

KFKI

## Bemessungswasserstände entlang der Elbe

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit / Provided in Cooperation with:  
Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)

---

Verfügbar unter / Available at:

<https://hdl.handle.net/20.500.11970/101276>

Vorgeschlagene Zitierweise / Suggested citation:

KFKI (1988): Bemessungswasserstände entlang der Elbe. In: Die Küste 47. Heide, Holstein: Boyens. S. 31-50.



# Bemessungswasserstände entlang der Elbe

Bericht einer Länder-Arbeitsgruppe\*

## Zusammenfassung

Auf ihrem Treffen vereinbarten die Staatssekretäre/Staatsräte der Elbanliegerländer 1985 folgende Ziele für die Arbeit der Gruppe:

- Vorschläge für eine einheitliche Definition und Festlegung der Bemessungswasserstände/maßgebenden Sturmflutwasserstände zu erarbeiten und
- die bisher gewählten Zuschläge zur Bestimmung der Sollhöhen zu erläutern.

Die Arbeitsergebnisse bestehen in einer „Bemessungssturmflut“ für die Elbe von Cuxhaven bis Geesthacht, der außerordentliche Wind-, Windstau- und Oberwassergrößen zugrunde liegen und die für das nächste Jahrhundert Gültigkeit haben soll. Durch Verwendung von Modellen werden gegenüber bisherigen Verfahren Vereinfachungen insofern erreicht, als nur noch Zuschläge für den Wellenauflauf erforderlich werden.

## Summary

*In their 1985 meeting, Government representatives of the German Federal Republic States bordering the Elbe agreed of the following goals for a working group:*

- *Suggestions for a general definition and determination of the design water level associated with storm surges*
- *discussion of the safety factors formerly used to calculate the height of constructions measures.*

*This has resulted in a "design storm surge" for the Elbe from Cuxhaven to Geesthacht associated with extreme wind, storm surge and fresh water discharge. These values are considered to be valid for the next century. Using models the procedure could be simplified in comparison to previous techniques since only corrections due to wave run-up have to be added.*

## Inhalt

1. Verfahren zur Festlegung der Bemessungswasserstände . . . . .	32
2. Grundlagen des Verfahrens . . . . .	33
2.1 Maßgebende Sturmidekurve für Cuxhaven . . . . .	33
2.1.1 Mittlere Tidekurve . . . . .	33
2.1.2 Windstaukurve . . . . .	35
2.1.3 Säkulare Veränderungen . . . . .	37
2.2 Sonstige Vorgaben für die Modelluntersuchungen . . . . .	38
2.2.1 Wind über der Elbe . . . . .	40
2.2.2 Oberwasserzufluß . . . . .	40

---

\* Am 21. 3. 1985 sprachen die zuständigen Staatssekretäre/Staatsräte von Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Hamburg über den Hochwasserschutz entlang der Elbe. Eines der Ergebnisse war die Einsetzung einer Arbeitsgruppe von Fachbeamten, die sich mit den Bemessungswasserständen befassen sollte. Diese Gruppe bestand aus den Herren:

MR Krause, Umweltministerium, Hannover

BD Kroker, Baubehörde, Hamburg

RBD Probst, Amt für Land- und Wasserwirtschaft, Itzehoe

MR Scherenberg, Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei, Kiel

Prof. Dr.-Ing. Siefert, Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Landwirtschaft, Hamburg (Obmann)

und legte im Mai 1986 nach sechs Sitzungen den hier nur unwesentlich veränderten Bericht vor.

3. Bemessungswasserstände und Sollhöhen der Hochwasserschutzanlagen . . . . .	42
3.1 Modellergebnisse . . . . .	42
3.2 Zum Wellenauflauf . . . . .	44
4. Diskussion alternativer Bemessungsansätze . . . . .	46
4.1 Zu den astronomischen Einflüssen . . . . .	46
4.2 Zu Fernwellen . . . . .	47
4.3 Überlagerung von Höchstwerten . . . . .	47
4.4 Zur Eintrittswahrscheinlichkeit der maßgebenden Sturmflut . . . . .	48
4.5 Zu Sicherheitszuschlägen . . . . .	49
5. Schriftenverzeichnis . . . . .	50

## 1. Verfahren zur Festlegung der Bemessungswasserstände

Der Bemessungswasserstand ist der für einen vorgegebenen Zeitraum zu erwartende höchste Wasserstand, auf den eine Hochwasserschutzanlage unter Berücksichtigung des säkularen Anstiegs und des Oberwasserzuflusses zu bemessen ist. Möglicher Seegangseinfluß ist darin nicht enthalten.

Die Arbeitsgruppe war sich einig, daß zum Erreichen der Ziele ein zwischen den Elbanliegerländern abgestimmtes Bemessungsverfahren konzipiert werden mußte. Dieses sollte

- die Erkenntnisse über das Tide- und Sturmflutgeschehen, die in den letzten 25 Jahren gesammelt wurden, berücksichtigen,
- auf gemessenen Daten basieren, soweit dies irgend möglich ist,
- physikalisch sinnvoll sein,
- nachvollziehbar sein,
- so aufgebaut sein, daß es im Prinzip auch für die Küste und für andere Flüsse brauchbar ist,
- so beschaffen sein, daß einerseits neue oder auszubauende Hochwasserschutzanlagen damit bemessen und andererseits die Sicherheit vorhandener überprüft werden können.

Es mußte dazu zwischen zwei Wegen entschieden werden, nämlich ob für jeden Ort an der Elbe ein Bemessungswasserstand separat festgelegt oder ob nur für die Elbmündung (d. h. Cuxhaven) ein solcher ermittelt und der weitere Verlauf in der Elbe in Modellen bestimmt werden sollten. Basis der Untersuchungen mußte jeweils ein großes, möglichst homogenes Datenkollektiv sein. In der Elbe selbst sind in den letzten drei Jahrzehnten aber erhebliche natürliche und künstliche Veränderungen zu verzeichnen.

Die Benutzung des ersten Weges erfordert, diese Tatsache zu berücksichtigen und folglich die Wasserstände, die in und vor den letzten Jahrzehnten auftraten, auf den heutigen Elbezustand zu „beschicken“. Erst dann könnten sie statistisch weiter bearbeitet werden. Eine „Beschickung“ könnte aber nur dann richtig vorgenommen werden, wenn die Wirkungen der einzelnen Veränderungen bekannt wären.

Dagegen basiert der zweite Weg unmittelbar auf Meßwerten, mit denen ein geeichtes Modell gesteuert werden kann. Dafür sind aber erneut zwei Wege denkbar, nämlich die Bestimmung eines maßgebenden *Scheitel*wasserstandes oder die Ermittlung einer maßgebenden *Sturmtidekurve*, deren Höchstwert den Bemessungswasserstand darstellt.

Der Vorteil der Verwendung einer *Sturmtidekurve* ist, daß nur so die ungünstigsten Wechselwirkungen zwischen Tide und Windstau auf dem Weg von Cuxhaven nach Hamburg erfaßt und zusätzliche Aussagen über Verweildauern hoher Zwischenwasserstände sowie den zeitlichen Ablauf der Sturmflut möglich sind.

Damit reduzierten sich für die Arbeitsgruppe die Alternativen auf

- Modellversuche für alle in verschiedenen Ausbaurzuständen der Elbe gelaufenen höheren Sturmfluten mit nachfolgender statistischer Bearbeitung für die einzelnen Pegel und
- statistische Bearbeitung der gemessenen Daten von Cuxhaven mit anschließendem Modellversuch für die Elbe.

Die Arbeitsgruppe entschied sich für den sichereren und physikalisch sinnvolleren zweiten Weg, nämlich folgendes Verfahren:

- a) Bestimmung einer maßgebenden Sturmidekurve für Cuxhaven;
- b) Modelluntersuchungen für die Elbe mit dieser Sturmidekurve; Ergebnis ist der maßgebende Sturmflutablauf in der Elbe;
- c) daraus Festlegung der Scheitelwerte (HThw) für jeden Ort als Bemessungswasserstände;
- d) Bestimmung des zeitlichen und örtlichen Ablaufes der maßgebenden Sturmflut aus den Kurven.

Das so entwickelte Bemessungsverfahren wird im folgenden erläutert. Tab. 1 enthält eine Gegenüberstellung der gewählten Komponenten dieses Verfahrens mit den bisher an der Elbe praktizierten.

## 2. Grundlagen des Verfahrens

### 2.1 Maßgebende Sturmidekurve für Cuxhaven

Die maßgebende Sturmidekurve muß folgende Komponenten enthalten (siehe dazu Abb. 1):

- Die aktuellen Tideverhältnisse an der Küste,
- zusätzliche astronomische Einflüsse,
- meteorologische Einflüsse (im wesentlichen Windstau),
- Einflüsse aus Schwingungen in der Nordsee und aus Fernwellen und
- säkulare Veränderungen.

Diese Komponenten überlagern sich schon in der Nordsee. Dabei beeinflussen sie sich gegenseitig, so daß die in Cuxhaven gemessenen Werte nur die integrierte Wirkung darstellen. Ein Herauslösen einzelner Einflüsse für Bemessungszwecke ist mit ausreichender Sicherheit nicht möglich.

Das aktuelle Tidegeschehen wird am besten durch die mittleren Tidekurven beschrieben. Die übrigen astronomischen und meteorologischen Einflüsse sowie die Wirkungen aus Schwingungen und Fernwellen sind in der sog. Windstaukurve zusammengefaßt. Diese Bezeichnung ist deshalb gerechtfertigt, weil in der Regel etwa 90 % ihrer Beträge aus Windeinfluß bestehen.

Hinsichtlich der säkularen Veränderungen sind gesonderte Betrachtungen erforderlich (siehe Kap. 2.1.3).

#### 2.1.1 Mittlere Tidekurve

Es wird vorgeschlagen, das Mittel der letzten 10 Jahre zu wählen, um einen repräsentativ langen Zeitraum zu haben, in dem auch der Oberwasserzufluß ( $770 \text{ m}^3/\text{s}$ ) etwa dem langjährigen Mittel entspricht. Die mittlere Tidekurve ist in ihrem gesamten Verlauf durch topographische, periodische (astronomische) und aperiodische (meteorologische) Faktoren beeinflusst. Die Kurve wird durch folgende Parameter charakterisiert:

Tabelle 1. „Kanontafel“ der Bemessungsverfahren für den Tidebereich der Elbe

	Elbabschnitt	mittlere Tide	Sturmflutscherteil	säk. Entwicklung	Oberwasserzufluß	Zuschlag	Bemessungswasserstand	Wellenauflauf	Quelle
Niedersachsen 1965	Cuxhaven bis Drochtersen		16./17.02.62 (= HHT <sub>Thw</sub> )		1042 m <sup>3</sup> /s (wie am 16./17.02.)	0,5 bis 0,6 m „Sicherheitsszuschl.“	Bemessungswasserstand	2,26 m (Cuxhaven) bis 1,35 m (Drochtersen) (Diff. zwischen Sollhöhe und BW)	Die Küste, H. 33, 1979, S. 25-51
	Grauerort bis Zollenspieker		16./17.02.62, jedoch ohne Deichbrüche; Zuschläge 0,1 bis 0,4 m nach Franziusus-Inst.		1042 m <sup>3</sup> /s	0,5 bis 0,85 m		1,3 m (Grauerort) bis 0,6 m (Over)	
Niedersachsen 1979 (Ing.-Kommission)	oberh. Zollensp. bis Geesthacht		wie Zollenspieker		wie Zollenspieker			0,8 m (Ilnenau-Mündung) bis 1,6 m (Geesthacht)	
	Cuxhaven bis Geesthacht	Springerhöhung des Thw um 30 cm	03.01.76 (= HHT <sub>Thw</sub> )	+ 22 cm (bis 2065)	2150 m <sup>3</sup> /s (→ + 4 cm in Hbg. bis + 93 cm in Gee.)			2,28 m (Cuxhaven) bis 1,18 m (Hinterbrack); 0,4 m (Over) bis 0,62 m (Geesthacht) als Diff. zwischen vorh. Deichhöhe und BW	
Schleswig-Holstein 1967	Brunsbüttel bis Schülaue	Var. 7 der Modellversuche des Franziusus-Instituts: Sturmflut vom 16./17.02.62, jedoch bei Brunsbüttel um 0,5 m erhöht, mit hochwasserfreier Eindichtung Wilhelmshurgs, aller Gebiete unterh. Funkenwerder und aller Nebenflüsse sowie neuer Deichlinie Este bis Harburg		Over bis Geesthacht: + 32 cm insgesamt	1042 m <sup>3</sup> /s	0,5 m Diff. zwischen Bestickhöhe und maßgeb. Sturmflutwass. + Bemess.-Wellenauf-		1,9 m (Brunsbüttel, Brokdorf) bis 1,1 m (Schülaue) als „Bemess.-Wellenauflauf“ nach Einmessung von Treibselgrenzen	Mitt. des Franziusus-Inst. Hannover, H. 45, 1977, S. 55 und Taf. 6; Erlaß Landesamt für Wasserwirtschaft Schl.-H., 21. 12. 1967
Hamburg 1962	Blankenese bis Gauer	Springerhöhung des Thw um 30 cm	17.02.62	+ 20 cm	2400 m <sup>3</sup> /s (→ + 10 cm)	0,4 m für Deichbrüche am 17.02.62. Abdämmung der Alten Süderelbe	Bemessungswasserstand	bis 2,3 m (Mühlens. Loch) im übrigen Bereich 0,5 m für Wellenauflauf und örtl. Windstau	Die Küste, H. 1, 1962, S. 86 sowie unveröff. Arbeiten verschiedener Gutachter
Arbeitsgruppe „Bemessungswasserst.“ 1985/86	Cuxhaven	Mittl. Kurve 1976/85 + maßgeb. Windstau k u r v e aus den höchsten seit 1800 gemessenen Werten; Spring-einfl. und Fernwellen sind enthalten		MThw-Anstieg 30 cm MT <sub>Nw</sub> unverändert		Bemessungswasserstand			
	oberh. Cuxhaven bis Geesthacht	Modellunters. mit Randbed. Cuxhaven sowie Wind über der Unterelbe wie am 03.01.76 (höchste Meßwerte)			2200 m <sup>3</sup> /s			Berechnung des Auflaufpektrums nach Mess. bzw. Beobacht. des See-gangs vor den Schutzanlagen	---

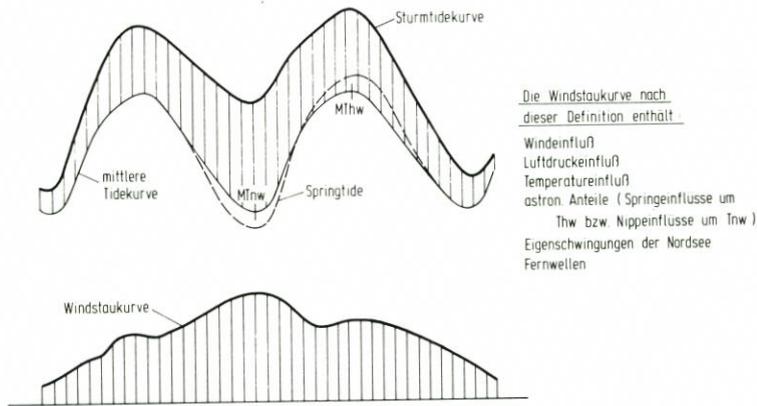


Abb. 1: Definition Windstaukurve

Mittlere Tide 1976/85 in Cuxhaven

Tidehochwasser (MThw)	1,50 mNN
Tideniedrigwasser (MTnw)	- 1,55 mNN
Tidemittelwasser (MTmw)	0,05 mNN
Tidehub (MThb)	3,05 m
Flutdauer (T <sub>F</sub> )	5 h 40 min
Ebbdauer (T <sub>E</sub> )	6 h 45 min

Die Scheitelwerte sind auf 5 cm und 5 min auf- bzw. abgerundet worden. Alle 5 bis 10 Jahre sollte künftig das letzte 10jährige Mittel mit diesen Werten verglichen werden, um mögliche Abweichungen interpretieren zu können.

2.1.2 Windstaukurve

Die maßgebende Sturmtidekurve wird aus der Addition der mittleren Tidekurve und einer extremen Windstaukurve gebildet (Abb. 1). Zur Bestimmung der letzteren stehen Windstaukurven aller Sturmtiden seit 1901 zur Verfügung (insgesamt 180 Ereignisse; STROM- UND HAFENBAU, 1985), darüber hinaus die Windstaukurven aller hohen Sturmfluten des 19. Jahrhunderts (SIEFERT, 1969).

Entscheidend für die Höhe einer Sturmflut ist der Windstau um die MThw-Zeit in Cuxhaven. Aus dem Kollektiv der hohen Sturmfluten der letzten 160 Jahre ergeben sich als Höchstwerte:

W (MThw) = max. Stau um MThw cm	Datum
375	16./17. 02. 1962
365	03. 01. 1976
360	03./04. 02. 1825

Dazu ist anzumerken, daß 1962 eine Fernwelle bei Nipptide auftrat, 1825 dagegen Springtide herrschte.

In Cuxhaven traten die höchsten bisher ermittelten Windstau maxima jedoch um die MTnw-Zeit auf, und zwar

W (MTnw) = max. Windstau um MTnw cm	Datum
430	23. 12. 1894
430	23. 02. 1967
410	03. 01. 1976
400	10. 02. 1949

Wegen der o. g. Wechselwirkungen zwischen Windstau, astron. Tide und Wassertiefen muß sich bei sonst gleichen Verhältnissen der Stau um MThw niedriger als um MTnw entwickeln. Um dieses Phänomen näher zu untersuchen, wurden alle Sturmfluten in Cuxhaven herangezogen, deren Windstau maximum W um MTnw auftrat und bei denen der Wind sich über die Tide nicht wesentlich veränderte. Da gesicherte Winddaten erst ab 1965 zur Verfügung stehen, verblieben letztlich die 12 Ereignisse der Tab. 2.

Tabelle 2

Sturmflut	W (MTnw) cm	W (MThw) cm	W (MThw) / W (MTnw) %
17. 1. 84	220	120	55
18. 1. 83	325	220	68
16. 12. 82	290	225	78
20. 11. 82	220	180	82
24. 11. 81	350	300	86
1./ 2. 1. 81	295	150	51
3. 1. 76	410	365	89
26. 1. 75	215	185	86
18. 12. 74	215	185	86
19. 12. 66	240	150	63
2. 1. 65	340	230	68
31. 10. 65	220	140	64
		Mittel:	73%
		Max:	89%
		Min:	51%

Daß der Weg über die Betrachtung der Niedrigwasser-Stauwerte überhaupt beschritten wird, hat zwei Gründe. Zum einen ist das Kollektiv mit hohem Stau um MThw nur sehr klein, zum anderen sind die Maximalwerte um MTnw aufgetreten und sollten nicht einfach vernachlässigt werden.

Zur Ermittlung des maßgebenden Windstaus wird aufgerundet mit dem maximalen Verhältnis

$$W(MThw) : W(MTnw) = 90 \%$$

gerechnet, um die ungünstigste Übertragung auf das Hochwasser zu erfassen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Staubeträge um MTnw mögliche Anteile aus Fernwellen, Schwingungen usw. enthalten (wie ja auch die Werte um MThw), jedoch *keine* Springeinflüsse (Abb. 1).

Denn die Hälfte der SpTnw ist niedriger als die zur Stauermittlung verwendeten MTnw, und zwar in Cuxhaven i. M. um rd. 25 cm, die dann in der mittleren Tidekurve enthalten sind. Das o. a. Verhältnis enthält also bereits den Springeinfluß um MThw bei der Übertragung des MTnw-Staus auf das MThw, soweit er auftrat. In obiger Liste sind deshalb die Ereignisse bei Springtide unterstrichen. Wenn bei Sturmfluten die Stauentwicklung überhaupt auf die Springtidewasserstände reagierte, was nach neuen Untersuchungen aber unwahrscheinlich ist<sup>1)</sup>, wären zu erwarten:

- Stau um MTnw erhöht wegen geringerer Wassertiefe;
- Stau um MThw ermäßigt wegen größerer Wassertiefe;
- daraus folgend kleineres Verhältnis  $W(MThw) : W(MTnw)$  als bei mittlerer Tide;
- bei Springtide andere (meist steilere) Gefälleverhältnisse in der Deutschen Bucht, die sich auf die Stauentwicklung auswirken;
- daraus ohnehin folgend ein Verbot linearer Überlagerung (Addition) von Spring- und Stauwerten, die nicht gleichzeitig aufgetreten sind.

Um die Repräsentanz des maximalen Verhältnisses  $W(MThw)/W(MTnw) = 0,89$  am 03. 01. 76 zu unterstreichen, sei auf ein numerisches Ergebnis des DÄNISCHEN HYDRAULISCHEN INSTITUTS (1983) in deren Nordseemodell hingewiesen. Dort wurden die Stauwerte in Cuxhaven für die meteorologische Situation am 3. 1. 76 sowie die Fälle von Phasenverschiebungen um 3 h bzw. 6 h gegen die Tide untersucht: Der (in der Natur eingetretene) maximale Stau um MTnw mit 410 cm verschiebt sich schließlich auf die Zeit nach MThw und erreicht um MThw etwa 340 cm, also 83 %. - Außerdem wurden die Sturmfluten von 1901 bis 1964 trotz unzureichender Winddaten auf das Verhältnis  $W(MThw) : W(MTnw)$  untersucht. Dabei ergaben sich für 14 Ereignisse Werte von 63 % bis 83 %, i. M. 73 %.

Damit sollte der Stau für eine *maßgebende Windstaukurve* folgendermaßen festgelegt werden:

max. Stau um MTnw: 430 cm

um MThw:  $430 \cdot 90\% = 385$  cm

(zum Vergleich: bisher gemessener Höchstwert 375 cm)

Diese Daten basieren auf Meßwerten und sind in den letzten 160 Jahren nie überschritten worden (Abb. 2). Die Gruppe schlägt als Windstaukurve den in Abb. 3 gezeigten Verlauf vor. Von MTnw bis nach MThw ist die Windstaukurve einem realistischen Verlauf angepaßt. Der für die Elbe ungünstigste Anstieg der Kurve vor MTnw wurde in Modellen ermittelt.

### 2.1.3 Säkulare Veränderungen

Die säkularen Veränderungen werden üblicherweise durch Ausgleich 19jähriger Mittel bestimmt. Abb. 4 zeigt die bekannten Entwicklungen der Tidescheitelhöhen in Cuxhaven und Hamburg. Da letztere durch Maßnahmen in und an der Elbe beeinflusst sind, sollen die Veränderungen in Cuxhaven näher beleuchtet werden, um Aufschluß über zu erwartende Höhen zu gewinnen. So ergeben sich durch optischen Ausgleich der 19jährigen Mittel<sup>2)</sup> für willkürlich ausgewählte Zeiträume die auf Tab. 3 folgenden Trends.

<sup>1)</sup> Siehe dazu SIEFERT und LASSEN (1985) über Windstau-Kennlinien im Küstenvorfeld.

<sup>2)</sup> Das Mittel „1976“ umfaßt z. B. den Zeitraum 1967 bis 1985

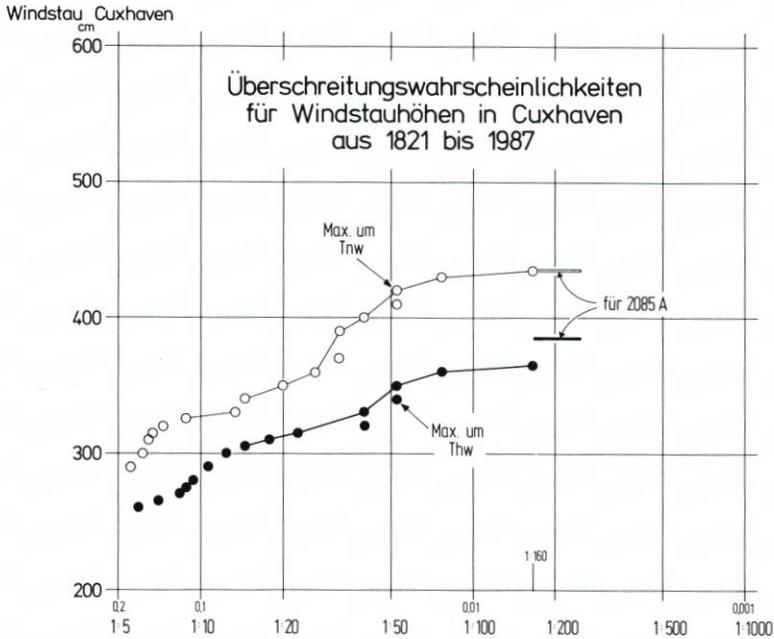


Abb. 2: Überschreitungswahrscheinlichkeit für Windstauhöhen in Cuxhaven mit Angabe der für die Bemessungsturmflut 2085A verwendeten Werte

Weitere Untersuchungen zur säkularen Entwicklung der mittleren Scheitelwasserstände führten JENSEN (1984) sowie FÜHRBÜTER und JENSEN (1985) für elf Küstenorte durch. Sie berechneten dazu den säkularen Anstieg der Jahresmittel der MThw und MTnw über 100, 50 und 25 Jahre. So besteht die Möglichkeit, auch aus diesen Angaben die säkularen Veränderungen in Cuxhaven für eine anschließende Berechnung in einem Elbmodell zu entnehmen.

Um den Veränderungen in den letzten vier Jahrzehnten gerecht zu werden, schlägt die Arbeitsgruppe als anzunehmende Werte in Anlehnung an die 19jährigen Mittel für 1955/76 (Zeitraum 1946/85) und die Trends der Jahresmittel 1936/85 für Cuxhaven (Abb. 4) vor:

MThw-Anstieg bis 2085: 30 cm

MTnw verharrend auf dem Niveau von 1976/85

So ist nach 100 Jahren die in Abb. 3 skizzierte „mittlere Tidekurve nach säkularer Entwicklung“ maßgebend. Durch Überlagerung mit der unter 2.1.2 ermittelten Windstaukurve ergibt sich eine höhere maßgebende Sturmidekurve als für 1985.

Zukünftige physikalische Änderungen in der Atmosphäre und deren Folgen sind nicht abzusehen. Deshalb hält es die Gruppe für notwendig, daß die säkulare Entwicklung alle 20 bis 25 Jahre überprüft wird.

## 2.2 Sonstige Vorgaben für die Modelluntersuchungen

Außer der maßgebenden Sturmidekurve tragen auch der Wind über der Elbe und der Oberwasserzufluß zum Entstehen der örtlichen Wasserstände bei. Diese Faktoren müssen deshalb ebenfalls in maßgebender Größe in das Modell eingegeben werden.

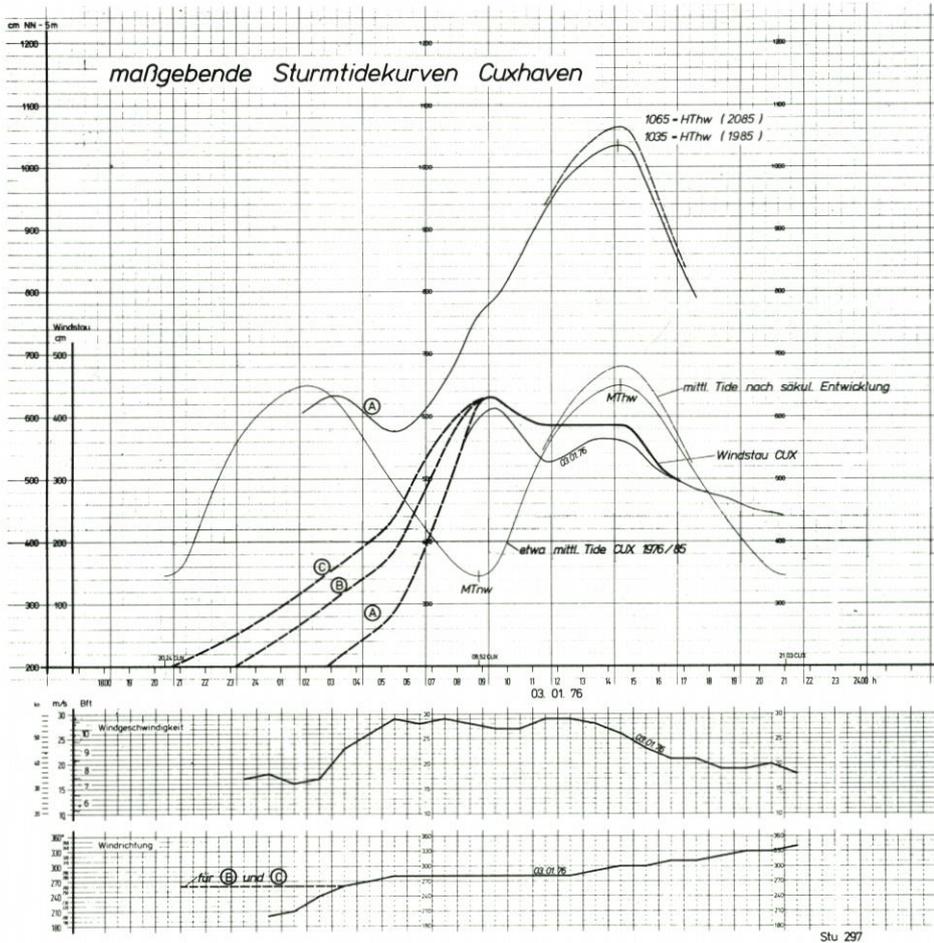


Abb. 3: Mittlere Tidekurven Cuxhaven, Windstaukurven für Cuxhaven und Windverhältnisse im Elbmündungsgebiet für die Bemessungsturmflut

Tabelle 3

Zeitraum	Veränderungen in cm/Jh.	
	MThw	MTnw
1860/90**)	± 0	
1880/1930	+ 31	
1920/76	+ 19	
1955/76	+ 30	- 18
1967/76	+ 65	
1865/90		- 20
1905/60		+ 18
1960/76		- 32
1876/1976	+ 24	+ 17

\*\* D. h. 31 19jährige Mittel

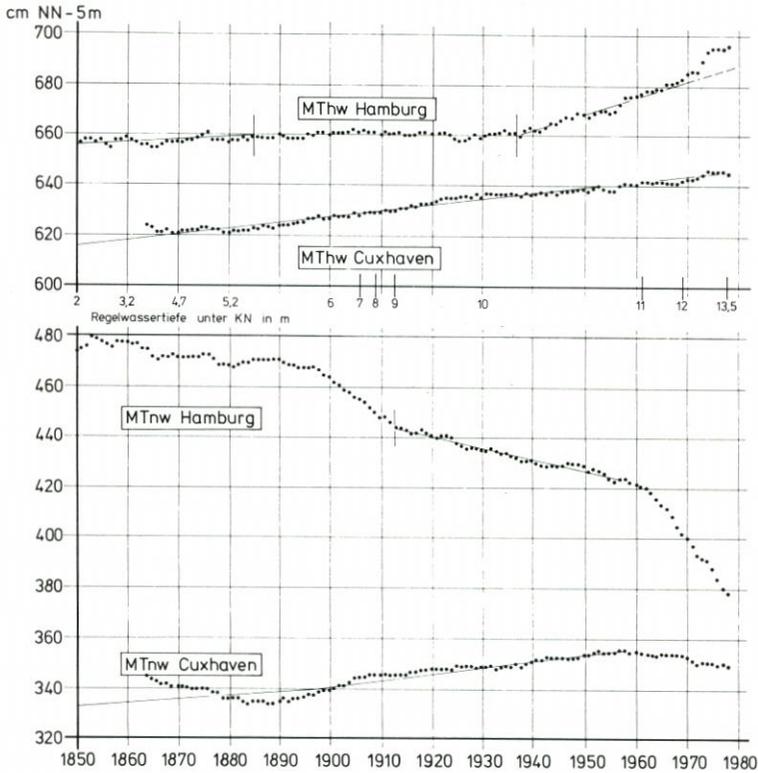


Abb. 4: 19jährige übergreifende Mittel der Thw und Tnw in Cuxhaven und Hamburg

### 2.2.1 Wind über der Elbe

Als Ergebnis der meteorologischen Verhältnisse über dem Atlantik und der Nordsee wird die Windstaukurve von Cuxhaven in das Modell eingegeben. Wirksam wird dann noch der Wind über der Unterelbe, der nach Vergleichen aber schon schwächer als über der Deutschen Bucht ist. Dennoch wird der auf Scharhörn gemessene Wind für die untere Modellgrenze angesetzt, und zwar mit den bisher gemessenen Höchstwerten.

Mit 29 m/s über 4 Stunden stellt die Windgeschwindigkeit am 3. 1. 76 das Maximum dar, das auch 1962 nicht erreicht wurde. Am nächsten kommt ihr der 23./24. 2. 67 mit 29 m/s über 3 Stunden. Höhere Geschwindigkeiten wurden kaum, und dann nur für kurze Zeit, gemessen.

### 2.2.2 Oberwasserzufluß

Alle neueren Untersuchungen zeigen, daß der Stau in Cuxhaven weitgehend unbeeinflusst vom Oberwasserzufluß  $Q_0$  ist, der in Neu Darchau gemessen wird. Also ergeben sich zwei Fragen, nämlich nach

- der als Zufluß zu wählenden Wassermenge und
- dem Einfluß von  $Q_0$  auf die HThw-Höhen.

## Zum Zufluß für die maßgebende Sturmflut:

- MQ liegt zwischen 700 und 800 m<sup>3</sup>/s
- HHQ erreichte 3840 m<sup>3</sup>/s (Ermittlung ungenau) am 7. 4. 1895
- bei 180 Sturmfluten seit 1901 (mit Windstau über 2 m oder HThw mindestens 1,5 m über MThw in Cuxhaven) traten ein (Tab. 4):

Tabelle 4

Q <sub>o</sub> in m <sup>3</sup> /s	Anzahl Sturmfluten	Bem.
1400-1600	5	
1600-1800	6	
1800-2000	4	
2000-2200	1	(29. 12. 1974)
2200-2600	0	
2600	1	(24. 2. 1946; Q <sub>o</sub> unsicher)

17 von 180

Niedersachsen verwendete bisher den 1974 bei einer mittleren Sturmflut aufgetretenen Wert von 2150 m<sup>3</sup>/s (ING.-KOMMISSION, 1979, S. 33). Neue Erkenntnisse über das mögliche Zusammentreffen hohen Windstaus mit großen Q<sub>o</sub> sind nicht vorhanden. Die Arbeitsgruppe sieht keine Veranlassung, zur Ermittlung der maßgebenden Sturmflut einen höheren Wert zu nehmen. Sie empfiehlt jedoch, den Windstau mit einem auf 2200 m<sup>3</sup>/s aufgerundeten Oberwasserzufluß zu kombinieren. Dieser Wert wurde 1926/83 i. M. an drei Tagen im Jahr überschritten (Dt. Gew. Jahrb. Elbe 1983, S. 104).

## Einfluß des Oberwasserzuflusses:

Die Wirkung des Oberwasserzuflusses auf die Thw unterhalb von Geesthacht kann auf drei Wegen ermittelt werden: Durch statistische Auswertung gemessener Daten, durch Versuche in einem hydraulischen Modell oder durch Berechnungen in einem numerischen Modell.

Neue Untersuchungen zu diesem Thema mit mehreren sehr hohen Sturmfluten (24. 11. 1981, 3. 1. 1976, konstruierte Sturmflut HIST/1\*) stammen aus verschiedenen Berichten 1984/85 des Dän. Hydr. Inst. Mit der von der Arbeitsgruppe vorgeschlagenen maßgebenden Sturmflut wurde der Einfluß mit Q<sub>o</sub> von 1800, 2200 und 2800 m<sup>3</sup>/s festgestellt. Alle Ergebnisse zeigen weitgehende Linearität und bringen für eine Q<sub>o</sub>-Änderung um 1000 m<sup>3</sup>/s folgende Wasserstandsdifferenzen für sehr hohe Sturmfluten:

Stadersand	rd. 0,5 dm/1000 m <sup>3</sup> /s
Schulau	0,5 bis 1 dm/1000 m <sup>3</sup> /s
Hbg.-St. Pauli	rd. 1 dm/1000 m <sup>3</sup> /s
Bunthaus	1 bis 2 dm/1000 m <sup>3</sup> /s
Zollenspieker	1 bis 2,5 dm/1000 m <sup>3</sup> /s
Altengamme	2 bis 3 dm/1000 m <sup>3</sup> /s
Geesthacht	über 2 dm/1000 m <sup>3</sup> /s

bei Zuflüssen bis 3000 m<sup>3</sup>/s; bei größeren Zuflüssen Tendenz zu den kleineren Werten.

\* HIST/1 ist als „höchste denkbare Sturmflut“ konstruiert worden (PLATE, 1983)

Sowohl in hydraulischen Modellen wie im numerischen Modell hat sich herausgestellt, daß der Einfluß der Oberwassermenge auf die Tidewasserstände unterhalb von Glückstadt vernachlässigbar klein wird und eigentlich nur in dem Gebiet ab Schulau von Bedeutung ist.

### 3. Bemessungswasserstände und Sollhöhen der Hochwasserschutzanlagen

#### 3.1 Modellergebnisse

Wie aus dem Text bereits hervorgeht, sollten die Bemessungswasserstände in der Elbe auf der Basis der festgelegten Tide-, Wind- und Stauwerte für Cuxhaven und der Oberwasserwerte in Modellen bestimmt werden. Die Arbeitsgruppe hielt es für geboten, zur Absicherung der Ergebnisse drei Modelle, die nach unterschiedlichen Systemen konzipiert sind, einzusetzen, und zwar

- das empirische WADI-Modell des Strom- und Hafengebäude Hamburg<sup>1</sup>,
- das eindimensionale Verzweigungsmodell des Dän. Hydr. Inst. (dhi) nach dem dort entwickelten „System 11“<sup>2</sup> und
- das zweidimensionale Finite-Elemente-Modell des Inst. für Strömungsmechanik der Univ. Hannover (IfS) mit eindimensionalem Teil oberhalb von Hamburg<sup>3</sup>.

Tabelle 5

Ort	Ergebnisse nach den Modellen in m NN					
	WADI		dhi		Inst. für Strömungsmech.	
	HThw (1985)	HThw (2085)	HThw (1985)	HThw (2085)	HThw (1985)	HThw (2085)
Cuxhaven	5,35	5,65	5,35	5,65	5,35	5,65
Otterndorf			5,55	5,85	5,60	5,90
Brunsbüttel			5,90	6,20	5,85	6,15
Brokdorf	6,00 ± 0,1	6,35 ± 0,1	6,05 ± 0,1	6,35 ± 0,1	6,10 ± 0,1	6,40 ± 0,1
Glückstadt			6,20 ± 0,1	6,50 ± 0,1	6,30 ± 0,1	6,60 ± 0,1
Stadersand			6,50 ± 0,1	6,80 ± 0,1	6,60 ± 0,1	6,90 ± 0,1
St. Pauli	6,95 ± 0,2	7,25 ± 0,2	6,95 ± 0,1	7,25 ± 0,1	6,95 ± 0,1	7,30 ± 0,1
Bunthaus			7,10 ± 0,1	7,40 ± 0,1	7,15 ± 0,1	7,45 ± 0,1
Zollenspieker	7,05 ± 0,2	7,30 ± 0,2	7,30 ± 0,1	7,60 ± 0,1	7,35 ± 0,1	7,70 ± 0,1

Da der Bemessungswasserstand für einen Zeitraum von 100 Jahren gelten soll, mußten die HThw (2085) aus der Kombination von mittl. Tide 1976/85 + säk. Veränderung (30 cm beim Thw) + Bemessungs-Windstau (385 cm beim Thw) +  $Q_o$  (2200 m<sup>3</sup>/s) ermittelt werden. Um jedoch die Höhe und Sicherheit der heutigen Hochwasserschutzanlagen hinsichtlich dieses neuen Bemessungswasserstandes beurteilen zu können, sollten auch die HThw (1985) aus

<sup>1</sup> Erläuterungen und Genauigkeiten bei SIEFERT und CHRISTIANSEN (1983)

<sup>2</sup> Erläuterungen dazu bei ABBOTT et al. (1973)

<sup>3</sup> Kurze Beschreibung bei THEUNERT und ZIELKE (1983)

mittl. Tide 1976/85 + Bemessungs-Windstau (385 cm beim Thw) +  $Q_o$  (2200 m<sup>3</sup>/s) vorliegen. Die Ergebnisse mit der als maßgebend gewählten ungünstigsten Windstaukurve (Abb. 3) sind für einige Standorte in Tab. 5 gegenübergestellt. Detaillierte Daten sind Tab. 6 zu entnehmen.

Die Berechnungen gelten für ein gelegtes Wehr in Geesthacht. Bei geschlossenem Wehr wären bei hohen Sturmfluten die Scheitel im Hamburger Hafen bis zu 10 cm, oberhalb von Bunthaus um 10 bis 40 cm höher (Berechnungen des dhi [1985] mit 4 Sturmfluten).

Tabelle 6. Berechnungen des dhi und des IfS für die maßgebende Sturmflut

Ort	HThw (1985) m NN		HThw (2085) m NN		empfohlener Bemess.-Wasserst. m NN
	dhi	IfS	dhi	IfS	
Cuxhaven	5,35	5,35	5,65	5,65	5,65
Klotzenloch	5,65		5,95		
Altenbruch	5,53	5,58	5,83	5,89	5,9
Ostemündung	5,67		5,97		6,0
Brunsbüttel	5,92	5,86	6,19	6,14	6,2
Brokdorf	6,07	6,09	6,35	6,38	6,4
Glückstadt	6,22		6,50		6,5
Kollmar	6,37		6,66		6,7
Stadersand	6,50	6,61	6,78	6,91	6,8
Lühe	6,60		6,89		6,9
Hahnöfer Nebelbe	6,68		6,97		7,0
Cranz	6,71		7,00		7,0
Schulau	6,67	6,78	6,96	7,09	7,0
Blankenese	6,75		7,04		7,1
Waltershofer Hafen	6,87		7,17		7,2
Kaiser-Wilhelm-H.	6,91		7,21		7,2
Rosshafen	6,92		7,22		7,3
Reiherstieg-Mitte	6,94		7,24		7,3
Seemannshöft	6,83		7,13		7,2
Reiherstieg-Süd	6,95		7,25		7,3
Dovenfleet	6,95		7,25		7,3
Brandshof	6,96		7,26		7,3
Spreehafen	6,96		7,26		7,3
St. Pauli	6,93	6,97	7,23	7,31	7,3
Baakenhöft	6,96		7,26		7,3
Sperrw. Billw. Bucht	6,99		7,29		7,3
Schöpfstelle	7,03		7,32		7,4
Köhlbrandhöft	6,90		7,19		7,2
Altenwerder	6,97		7,26		7,3
Harburg	7,02		7,31		7,3
Stillhorn	7,07		7,35		7,4
Spadenland	7,08		7,37		7,4
Bunthaus	7,12	7,17	7,41	7,49	7,5
Over	7,20		7,48		7,5
Fliegenberg	7,30		7,58		7,6
oberh. Zollenspieker	7,38	7,37	7,66	7,71	7,7
Drage	7,44		7,72		7,8
Altengamme	7,50		7,78		7,8
Geesthacht		7,51		7,85	7,9

## 3.2 Zum Wellenauflauf

Die Bestickhöhe oder die Oberkante der Hochwasserschutzanlagen muß die Seegangswirkung (Auflauf an Deichen, Reflexion an Mauern) berücksichtigen. Deswegen darf eine Betrachtung des Wellenaufbaus hier nicht fehlen. Die bisher an der Elbe verwendeten Zuschläge wurden geschätzt oder aus Treibsellagen an alten, steilen, heute z. T. nicht mehr vorhandenen Deichen abgeleitet. Dabei ist keineswegs sicher, daß die obere Grenze des Treibselns auch den höchsten Wellenaufbau dokumentiert. Außerdem wirkt Treibsel seegangsdämpfend. Wenn nach einer Sturmflut das Treibsel entfernt würde, könnten sich Seegang und Auflauf bei einer folgenden höher entwickeln.

Die Arbeitsgruppe ist der Überzeugung, daß man heute in der Lage ist, die Seegangswirkung genauer zu bestimmen. So sollte der *Wellenaufbau* – wie in den Niederlanden – über den Ansatz

$$R_{0,98} = 0,75 \cdot \bar{T} \cdot \sqrt{g \cdot H_{1/3}} \cdot m$$

ermittelt werden (BATTJES, 1971). Dabei sind

$\bar{T}$  = mittl. Wellenperiode in s

$H_{1/3}$  = Höhe der kennzeichnenden Wellen in m

$g$  = Erdbeschleunigung in  $m/s^2$

$m$  = Böschungsneigung 1:n

$R_{0,98}$  ist die Höhe, die von 98 % der auflaufenden Wellen nicht überschritten wird, und entspricht damit weitgehend der Annahme „keine Überströmung der Deiche“, wie sie Niedersachsen und Schleswig-Holstein bisher schon zugrundelegen.

Die Böschungsneigungen an den Elbdeichen im Bereich des Bemessungswasserstandes sind in

Niedersachsen: Cuxhaven bis Nordkehdingen 1:6, oberhalb davon 1:4; oberh. Hamburg 1:3

Schleswig-Holstein: teils 1:5, teils 1:6

Hamburg: oberh. Finkenwerder 1:3; teils 1:2,5

Um Auflauf und Reflexion berechnen zu können, müssen die Seegangparameter  $\bar{T}$  und  $H_{1/3}$  bekannt sein. Leider jedoch gibt es auf der Elbe so gut wie keine Seegangsmessungen, bei hohen Sturmfluten gar keine. Es liegen nach Messungen von Strom- und Hafengebäude Hamburg, der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord und vom Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig nur wenige Anhaltswerte vor, die – durch Beobachtungen, Film- und Fotoauswertungen ergänzt – für die Bemessungssturmflut Werte entspr. Tab. 7 abschätzen lassen.

Treibselgrenzen-Einmessungen des Amtes für Land- und Wasserwirtschaft Itzehoe (für das rechte Ufer<sup>1</sup>), des Wasserwirtschaftsamtes Stade (für das linke<sup>2</sup>) sowie der Baubehörde Hamburg (für das dortige<sup>3</sup>) brachten die auf Tab. 8 bis 10 zusammengestellten Höhen. Die vor Nordkehdingen im Vergleich zu den Werten des gegenüberliegenden Ufers sehr geringen Auflaufhöhen sind zu erklären zum einen durch niedrigeren Wasserstand (und damit kleineren Seegang vor dem Deich), zum anderen durch die Lage zur vorherrschenden Windrichtung: Lange Deichabschnitte liegen in Lee.

Der Arbeitsausschuß empfahl dringend ein Seegangs- und Wellenaufbaumeßprogramm in der Elbe an etwa 10 Punkten über mehrere Jahre. Dies hatte ein 1988 in Hamburg anlaufendes und ein für die Elbe über das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen geplantes Meßprogramm zur Folge.

<sup>1</sup> nach der Sturmflut vom 3. 1. 1976; teilweise veröffentlicht bei ZITSCHER et al. (1979)

<sup>2</sup> nach der Sturmflut vom 24. 11. 1981

<sup>3</sup> nach der Sturmflut vom 3. 1. 1976; Studie Nr. 65 (1987) des Ref. Hydr. Unterelbe

Tabelle 7. Seegang- und Auflaufdaten

Elbe-km	Ort	Seegang (vorläufig)		Auflauf (vorläufig)
		$\bar{T}$ s	$H_{1/3}$ m	$R_{0,98}$ m
725	Kratzsand	5,0	1,4	
715	Otterndorf	4,5	1,2	1,9
695	Brunsbüttel	4	1,2	1,7
695	Nordkehdingen	3-4	1,0	1,4
690	Scheelenkuhlen	3,5	1,4	1,6
685	Brokdorf	4	1,5	1,9
670	Steindeich	3,0	1,2	1,3
635	Mühlenb. Loch	4	2,0	2,8
630	Finkenwerder (Steendiekkanal)	3-4	1,5	2,5
625	St. Pauli	3-4	1,0	Reflexion
	Altenwerder, Wilhelmsb.-Ost	2-3	0,2	nahe 0(Lee)
620 bis 610	Wilhelmsb.-West, Spadenland, Moorwerder Hauptdeich (Süd)	2-3	0,2	0,8
605 bis 585	oberh. Oortkaten (beidseitig der Elbe für Luvdeiche)	2-3	0,4	1,2

Ungeklärt bleiben zunächst Detailfragen nach Seegangsrichtung, Mach-Reflexionen an Deichen und realistischen Formeln für die Berechnung der Reflexion an Schutzmauern in Hamburg.

Tabelle 8. Treibsellagen am rechten Ufer

Elbe-km	Ort	Vorland		HThw 3. 1. 76 m NN	Treibselgrenze über HThw bis m
		Höhe m NN	Breite m		
720	Dieksanderkoog	1,5	1500	5,3	2,4
695	Brunsbüttel	1,4	100 bis 600	5,4	1,2
690	St. Margarethen	2,2	10 bis 600	5,5	1,3
688	Scheelenkuhlen	2,1	30 bis 50	5,6	1,8
686	Gr. Arentsee	2,2	50 bis 120	5,6	2,0
684	Brokdorf	2,0 bis 2,3	10 bis 120	5,7	2,0
682	Hollerwettern	1,1 bis 2,1	15 bis 30	5,7	1,8
675	Glückstadt	1,7 bis 2,2	30 bis 550	5,8	2,0
670	Bielenberg	2,5	100 bis 750	5,9	1,3
667	Kollmar	2,0 bis 2,5	40 bis 100	5,9	1,5
663	Krückeumündung	2,2	350 bis 400	5,9	1,6
659	Pinnaumündung	1,7	50 bis 700	6,0	0,9
656	Hohenhorst	1,7 bis 2,2	300 bis 500	6,0	1,3
653 bis	Haseldorf-	1,6 bis 2,5	400 bis	6,1 bis	0,4 <sup>1)</sup>
648	Hetlingen		3300	6,2	
640	Schulau			6,3	0,4

<sup>1</sup> an der alten Deichlinie gemessen

Tabelle 9. Treibsellagen am linken Ufer

Elbe-km	Ort	Vorland		HThw 24. 11. 81 m NN	Treibselgrenze*) über HThw m
		Höhe m NN	Breite m		
705	Ostesperwerk		0	4,8	0,4
703	Hullen		500	4,8	1,1
697	Balje	1,0 bis 2,0	200	4,8	0,7
693	Wechtern		200	4,9	0,9
690	Stellenfleth		300	4,9	0,8
683	Freiburg		200	4,9	0,8
680	Allwörden		1000	4,9	0,1

Tabelle 10. Treibsellagen in Hamburg

Deich-km	Ort	Treibselgrenze über HThw m
IV	0 bis 8	Alten-, Neuengamme
	8 bis 18	Riepenburg, Kirchwerder, Howe, Warwisch
	18 bis 20	Overwerder
	20 bis 23	Overhaken, Gauert
	23 bis 30	Spadenland, Ruschort
III	30 bis 34	Moorfleet, Kaltehofe
II	7 bis 17	Kreetsand,
	17 bis 23,8	Moorwerder, Stillhorn, Finkenriek Reiherstieg
I	0 bis 5	Fünfhausen, Schweinssand, Neuland
	11,8 bis 23,6	Altenwerder, Aue
	23,6 bis 25,5	Neß (Hauptdeich)

#### 4. Diskussion alternativer Bemessungsansätze

##### 4.1 Zu den astronomischen Einflüssen

Die Anziehungskräfte der Gestirne und die Drehbewegung der Erde führen etwa alle 2 Wochen zu Springtiden mit besonders niedrigen Tnw und besonders hohen Thw. Dabei erreichen pro Monat etwa 5 Tiden eine Höhe von 30 cm unter MTnw bzw. über MThw; Einzelwerte sind größer, aber sehr selten. Nach Aussagen des DEUTSCHEN HYDROGRAPHISCHEN INSTITUTS sollen für Cuxhaven maximale Thw-Erhöhungen von 60 cm durch astronomische Einflüsse möglich sein.

Für 1984/86, also rd. 2100 Tiden, lagen aber die höchsten berechneten Thw weniger als 50 cm über dem MThw und traten im Sommer auf. Die Tnw-Erniedrigungen können

\* oberer Rand der bis zu 10 m breiten Treibselage

offenbar etwas größer werden. Aus den DHI-Berechnungen leitet die Arbeitsgruppe folgende Hinweise ab:

Ort	SpThw cm über MThw	SpTnw cm unter MTnw
Cuxhaven	30	25
Hbg.-St. Pauli	25	8

Eine Untersuchung der Spring- und Nippscheitel in Hamburg von 1941 bis 1980 ergab für die heutigen Verhältnisse: MSpThw rd. 15 cm über MThw, MSpTnw rd. 5 cm unter MTnw (SIEFERT, 1982, S. 22).

Es sei darauf hingewiesen, daß die Spring-Änderungen in den Windstaukurven enthalten sind und diese Ausführungen lediglich zur Erläuterung des Kap. 2.1 dienen sollen.

#### 4.2 Zu Fernwellen

Es gibt keine vollständigen Fernwellen-Erfassungen, da die Registrierungen an der englischen Ostküste, wo die Wellen bei ihrem Lauf vom Atlantik in die Deutsche Bucht identifiziert werden müssen, im Sommerhalbjahr unterbrochen werden. Die Ergebnisse des älteren Schrifttums (um 1960) sind heute z. T. umstritten. KOOPMANN (1962) ermittelte für Fernwellen von 1949 bis 1962

- Höhen zwischen 0,3 und 1,7 m
- Perioden zwischen 7 und 24 h\*
- Scheitel zu 90 % um MTnw eintretend

Auch die Fernwellen sind in den Windstaukurven enthalten (Kap. 2.1.2).

#### 4.3 Überlagerung von Höchstwerten

Die Arbeitsgruppe hält es für notwendig, Erläuterungen zu einem bisweiligen vorgeschlagenen Bemessungsverfahren zu geben, das die einfache Addition von Höchstwerten vorsieht, also

- höchstes MThw
- + höchste berechnete Springerhöhung (60 cm)
- + höchster gemessener Windstau um MThw (375 cm)
- + höchste gemessene Fernwelle (170 cm)
- + höchster denkbarer säkularer Anstieg (?)
- + höchster Oberwasserzufluß

Das Ergebnis liegt für Cuxhaven mindestens 2 m höher als dasjenige nach dem von der Arbeitsgruppe vorgeschlagenen Verfahren aus der Überlagerung

\* Daraus folgt Fernwellen-Einfluß um MThw *und* um MTnw, was für die Umrechnung des MTnw-Staus auf den MThw-Stau in Kap. 2.1.2 von Bedeutung ist

- aktuelle mittlere Tidekurve
- + Windstaukurve als höchste bisher gemessene bzw. beschickte, die Fernwellen- und astronomische Einflüsse enthält
- + säkularer Anstieg entspr. bisherigen Messungen
- +  $Q_0 = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$

Der Weg der einfachen Addition von Höchstwerten gibt zu Zweifeln Anlaß:

- Es ist nicht nachzuweisen, daß die Gefälleverhältnisse von Tide und Stau in der Deutschen Bucht eine solche Addition gestatten. So ist z.B. nicht davon auszugehen, daß eine Fernwelle von rd. 1,7 m Höhe überhaupt bei Windstau über 2 m auftritt.
- Es gibt Wechselwirkungen zwischen Springerhöhung, Windstau und Fernwelle, die nicht unberücksichtigt bleiben dürfen. Deshalb ist eine Addition nicht zulässig.

#### 4.4 Zur Eintrittswahrscheinlichkeit der maßgebenden Sturmflut

Der Vorschlag der Arbeitsgruppe entspr. Kap. 1 und 2 basiert nicht auf Eintrittswahrscheinlichkeiten von Scheitelwerten. Da in den Nachbarländern der Bundesrepublik aber vielfach damit gearbeitet wird, folgen einige Erläuterungen zur Eintrittswahrscheinlichkeit der Scheitelhöhe der maßgebenden Sturmflut.

In einer umfangreichen Arbeit werden Anpassungsfunktionen für verschiedene Sturmflut-Zeitreihen an 10 Küstenpegeln getestet (JENSEN, 1985). Die dabei als beste identifizierte mit dem Jenkinson-Parameter  $J = -\ln \ln (1/P)$  liefert für die maßgebende Sturmflut in *Cuxhaven* mit

HThw (1985) = 5,35 m NN<sup>1</sup> mit der mittl. Tidekurve 1976/85

HThw (2085) = 5,65 m NN unter Einrechnung der säkularen Veränderungen<sup>2</sup> folgende Wiederkehrperioden<sup>3</sup> auf der Basis von zwei untersuchten Zeitreihen:

Scheitelhöhe Cux m NN	Wiederkehrperiode in Jahren aus Zeitraum	
	1855/1983	1934/83
5,35 für 1985	150	(100)
5,65 für 1985	(300)	(200)
5,65 für 2085	150	(100)

Die Vertrauensbereiche liegen bei rd.  $\pm 10$  cm. Die eingeklammerten Werte gehen über das 1,5fache des Untersuchungszeitraumes hinaus und sind daher unsicher. Im übrigen ist das Ergebnis wie folgt zu interpretieren:

Die Anpassungsfunktion für die Sturmfluten der letzten rd. 130 Jahre liefert für den Scheitel der maßgebenden Sturmtidekurve in Cuxhaven für den *heutigen* Zustand eine Wiederkehrperiode von 150 Jahren. Verkürzt man die Zeitreihe auf die letzten 50 Jahre, um den stärkeren Anstieg seit 1950 besser zu berücksichtigen, so verkürzt sich diese Periode auf 100 Jahre. Dieser Wert scheint der Arbeitsgruppe realistisch.

*Dieselben* Wiederkehrperioden werden in *100 Jahren* für die HThw (2085) gelten, wenn sich die mittlere Tide wie auf Abb. 3 verändert haben wird. Heute hat ein solches Hochwasser

<sup>1</sup> 1,50 m NN + 3,85 m nach Kap. 2.1

<sup>2</sup> 0,30 m MThw-Erhöhung nach Kap. 2.1.3

<sup>3</sup> dieser Ausdruck wird heute häufig für die statistische Wahrscheinlichkeit verwendet

allerdings Wiederkehrperioden von rd. 300 bzw. 200 Jahren mit den o. g. Einschränkungen. Durch die Wahl des  $Q_0$  mit  $2200 \text{ m}^3/\text{s}$  wird für einen gleichzeitigen Eintritt von Bemessungsstau und  $Q_0$  oberhalb von Glückstadt für das HThw eine statistisch höhere Sicherheit erreicht.

Ferner wird auf die Interpretation des statistischen Parameters „Wiederkehrperiode“ aufmerksam gemacht: Abb. 5 zeigt, daß das Risiko für den tatsächlichen Eintritt eines Ereignisses mit der Wiederkehrperiode 100 Jahre innerhalb der ersten 100 Jahre 63 % beträgt, die Sicherheit gegen den Eintritt also noch 37 %. Erst nach rd. 500 Jahren wird das gen. Ereignis wahrscheinlich einmal eingetreten sein. Es kann in naher Zukunft sein; andererseits braucht man nicht davon auszugehen, daß eine Sturmflut mit HThw (1985) in Cuxhaven innerhalb des nächsten Jahrhunderts überhaupt auftritt, auch wenn es die Wiederkehrperiode 100 Jahre hat.

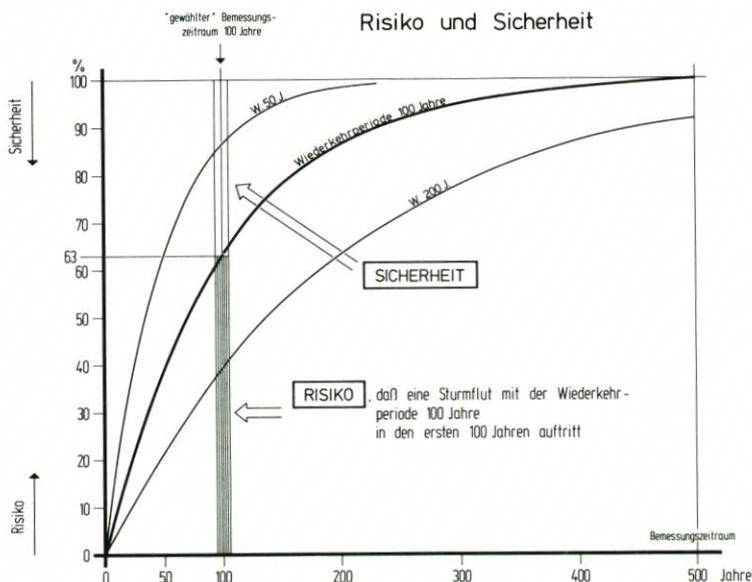


Abb. 5: Risiko und Sicherheit bei statistischen Aussagen

Es muß darauf hingewiesen werden, daß die rechnerischen Wiederkehrperioden zwar sehr lang sind, dennoch auf Überprüfungen der Tideentwicklung im Abstand von 20 bis 25 Jahren nicht verzichtet werden darf, wenn HThw (2085) nicht gar vorher überschritten wird. Darauf ist auch in Kap. 2.1 in anderem Zusammenhang hingewiesen worden. Ergänzend sei erwähnt, daß die auf der Basis der Daten bis 1983 gegebenen Ergebnisse auch für die Daten bis 1985 gelten.

#### 4.5 Zu Sicherheitszuschlägen

Die bisherigen Verfahren zur Bemessung der Hochwasserschutzanlagen weisen z.T. nicht genau definierte Sicherheitszuschläge aus (Tab. 1). Bei dem hier vorgeschlagenen Verfahren mit einer Bemessungssturmflut sind derartige Zuschläge nicht mehr erforderlich, weil die mit den Zuschlägen abgedeckten Einflüsse mit ausreichenden Sicherheiten darin enthalten sind. Zum Bemessungswasserstand entspr. der Definition in Kap. 1 muß lediglich

ein Wert aus dem örtlich sehr verschiedenen Seegangseinfluß addiert werden, um die Höhe der Hochwasserschutzanlagen zu erhalten. Brandungsstau ist in der Elbe nicht zu erwarten.

Der KÜSTENAUSSCHUß NORD- UND OSTSEE (1962) schlägt vor, bei konzentriertem Gefährdungspotential an Menschen und Sachwerten – wie etwa in Hamburg – zur Festlegung der Sollhöhe der Hochwasserschutzanlagen einen Zuschlag zu berücksichtigen.

## 5. Schriftenverzeichnis

- ABBOTT, M. B., RODENHUIS, G. S. u. VERWEY, A.: System 11, „SIVA“, a design system for rivers and estuaries. IAHR-Kongreß-Bangkok, 1973.
- BATTJES, J. A.: Run-up distributions of waves breaking on slopes. J. of Waterways, Harbours and Coastal Eng. Div., ASCE, WWI, 1971.
- DÄN. HYDR. INST.: Hamburger Hafen – Mittelhohe, synthetische und hohe Sturmfluten. Unveröff. Bericht, Horsholm, 1983.
- DÄN. HYDR. INST.: Hamburger Hafen – Empfindlichkeit der Elbemodelle. Unveröff. Bericht, Horsholm, 1985.
- FREISTADT, H.: Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 in Hamburg. Die Küste, H. 1, Jg. 10, 1962.
- FÜHRBÖTER, A. u. JENSEN, J.: Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht. Die Küste, H. 42, 1985.
- ING.-KOMMISSION: Erfahrungen und Folgerungen aus den Januar-Sturmfluten 1976 für den Küstenschutz in Niedersachsen. Die Küste, H. 33, 1979.
- JENSEN, J.: Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 83, 1984.
- JENSEN, J.: Unterlagen, die im Rahmen der Dissertation entstanden (Braunschweig, 1985).
- KOOPMANN, G.: Wasserstandserhöhungen in der Deutschen Bucht durch Schwingungen und Schwall. Dt. Hydr. Z., H. 5, 1962.
- KÜSTENAUSSCHUß NORD- UND OSTSEE: Empfehlungen für den Deichschutz nach der Februar-Sturmflut 1962. Die Küste, H. 1, 1962.
- NASNER, H. u. PARTENSKY, H.-W.: Modellversuche für die Tideelbe. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 45, 1977.
- PLATE, E. J.: Zeitreihenuntersuchung der Sturmfluten im Mündungsbereich der Elbe. Die Küste, H. 38, 1983.
- SIEFERT, W.: Die Sturmflut von 1825 in der Elbe. Hamb. Küstenf., H. 5, 1969.
- SIEFERT, W.: Bemerkenswerte Veränderungen der Wasserstände in den deutschen Tideflüssen. Die Küste, H. 37, 1982.
- SIEFERT, W. u. CHRISTIANSEN, H.: Entwicklung und Stand der Sturmflutvorhersagen des Hamburger Sturmflutwarndienstes. Hamb. Küstenf., H. 42, 1983.
- SIEFERT, W. u. LASSEN, H.: Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelauswertungen. Die Küste, H. 42, 1985.
- STROM- UND HAFENBAU, REF. HYDROL. UNTERELBE: Sturmfluten von 1901 bis 1984 vor der südlichen Nordseeküste und in Hamburg. Hamb. Küstenf., H. 44, 1985.
- THEUNERT, F. u. ZIELKE, W.: Bericht über das Forschungsvorhaben Tidedynamik in Ästuarien und ihre Veränderung durch bauliche Maßnahmen. Inst. für Strömungsmech., Hannover, 1983.
- ZITSCHER, F.-F., SCHERENBERG, R. u. CAROW, U.: Die Sturmflut vom 3. und 21. Januar 1976 an den Küsten Schleswig-Holsteins. Die Küste, H. 33, 1979.