

# Entwicklung und Ablauf von Sturmfluten in Ems, Weser und Elbe (Abschlußbericht eines KFKI-Projektes)

VON WINFRIED SIEFERT und HORST LASSEN

## Zusammenfassung

Im Rahmen des KFKI-Projektes „Entwicklung und Ablauf von Sturmfluten in den deutschen Tideästuaren“ wurden vergleichende Untersuchungen in Ems, Weser und Elbe durchgeführt. Dabei wurden zum einen die Scheitelwasserstände bei mittleren Tiden und Sturmfluten in ihrer Entwicklung seit 1940 beleuchtet, zum anderen der Ablauf einzelner Sturmfluten analysiert. Die wichtigsten Ergebnisse können folgendermaßen zusammengefaßt werden:

- Vor der deutschen Nordseeküste sind in den letzten drei Jahrzehnten die MThw um rd. 5 cm gestiegen, die MTnw um denselben Betrag gefallen.
- An den Mündungen der drei Ästuarie haben Höhe und Häufigkeit von Sturmfluten merklich zugenommen; dies ist im übrigen überall an der deutschen Nordseeküste feststellbar: in drei Jahrzehnten 50 % mehr Tiden mit Sturm oder Starkwind bei Anstieg der mittleren Sturmfluthöhen um rd. 3,5 dm.
- In den Ästuaren selbst haben sich die Wasserstände jedoch nicht nur entsprechend der Entwicklung an der Küste erhöht, sondern noch ausgeprägter. Dies führte generell zu deutlich höheren Sturmfluthöhen in den oberen Tidebereichen.
- Die Eintrittszeiten der Tide- und Sturmflutscheitel im Ästuar selbst, nach Eintritt am Mündungspegel, zeigen ebenfalls Veränderungen, allerdings nur in der Weser oberhalb von Vegesack und in der Elbe oberhalb von Brokdorf. Hier sind die Scheitel zeitlich näher zusammengerrückt. Generell bedeutet dies: In den Flüssen sind Sturmfluten in den letzten Jahrzehnten häufiger, höher und „schneller“ geworden. Daraus ist allerdings keine Prognose abzuleiten.

Alle Angaben beziehen sich auf einen aktuellen Zustand um 1980. Wenn sich die Tideverhältnisse an der Küste weiter so verändern wie in den letzten Jahrzehnten, wird dies deutliche Auswirkungen auf den Energiehaushalt der Flüsse haben. Um sie dann feststellen und Schlüsse daraus ziehen zu können, sollten ähnliche Untersuchungen weitergeführt und die Methode verbessert werden.

## Summary

*Comparative measurements were made in the Ems, Weser and Elbe Estuaries in the context of the German Coastal Engineering Board sponsored research project "Generation and Course of Storm Surges in German Estuaries". In this study both mean high and low water levels by mean and storm tides since 1940 were investigated and isolated events evaluated.*

*The most significant results can be summarized as follows:*

- *In the past three decades, the mean high water level has risen by approx. 5 cm and the mean low water level has fallen by this same amount.*
- *The heights and frequencies of storm surges at the estuary mouths have increased drastically; this phenomenon has occurred along the entire German North Sea coast. Within three decades the number of tides associated with storms or strong winds has increased by 50 % and the mean storm surge elevation by 35 cm.*
- *Increase in the water level within the estuaries is even more pronounced than the increases at the mouths. This has led to significantly higher storm surge heights in the upper estuary reaches.*
- *The storm surge propagation speed has also changed in the Weser upstream of Vegesack and in the Elbe upstream of Brokdorf. The phase lag between peak occurrences has decreased.*

*In general this implies that during the past decades storm surges in German estuaries have become "faster", occur more frequently and have more extreme heights. Future developments can not however be extrapolated from this information.*

Inhalt

- 1. Einführende Bemerkungen . . . . . 134
  - 1.1 Veranlassung . . . . . 134
  - 1.2 Untersuchungszeitraum, Betreuung und Förderung . . . . . 135
  - 1.3 Arbeitsumfang . . . . . 135
  - 1.4 Ziele . . . . . 139
- 2. Aufbereitung und Bearbeitung des Datenmaterials . . . . . 139
- 3. Tide- und Sturmflutentwicklung seit 1940 . . . . . 140
  - 3.1 Nordseeküste . . . . . 140
  - 3.2 Ems . . . . . 149
  - 3.3 Weser . . . . . 150
  - 3.4 Elbe . . . . . 153
- 4. Mittlere Tiden und Sturmfluten 1976 und 1981 . . . . . 156
  - 4.1 Ems . . . . . 156
  - 4.2 Weser . . . . . 158
  - 4.3 Elbe . . . . . 163
- 5. Schriftenverzeichnis . . . . . 167
  - Symbolverzeichnis . . . . . 168
  - Pegelverzeichnis . . . . . 168

1. Einführende Bemerkungen

1.1 Veranlassung

Im Laufe der letzten drei Jahrzehnte hat eine Entwicklung stattgefunden, deren Ursachen und deren weiterer Fortgang bis heute nicht erforscht sind:

Sturmfluten, die im Mündungsgebiet der deutschen Tideflüsse nur mittlere Höhen erreichen und dort als unbedeutend angesehen werden, laufen im oberen Tidebereich dieser Flüsse zu Höhen auf, die in früheren Jahren wesentlich seltener vorgekommen sind. In der Elbe dokumentiert sich dies z. B. durch eine Zunahme der mittleren HThw-Höhen-Differenz

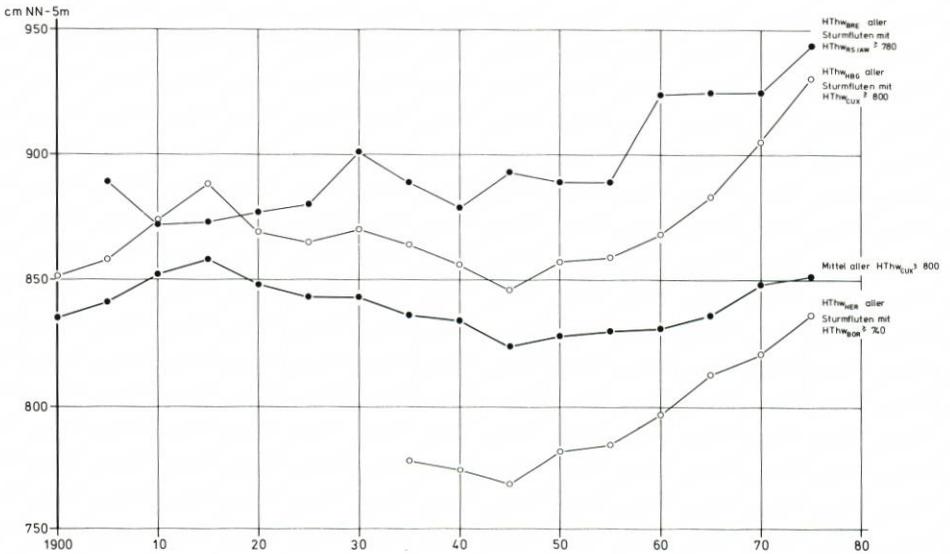


Abb. 1. Entwicklung gemittelter Sturmflutwasserstände 1900 bis 1980 in Ems, Weser und Elbe

Cuxhaven-Hamburg um rd. 0,5 m innerhalb von 30 Jahren. (Als HThw wird hier der Sturmflutschwelle bezeichnet.) Gleiche Tendenzen sind aus Weser und Ems bekannt: Sturmfluten, deren HThw  $\geq 1,5$  m über MThw an der Mündung auflief, erreichten dort die auf Abb. 1 wiedergegebenen Werte.

Damit werden bei den recht häufigen Windlagen, die diese Sturmfluten erzeugen, zunehmend kritische Wasserstände in den oberen Tidegebieten überschritten. Solange der (möglicherweise sich ändernde) Ablauf dieser Sturmfluten nur wenig bekannt ist, kann über die weitere Entwicklung keine Aussage gemacht werden. Sie ist jedoch im Hinblick auf den Vorhersagebedarf von eminenter Bedeutung.

Bevor die zukünftigen Veränderungen abgeschätzt werden können, ist eine gründliche Analyse der bisherigen Entwicklung erforderlich. Dazu soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag liefern.

## 1.2 Untersuchungszeitraum, Betreuung und Förderung

Die folgenden Untersuchungen wurden als Projekt des KFKI (Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen) von Mitte 1983 bis Mitte 1985 durchgeführt und von einer Projektgruppe begleitet, deren Mitglieder\*) nicht nur die wissenschaftliche Arbeit förderten, sondern auch für die Bereitstellung umfangreichen Datenmaterials sorgten.

Die Arbeiten wurden finanziell durch Mittel des Bundesministeriums für Forschung und Technologie und durch Eigenmittel der beteiligten Behörden und Dienststellen unterstützt.

## 1.3 Arbeitsumfang

Tide- und Sturmflutveränderungen mit erkennbarem Trend sind in Tideflüssen zurückzuführen auf Veränderungen in den Flüssen selbst oder unterhalb der Seegrenze, also in der Nordsee. Da Ems, Weser und Elbe in den letzten Jahrzehnten ausgebaut wurden, läge es nahe, damit die Veränderungen zu erklären, wenn sich nicht durch zeitgleiche, geradezu plötzliche Trendänderungen in allen Flüssen sowie durch meßbare Veränderungen an den Mündungsspegeln Hinweise häuften, die auch auf Einflüsse von See hindeuten. Es müssen also neben den Wirkungen von Baumaßnahmen auch mögliche Tide- und Windstauänderungen in der Deutschen Bucht und in der Nordsee in die Betrachtungen einbezogen werden.

Wenn das Problem umfassend bearbeitet werden sollte, müßten meteorologische und hydrologische Daten vom Eingang in die Nordsee (etwa Island/Färöer), aus der Nordsee selbst und von ihren Rändern herangezogen werden. Da dies in absehbarer Zeit nicht möglich sein wird, mußte die Bearbeitung auf ein Teilgebiet beschränkt werden. Sie konzentriert sich

\*) Der Projektgruppe gehörten an:

RD Dipl.-Oz. ANNUTSCH, Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg

BD Dipl.-Ing. BLIESENER, Wasserwirtschaftsamt Bremen (ab 1985)

BD Dipl.-Ing. DIETZE, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest, Aurich

RD Dr. HOFFMANN, Seewetteramt, Hamburg

RBD Dipl.-Ing. SCHULZ-KOSEL, Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten, Kiel

Prof. Dr.-Ing. SIEFERT, Strom- und Hafengebäudeamt Hamburg, Cuxhaven (Obmann)

BD Dr.-Ing. STRÖHMER, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

LBD Dipl.-Ing. WÖBKEN, Wasserwirtschaftsamt Brake

OBRDr.-Ing. WUNDES, Wasserwirtschaftsamt Bremen (bis 1985)

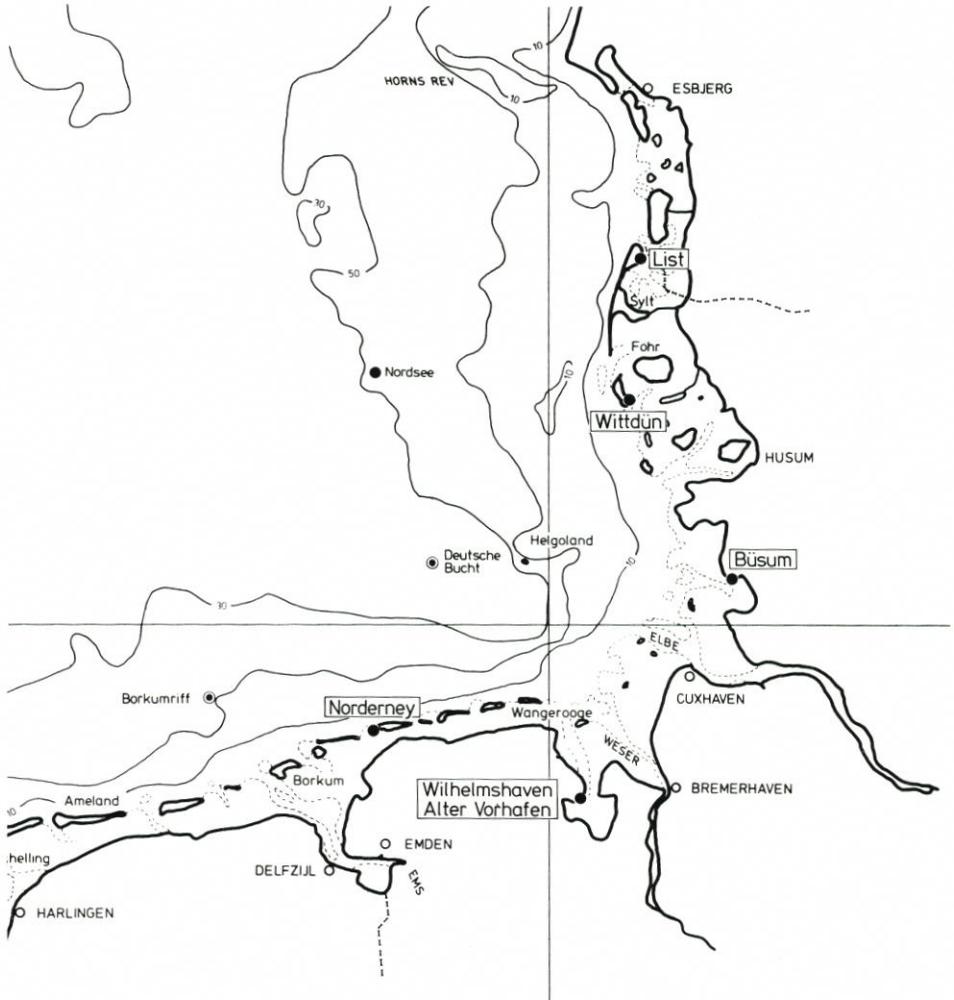


Abb. 2. Deutsche Bucht mit den untersuchten Küstenpegel-Standorten

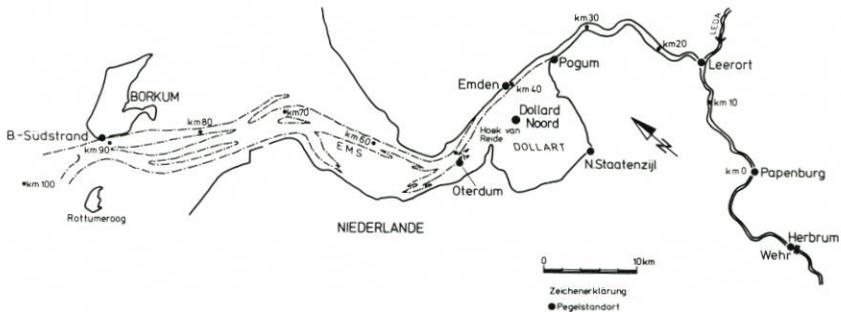


Abb. 3. Lageplan der Ems

Tabelle 1. Vergleiche zwischen Ems, Weser und Elbe

	Ems	Weser	Elbe
künstl. Tidegrenze bei	Herbrum	Bremen-Hemelingen	Geesthacht
km vom Mündungspegel	107	119	141
mittl. Oberwasserabfluß (rd.)	75 m <sup>3</sup> /s	320 m <sup>3</sup> /s	720 m <sup>3</sup> /s
Mündungspegel	Borkum-Südstrand	LT. Alte Weser	Cuxhaven
MThb am Mündungspegel (um 1980)	2,3 m	2,85 m	3,05 m
MThb am Pegel der Tidegrenze (um 1980)	2,1 m	3,8 m	1,5 m
mittl. Eintrittszeitdifferenz (um 1980) der Thw von der Mündung zur Tidegrenze	3.40 h	3.15 h	5.00 h
allgemeiner Thb-Verlauf	stromauf erst zu-, dann abnehmend	mehrfach zwischen Zu- und Abnahme wechselnd	mehrfach zwischen Zu- und Abnahme wechselnd
typischer HThw-Verlauf	steigend bis Leerort, dann fallend	leicht steigend bis Tidegrenze (mit Min. bei BRA-ELS)	steigend bis Hamburg, dann fallend*)
bedeutendste Häfen	Emden	Bremerhaven/Bremen	Hamburg
stromauf vom Mündungspegel gelegen (rd.)	50 km	50/100 km	100 km
Fahrwassertiefe unter KN (um 1980)	12,5 m bis Leichterplatz 8,5 m bis EMD	12,0 m bis BHV 11,0 m bis NOR 9,0 m bis BRE	13,5 m bis HBG
Besonderheiten des Ästuars	Dollart als große seitliche Meeresbucht	oberhalb von BHV tiefe Rinne, wenig Vorland	Stromspaltungsgebiet in HBG

\*) bis 1962 steigend bis STA-SUL, dann fallend

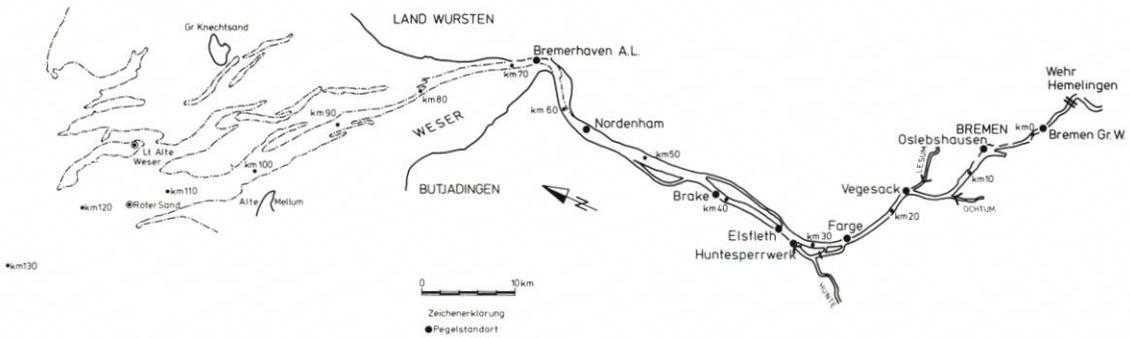


Abb. 4. Lageplan der Weser

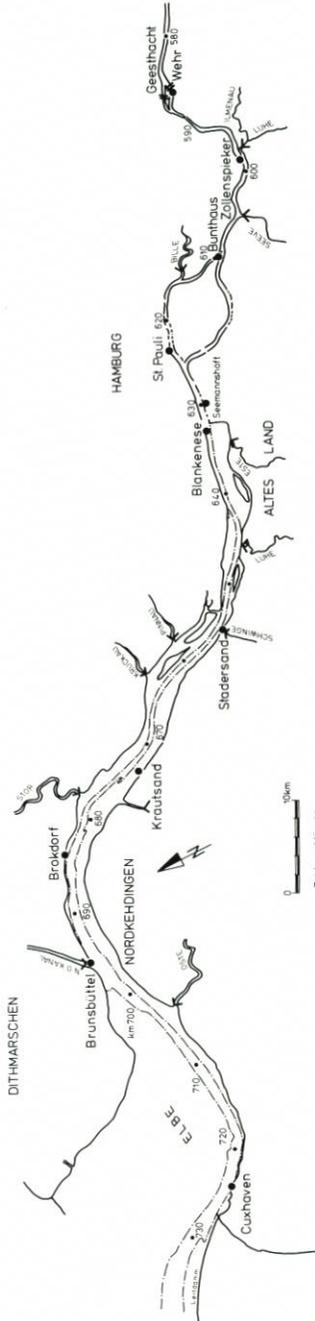


Abb. 5. Lageplan der Elbe

also auf die Deutsche Bucht und deren Ästuar. Nach dem Projektvorschlag von 1982 sollten Daten von relevanten Stationen analysiert werden, die ausgewählt werden sollten aus

- etwa 7 meteorologischen Stationen (Wind und Luftdruck)
- etwa 5 Pegeln je Tidefluß (Scheitelwerte, Tidekurven)

– 5 weiteren Pegeln an der Küste oder im Küstenvorfeld (Abb. 2 zeigt die Stationen Norderney, Wilhelmshaven/Alter Vorhafen, Büsum, Wittdün und List).

Darüber hinaus war vorgesehen, Ergebnisse aus dem 1983 abgeschlossenen KFKI-Projekt „Tide und Windstau im Küstenvorfeld“ (SIEFERT und LASSEN, 1985), aus Untersuchungen am Leichtweiß-Institut (FÜHRBÖTER und JENSEN, 1985) und aus Energiebetrachtungen (SIEFERT, 1984) mit einzubeziehen.

Ein Teil des Programms wurde im Laufe der Arbeiten modifiziert. So wurde u. a. die Anzahl der berücksichtigten Pegelstationen erhöht. Herangezogen wurden in der

**E m s:** Herbrum, Papenburg, Leerort, Pogum, Emden, Oterdum, N. Staatenzyl (Abb. 3)

**W e s e r:** Weserwehr UW, Bremen/Gr. Weserbr., Oslebshausen, Vegesack, Farge, Elsfleth, Hüntesperrwerk, Brake, Nordenham, Bremerhaven A. L. (Abb. 4)

**E l b e:** Geesthacht UW, Zollenspieker, Bunthaus, Hbg.-St. Pauli, Seemannshöft, Blankenese, Stadersand, Krautsand, Brokdorf, Brunsbüttel (Abb. 5)

Dafür wurde der meteorologische Teil der Arbeit verringert, weil auf eine neue Veröffentlichung des Seewetteramtes zurückgegriffen werden konnte (DUENSING et al., 1985).

Die Projektgruppe hält energetische Untersuchungen zum Sturmflutablauf für einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis des Geschehens. Die dazu durchgeführten Analysen sind jedoch noch nicht veröffentlichungsreif, zumal die o. g. Arbeit des Verfassers Ungenauigkeiten und Fehler enthält, worauf der Schriftleiter dieser Schriftenreihe, Herr Dr.-Ing. GÖHREN, freundlicherweise hingewiesen hat.

#### 1.4 Ziele

Als erstes Ziel der Untersuchungen wurde in der Projektplanung die Darlegung der Sturm- und Sturmflutentwicklung in der Deutschen Bucht in den letzten Jahrzehnten gesehen. Zweites Ziel der Untersuchungen sollte sein, den Ablauf von Sturmfluten zu erkennen und daraus Rückschlüsse auf Veränderungen dieses Ablaufes in den Flüssen in den letzten Jahren sowie Folgerungen für zukünftige Entwicklungen zu ziehen. Außerdem sollte die Arbeit auch die Basis zur Verbesserung der Sturmflutvorhersagen erweitern.

### 2. Aufbereitung und Bearbeitung des Datenmaterials

Die statistische Bearbeitung gliedert sich in drei Teile, und zwar

a) die Ermittlung der **Ä n d e r u n g** der mittleren **T i d e w a s s e r s t ä n d e** an der Küste, bei der auf 10- und 19jährige Mittel und auch auf Arbeiten im Leichtweiß-Institut der Technischen Universität Braunschweig zurückgegriffen werden konnte. Hier wurden u. a. für die Pegel Borkum-Südstrand, Norderney, Wilhelmshaven, Cuxhaven, Büsum und List die Säkularrends ermittelt (JENSEN, 1984; FÜHRBÖTER und JENSEN, 1985). Beispiel:

Der Säkularanstieg im Jahr 1904 ergibt sich aus dem Anstieg der Regressionsfunktion der Zeitreihe von 1855 bis 1904 (= 50 Jahre), extrapoliert auf einen Zeitraum von 100 Jahren. Der Säkularanstieg im Jahr 1905 ergibt sich entsprechend aus der Zeitreihe von 1856 bis 1905 (= 50 Jahre). Diese Rechenoperation wird dann bis zum Ende der Zeitreihe, also bis zum Jahr 1983, wiederholt.

Für die Säkulartrendfunktion mit einer Gruppengröße von  $N = 25$  Jahren gilt das entsprechende (1855 bis 1879 = 25 Jahre, extrapoliert auf 100 Jahre).

b) die Ermittlung der **S t u r m f l u t e n t w i c k l u n g** an der Küste, und zwar für die Pegel

Borkum-Südstrand, Wilhelmshaven, Alte Weser/Roter Sand, Cuxhaven und Wittdün mit den Winddaten der Station Scharhörn, die sich als repräsentativ für die Deutsche Bucht erwiesen haben.

c) die Analyse der Höhen und Eintrittszeiten der Sturmflutscheitel in den Flüssen seit 1941, und zwar als Differenzen zu den Daten der Mündungspegel. Es sind für die

Em s : Borkum zu Emden, Leerort, Papenburg, Herbrum

Weser : Roter Sand/Alte Weser zu Bremerhaven, Brake, Vegesack, Bremen\*)

Elbe : Cuxhaven zu Brokdorf, Glückstadt, Schulau, Hamburg\*, Zollenspieker, Geesthacht

Die Ergebnisse wurden zu 10jährigen übergreifenden Mitteln zusammengefaßt. Alle Höhen sind auf den Horizont NN -5 m bezogen worden. (Das Pegelnull [PN] weicht ja bekanntlich an vielen Orten einige Zentimeter von dieser Kote ab.)

Die deutschen Ästuarie, in die heute noch - nach der Absperrung der Eider und der größeren Nebenflüsse - Sturmfluten eindringen können, sind auf Abb. 3 bis 5 dargestellt. Tab. 1 zeigt einige geographische, topographische und hydrologische Vergleiche. Erläuterungen dazu gibt auch Abb. 6.

### 3. Tide- und Sturmflutentwicklung seit 1940

#### 3.1 Nordseeküste

Verschiedene Veröffentlichungen haben in den letzten Jahren aufgezeigt, wie sich die mittleren Tideverhältnisse und das Sturmflutgeschehen während der vergangenen Jahrzehnte verändert haben. Da die Entwicklungen überall an der Küste der Deutschen Bucht gleichsinnig aufgetreten sind, können sie mit den Daten weniger Pegel dokumentiert werden, wobei die Mündungspegel der drei Ästuarie eingeschlossen werden (Tab. 2). Aufgelistet sind 10jährige übergreifende Mittel. Die Daten stammen aus den Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbüchern der entsprechenden Jahre.

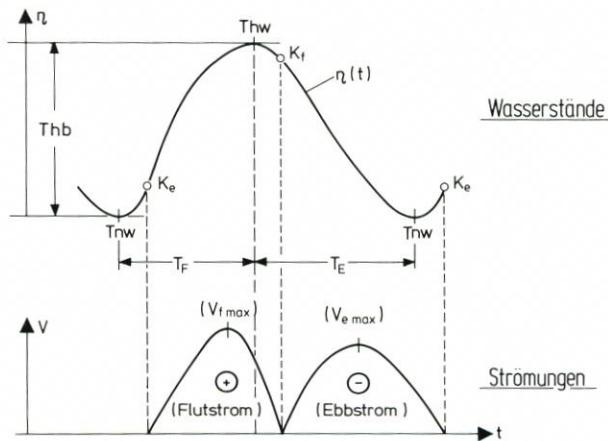


Abb. 6. Meßbare Tideparameter

\* Wenn Bremen genannt, dann stets Gr. Weserbrücke  
Wenn Hamburg genannt, dann stets St. Pauli

Die Zahlen der Tab. 2 zeigen folgendes: In den letzten rd. drei Jahrzehnten sind die MThw etwa um 5 cm (genau: 2 bis 11 cm) gestiegen, die MTnw aber etwa um 5 cm (genau: 1 bis 10 cm) gefallen; Ausnahmen bilden hier Borkum und die Wesermündung mit einem MTnw-Anstieg von 2 bis 4 cm.

Auf der Basis derselben Daten, jedoch weiter zurückreichender Reihen, hat JENSEN (1984) die auf Säkula hochgerechneten Thw- und Tnw-Änderungen und deren Trends für elf Küstenpegel im einzelnen ermittelt (Tab. 3).

Er kommentiert u. a. wie folgt:

„Die MTnw- und MThw-Zeitreihen zeigen an den ausgewählten Pegelstationen einschließlich einiger markanter Entwicklungen und Ergebnisse innerhalb der Zeitreihen eine gute Übereinstimmung. Die Varianz bzw. Standardabweichung der MTnw-Zeitreihen ist wesentlich größer als die der MThw-Zeitreihen. Der Mittelwert des Säkularanstiegs der MTnw-Zeitreihen aller untersuchten Pegel, die eine Zeitreihe von mehr als 80 Jahren aufweisen, beträgt  $6 \text{ cm} \pm 10 \text{ cm}/100$

Tabelle 2. Veränderung 10jähriger Mittel der MThw und MTnw an der Nordseeküste

Pegel	MThw/MTnw in cm NN - 5 m der Dekade							
	1941/50	1946/55	1951/60	1956/65	1961/70	1966/75	1971/80	(1976/84)
Borkum-Südstrand	592/373	593/375	593/372	595/373	599/377	604/377	599/372	604/375
Norderney	611/375	611/378	610/374	610/374	613/377	614/378	613/373	
Wilhelmshaven	662/302	662/303	664/299	666/298	670/300	670/299	669/294	
Alte Weser/ Roter Sand	629/343	618/346	622/346	624/341	631/349	630/349	631/347	
Cuxhaven	638/353	637/356	637/352	638/351	643/355	644/354	643/348	649/347
Büsum	647/328	645/329	646/327	648/326	651/328	652/328	653/326	
Wittdün	602/366	604/368	605/363	607/361	612/364	613/362	613/356	
List	569/405	570/406	570/402	570/400	573/402	572/401	572/397	
	Veränderung in cm gegenüber dem Mittel 1941/50							
Borkum-Südstrand	+ 1/+2	+1/-1	+3/-	+ 7/+4	+12/+4	+ 7/- 1	+12/+2	
Norderney	-/+3	-1/-1	-1/-1	+ 2/+2	+ 3/+3	+ 2/- 2		
Wilhelmshaven	-/+1	+2/-3	+4/-4	+ 8/-2	+ 8/-3	+ 7/- 8		
Alte Weser/ Roter Sand	-11/+3	-7/+3	-5/-2	+ 2/+6	+ 1/+6	+ 2/+ 4		
Cuxhaven	- 1/+3	-1/-1	- /-2	+ 5/+2	+ 6/+1	+ 5/- 5	+11/-6	
Büsum	- 2/+1	-1/-1	+1/-2	+ 4/-	+ 5/-	+ 6/- 2		
Wittdün	+ 2/+2	+3/-3	+5/-5	+10/-2	+11/-4	+11/-10		
List	+ 1/+1	+1/-3	+1/-5	+ 4/-3	+ 3/-4	+ 3/- 8		

Tabelle 3. Mittlerer Säkularanstieg für 11 Nordsee-Küstenpegel (JENSEN, 1984)

Zeitreihe	Anzahl der Jahre	Mittlerer Säkularanstieg		
		MTnw cm/100 Jahre	MThw cm/100 Jahre	MThb cm/100 Jahre
gesamte Zeitreihe mit N>80	>80	$6 \pm 10$	$23 \pm 4$	$17 \pm 12$
1884 bis 1983	100	$3 \pm 16$	$25 \pm 4$	$22 \pm 16$
1934 bis 1983	50	$- 4 \pm 11$	$33 \pm 9$	$35 \pm 15$
1959 bis 1983	25	$-13 \pm 30$	$64 \pm 15$	$76 \pm 30$

Jahre; der Mittelwert für die MThw-Zeitreihen ergibt einen Säkularanstieg von  $23 \text{ cm} \pm 4 \text{ cm}/100$  Jahre. Die statistische Signifikanz der berechneten Säkularanstiegswerte ist bei den MThw-Zeitreihen wesentlich größer.

Die Säkulartrenduntersuchungen mit einer Gruppengröße von  $N = 25$  Jahren heben verfahrensgemäß Veränderungen in der Entwicklung der Zeitreihen stärker hervor. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen mit  $N = 25$  Jahren deuten darauf hin, daß die Entwicklung im Bereich der MThw-Zeitreihen noch nicht abgeschlossen ist.“

Diese Darstellung ist sicherlich möglich, auch wenn sie eine Extrapolation eines 25 Jahre langen Zeitraumes auf das Vierfache beinhaltet. Es bleibt – in Übereinstimmung mit Tab. 2 – die Tatsache, daß in den letzten Jahrzehnten vor der deutschen Nordseeküste die MThw stärker als zuvor angestiegen, die MTnw abgefallen und damit die MThb größer geworden sind. Daran ändert auch nichts, daß die Wechsel der Pegelstandorte in Borkum und Norderney unberücksichtigt blieben.

JENSENS Ergebnisse können aber auch anders interpretiert werden und sind dann für die Praxis verständlicher. Zunächst sollte man sich darüber klar sein, daß ein Wert von z. B.  $64 \text{ cm}/\text{Jh}$  eine Geschwindigkeit darstellt, die über einen bestimmten Zeitraum gemessen wurde und von deren Dauer über ein ganzes Jahrhundert nichts gesagt ist. Der Autor selbst schreibt, daß der ermittelte Trend statistisch abgesichert nur etwa auf das 1,5fache des Untersuchungszeitraumes extrapoliert werden darf. Das führt dann zu folgenden Aussagen (Tab. 4):

Innerhalb der nächsten 38 Jahre kann mit einem MThw-Anstieg von rd.  $24 \text{ cm}$  gerechnet werden. Die weitere Entwicklung ist abzuschätzen und deutet auf knapp  $30 \text{ cm}$  in den nächsten 100 Jahren hin. Genauere Aussagen über einen möglichen schnelleren MThw-Anstieg nach den ersten 38 Jahren sind erst in ein bis zwei Jahrzehnten zu erwarten.

Die säkularen Veränderungen wurden bisher üblicherweise durch Ausgleiche 19jähriger Mittel bestimmt. Abb. 7 zeigt die 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. So ergeben sich durch optischen Ausgleich der 19jährigen Mittel<sup>1)</sup> für willkürlich ausgewählte Zeiträume folgende Trends:

Zeitraum	Veränderungen in $\text{cm}/\text{Jh}$ .	
	MThw	MTnw
1865/90 <sup>2)</sup>	$\pm 0$	$- 20$
1880/1930	$+ 31$	
1920/76	$+ 19$	
1905/60		$+ 18$
<u>1876/1976</u>	<u><math>+ 24</math></u>	<u><math>+ 17</math></u>

Dabei wurden für Cuxhaven nur Wasserstände ab 1855 verwendet, die entspr. den Ausführungen bei SIEFERT und LASSEN (1985) für die Zeit bis 1900 aus korrigierten Daten bestehen.

Die Sturmflutentwicklung seit 1940 war in den letzten Jahren ebenfalls Gegenstand mehrerer Veröffentlichungen. Diese können hier insoweit ergänzt werden, als sie zu aktualisieren sind und für verschieden festgelegte Kollektive angegeben werden (Tab. 5).

<sup>1)</sup> Das Mittel „1976“ umfaßt z. B. den Zeitraum 1967 bis 1985

<sup>2)</sup> D. h. 26 19jährige Mittel

Tabelle 4. Extrapolierter Säkularanstieg nach Tab. 3 für begrenzte Extrapolations-Zeiträume

mittlere MThw-Anstiegsgeschw. cm/Jh	Untersuchungs-Zeitraum Jahre	Extrapolations-Zeitraum Jahre	MThw Anstieg im Extrapolations-Zeitr. cm
23	80	120	28
25	100	150	38
33	50	75	25
64	25	38	24

Das Resultat ist wiederum weitgehend einheitlich: Von 1941/50 auf 1976/84 hat die Anzahl an Sturmfluten überall stark zugenommen. Sofern die Kollektive nicht nur hohe, sondern auch mittelhohe Sturmfluten enthalten, liegt die Zunahme bei 100 % oder sogar darüber. Die Anzahl hoher Sturmfluten ist dabei gleichzeitig bis etwa 1966/75 überproportional gestiegen (Tab. 5):

- Von 1 auf 9 in Borkum
- von (8) auf 13 in Wilhelmshaven
- von 0 auf 7 bei Roter Sand/Alte Weser
- von 3 auf 13 in Cuxhaven

Bis 1976/84 ist sie etwa gleich geblieben, während die Anzahl niedrigerer Sturmfluten weiter zugenommen hat. Dieses erklärt auch, warum die mittleren Höhen der jeweils nach oben

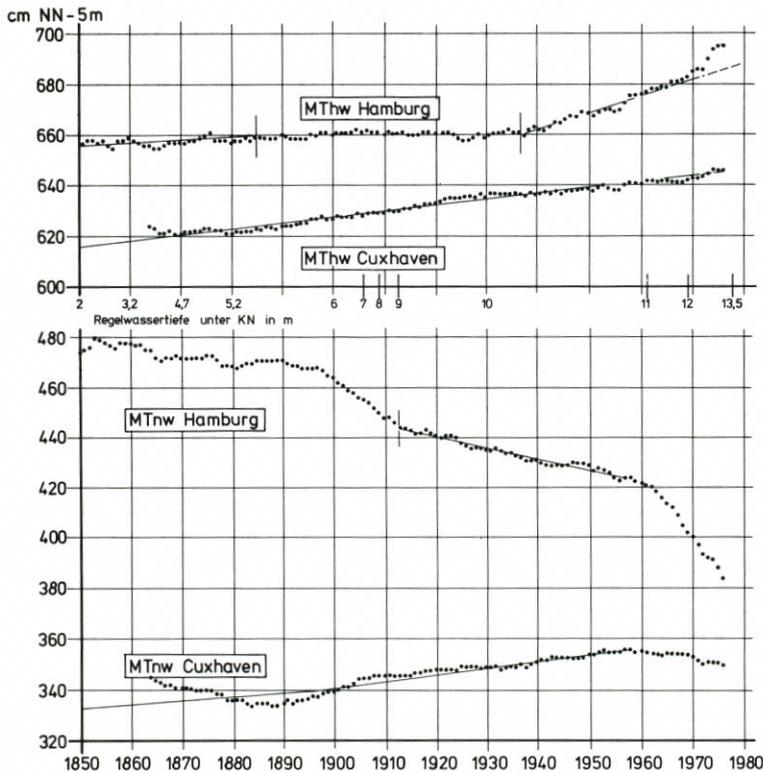


Abb. 7. 19jährige übergreifende Mittel der Thw und Tnw in Cuxhaven und Hamburg

Tabelle 5. Veränderung 10jähriger Mittel der HThw an der Nordseeküste

Pegel/ Kollektiv ausgewählter HThw	Anzahl/mittlere Höhe in cm NN - 5 m der Sturmfluten in der Dekade									
	1941/50	1946/55	1951/60	1956/65	1961/70	1966/75	1971/80	(1976/84)		
<b>Borkum-Südstrand</b>										
Windstau CUX $\geq 2$ m <sup>*)</sup>	21/721	18/730	15/745	20/742	32/734	38/740	34/764	43/743		
HThw <sub>BOR</sub> $\geq$ MThw <sub>BOR</sub> + 1,5 m	9/760	7/775	9/771	8/778	13/782	21/777	21/789	17/794		
HThw <sub>BOR</sub> $\geq 740$	10/758	8/771	9/771	12/767	17/776	22/776	24/784	22/783		
HThw <sub>BOR</sub> $\geq 780$	1/-	2/808	2/808	3/816	7/801	9/805	11/819	10/816		
<b>Wilhelmshaven</b>										
Windstau CUX $\geq 2$ m		18/813	15/833	20/828	32/814	38/819	34/850	43/830		
HThw <sub>WHV</sub> $\geq 850$		8/869	8/874	6/896	9/896	11/906	13/924	18/892		
HThw <sub>CUX</sub> $\geq 850$		4/873	4/875	3/905	7/891	13/892	14/916	14/902		
<b>Roter Sand/Alte Weser</b>										
(PN RS = NN - 4,90)										
Windstau CUX $\geq 2$ m	19/750	16/761	15/767	20/764	32/736	38/771	32/798	43/781		
HThw <sub>RS/AW</sub> $\geq 780$	4/795	4/803	5/800	5/814	10/824	16/829	19/833	21/823		
HThw <sub>RS/AW</sub> $\geq 810$	-/-	1/-	1/-	1/-	3/867	7/860	10/864	12/846		
<b>Cuxhaven</b>										
Windstau CUX $\geq 2$ m	21/793	18/803	15/809	20/808	32/802	38/811	35/838	45/829	1975/84	
Gesamtzahl	32/800	26/806	22/811	29/809	45/806	48/812	41/834	50/827		
HThw <sub>CUX</sub> $\geq$ MThw <sub>CUX</sub> + 1,5 m	22/821	20/824	19/827	23/829	32/833	35/843	39/848	53/840		
$\geq$ MThw <sub>CUX</sub> + 2,0 m	3/877	5/861	5/859	6/873	11/875	14/884	14/901	18/886		
$\geq 800$	20/824	18/828	18/829	22/831	29/837	32/848	37/851	52/841		
$\geq 850$	3/877	4/868	4/864	3/902	7/892	13/887	14/901	17/888		
<b>Wittlün</b>										
Windstau CUX $\geq 2$ m		18/732	15/752	20/743	32/737	38/744	35/769	43/775		
Windstau WIT $\geq 1,6$ m				30/752	38/765	35/771	31/786			

\*) unvollständige Reihe entspr. CHRISTIANSEN, SAARE und SIEFERT (1985)

offenen Kollektive fast überall bis 1971/80 gestiegen und danach wieder abgefallen sind. Der Anstieg liegt bei den größeren Kollektiven zwischen 3 und 4 dm, bei denen der hohen Fluten bei 2 dm (BOR) bis 6 dm (WHV).

Die gewählten Kollektive sind nicht gleichwertig. Einige Zahlen geben die Überschreitungen bestimmter Horizonte an. Da diese Zahlen natürlich durch gleichzeitigen MThw-Anstieg beeinflusst werden, sind andererseits auch Kollektivgrenzen auf MThw bezogen worden.

Im Zusammenhang mit der Entwicklung des Hamburger Sturmflutwarndienstes wurde eine große Anzahl von Sturmfluten analysiert, die alle in Cuxhaven die Windstauhöhe von 2 m im Verlaufe der Tide überschritten (SIEFERT und CHRISTIANSEN, 1983). Die Veränderungen, die sich an dieser Auswahl zeigen, sind für die anderen Pegel denen in Cuxhaven gegenübergestellt (Tab. 5). Sie ergeben von 1941/50 auf 1971/80 eine Höhenzunahme von

- 43 cm in Borkum
- rd. 40 cm in Wilhelmshaven
- 48 cm bei Roter Sand/Alte Weser
- 45 cm in Cuxhaven
- rd. 40 cm in Wittdün

Tabelle 6. Monats- und Jahresmittel der Thw an den Pegeln Roter Sand (bis 1964) und Alte Weser, abgezogen von den Werten in Cuxhaven (nach LIETZ, 1986).

Hinweis auch für Tab. 7: PN sind für RS mit NN - 4,82 m und für AW mit NN - 4,96 angesetzt

Jahr	NOV	DEZ	JAN	FEB	MAE	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	J-MI
1960	-3	-5	-1	-2	-3	6	2	5	3	5	3	-2	0
1961	6	8	2	5	16	5	9	10	12	9	6	3	8
1962	4	6	10	14	6	9	9	13	9	8	7	6	9
1963	1	4	-1	-4	1	3	4	5	8	6	6	9	3
1964	9	5	4	5	-2	4	6	7	8	8	9	1	5
1965	17	13	13	15	14	20	24	29	29	20	17	15	19
1966	13	16	14	13	24	15	19	16	20	18	19	10	16
1967	11	15	20	21	26	19	16	17	15	15	13	19	17
1968	12	18	21	15	19	17	15	14	17	15	18	20	17
1969	11	9	7	11	8	18	16	14	16	10	13	10	12

Tabelle 7. Monats- und Jahresmittel der Tnw an den Pegeln Roter Sand (bis 1964) und Alte Weser, abgezogen von den Werten in Cuxhaven (nach LIETZ, 1986)

Jahr	NOV	DEZ	JAN	FEB	MAE	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	J-MI
1960	-5	-6	-3	-4	-8	-2	1	1	0	0	-2	-6	-3
1961	-3	-1	-5	-1	5	0	4	4	5	2	1	-1	0
1962	0	1	2	7	-1	0	1	1	1	2	1	-2	1
1963	-3	-2	-6	-8	-3	-4	-1	-2	0	0	-1	-2	-3
1964	-2	-7	-7	-5	-10	-7	-6	-7	-6	-4	-4	-11	-6
1965	6	4	3	8	8	7	4	-2	1	7	7	5	5
1966	8	9	3	0	7	2	4	4	6	5	5	2	4
1967	2	8	10	10	11	11	6	7	6	7	7	8	8
1968	8	11	12	4	9	5	5	7	13	12	14	13	10
1969	2	-1	0	-1	0	6	4	4	9	7	8	5	4

Änderungen der Wasserstände an der Küste und in den Ästuaren im Laufe der letzten 100 Jahre hat DIETZE (1983) zusammengestellt.

Berücksichtigt man die Gesamtzahl der Sturmfluten, die obigem Windstau-Kriterium entsprechen, so erhält man eine Zunahme der Ereignisse (d.h. alle kleineren bis hohen Sturmfluten, bei denen nach Erfahrung mindestens 7 Bft aus aufländigen Richtungen gemessen wurde) von 32 auf 41 – sogar 32 auf 50 bis 1976/84 – und einen HThw-Anstieg von 34 cm in Cuxhaven. Daraus ist zu schließen:

– In den letzten drei Jahrzehnten haben sich die Tiden mit Sturm oder Starkwind um rd. 50 % vermehrt.

– Vor der Küste und an den Mündungen der Ästuare sind die mittleren Sturmfluthöhen um rd. 3,5 dm in rd. 30 Jahren gestiegen (worin der MThw-Anstieg enthalten ist).

Abschließend sei erwähnt, daß sämtliche Wasserstände auf NN –5 m bezogen wurden. Das PN am Pegel Alte Weser wurde mit NN –4,96 m angesetzt, dasjenige am Pegel Roter Sand nicht mit NN –4,82, sondern mit NN –4,90 m. Begründung: Eine Auswertung der Monats- und Jahresmittel von LIETZ (1986) zeigt sowohl bei den MThw wie bei den MTnw deutliche Sprünge beim Übergang von RS auf AW (1964 auf 1965 in Tab. 6 und 7), wenn PN (RS) = NN –4,82 m angesetzt wird: rd. 11 cm im Thw und rd. 9 cm im Tnw. Die Erklärung für die Differenz der Differenzen kann über die Ergebnisse eines anderen KFKI-Projektes gegeben werden. Danach ist mit

$$MThw_{RS} \approx MThw_{AW} + 2 \text{ cm}$$

$$MTnw_{RS} \approx MTnw_{AW}$$

zu rechnen (SIEFERT und LASSEN, 1985). Deshalb wurde das PN (RS) korrigiert um die Differenz, die sich schon aus der Einwägung 1952 (PN = NN –4,82 m) und dem hydrostatischen Nivellement 1966 (PN = NN –4,90 m) ergeben hatte.

Die Ergebnisse hinsichtlich der Zunahme der Tiden mit Sturm oder Starkwind, wie sie aus den Scheitelwasserständen abgeleitet wurden, stehen nicht im Einklang mit neuen meteorologischen Untersuchungen. So schreiben DUENSING et al. (1985) u. a. zusammenfassend:

„Die vorliegenden meteorologischen Meßreihen zeigen mit mathematisch-statistischer Sicherheit keine periodischen Vorgänge oder Trends. Meteorologische Vorgänge treten in einzelnen Zeitabschnitten ‚zufällig häufig‘ auf.

Nicht die Gesamtzahl der Stürme, sondern die Häufigkeit von Nordweststürmen und in geringem Maße auch von Südweststürmen ist entscheidend für die Häufigkeit von Sturmfluten. Weder aus den Winddaten der Feuerschiffe, noch aus den längeren Reihen der Küstenstationen oder auch der Häufigkeit von Nordwest-Wetterlagen der letzten 100 Jahre läßt sich eine Zunahme von nordwestlichen Starkwinden und Stürmen zu Lasten der anderen Windrichtungen oder Geschwindigkeiten nachweisen.“

Über die Schwierigkeiten bei der Auswertung heißt es dort u. a.:

„Eine Zunahme der Starkwinde kann nicht direkt aus den Meßreihen gefolgert werden. Die z. T. seit 1924 vorliegende Reihe der Winddaten der Feuerschiffe weist einen Bruch auf. Vor dem 1. 1. 1957 handelt es sich um Schätzungen nach der Beaufort-Skala, danach um Messungen. Diese wurden mittels der mit Mängeln behafteten, aber international gültigen Beaufort-Äquivalentskala umgerechnet. Weil in der alten Skala die untere Grenze des Starkwindes (6–7 Bft) bei 22 kn liegt, eigentlich aber 24 kn betragen müßte, ergibt sich für die in Beaufort-Stärken umgerechneten Windmessungen eine zu große Häufigkeit von Starkwind. Umgekehrt ist es bei schweren Stürmen und Orkanen ( $\geq 10$  Bft), da die Äquivalentskala 48 kn als untere Grenze angibt, es jedoch 46 kn sein müßten. Stürme ( $\geq 8$  Bft) sind nicht betroffen, da deren untere Grenze (34 kn) in der Umrechnungsskala richtig angegeben ist. So erscheinen seit Beginn der Messungen (1957) die Häufigkeiten der Starkwinde (6–7 Bft) stark erhöht, die der Windstärken 10 Bft gegenüber früher stark reduziert, obgleich die Anzahl mittlerer und schwerer Sturmfluten seit diesem Termin schwach zugenommen hat.

Tabelle 8. HThw-Entwicklung in der Ems am Beispiel 10jähriger Mittel

Kriterium	HThw in cm NN - 5 m am Ausgangspegel sowie $\Delta H/\Delta T$ in cm bzw. h zum Ausgangspegel im Jahrzehnt									
	1941/50	1946/55	1951/60	1956/65	1961/70	1966/75	1971/80			
<b>BOR</b> $H_{ThwBOR} \geq 740$ Mittel =	758	771	771	767	776	776	784			
Diff. zum Pegel EMD:	103/1.33 (92)*	86/1.37	76/1.37	73/1.27	73/1.24	76/1.31	78/1.28			
LEE:					93/2.29	100/2.36	107/2.35			
PAP:					51/3.20	60/3.31	67/3.28			
HER:	+ 10/4.39	+ 11/5.04	+ 14/5.05	31/4.54	38/4.46	46/4.53	52/4.51			
<b>BOR</b> $H_{ThwBOR} \geq 780$ Mittel =	(nur 1 Ereignis)	(808)	(808)	816	801	805	819			
		(nur 2 Ereign.)								
Diff. zum Pegel EMD:	-	(85/1.30)	(85/1.30)	85/1.12	78/1.09	83/1.23	90/1.23			
LEE:	-				98/2.11	107/2.25	120/2.29			
PAP:	-				50/2.58	57/3.20	65/3.18			
HER:	-	(- 8/4.27)	(- 8/4.27)	+ 18/4.30	43/4.40	37/5.03	41/4.54			
<b>EMD</b> $H_{ThwEMD} \geq 850$ Mittel =					885	890	13			
Diff. zum Pegel HER:					- 45/3.36	- 49/3.40	- 53/3.39			

\*) ohne die Flut vom 4. 2. 44 mit  $\Delta H = 199$  cm

Tabelle 9. Sturmfluten in der Ems von 1941 bis 1980, deren Scheitelhöhe bei Borkum mindestens 780 cm NN - 5 m erreichte

Nr.	Sturmflut Datum	BOR		EMD		LEE		PAP		HER	
		Zeit	Höhe cm NN - 5 m								
49	4. 2. 44	18.50	813	20.18	1012					22.20	790
64	22.12.54	7.06	830	8.20	943					10.50	793!
66	23./24.12.54	20.40	785	22.25	842					1.50	806
78	16./17. 2. 62	21.27	883	22.25	972			23.29	897	3.10	(856)
79	17. 2. 62	8.45	781	9.48	874			11.30	853	13.00	853
85	13./14. 2. 65	19.53	783	21.09	857	22.13	872	22.52	821	0.05	792
89	10./11.12.65	23.30	784	0.35	850	1.42	869	2.45	845	4.00	851
90	1.12.66	0.30	786	2.10	846	3.09	861	4.08	828	6.05	816
94	23./24. 2. 67	22.06	798	22.45	881	23.50	915	0.50	870	2.10	859
95	1. 3. 67	1.35	792	2.42	874	3.44	890	4.40	841	6.25	830
113	13.11.73	11.28	805	13.14	884	14.30	910	15.15	855	17.05	818
114	16.11.73	1.20	800	3.00	880	4.07	907	5.05	856	7.05	835
115	19.11.73	17.48	836	19.37	942	20.26	971	21.07	902	22.58	858
117	6./ 7.12.73	19.42	808	20.55	906	21.53	933	22.50	876	0.35	853
119	14.12.73	0.30	834	1.57	926	2.55	949	3.50	884	5.30	854
125	3. 1. 76	11.44	833	13.15	930	14.30	971	15.16	919	17.02	906
126	3./ 4. 1. 76	23.11	857	0.15	958	1.20	981	2.00	929	3.25	915
127	20./21. 1. 76	1.12	847	1.34	938	2.43	962	3.25	900	5.24	879
128	21./22. 1. 76	1.06	786	2.36	889	3.42	921	4.50	875	6.00	866
131	15.11.77	0.47	785	2.16	822	3.25	880	4.25	839	6.00	818
134	30.12.77	0.53	820	2.14	924	3.24	951	4.00	894	5.30	862

Tabelle 10. Fünfjährige Mittel von Sturmfluten, deren Windstau in Cuxhaven 2 m überschritt; hier: Zeit- und Höhendifferenzen Herbrum-Borkum

Zeitraum	Anzahl	HThw-Differenz HER-BOR	
		$\Delta H$ cm	$\Delta T$ h
1941/45	12	30	4.38
46/50	9	60	4.53
51/55	9	23	5.10
56/60	7	48	4.42
61/65	14	51	5.01
66/70	18	65	4.37
71/75	22	55	5.00
76/80	14	63	4.32

Alle Schlußfolgerungen, die diesen Bruch in der Reihe nicht berücksichtigen, sind deshalb falsch, so z. B. die Aussage, die auf den Beobachtungen der deutschen Feuerschiffe der Jahre 1953 bis 1969 basiert, daß die Häufigkeit der Beaufortstärken  $\geq 10$  abgenommen habe. Bei den niederländischen Feuerschiffen hingegen ist eine solche Abnahme nicht zu bemerken.“

Die durchgehenden Windmessungen auf der Düneninsel Scharhörn durch Strom- und Hafengebäude Hamburg seit 1965 lassen allerdings – in Übereinstimmung mit anderen Stationen (List, Cuxhaven) – eine Zunahme der Häufigkeit hoher Windstärken aus stauwirksamen Richtungen erkennen: Die jährliche Dauer von Winden mit Stärken über 6 Bft aus  $240^\circ$  bis  $330^\circ$  hat von 1965 bis 1983 um gut 20 % zugenommen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß in den Jahren um 1970 die Häufigkeit starker Winde relativ gering und in den Jahren davor ähnlich derjenigen in den folgenden Jahren war. Sturm ab Stärke 8 Bft ist allerdings bis etwa 1975 jeweils gleich häufig und danach zunehmend oft auf Scharhörn gemessen worden, so daß sich dessen Dauer auf das Zwei- bis Dreifache verlängerte.

### 3.2 E m s

Statistische Untersuchungen über die Sturmflutentwicklung von 1941/50 bis 1971/80 umfassen Daten der Pegel Borkum (BOR), Emden (EMD), Leerort (LEE), Papenburg (PAP) und Herbrum (HER). Die Kollektive für die 10jährigen Mittel der Höhen- und der Eintrittszeit-Differenzen wurden nach den Höhen an der Mündung ausgewählt, in diesem Falle für

$$HThw_{BOR} \geq 740 \text{ cm NN} - 5 \text{ m}$$

$$HThw_{BOR} \geq 780 \text{ cm NN} - 5 \text{ m}$$

und auf Tab. 8 zusammengestellt. Die wichtigsten Einzelwerte sind in Tab. 9 aufgelistet. Daneben liegen 5jährige Mittel  $\Delta H$  und  $\Delta T$  zwischen BOR und HER von Sturmfluten vor, deren Windstau in Cuxhaven 2 m überschritt (Tab. 10).

Dieses Kollektiv umfaßt alle hohen Sturmfluten, aber auch eine Reihe von Ereignissen, die nur wenig erhöhte HThw zeigten, wenn etwa um Tnw erheblicher Windstau auftrat. Als Resultate ergeben sich folgende Charakteristika und Tendenzen:

- Mittlere und hohe Sturmfluten ( $HThw_{BOR} \geq 740 \text{ cm NN} - 5 \text{ m}$ ) weisen über die letzten Jahrzehnte zunächst leicht fallende, ab 1961/70 dann leicht steigende HThw-Differenzen EMD-BOR auf; dieselbe Tendenz, jedoch mit ausgeprägtem Anstieg, zeigen die hohen Sturmfluten ( $HThw_{BOR} \geq 780 \text{ cm NN} - 5 \text{ m}$ ). Dabei sind die mittleren Differenzen EMD-BOR nur rd. 0,5 dm höher als bei dem vorgenannten Kollektiv.

- In den letzten beiden Jahrzehnten sind die Differenzen LEE-BOR und PAP-BOR bei beiden Kollektiven schneller gewachsen als EMD-BOR. 1961/70 lag z. B. LEE 2 dm höher als EMD, 1971/80 waren es dagegen 3 dm. PAP lag zunächst 2 bis 3 dm unter EMD, später nur noch 1 bis 2 dm. Nach 1962 wurden die Überschwemmungsgebiete oberhalb von PAP eingedeicht.
- Daraus folgt, daß sich der über die Jahrzehnte geringe Anstieg zwischen BOR und EMD stromauf fortsetzt, zwischen EMD und LEE aber noch verstärkt wird und bis PAP dann etwa bleibt.
- Bis 1951/60 liegen die  $\Delta H$  HER-BOR für mittlere und hohe Sturmfluten kurz über 1 dm, 1956/65 schon bei 3 dm, 1971/80 bei 5 dm, wobei interessanterweise die Differenzen für die hohen Ereignisse seit 1961/70 mit 4 dm etwa konstant geblieben sind. Die Entwicklung von BOR bis PAP setzt sich also in ähnlicher Weise bis HER fort, wenn auch nicht ganz übereinstimmend.
- Werden die Kollektive durch andere Sturmfluten erweitert, so zeigt sich insgesamt über die Jahre ein Trend zur größeren HThw-Differenz, die im 5jährigen Mittel inzwischen von rd. 3 dm auf rd. 6 dm angestiegen ist (Tab. 10).
- Die Eintrittszeit-Differenzen zwischen BOR und HER haben in den letzten Jahrzehnten eher zu- als abgenommen, und zwar fast ausschließlich auf der Strecke BOR-EMD. Diese Entwicklung steht im Gegensatz zu der in Weser und Elbe, ist aber zumindest teilweise über (zufällige) Überlagerungen von Tide und Windstau zu erklären.
- Zusätzlich wurden die Kollektive mit  $HThw_{EMD} \geq 800$  und  $\geq 850$  cm NN -5 m analysiert. Es zeigte sich, daß beide nahezu identisch mit den oben für die  $HThw_{BOR}$  gewählt sind und keine zusätzlichen Aussagen gestatten (Beispiel auf Tab. 8).

### 3.3 Weser

Die statistischen Untersuchungen von 1941/50 bzw. 1961/70 bis 1971/80 umfassen Daten der Pegel Roter Sand/Alte Weser (RS/AW), Bremerhaven (BHV), Brake (BRA), Vegesack (VEG) und Bremen-Gr. Weserbrücke (BRE). Wie bei den anderen Ästuaren wurden die Kollektive nach den Höhen für den Mündungspegel ausgewählt, und zwar für

$$HThw_{RS/AW} \geq 780 \text{ cm NN } -5 \text{ m} \\ \geq 810 \text{ cm NN } -5 \text{ m}$$

Die Grenzen sind den für BOR gewählten etwa gleichwertig. Die wichtigsten Daten sind auf Tab. 11 zusammengestellt, die 10jährigen übergreifenden Mittel auf Tab. 12. Darüber hinaus wurden 5jährige Mittel der HThw-Differenzen RS/AW-BRE derjenigen Sturmfluten gebildet, deren Windstau in Cuxhaven 2 m überschritt (Tab. 13).

Daran werden insgesamt folgende Charakteristika und Tendenzen deutlich:

- Mittlere und hohe Sturmfluten ( $HThw_{RS/AW} \geq 780$  cm NN -5 m) zeigen - abgesehen von 1956/65 - weitgehend konstante Höhendifferenzen BHV-RS/AW zwischen 7 und 8 dm. Hier wird der allgemeine HThw-Anstieg an der Küste also mit gleichem Wert in die Weser übertragen. Hohe Sturmfluten dagegen ( $HThw_{RS/AW} \geq 810$  cm NN -5 m) sind gerade im letzten Jahrzehnt in BHV gegen AW um rd. 1 dm gestiegen.
- Das erstere Kollektiv zeigt für BRA-RS/AW praktisch gleiche Werte wie für BHV-RS/AW. Bei hohen Sturmfluten war früher die Differenz BRA-RS/AW um rd. 1 dm kleiner als BHV-RS/AW. Heute sind sie fast gleich.
- Anders entwickelten sich die Werte  $\Delta H$  bis VEG: Im ersten Kollektiv liegen sie 1971/80 um rd. 1 dm höher als früher und 2 dm über den  $\Delta H$  bis BHV, während es in den Jahrzehnten

Tabelle 11. Sturmfluten in der Weser von 1941 bis 1980, deren Scheitelhöhe bei Roter Sand bzw. Alte Weser mindestens 810 cm NN - 5 m erreichte

Nr.	Sturmflut Datum	RS/AW		BHV		BRA		VEG		BRE	
		Zeit	Höhe cm NN - 5 m	Zeit	Höhe cm NN - 5 m	Zeit	Höhe cm NN - 5 m	Zeit	Höhe cm NN - 5 m	Zeit	Höhe cm NN - 5 m
61	16. 1. 54	( 7.50)	(812)	9.16	874					12.33	890
64	22. 12. 54	9.00	830	9.50	928					11.41	934
78	16./17. 2. 62	22.05	908	22.45	1035			2.10	1022	2.45	1041
88	2. 11. 65	5.30	816	6.30	864	7.11	871	8.17	875	8.32	887
89	11. 12. 65	1.02	816	2.00	880	3.04	886	3.49	905	4.00	920
90	1. 12. 66	2.00	818	2.50	888	3.42	870	4.49	882	5.22	899
94	23./24. 2. 67	23.01	834	0.16	914	1.07	904	1.58	910	2.20	922
95	1. 3. 67	2.53	858	3.49	902	4.56	893	5.48	907	6.05	917
113	13. 11. 73	13.27	853	14.42	917	15.51	918	16.44	929	16.52	945
114	16. 11. 73	3.26	863	4.18	949	5.10	937	6.35	939	6.18	959
115	19. 11. 73	18.57	865	19.47	966	20.45	944	22.14	952	21.35	960
117	6./ 7. 12. 73	20.40	879	21.46	972	22.50	948	0.13	955	0.10	960
119	14. 12. 73	2.26	868	3.45	957	4.40	942	5.47	958	5.47	965
125	3. 1. 76	13.39	910	14.21	1018	15.50	1012	16.48	1013	17.08	1033
126	4. 1. 76	1.07	831	2.11	893	3.00	912	4.04	927	4.26	949
127	21. 1. 76	2.40	914	3.16	994	5.02	987	5.40	994	6.25	1011
128	22. 1. 76	3.00	824	4.05	923	5.15	937	6.03	955	6.02	968
131	14./15. 11. 77	2.12	815	3.16	880	4.13	882	5.00	910	5.30	936
134	31. 12. 77	1.50	831	1.51	936	3.22	946	4.18	967	4.20	981

Tabelle 12. HThw-Entwicklung in der Weser am Beispiel 10jähriger Mittel

Kriterium	HThw in cm NN - 5 m am Ausgangspegel sowie $\Delta H/\Delta T$ in cm bzw. h zum Ausgangspegel im Jahrzehnt						
	1941/50	1946/55	1951/60	1956/65	1961/70	1966/75	1971/80
<b>RS/AW</b> $H_{Thw_{RS/AW}} \geq 780$	Mittel: 795	803	801	814	824	829	833
Diff. zum Pegel	83/0.53	75/0.55	74/1.02	96/0.52	77/0.57	69/1.05	74/1.01
BRA					74/2.06	69/2.02	79/1.56
VEG					84/2.57	83/3.03	94/3.00
BRE	101/3.46	89/3.40	89/3.46	122/3.49	102/3.29	96/3.15	111/3.15
<b>RS/AW</b> $H_{Thw_{RS/AW}} \geq 810$	Mittel: -	(821) (nur 2 Ereign.)	(821)	(nur 1 Ereign.)	842	847	859
Diff. zum Pegel		(72/1.08)	(72/1.08)	-	71/0.57	74/1.02	87/0.54
BRA				-	67/1.59	64/1.58	83/2.03
VEG				-	75/3.03	74/3.05	95/3.06
BRE				-	89/3.25	86/3.10	110/3.12

Tabelle 13. Fünfjährige Mittel von Sturmfluten, deren Windstau in Cuxhaven 2 m überschritt; hier: Zeit- und Höhendifferenzen Bremen-Roter Sand/Alte Weser

Zeitraum	Anzahl	HThw-Differenz BRE-RS/AW	
		$\Delta H$ cm	$\Delta T$ h
1941/45	12	101	3.39
46/50	9	136	3.50
51/55	9	102	4.06
56/60	7	105	3.34
61/65	14	120	3.17
66/70	18	98	3.13
71/75	22	108	3.09
76/80	14	122	3.08

davor rd. 1 dm war. Diese Tendenz wird vor allem durch die hohen Sturmfluten bestimmt, deren Differenzen zu RS/AW früher in BHV und VEG etwa gleich waren, heute aber in VEG rd. 1 dm größer sind, obwohl sie auch in BHV um 1 dm stiegen. Ab Herbst 1979 waren sämtliche Sturmflutsperrwerke in Betrieb.

- Die Höhendifferenzen BRE-RS/AW lagen für das größere Kollektiv seit 1941/50 stets zwischen 9 und 12 dm, ohne daß ein Trend erkennbar ist. Daraus folgt, daß der Anstieg bei RS/AW um 3 bis 4 dm in 30 Jahren direkt auch in BRE zu verzeichnen ist. Das bestätigen auch die 5jährigen Mittel der Tab. 13 trotz erheblicher windstaubedingter Schwankungen.
- Auch die Eintrittszeit-Differenzen zwischen RS/AW und BHV haben sich in den letzten Jahrzehnten bei Sturmfluten nicht merklich geändert. Dies gilt sogar weiter stromauf bis VEG. Erst oberhalb davon wurden die  $\Delta T$  kürzer, und zwar seit den 50er Jahren um rd. 30 min, so daß heute Sturmfluten ab VEG bis zum Wehr Hemelingen fast zeitgleich ihren Scheitel erreichen.

### 3.4 Elbe

Für die Pegel CUX und HBG wurde eine ausführliche Dokumentation aller Sturmfluten seit 1661 mit umfangreichen statistischen Berechnungen vorgelegt (CHRISTIANSEN, SAARE und SIEFERT, 1985). Für weitere Pegel\*) wurden aus einer zweiten Studie (SAARE und SIEFERT, 1985) Werte entnommen und teilweise schon veröffentlicht (Strom- und Hafengebäude Hamburg, 1985). Die wichtigsten Daten sind in Tab. 14 und 15 zusammengestellt. Als Ergebnisse für mittlere und hohe Sturmfluten sind festzuhalten:

- Die Sturmfluthöhen sind von 1941/50 auf 1975/84 an der Mündung in Cuxhaven deutlich angestiegen. Diese Entwicklung ist jedoch nicht elbe-spezifisch, sondern allgemein an der deutschen Nordseeküste festzustellen.
- In BRO verändern sich die  $\Delta H$  und  $\Delta T$  gegen CUX in all den Jahrzehnten nicht.
- Vor 1966/75 ist in der Elbe kaum ein HThw-Anstieg von CUX bis STA vorhanden; erst danach wird er deutlich. Die Höhendifferenzen gegen Cuxhaven stiegen inzwischen von rd. 2 dm auf rd. 3,5 dm.

\*) Im einzelnen sind dies: Brokdorf, Kollmar, Stadersand, Schulau, Hbg.-Blankenese, -Seemannshöft, -Köhlbrandhöft, -Amerikahöft, -Schöpfstelle, -Ernst-August-Schleuse, -Altenwerder, -Hamburg, Bunthaus und Zollenspieker

Tabelle 14. Sturmfluten vor der südlichen Nordseeküste und in Hamburg von 1941 bis 1980, und zwar: Alle Ereignisse, deren Scheitelhöhe bei Cuxhaven mindestens 850 cm NN - 5 m erreichten

Lfd. Nr.	Dat. (für Cux-Hbg)		Thw Terschelling		Thw Borkum		Thw Cuxhaven		Thw Hbg.-St. P.		Q <sub>o</sub> Neu Darchau m <sup>3</sup> /s
	Tag	Monat	Zeit	Höhe cm NN - 5 m	Zeit	Höhe cm NN - 5 m	Zeit	Höhe cm NN - 5 m	Zeit	Höhe cm NN - 5 m	
44	18./19.	10.	41		22.06	756	0.17	903	4.40	918	1180
51	1./2.	3.	45		0.19	747	2.58	862	7.34	911	1547
59	24.	10.	49		11.45	737	13.35	866	18.00	841	232
61	16.	1.	54		7.10	773	9.45	869	14.15	914	260
64	22.	12.	54		7.06	830	9.50	883	14.32	935	518
67	12./13.	1.	55		2.30	728	4.15	854	8.47	883	1700
69	18./19.	1.	56		2.05	753	4.00	853	8.50	864	1050
77	12.	2.	62		17.33	742	19.34	858	23.35	926	922
78	16./17.	2.	62		21.27	883	(22.40)	(995)	3.08	1070	952
88	1./2.	11.	65	2.15	4.00	773	5.58	874	10.15	938	420
89	10./11.	12.	65	22.00	745	784	1.46	856	6.12	890	840
90	30. 11./1.	12.	66	23.00	741	786	0.30	880	7.00	900	774
94	23./24.	2.	67	20.30	755	798	22.06	899	3.20	996	1692
95	28.	2./1.	3.	67	24.00	755	1.35	792	7.28	936	1430
103	2./3.	10.	70	21.30	715	747	0.02	852	6.39	891	446
113	13./11.	73	10.30	763	11.28	805	14.13	896	18.24	965	336
114	15./16.	11.	73	0.05	765	800	3.35	923	7.54	981	367
115	19.	11.	73	17.00	734	836	19.30	907	23.39	1000	364
117	6./7.	12.	73	18.00	720	808	21.25	939	0.59	1033	423
119	13./14.	12.	73	23.15	780	834	2.45	922	7.22	1005	423
121	5.	12.	74	0.50	725	758	4.37	853	8.14	916	887
123	25./26.	1.	75	21.10	645	708	23.50	851	3.30	908	1650
125	3.	1.	76	10.30	747	823	14.20	1010	17.10	1145	460
126	3./4.	1.	76	21.45	825	847	1.48	862	5.19	919	460
127	20./21.	1.	76	23.20	800	841	3.16	970	6.35	1058	1400
128	21./22.	1.	76	0.30	715	785	3.45	880	7.38	980	1400
131	14./15.	11.	76	23.45	743	775	3.12	872	6.17	953	837
134	30./31.	12.	77	23.15	760	828	2.15	890	5.25	955	825

Tabelle 15. HThw-Entwicklung in der Elbe am Beispiel 10jähriger Mittel

Kriterium	HThw in cm NN - 5 m am Ausgangspegel sowie $\Delta H/\Delta T$ in cm bzw. h zum Ausgangspegel im Jahrzehnt									
	1941/50	1946/55	1951/60	1956/65	1961/70	1966/75	1971/80	1975/84		
<b>CUX</b> HThw <sub>CUX</sub> $\geq$ 800	824	828	829	831	837	848	851	842		
Mittel:										
Diff. zum Pegel										
BRO			7/1.15	11/1.21	12/1.29	10/1.31	12/1.29			
STA			11/2.56	14/2.55	16/2.59	19/3.01	33/2.46			
SUL			17/3.34	24/3.32	26/3.33	32/3.29	51/3.11			
HBG	19/4.20	28/4.19	29/4.19	36/4.14	45/4.08	57/3.59	78/3.40	90/3.26		
BUN			35/4.47	46/4.40	53/4.31	65/4.22	88/4.04			
ZOL			45/5.20	55/5.10	63/5.01	74/4.52	102/4.26			
<b>CUX</b> HThw <sub>CUX</sub> $\geq$ 850	877	868	864	902	892	887	901	888		
Mittel:										
Diff. zum Pegel										
BRO			10/1.24	21/1.44	18/1.32	12/1.34	13/1.31			
STA			17/3.05	20/3.01	21/3.00	24/3.04	35/2.46			
SUL			22/3.45	49/3.46	38/3.40	39/3.34	54/3.11			
HBG	13/4.28	25/4.32	34/4.38	51/4.26	54/4.12	63/4.05	77/3.43	92/3.18		
BUN			38/5.05	51/4.44	58/4.32	66/4.27	84/4.05			
ZOL			42/5.33	56/5.07	54/5.13	64/5.05	90/4.32			
<b>CUX</b> HThw <sub>CUX</sub> $\geq$ MThw <sub>CUX</sub> + 150	821	824	827	829	833	843	848	841		
Mittel:										
HBG:	23/4.16	36/4.15	34/4.20	36/4.13	45/4.07	56/3.59	78/3.39	90/3.26		
<b>CUX</b> HThw <sub>CUX</sub> $\geq$ MThw <sub>CUX</sub> + 200	877	861	859	873	875	884	901	886		
Mittel:										
HBG	13/4.28	28/4.30	35/4.35	45/4.20	51/4.13	61/4.06	77/3.43	93/3.18		

Tabelle 16. Fünfjährige Mittel von Sturmfluten, deren Windstau in Cuxhaven 2 m überschritt; hier: Zeit- und Höhendifferenzen Hbg-St. Pauli-Cuxhaven

Zeitraum	Anzahl	HThw-Differenz HBG-CUX	
		$\Delta H$ cm	$\Delta T$ h
1941/45	12	29	4.30
46/50	9	54	4.14
51/55	9	48	4.25
56/60	7	37	4.20
61/65	14	51	4.15
66/70	18	52	4.00
71/75	22	63	3.56
76/80	14	88	3.18
81/85	30	80	3.25

- Weiter oberhalb, wo die hohen Sturmfluthöhen bis Hamburg stromauf ansteigen und dann bis Zollenspieker etwa gleich hoch bleiben oder sogar wieder leicht abfallen, ist die Entwicklung differenzierter: In HBG ist ein fast gleichmäßiger HThw-Anstieg von 1941/50 bis 1975/84 erkennbar. Die Differenzen der Höhen zu Cuxhaven sind in dieser Zeit von 2 auf 9 bzw. von 1,5 auf 9 dm gestiegen. Darin enthalten sind der Anstieg der MThw-Differenz und der Einfluß der Baumaßnahmen an und in der Elbe.
- Die  $\Delta H$  ZOL-CUX sind bei beiden Kollektiven inzwischen noch um rd. 1 dm mehr als die  $\Delta H$  HBG-CUX angestiegen.
- Die Eintrittszeit-Differenzen der HThw gegen CUX verhalten sich in der Elbe etwas anders als die  $\Delta H$ : in BRO haben sie sich bis heute praktisch nicht verändert (rd. 1.30h). In STA nehmen sie seit 1971/80 ab, von SUL bis ZOL etwa seit 1966/75. Die Verkürzung dieser Differenzen ist erheblich (in HBG rd. 50 min/20 Jahren, in ZOL rd. 60 min/20 Jahren). Berücksichtigt man dabei den starken Anstieg der Höhendifferenzen zu CUX an diesen Orten (rd. 45 cm/20 Jahren bzw. rd. 50 cm/20 Jahren) und den HThw-Anstieg in CUX selbst (rd. 30 cm/20 Jahren), so ist generell von einer Erhöhung der Sturmfluthöhen in der Elbe bei gleichzeitiger Verkürzung der Laufzeit auszugehen, wobei beides verstärkt für den Bereich oberhalb STA gilt.

Weitere Einzelheiten sind den o. g. Studien zu entnehmen, die Differenzen der fünfjährigen Mittel der Tab. 16.

#### 4. Mittlere Tiden und Sturmfluten 1976 und 1981

##### 4.1 Ems

Für einen Vergleich wurden die Tiden von Tab. 17 herangezogen (Abb. 8 und 9). Die mittlere Flutdauer  $T_F$  beträgt (mittl. Juni-Werte 1961/80):

$T_F$ in Reide	6.00 h	PAP	4.53 h	
	POG	5.59 h	HER	4.25 h
	LEE	5.10 h		

Die Kenterpunkte (Abb. 6) liegen

- in EMD  $K_e$  etwa 45 min nach  $T_{nw}$  und  $K_f$  etwa 25 min nach Thw
- in POG  $K_e$  etwa 30 min nach  $T_{nw}$  und  $K_f$  etwa 20 Min nach Thw

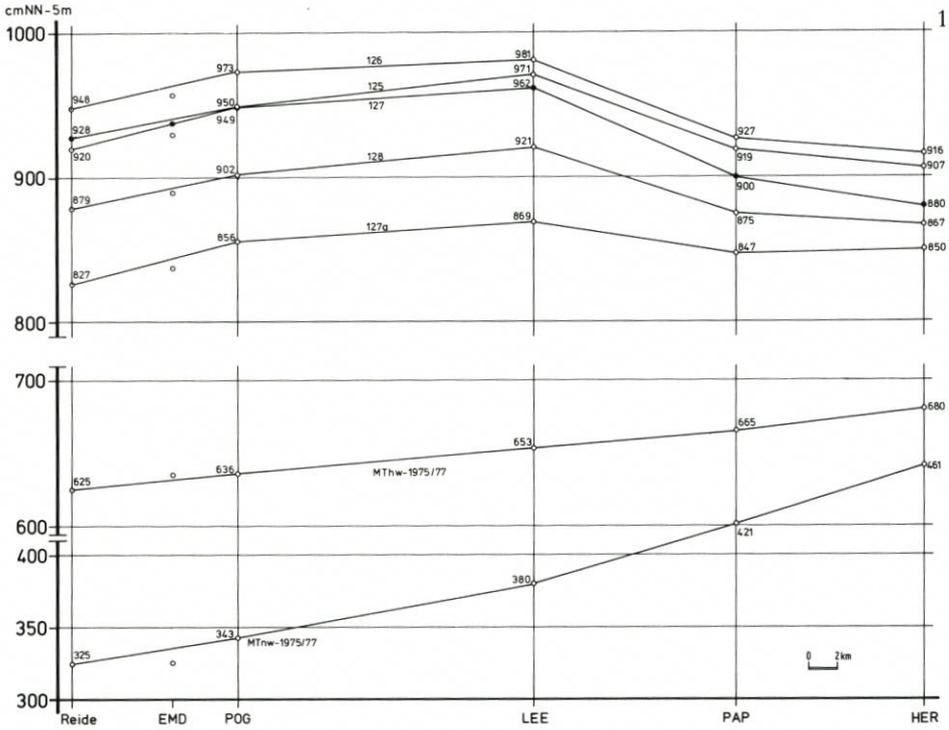


Abb. 8. Sturmfluten von 1976 in der Ems

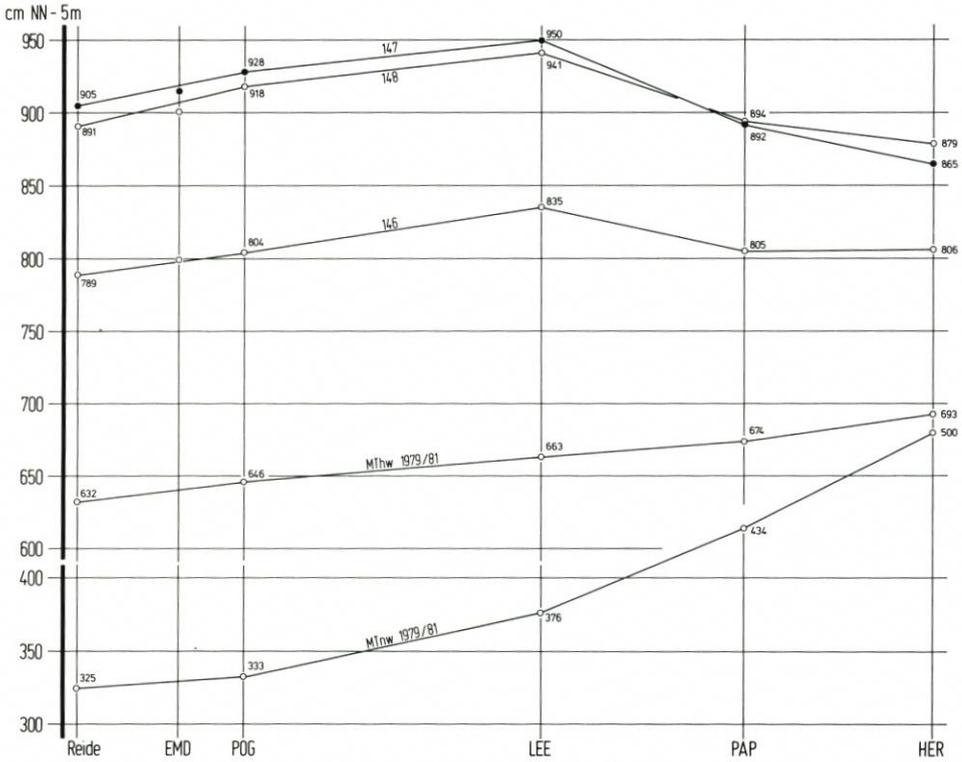


Abb. 9. Sturmfluten von 1981 in der Ems

Tabelle 17. Scheitelwasserstände in der Ems

Tide	Wasserstand in cm NN – 5 m im Querschnitt <sup>1)</sup>					Q <sub>o</sub> m <sup>3</sup> /s
	Reide <sup>2)</sup>	POG	LEE	PAP	HER	
mittl. Tide 1975/77						
MThw	625	636	653	665	680	67
MTnw	325	343	380	421	461	
3. 1. 76 (125)	920	950	971	919	907	120
4. 1. 76 (126)	<u>948</u>	<u>973</u>	<u>981</u>	<u>927</u>	<u>916</u>	120
20. 1. 76	<u>770</u>	<u>785</u>	<u>803</u>	<u>800</u>	<u>800</u>	160
21. 1. 76 (127)	928	949	962	900	880	180
21. 1. 76 (127a)	827	856	869	847	850	180
22. 1. 76 (128)	879	902	921	875	867	200
mittl. Tide 1979/81						
MThw	632	646	663	674	693	88
MTnw	325	333	376	434	500	
24. 11. 81 (146)	789	804	835	805	806	140
24. 11. 81 (147)	<u>905</u>	<u>928</u>	<u>950</u>	892	865	140
24. 11. 81 (148)	891	918	941	<u>894</u>	<u>879</u>	140

<sup>1)</sup> vgl. Abb. 3

<sup>2)</sup> interpoliert zwischen Dollard-Noord, Oterdum und Emden (Abb. 3)

- in LEE K<sub>e</sub> etwa 15 min nach Tnw und K<sub>f</sub> etwa z. Z. Thw
  - in PAP K<sub>e</sub> etwa 10 min nach Tnw und K<sub>f</sub> etwa 25 min vor Thw.
- Die Flutstromgrenze liegt zwischen PAP und HER.

Als topographische Ausgangsparameter wurden nach den Unterlagen, die die Mitglieder der Projektgruppe zur Verfügung stellten, die mittleren Breiten b<sub>m</sub> über MTnw ermittelt, und zwar getrennt für 1976 und 1981, für die mittleren Tiden und für jede Sturmflut. Die Werte änderten sich kaum, weil an der Ems keine großen Vorländer mehr vorhanden sind, die nach 1976 hätten eingedeicht werden können.

Die Scheitelhöhen charakterisieren den Sturmflutablauf nur sehr mangelhaft. So sind vom Typ her die Sturmfluten Nr. 127/128 und 147/148 am ehesten vergleichbar, während die höchsten dieser Fluten, Nr. 125/126, eher gesondert zu betrachten sind. Dennoch zeigen alle Sturmflutperioden das für die Ems typische Bild mit stromauf bis LEE steigenden HThw, die weiter bis HER deutlich fallen. Ganz anders entwickeln sich die mittleren Tiden, deren Thw und Tnw stromauf „klassisch“ ansteigen. Der Unterschied zwischen 1976 und 1981 geht dabei weitgehend zu Lasten des Oberwasserabflusses.

#### 4.2 W e s e r

Die bearbeiteten Tiden werden durch die hydrologischen Parameter der Tab. 18 charakterisiert (Abb. 10 und 11). Die mittlere Flutdauer beträgt (berechnet über die 1. Junihälfte 1975/81):

T <sub>F</sub> in	BHV	6.00 h	ELS	5.36 h	OSL	5.14 h
	NOR	6.00 h	FAR	5.32 h	BRE	5.00 h
	BRA	5.43 h	VEG	5.26 h	HEM	4.53 h

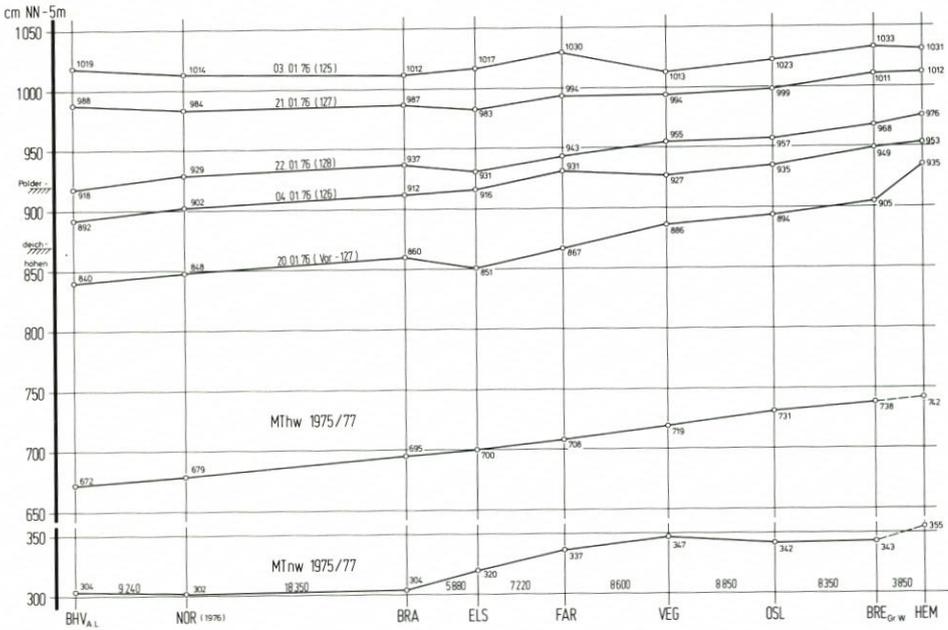


Abb. 10. Sturmfluten von 1976 in der Weser

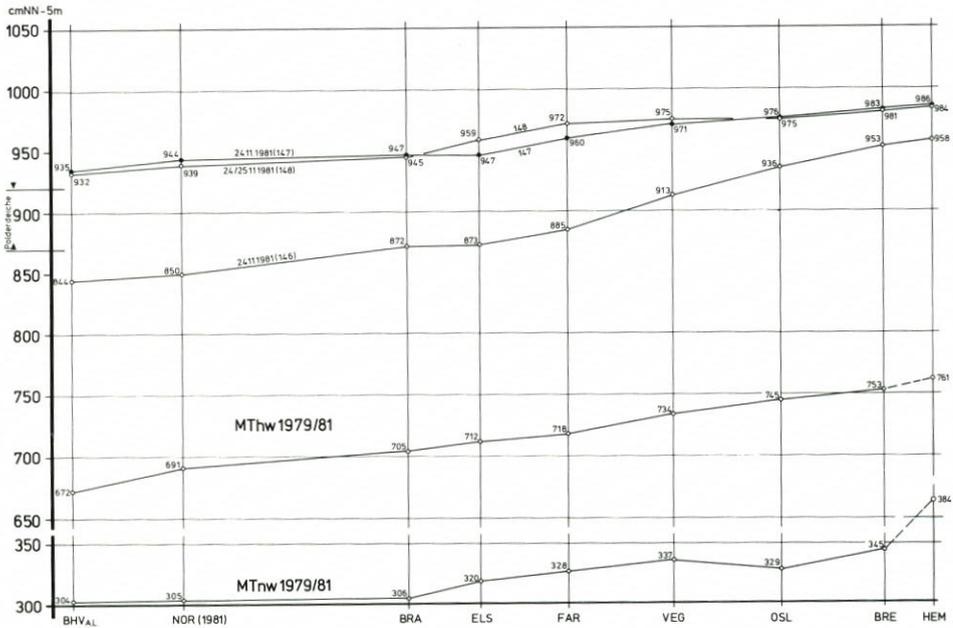


Abb. 11. Sturmfluten von 1981 in der Weser

Die Kenterpunkte (Abb. 6) liegen

- in BHV  $K_e$  etwa 50 min nach  $T_{nw}$  und  $K_f$  rd. 40 min nach Thw
- in BRA  $K_e$  etwa 40 min nach  $T_{nw}$  und  $K_f$  rd. 35 min nach Thw
- in VEG  $K_e$  etwa 20 min nach  $T_{nw}$  und  $K_f$  z. Z. Thw
- in OSL  $K_e$  etwa 10 min nach  $T_{nw}$  und  $K_f$  etwa 15 min vor Thw

In BRE ist die Flutstromgrenze erreicht.

Ergänzend sei darauf hingewiesen, daß 1975/77 wie 1979/81 die  $MT_{nw}$  von BHV bis OSL tiefer als diejenigen an der Mündung (AW mit 345 cm NN -5 m) abfielen. Im übrigen sind die Höhen der  $M_{Thw}$  wie der  $MT_{nw}$  durch das Oberwasser beeinflusst, wie der Vergleich auf Tab. 18 zeigt. Während die  $M_{Thw}$  von BHV bis HEM gleichmäßig (um 70 bzw. 90 cm) ansteigen, liegen die  $MT_{nw}$  von BHV bis BRA in beiden Jahrgängen auf einer Höhe; von VEG nach OSL fallen sie sogar leicht ab.

Die Entwicklung bei Sturmfluten muß im Zusammenhang mit der Wirkung der Nebenarme und Vorländer, vor allem aber der Polder, gesehen werden. Dafür gelten folgende Daten für das Beispiel der Sturmflut vom 3. 1. 76:

1. Schweißburg mit Vorländern und Polder, Strohauser Plate (zwischen NOR und BRA)
 

Gesamtüberflutungsfläche nach WWA Braake	1280 ha
davon bedeckt (auf 3,75 m NN)	170 ha
mit mittl. Geländehöhe	2,1 m NN
Speicherraum bis Deichkrone	$2,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
Gesamtspeicherraum bis HHThw	$31,0 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
2. Harrier Sand, Hammelwarder Sand (bei BRA)

		Harrier Sand	Hammelw. Sand
Gesamtüberflutungsfläche	ha	550	680
Deichhöhe	m NN	4,3 (Westdeich) 3,7 (Ostdeich)	4,3
Gesamtspeicherraum	$\text{m}^3$	$9,3 \cdot 10^6$ <sup>1)</sup>	$15,6 \cdot 10^6$ <sup>2)</sup>
Gesamtspeicherraum bis HHThw	$\text{m}^3$	$17,0 \cdot 10^6$	$21,0 \cdot 10^6$

<sup>1)</sup> bis 3,7 m NN; <sup>2)</sup> bis 4,3 m NN

3. Polder Neuenkirchen-Rade (bei ELS)
 

Gesamtüberflutungsfläche, bedeckt auf 3,95 m NN	470 ha
mittl. Geländehöhe	2,0 m NN
Speicherraum bis Deichkrone	$9,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
Gesamtspeicherraum bis HHThw	$14,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
4. Hunte, Elsfl ether Sand (zwischen ELS und FAR)
 

Die Hunte wird von der Eisenbahnbrücke (km 21.383) bis zum Sperrwerk (km 24.550) berücksichtigt, der Elsfl ether Sand bis zur neuen Deichlinie:

Gesamtüberflutungsfläche	190 ha
davon bedeckt (auf 3,75 m NN)	40 ha
mit mittl. Geländehöhe	2,2 m NN

Gesamtspeicherraum bis HHThw

 $6,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ 

1981 war das Gebiet abgesperrt.

Nach Berechnungen des WWA Brake betrug die gesamte Flutwassermenge der Hunte bis Oldenburg am 3. 1. 76 rd.  $13,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ , am 21./22. 1. 76 sogar  $15,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ .

Tabelle 18. Scheitelwasserstände in der Weser

Tide	Wasserstand in cm NN - 5 m im Querschnitt									Q <sub>0</sub> m <sup>3</sup> /s
	BHV	NOR	BRA	ELS	FAR	VEG	OSL	BRE	HEM	
mittl. Tide 75/77										
MThw	672	679	695	700	708	719	731	738	742	
MTnw	304	302	304	320	337	347	342	343	355	289
3. 1. 76 (125)	<u>1019</u>	<u>1014</u>	<u>1012</u>	<u>1017</u>	<u>1030</u>	<u>1013</u>	<u>1023</u>	<u>1033</u>	<u>1031</u>	269
4. 1. 76 (126)	892	902	912	916	931	927	935	949	953	354
20. 1. 76	840	848	860	851	867	886	894	905	(935)	702
21. 1. 76 (127)	988	984	987	983	994	994	999	1011	1012	704
21. 1. 76 (127a)	857	870	885	886	897	907	914	925	916	704
22. 1. 76 (128)	918	929	937	931	943	955	957	968	976	761
mittl. Tide 79/81										
MThw	672	691	705	712	718	734	745	753	761	
MTnw	304	305	306	320	328	337	329	345	384	381
24. 11. 81 (146)	844	850	872	873	885	913	936	953	958	486
24. 11. 81 (147)	<u>935</u>	<u>944</u>	<u>947</u>	<u>947</u>	<u>960</u>	<u>971</u>	<u>976</u>	<u>983</u>	<u>986</u>	530
25. 11. 81 (148)	932	939	945	<u>959</u>	<u>972</u>	<u>975</u>	975	981	984	529

Tabelle 19. Thw-Eintrittszeit-Differenzen zwischen Brake und Nordenham

	Thw-Eintrittszeit-Differenzen			
	BRA-NOR min	ELS-BRA min	FAR-ELS min	FAR-NOR min
40 Junitiden 1976, 1981	42	11	15	68
Sturmfluten 1976 und 1981				
a) Harrier Sand trocken	37	16	15	68
b) Harrier Sand geflutet	47	18	23	88
c) alle Polder geflutet	79	7	6	92

5. Köttersand, Weserdeicher Sände und Groden, Juliusplate, Warflether Sand; Westergate, Rekumer Loch, Woltjen Loch (bei FAR)
- Gesamtüberflutungsfläche 410 ha  
 davon bedeckt (auf 3,75 m NN) 240 ha  
 mit mittl. Geländehöhe 2,1 m NN  
 Gesamtspeicherraum bis HHThw  $13,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

Bei der Beurteilung des Poldereinflusses ist von entscheidender Bedeutung, ob eine Flut auf einen leeren oder schon durch die Vortide gefüllten Polder trifft. So waren z. B. am 3. 1. 1976 alle Polder gefüllt worden und bei der nächsten Tide (4. 1. 1976) noch nicht wieder leer.

Deutliches Anzeichen für eine Einflußnahme der Füllung der Polder auf den Sturmflutablauf in der Weser sind die Differenzen der HThw-Eintrittszeiten (Tab. 19):

Die Füllung der Polder verzögert den HThw-Eintritt in BRA erheblich, was sich

stromauf jedoch nur noch in abgeschwächter Form bemerkbar macht, da dort die  $\Delta T$  abnehmen.

Der Harrier Sand wird zunächst von Osten gefüllt, also durch den rechten Nebenarm. Wenn dort ein Pegel stehen würde, könnte er wertvolle Daten liefern hinsichtlich Überströmungshöhe und -dauer. So müssen Aufzeichnungen des Pegels Brake herangezogen werden, die dazu weniger aussagekräftig sind, wie die Beispiele auf Abb. 12 zeigen. So kann der Beginn der Überströmung nur geschätzt werden. Die Tidekurven vom 3. 1. und 21. 1. 1976 zeigen etwa in Höhe 980 cm NN - 5 m mögliche Einflüsse.

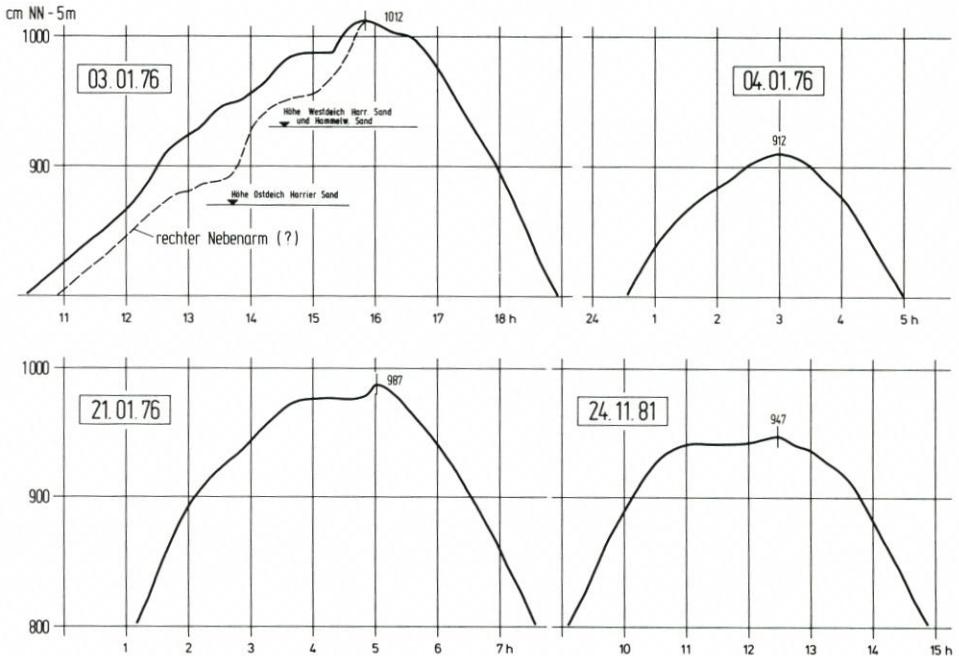


Abb. 12. Sturmfluten am Pegel Brake mit Einflüssen durch Polderfüllungen

## 6. Zum Vergleich: Hafen Bremen

Der Hafen Bremen enthält bis MThw eine Flutwassermenge von  $5,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ , darüber bis zum HThw am 3. 1. 1976 von  $4,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  (berechnet nach Angaben des WWA Bremen). Unberücksichtigt blieben bei den Berechnungen die bis zum 1. 10. 1979 tideoffenen Nebenflüsse Lesum und Ochtum. Das Füllvolumen der letzteren wurde vom WWA Brake zu  $11 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  für den 3. 1. 1976 bestimmt.

Der Vergleich der HThw auf Tab. 18 und Abb. 10 und 11 für Sturmfluten in 1976 und in 1981 zeigt u. a. folgendes:

Am 24. 11. 1981 lagen die HThw um 0,5 bis 0,2 m unter denen vom 21. 1. 1976. Besonders deutlich wird der 1981 geringere Energiebedarf für das Füllen der Nebenarme, Vorländer und Polder unterhalb von Farge. Damit geht ein stärkerer HThw-Anstieg von BHV nach HEM einher.

Die niedrige Sturmflut vom 24. 11. 1981 zeigt die weiter abnehmende Bedeutung der Nebenarme und Vorländer für den Sturmflutablauf. Die Polder wurden nicht mehr geflutet; entsprechend steiler ist der HThw-Anstieg. Er ist auch größer als bei der vergleichbaren Flut vom 20. 1. 1976, obwohl damals das  $Q_0$  erheblich höher lag.

## 4.3 Elbe

Um einen eindeutig definierten Querschnitt als untere Begrenzung zu haben, wurde die seeseitige Grenze für die Elbe nach Brunsbüttel gelegt.

Die bearbeiteten Tiden erreichten die Scheitelwasserstände von Tab. 20, Abb. 13 und 14.

Für mittlere Tideverhältnisse (1. Junihälfte 1975/81) gelten

$T_F$ in	BRU	5.21 h	SEE	5.10 h
	BRO	5.19 h	BUN	4.45 h
	KRA	5.20 h	ZOL	4.19 h
	STA	5.18 h		

Die Kenterpunkte (Abb. 6) liegen etwa

- in BRU  $K_e$  1 h nach  $T_{nw}$  und  $K_f$  1.30 h nach Thw
  - in STA  $K_e$  rd. 35 min nach  $T_{nw}$  und  $K_f$  rd. 45 min nach Thw
  - in HBG  $K_e$  rd. 30 min nach  $T_{nw}$  und  $K_f$  rd. 20 min nach Thw
- Die Flutstromgrenze ist etwa bei Zollenspieker erreicht.

Tabelle 20. Scheitelwasserstände in der Elbe

Tide	Wasserstand in cm NN - 5 m im Querschnitt <sup>1)</sup>							$Q_o$ m <sup>3</sup> /s
	BRU	BRO	KRA	STA	km 632 <sup>2)</sup>	BUN	ZOL	
mittl. Tide 1975/77								
MThw	644	643	649	659	690 <sup>3)</sup>	718 <sup>4)</sup>	740 <sup>4)</sup>	720
MTnw	369	370	370	376	375 <sup>3)</sup>	433 <sup>4)</sup>	534 <sup>4)</sup>	
3. 1. 76 (125)	1042	1067	1086	1107	1138	1143	1135	460
4. 1. 76 (126)	854	861	862	882	921	933	946	460
20. 1. 76	824	827	833	855	895	923	941	1400
21. 1. 76 (127)	986	988	998	1014	1048	1067	1077	1400
21. 1. 76 (127a)	846	848	846	864	905	934	952	1400
22. 1. 76 (128)	895	896	911	934	973	996	1015	1400
mittl. Tide 1980/82								
MThw	653	654	661	677	690 <sup>3)</sup>	718 <sup>4)</sup>	740 <sup>4)</sup>	990
MTnw	369	376	376	379	375 <sup>3)</sup>	433 <sup>4)</sup>	534 <sup>4)</sup>	
24. 11. 81 (146)	828	838	857	870	905	939	960	1340
24. 11. 81 (147)	986	1000	1015	1037	1065	1086	1100	1340
25. 11. 81 (148)	926	933	943	965	995	1025	1042	1340

<sup>1)</sup> vgl. Abb. 5

<sup>2)</sup> interpoliert zwischen Blankenese und Seemannshöft

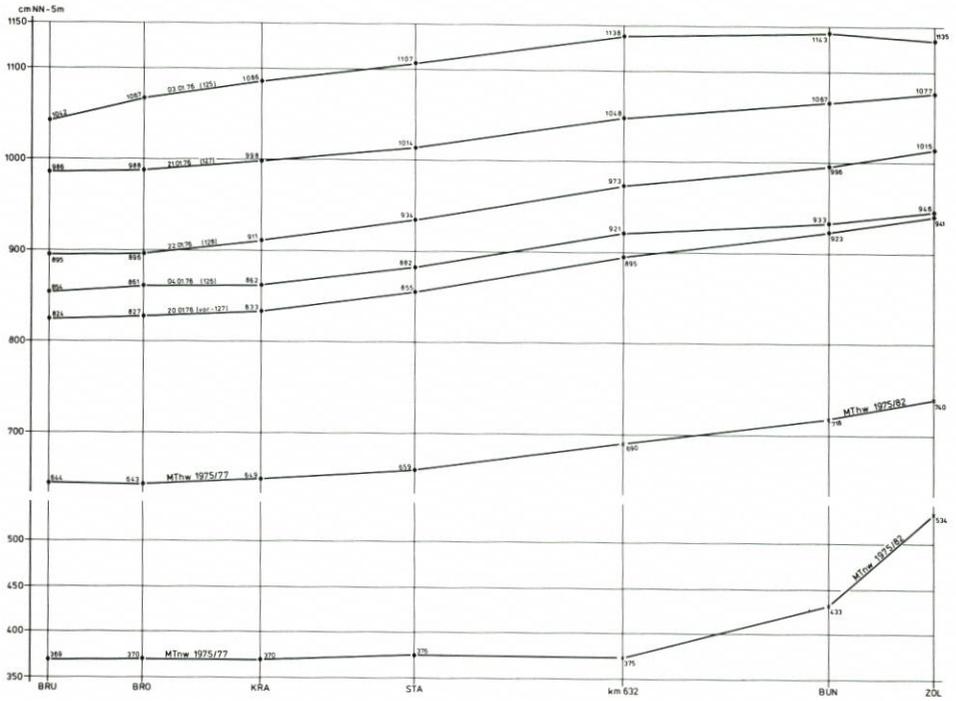
<sup>3)</sup> mittl. Tide 1976/81, um den  $Q_o$ -Einfluß auszuschalten

<sup>4)</sup> mittl. Tide 1975/82

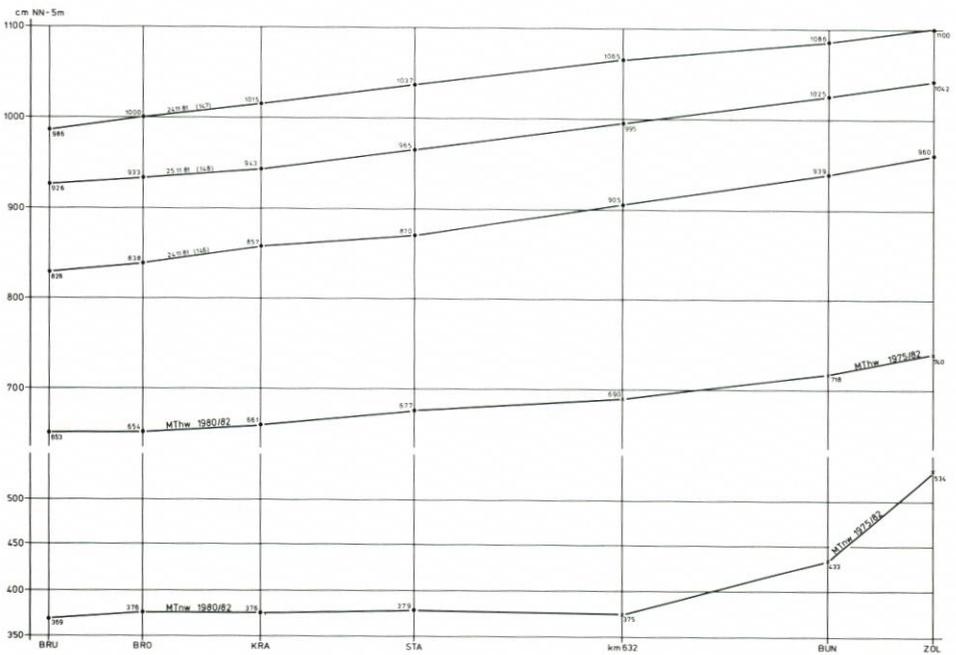
Während die MThw von BRU etwa gleichmäßig ansteigen, haben die MTnw in den letzten Jahrzehnten zwischen BRU und km 632\*) etwa gleiche Höhen erreicht. Dennoch ist eine MThb-Zunahme unterhalb km 632 erkennbar.

Die HThw-Entwicklung der ausgewählten Sturmfluten aus 1976 und 1981 von in BRU etwa gleich hohen Ereignissen zeigt weitgehend Konstanz, obwohl mehrere Eindeichungen an Einfluß gewonnen haben könnten. Als Stauräume waren bzw. sind vorhanden:

\*) km 632 wurde als fiktiver Pegelstandort gewählt, weil sich dort der Querschnitt von 1200 bis 1500 m Breite auf 600 m Breite verändert



13. Sturmfluten von 1976 in der Elbe



14. Sturmfluten von 1981 in der Elbe

- |   |  |
|---|--|
| 1. Nordkehdingen (Oste bis Altendorf)   |  |
| Gesamtüberflutungsfläche (Außendeich und Polder) 1976   | 6580 ha  |
| davon 1976 bedeckt (auf 4,2 m NN)   | 3175 ha  |
| mittl. Geländehöhe  | 2,2 m NN   |
| Gesamtspeicherraum bis Deichkrone   | $63,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$                                    |
| Gesamtspeicherraum bis HHThw (5,5 m NN)   | $217,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$                                   |
| 1981 war Nordkehdingen eingedeicht.   |  |
| 2. Krautsand  |  |
| Gesamtüberflutungsfläche 1976   | 3440 ha  |
| davon waren 1981 eingedeicht  | 3020 ha  |
| mittl. Geländehöhe  | 2,3 m NN   |
| Gesamtspeicherraum bis HHThw (5,8 m NN)   | $121,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$                                   |
| 3. Pagensander Nebelbe (mit Vorland und Pagensand) (zwischen KRA und STA)   |  |
| bei MTnw benetzte Fläche  | 300 ha   |
| Fläche über MThw  | 1500 ha  |
| mittl. Höhe der Gesamtfläche  | 1,7 m NN   |
| Gesamtspeicherraum bis HHThw (6,0 m NN)   | $72,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$                                    |
| 4. Drommel und Twielenflether Sand (bei STA)  |  |
| Gesamtüberflutungsfläche  | 680 ha   |
| mittl. Geländehöhe  | 1,7 m NN   |
| Gesamtspeicherraum bis HHThw (6,1 m NN)   | $29,9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$                                    |
| 5. Haseldorfer Marsch (unterhalb km 632)  |  |
| Gesamtüberflutungsfläche  | 2030 ha  |
| mittl. Geländehöhe  | 2,25 m NN  |
| Gesamtspeicherraum bis HHThw (6,1 m NN)   | $79,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$                                    |
| 1981 war die Marsch eingedeicht.  |  |
| 6. Neßsand, Hahnöfer Nebelbe und Mühlenberger Loch (unterhalb km 632)   |  |
| Gesamtüberflutungsfläche  | 1700 ha  |
| davon Mühlenberger Loch   | 730 ha   |
| Gesamtspeicherraum bis HHThw (6,25 m NN)  | $116,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$                                   |
| 7. Hamburger Stromspaltungsgebiet   |  |
| Die Elbe zwischen Bunthaus (km 609) und Nienstedten (km 632) wurde zur Berechnung in 5 Abschnitte unterteilt: östliche und westliche Norderelbe, Süderelbe, Köhlbrand und Unterelbe (Abb. 15). Die topographischen und mittleren Tidedaten enthält Tab. 21. Zunächst wurden die Daten für die Elbe selbst ermittelt, dann die Hafengebiete getrennt zugeordnet. So ergeben sich für die Elbarme selbst wie für die Häfen je 1230 ha Wasserfläche. |  |
| Landflächen im Hafen:   | Überflutet bei 5,5 m NN wurden 1976: 2000 ha<br>und 1981: 300 ha |

als Folge der Bauten von Hochwasserschutzpoldern.

1976 waren erstmals alle Nebenflüsse abgesperrt. Die Fahrwasservertiefungen waren damals bereits beendet.

Von 1976 bis 1981 wurde die Fläche der hier erwähnten Stauräume auf rd. ein Drittel reduziert; dabei nahm der Gesamtspeicherraum bis HHThw auf knapp die Hälfte ab. Dennoch entwickelten sich die HThw-Höhen in der Elbe oberhalb von BRU bei vergleichbaren Sturmfluten auf Abb. 13 und 14 fast identisch. Da (außer am 3./4. 1. 76) der Oberwasser-



Abb. 15. Lageplan des Hamburger Stromspaltungsgebietes

Tabelle 21. Topographische Angaben und mittlere Tidedaten im Hamburger Stromspaltungsgebiet (Abb. 15)

		östl. Norder- elbe	westl. Norder- elbe	Süder- elbe	Köhl- brand	Unter- elbe	Sum- men
Flußlänge	km	10,0	6,0	5,6	9,7	6,7	
Elbe-Wasserfläche bei MThw	ha	220	220	120	280	390	1230
Hafen-Wasserfläche bei MThw	ha	250*)	520	—	170	290	1230
	Summe	470	740	120	450	680	2460

\*) einschl. Billwerder Bucht (90 ha), die bei 3,5 m NN abgesperrt wird

	3 westl. Abschnitte		2 östl. Abschnitte	
	1976	1981	1976	1981
MThw cm NN - 5 m	690	715	696	734
MTnw cm NN - 5 m	375	375	409	439
MThb cm	315	340	287	295
T <sub>F</sub> h		5.05		4.52
T <sub>E</sub> h		7.20		7.33

abfluß etwa gleich war, ist dies ein Hinweis auf die relativ geringe Wirkung der Baumaßnahmen nach 1976 auf die HThw-Entwicklung. Dabei muß aber angemerkt werden, daß die Scheitelhöhen den eigentlichen Sturmflutablauf nur mangelhaft repräsentieren.

### 5. Schriftenverzeichnis

- CHRISTIANSEN, H., SAARE, H.-O. u. SIEFERT, W.: Sturmflut-Scheitelhöhen in Cuxhaven und Hamburg von 1661 bis 1984. Ref. Hydrol. Unterelbe, Studie 59, Cuxhaven 1985 (unveröff.).
- DIETZE, W.: Die Veränderung der Wasserstände in den großen deutschen Tideflüssen seit 100 Jahren. Dt. Gew. Mitt., H. 1, 1983.
- DUENSING, G., HÖFLICH, O., KAUFELD, L., SCHMIDT, H., OLBRÜCK, G. und BRANDT, B.: Meteorologische Untersuchungen über Stürme an der deutschen Nordseeküste. Dt. Wetterd., Seewetteramt, Einzelveröff. Nr. 108, Hamburg 1985.
- FÜHRBÖTER, A. u. JENSEN, J.: Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht. Die Küste, H. 42, 1985.
- JENSEN, J.: Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 83, 1984.
- LIETZ, U.: Zum Nullpunkt der Pegel Roter Sand und Alte Weser. Dt. Gew. Mitt., H. 2, 1986.
- SAARE, H.-O. u. SIEFERT, W.: Die Sturmflutentwicklung in der Elbe von 1950 bis 1980 als Mittelwerte über 5 und 10 Jahre. Ref. Hydrol. Unterelbe, Studie 62, Cuxhaven 1985 (unveröff.).
- SIEFERT, W. u. CHRISTIANSEN, H.: Entwicklung und Stand der Sturmflutvorhersagen des Hamburger Sturmflutwarndienstes. Hamb. Küstenforschung, H. 42, 1983.
- SIEFERT, W.: Energiebetrachtungen zum Tideablauf in Flüssen mit einigen Anwendungsbeispielen. Mitt. des Franzius-Inst. der Univ. Hannover, H. 58, 1984.
- SIEFERT, W. u. LASSEN, H.: Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelauswertungen. Die Küste, H. 42, 1985.
- O. V.: Sturmfluten von 1901 bis 1984 vor der südlichen Nordseeküste und in Hamburg. Hamb. Küstenforschung, H. 44, 1985.

## Symbolverzeichnis

$b_m$	mittlere Flußbreite zwischen MTnw und MThw bzw. HThw	m
HThw	Sturmflut-Scheitelhöhe	cm NN - 5 m
$K_e$	Ebbestrom-Kenterzeitpunkt	h
$K_f$	Flutstrom-Kenterzeitpunkt	h
MThb	mittl. Tidehub	m
MThw	mittl. Tidehochwasser	cm NN - 5 m
MTnw	mittl. Tideniedrigwasser	cm NN - 5 m
$Q_o$	Oberwasserabfluß	m <sup>3</sup> /s
$T_E$	Ebbedauer	s
$T_F$	Flutdauer	s
Thb	Differenz Thw - Tnw	m
$V_e$	Ebbestromgeschwindigkeit	m/s
$V_f$	Flutstromgeschwindigkeit	m/s
$\eta(t)$	Tidewasserstand	mKN, mNN
$\Delta H$	Differenz der Höhen der Tidescheitel zweier Pegel	m
$\Delta T$	Differenz der Eintrittszeiten der Tidescheitel zweier Pegel	s

## Pegelverzeichnis

Küstengebiet:	BOR	Borkum-Südstrand
	NOR	Norderney
	WHV	Wilhelmshaven - Alter Vorhafen
	AW	Alte Weser
	RS	Roter Sand
	CUX	Cuxhaven
	BÜS	Büsum
	WIT	Wittdün
	LIS	List
	Ems:	HER
PAP		Papenburg
LEE		Leerort
POG		Pogum
EMD		Emden
OTE		Oterdum
NST		Nieuwe Staatenzijl
Weser:	HEM	Weserwehr UW
	BRE	Bremen - Gr. Weserbrücke
	OSL	Oslebshausen
	VEG	Vege sack
	FAR	Farge

	ELS	Elsfleth
	HUN	Huntesperrwerk
	BRA	Brake
	NOR	Nordenham
	BHV	Bremerhaven – Alter Leuchtturm
Elbe:	GEE	Geesthacht UW
	ZOL	Zollenspieker
	BUN	Bunthaus
	SEE	Seemannshöft
	BLA	Blankenese
	SUL	Schulau
	STA	Stadersand
	KRA	Krautsand
	BRO	Brokdorf
	BRU	Brunsbüttel