zurückgeführt werden. Beweise können dafür im Moment noch nicht geliefert werden. Es zeichnet sich jedoch ein Weg ab, sie über eine neue Art von Modelluntersuchungen, in „Chronologischen Modellen“ verschiedener Flüsse, zu erfassen. Dabei ist jedoch auch der Trend zu Veränderungen der Ausgangswellen in der Nordsee zu berücksichtigen.

Die deutliche Abnahme der Eintrittszeit-Differenzen von Sturmfluten in Elbe und auch Weser kann dagegen weitgehend mit Veränderungen der Sturmflutabläufe in der Mündung erklärt werden. Es besteht kein Zweifel, daß in jüngster Zeit die Phasenlagen von Tide- und Windstauwellen anders, d. h. ungünstiger waren als in früheren Jahren. Das beste Indiz dafür ist die Entwicklung der Eintrittszeit-Differenzen von Sturmfluten zwischen Mündung und Oberlauf der Ems (Borkum-Herbrum): Anders als in Weser und Elbe haben sich diese in den letzten Jahrzehnten wesentlich verlängert, während sie sich in der gleichen Zeit bei den Normaltiden verkürzten (Abb. 3). Diese Tatsache überrascht zunächst, da die Ems ebenso wie Weser und Elbe in den letzten Jahren ausgebaut wurde. Die Entwicklung kann vielleicht mit Abb. 2 erläutert werden. Dort ist eine Sturmflut mit „langer“ Laufzeit (von a nach c) dargestellt, also der typische „Emsfall“ für die Jahre nach 1950 auf Abb. 3. Nehmen wir als

„Ort A“ auf Abb. 2 Borkum an, so laufen die Tide- und Windstauwellen nicht nur in der skizzierten Weise nach Ort B (Herbrum), sondern auch in Richtung Alte Weser/Cuxhaven. Dort erreichten sie in den letzten Jahren häufig ein Zwischenstadium, in dem (in d i e s e n , nun als „Ort A“ anzusehenden Flußmündungen) der Scheitel b höher als der Scheitel a wurde. Das führte in der Tat zu scheinbar kurzen „Laufzeiten“ von b bei Ort A zu c bei Ort B. Wenn sich also bei einer Sturmflut Windstau- und Tidewellen in Weser- und Elbemündung ungünstig überlagern, so können sie das nicht auch gleichzeitig in der Emsmündung, da auf dem Wege von Borkum nach Osten erst durch den „Huckepack-Effekt“ die kritische Überlagerung entsteht. Die Ausgangslage in der Emsmündung führt dann aber zwangsläufig zu solchen Sturmflutkurven, die scheinbar lange „Laufzeiten“ hervorrufen.

Es ist durchaus denkbar, daß in den nächsten Jahren wieder eine größere Anzahl „langsamerer“ Sturmfluten in Weser und Elbe auftreten kann, was zu „schnelleren“ Sturmfluten in der Ems führen mag.

#### 4. Statistik mit verschiedenen Kollektiven

Statistische Untersuchungen haben normalerweise das Ziel, einen vergangenen oder einen bestehenden Zustand darzustellen, Zusammenhänge zwischen verschiedenen Daten deutlich zu machen und Aussagen über zukünftige Entwicklungen zu ermöglichen. Wenn es sich dabei um Sturmfluten handelt, muß ein entsprechendes Datenkollektiv definiert werden. Damit taucht sofort das Problem der Definition einer „Sturmflut“ auf. Es gibt eine ganze Reihe von Vorschlägen, die je nach Aufgabenstellung ihre spezielle Berechtigung haben. Im folgenden soll an einigen Beispielen gezeigt werden, welche Möglichkeiten sich für die statistische Analyse verschiedener Daten ergeben:

- Verwendung von Jahres-HThw bei den Modellen „Vergeßlicher Chronist“ und „Langlebiger Chronist“ von FÜHRBÖTER (1976) zur Ermittlung der zeitlichen Änderung der Wahrscheinlichkeit von Extremsturmfluten (Beispiel auf Abb. 4),
- Verwendung von Jahres-HThw für einen „mittleren Küstenpegel“ von LIESE und LUCK (1978) zum Nachweis langjähriger periodischer Schwankungen in der Deutschen Bucht (Beispiel auf Abb. 4),
- Verwendung aller Sturmfluten in deutschen Tideflüssen, die an der Mündung einen Windstau von mindestens 1,5 m Höhe zur HThw-Zeit aufweisen, zur Ermittlung der säkularen Zunahme der Sturmfluthöhen (Abb. 5),
- Verwendung aller Sturmfluten, bei denen der Windstau zu irgendeiner Tidephase mindestens 2 m erreichte, zur Ermittlung von Veränderungen im Sturmflutcharakter (Abb. 5).

Sturmflutstatistiken sind natürlich erst vollständig, wenn auch die auslösenden Kräfte entsprechend dargestellt werden. Das aber ist bisher kaum erfolgt, weil

- bei Analysen allein von Jahres-HThw (also nur einer Sturmflut im Jahr) ein Großteil extremer Ereignisse gar nicht erfaßt wird;
- dazu verwendbare Winddaten erst ab Anfang der 1960er Jahre vorliegen.

Kopplungen zwischen Ursache und Wirkung sind nur durchführbar, wenn alle markanten Ereignisse erfaßt werden. Die Auswahl der zu berücksichtigenden Sturmflutereignisse sollte dann sinnvollerweise nur über die Höhe der Windstaukurve erfolgen und nicht davon abhängen, zu welcher Tidephase der Wind gerade am ungünstigsten geweht hat. (Die Fragen, ob Tidewasserstand und Windstärke sich gegenseitig beeinflussen oder warum heute in der Deutschen Bucht das Windmaximum häufiger bei astron. Thw als früher eintritt, sind keineswegs geklärt, sollen aber auch nicht Gegenstand dieser Arbeit sein.)



Abb. 4. Entwicklung verschiedener Thw-Kollektive von 1900 bis heute

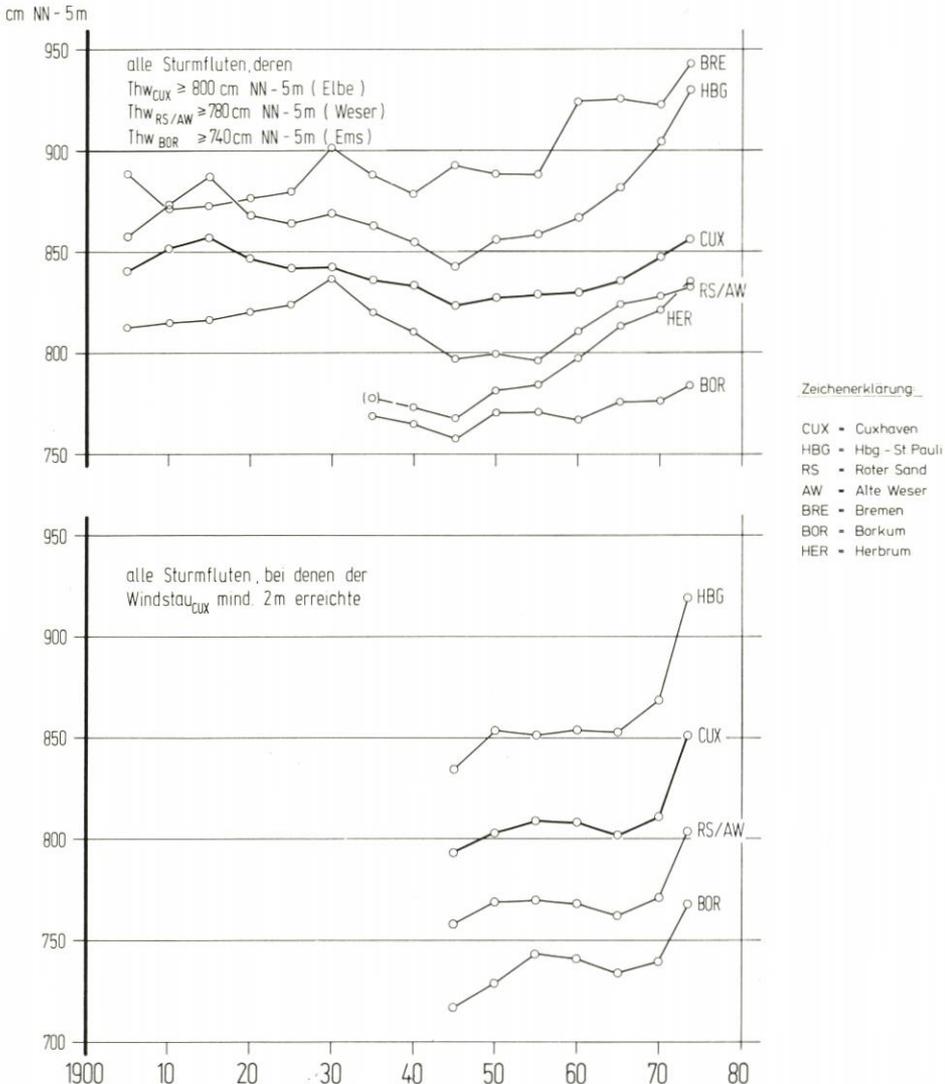


Abb. 5. Entwicklung der Thw - mit Windstau über 1,5 m (bei Thw) bzw. 2,0 m (zu beliebiger Tidephase) im Mündungsgebiet - in den deutschen Tideflüssen von 1900 bis heute

Am Beispiel der Elbe mag gezeigt werden, welchen Umfang solche Kollektive annehmen:

Zeitraum	Anzahl Sturmfluten mit Windstau in Cuxhaven		
	$\geq 250$ cm bei Thw	$\geq 200$ cm bei Thw	$\geq 200$ cm zu beliebiger Tidephase
1901/10	2	7	
1911/20	4	12	
1921/30	5	15	30
1931/40	3	8	19
1941/50	1	3	20
1951/60	-	4	15
1961/70	2	11	32
1971/79	7	14	31

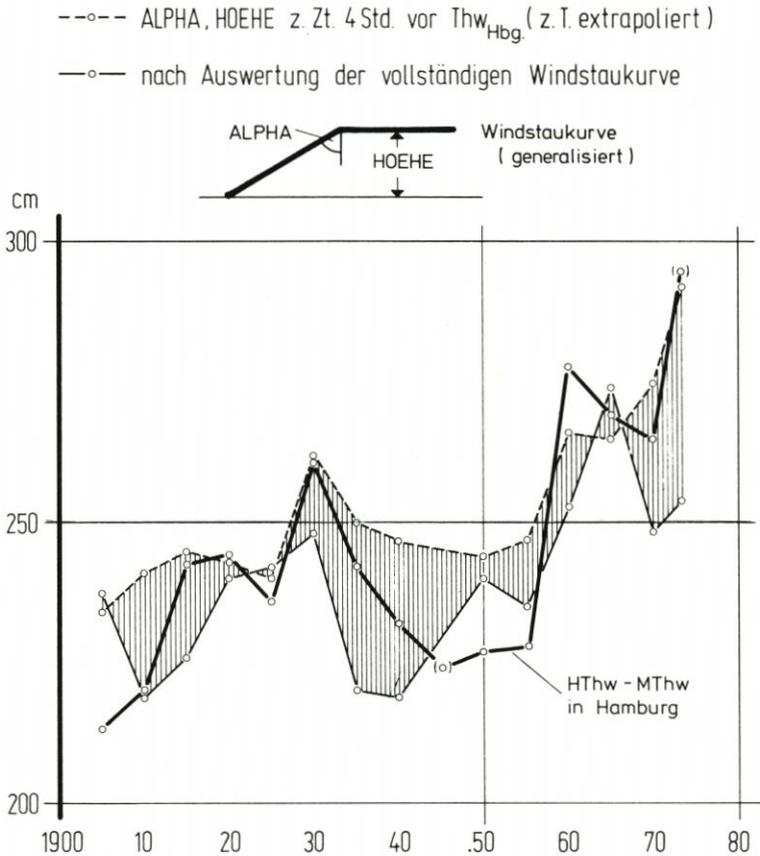
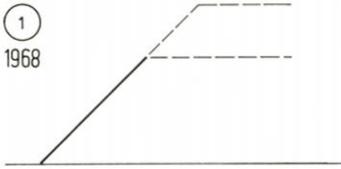


Abb. 6. Entwicklung der HThw in Hamburg, die in Cuxhaven mindestens 2 m Windstau bei Thw erreichten ( $HThw_{Cux} \geq 850 \text{ cm NN} - 5 \text{ m}$ ), und des Einflusses zweier Windstauparameter von 1900 bis heute

Welche Möglichkeiten sich für eine umfassendere Sturmflutanalyse ergeben, wird auf Abb. 6 gezeigt: Eine säkulare Veränderung der Windstaukurve in Cuxhaven bedingt säkulare Sturmflut-Höhenänderungen in Hamburg. Die Zusammenhänge werden deutlich und weisen zwingend aus, daß die HThw-Zunahme in Hamburg weitgehend auf Windstauänderungen in Cuxhaven (und damit Windänderungen in der Deutschen Bucht) zurückgeht. Dies paßt auch zu der Erkenntnis, daß hohe Sturmfluten in Cuxhaven etwa ab 1936 durch Sturmtiefs mit vorherrschend aus NW kommenden Zugbahnen erzeugt wurden; vor 1936 kamen dagegen fast alle Zugbahnen aus W bis SW.

### 5. Zukunft der Sturmflutvorhersagen

Genaue und anspruchsvolle Sturmflutvorhersagen, wie wir sie in Zukunft sicher in steigendem Maße benötigen, werden nach Ansicht des Verfassers nur über die Analyse von Windstaukurven großer Kollektive zu erstellen sein. Als Beispiel mag die Entwicklung der WADI-Vorhersagen für den Hamburger Hafen auf Abb. 7 dienen. Zu dem dort unter Pkt. 4



①  
1968

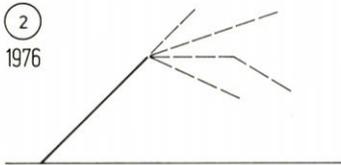
Der bekannte Teil der Windstaukurve Cuxhaven wird linear extrapoliert; Abfall der Kurve wird stets gleich angenommen

Ziel: Höhenvorhersage  $H_{Thw,Hbg}$

Genauigkeit

$\pm 20$  cm  
4 h im voraus

Grundlagen: Hydraulische Modellversuche  
Korrelationen Windstau Cuxhaven -  $H_{Thw,Hbg}$



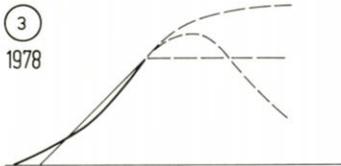
②  
1976

Der bekannte Teil der Windstaukurve Cuxhaven wird extrapoliert in Anlehnung an den Verlauf der Windstaukurve Borkum

Ziel: Höhenvorhersage  $H_{Thw,Hbg}$

$\pm 25$  cm  
4 bis 6 h im voraus

Grundlagen: Wie ①, dazu Korrelationen Windstau Borkum - Windstau Cuxhaven



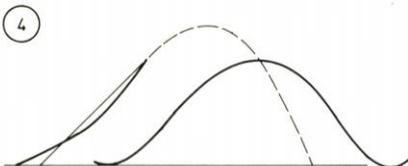
③  
1978

Der bekannte Teil der Windstaukurve Cuxhaven wird nichtlinear extrapoliert entspr. dem Verlauf der Windstaukurve Borkum und der Windentwicklung auf Scharhörn

Ziel: Höhenvorhersage und  
Zeitvorhersage  
für die Tidekurve Hbg.

$\pm 25$  cm  
 $\pm 30$  Min.  
6 bis 8 h im voraus

Grundlagen: Wie ①, dazu Korrelationen Windstau Borkum/  
Wind Scharhörn/Windstau Cuxhaven  
physikalisch-statistische Ansätze  
zur Berechnung des Windstaus Hamburg



④

Berechnung der Windstaukurven Cuxhaven und Hamburg über die physikalischen Beziehungen zu Windstauwellen in der westlichen Nordsee und Windverhältnissen in der Deutschen Bucht

Ziel: tägliche Vorhersagen  
der gesamten Tidekurven  
CUXHAVEN und HAMBURG

$\pm 20$  cm  
 $\pm 20$  Min.  
10 bis 12 h im voraus

Grundlagen: Theoretisch abgesicherte Ansätze über die physikalischen Zusammenhänge zwischen Topographie, Hydrologie und Meteorologie; Informationen über das Geschehen in der mittleren und nördlichen Nordsee; kurzfristige Windvorhersagen (3 bis 6 h)

Abb. 7. Entwicklung der Vorhersage-Grundlagen für den Hamburger Sturmflut-Warndienst

gegebenen Ausblick laufen bereits die Vorbereitungen. An einigen Beispielen kann der Stand erläutert werden:

Daß bei dem erwähnten „Huckepack-Effekt“ tatsächlich die langen Wellen in erheblichem Maße aufeinander einwirken, zeigt Abb. 8. Es sind die Windstaukurve in Cuxhaven sowie diejenigen in Hamburg aufgetragen, die sich ergeben, wenn die Normaltide dort zu vorausberechneter Zeit bzw. 1 Stunde früher eingetroffen wäre. Ein Vergleich der Formen zeigt, daß die Normaltide Hamburg offensichtlich früher als nach Tidekalender erreichte und daß diese Effekte (die bei jeder Sturmflut anders sind) „Laufzeiten“ und Höhen maßgeblich

bestimmen. Das zeigt auch Abb. 9, wo die Ähnlichkeit der Windstaukurven in Cuxhaven und Hamburg am größten ist bei einer Zeitverschiebung von 10 bis 20 Min. Auf Abb. 10 ist die Windstaukurve in Hamburg für eine nicht verschobene mittlere Tide deutlich niedriger als in Cuxhaven. Wenn dagegen die mittlere Tide um 30 Min. früher als bei ungestörten Verhältnissen Hamburg erreicht hat, sind die Windstaukurven an beiden Orten fast identisch.

Bei diesen Vergleichen wird noch qualitativ von der Ähnlichkeit auf eine Zeitverschiebung geschlossen. Zugleich wird angenommen, daß der Wind über der Elbe die Form der Windstaukurven nicht verändert. Augenblicklich wird bei Strom- und Hafengebäude Hamburg aber schon daran gearbeitet, nach Identifizierung der Windstaukurve in Cuxhaven die „Laufzeiten“ der Windstau- und Tidekurven bis Hamburg, ihre dortigen Formen und gegenseitigen Überlagerungen zu berechnen. Damit wäre man in der Lage, den gesamten Sturmflutablauf im oberen Stromgebiet zu prognostizieren.

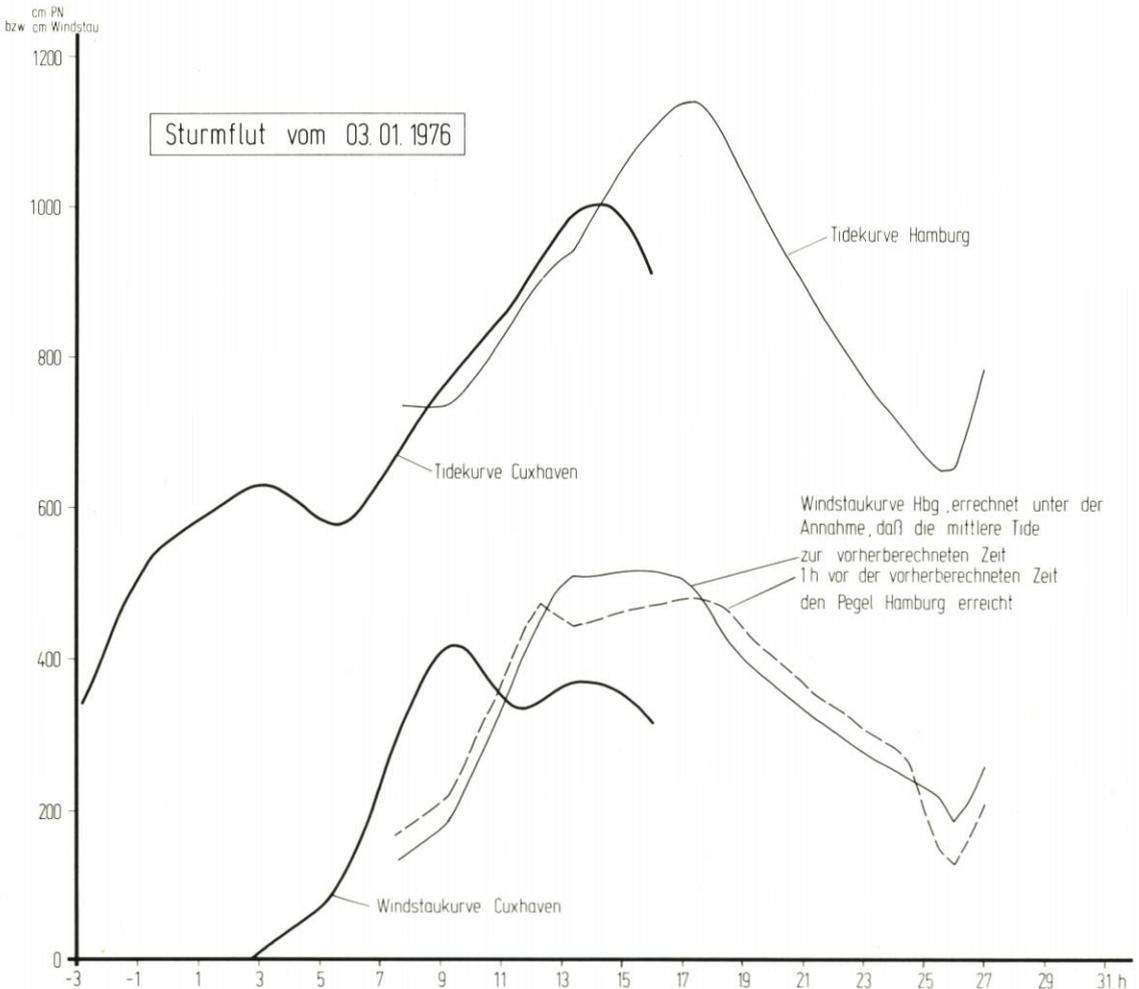


Abb. 8. Windstaukurven in Hamburg bei gegen den Windstau verschobener astronomischer Tide (03.01.1976)

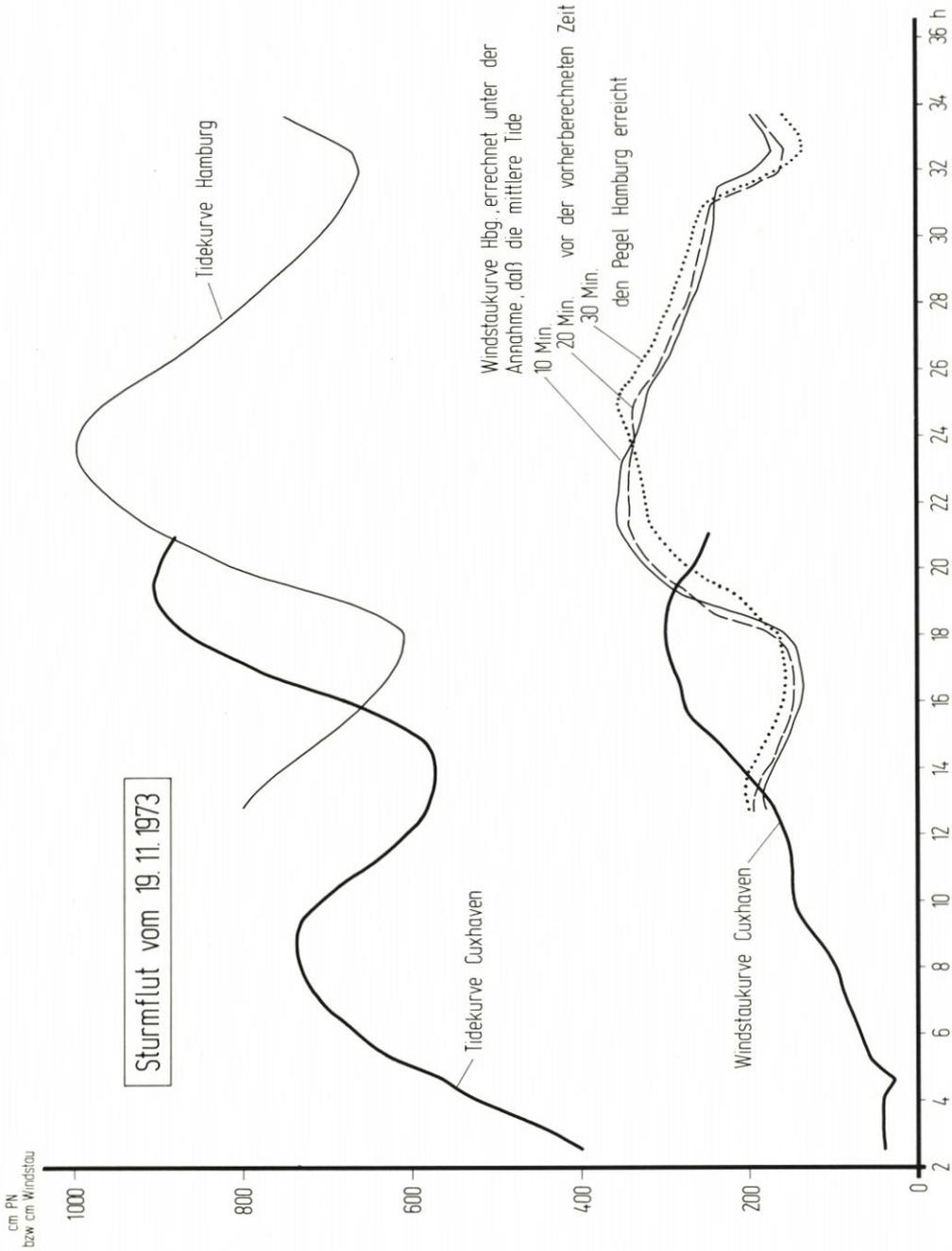


Abb. 9. Windstaukurven in Hamburg bei gegen den Windstau verschobener astronomischer Tide (19. 11. 1973)

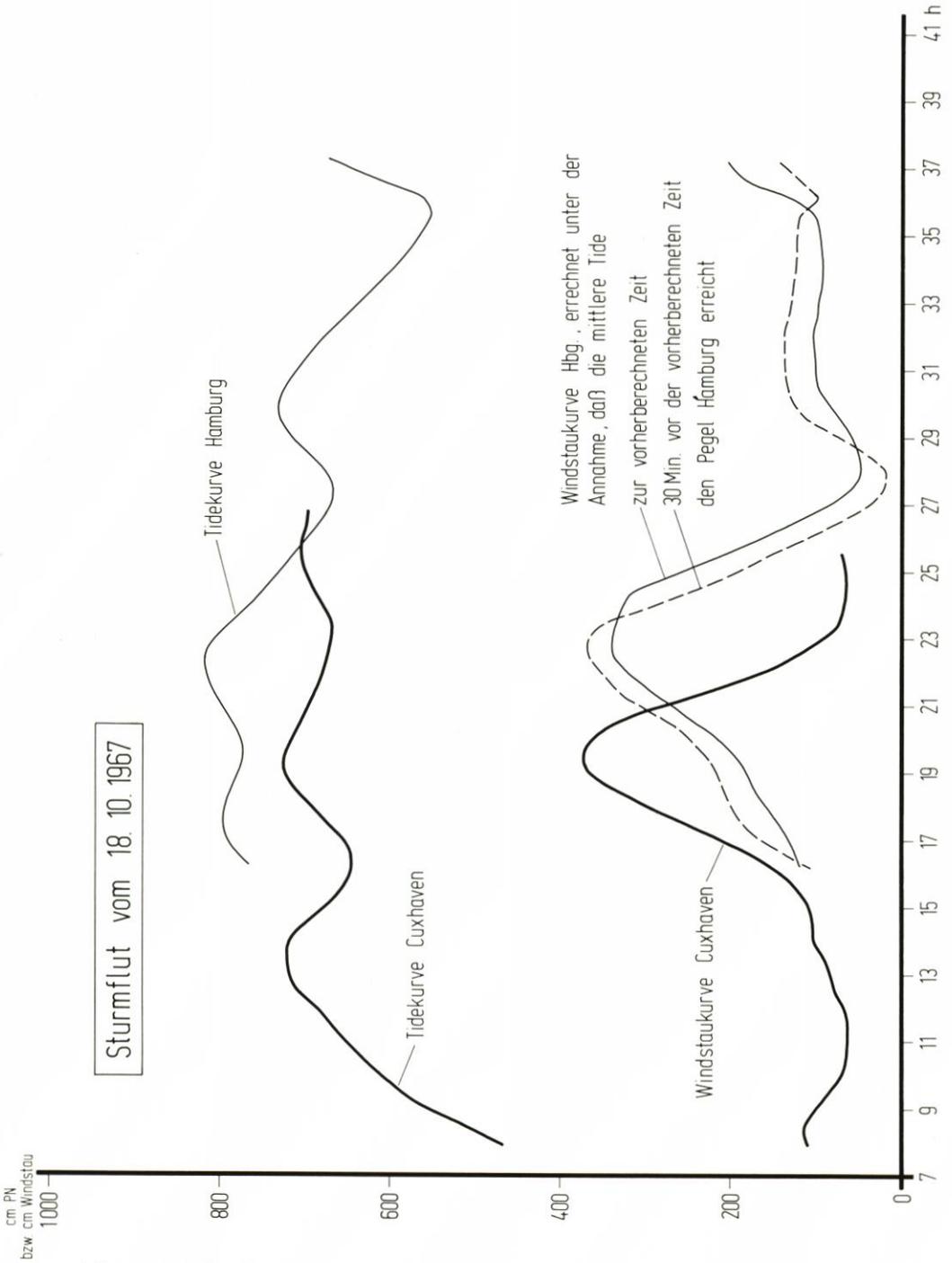


Abb. 10. Windstaukurven in Hamburg bei gegen den Windstau verschobener astronomischer Tide (18. 10. 1967)

## 6. S c h l u ß f o l g e r u n g e n

Zukünftige Sturmflutanalysen, die erhöhten Anforderungen genügen müssen – insbesondere wenn es sich um die Entwicklung regionaler Vorhersagen und um die Erarbeitung von Grundlagen für Bemessungswasserstände handelt, – werden recht aufwendig werden: Je Sturmflut und Pegelort werden erheblich mehr Informationen als nur Höhe und Zeit des Hochwasserscheitels benötigt. Für Analysen werden dann etwa über 24 Stunden alle 30 Min. die Höhen der Sturmflutkurven heranzuziehen sein. Abgesehen von der (als bekannt vorausgesetzten) mittleren Tidekurve und der dann auszurechnenden Windstaukurve wird sich der Arbeitsaufwand je Sturmflut etwa verfünffzigfachen! Ziel muß die Erstellung einer Datenbank sein, in der ausreichende Informationen über jede gelaufene Sturmflut abrufbar gespeichert sind.

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

- CHRISTIANSEN, H. und SIEFERT, W.: Storm Surge Prediction by Combined Wind and Tide Data. Proc. 16. Int. Conf. on Coastal Eng., 1978.
- DIETRICH, G. und KALLE, K.: Allgemeine Meereskunde. Gebr. Bornträger, Berlin, 1957.
- FÜHRBÖTER, A.: Über zeitliche Änderungen der Wahrscheinlichkeit von Extremsturmfluten an der deutschen Nordseeküste. Mitt. Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 51, 1976.
- LIESE, R. und LUCK, G.: Verfahren zum Nachweis von Veränderungen der Tidehochwasserstände in der Deutschen Bucht. Dt. Gew. Mitt., H. 5, 1978.
- PRANDLE, D.: A Numerical Model of the Southern North Sea and the River Thames. Inst. of Ocean. Sc., Rep. No. 4, Birkenhead, 1974.
- PRANDLE, D. und WOLF, J.: The Interaction of Surge and Tide in the North Sea and River Thames. Geoph. J., R. astr. Soc., 55, 1978.
- SIEFERT, W.: Sturmflutvorhersage für den Tidebereich der Elbe aus dem Verlauf der Windstaukurve in Cuxhaven. Mitt. Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 30, 1968.
- SIEFERT, W.: Hamburger Sturmflutwarndienst (WADI) – Grundzüge des Vorhersageverfahrens. Hansa, Nr. 5, 1977.
- TOMCZAK, G.: Der Einfluß der Küstengestalt und des vorgelagerten Meeresbodens auf den windbedingten Anstau des Wassers, betrachtet am Beispiel der Westküste Schleswig-Holsteins. Dt. Hydr. Zeitschr., H. 2/3, 1952.
- VERSCHAVE, J. E. L.: Stormtijden op de Noordzee en op de Westerschelde – Correlatie en Prognose van de Waterstanden. Tijdschr. de Openbare Werken van België, Afl. 6, 1977.