

# Die Veränderung der Scheitelhöhen hoher Sturmfluten in Hamburg

Von HANS ROHDE

## Zusammenfassung

An der Küste erfolgt der säkulare Anstieg der Sturmflutscheitel in etwa gleichem Maße wie der des MThw. In einem Tidefluß wird die Höhe der Sturmflutscheitel dagegen nicht nur durch die Höhe der Sturmflutscheitel an der Küste und die Änderung des MThw dort bedingt, sondern auch durch Baumaßnahmen im und am Fluß beeinflusst. Für Sturmfluten, deren Scheitel in Cuxhaven 2,0 m und mehr über MThw eintraten, wird für verschiedene Zeitabschnitte vom Ende des 18. Jahrhunderts bis zur Gegenwart untersucht, wie die Entwicklung der Scheitelhöhen derselben Sturmfluten in Hamburg war. Daraus ergeben sich Hinweise auf die Wirkung der seit 1962 ausgeführten Baumaßnahmen an der Elbe.

## Summary

*The secular rise of the maximum storm surge water levels in the coastal zone is of the same order of magnitude as that of MThw. On the other hand, the maximum water levels in estuaries depend not only on the values of MThw at the coast but also on the influence of local construction measures. An analysis is made of the maximum storm surge water levels in Hamburg for different time periods between the 18. century and the present, for the case of maximum water levels at Cuxhaven in excess of MThw + 2 m. In this manner, conclusions can be drawn on the effect of the construction measures in the Elbe since 1962 on the storm surge water levels in Hamburg.*

## Inhalt

|                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. Einleitung . . . . .                                                                   | 255 |
| 2. Der säkulare Anstieg des MThw und sein Einfluß auf die Sturmflutscheitelhöhen. . . . . | 226 |
| 3. Die Entwicklung der Sturmflutscheitelhöhen in Hamburg 1901 bis 1990 . . . . .          | 229 |
| 4. Sturmflutscheitelhöhen in Hamburg vor 1901. . . . .                                    | 234 |
| 5. Schlußbetrachtung . . . . .                                                            | 236 |
| 6. Schriftenverzeichnis . . . . .                                                         | 239 |

## 1. Einleitung

Seit dem Ende des 18. Jahrhunderts sind in Cuxhaven und Hamburg Pegel vorhanden, an denen für längere Zeitabschnitte regelmäßige Wasserstandsmessungen ausgeführt worden sind. Es waren zunächst nur Lattenpegel, an denen Höhe und Eintrittszeit der am Tage eingetretenen Thw und Tnw registriert wurden. Bis 1843 sind größere Lücken in den Aufzeichnungen vorhanden. Ab 1843 liegen für Hamburg fast lückenlose Aufzeichnungen der Thw und Tnw vor; seit 1863 ist der Pegel Hamburg-St. Pauli ein Schreibpegel.

In Cuxhaven wurden von 1843 bis 1863 zwischen 5 Uhr und 20 Uhr alle Thw und Tnw nach Zeit und Höhe registriert, ab 1863 wurden auch die nachts eingetretenen Extremwerte der Tidekurve durch eine Stellvorrichtung in ihrer Höhe erfaßt. Seit 1899 arbeitet in Cuxhaven ein Schreibpegel.

Einzelheiten über die an beiden Orten seit dem Ende des 18. Jahrhunderts vorgenommenen Wasserstandsmessungen sind von ROHDE (1976) geschildert. Insgesamt ist also für eine Zeit von etwas mehr als 200 Jahren ein sehr umfangreiches Datenmaterial vorhanden, das nach verschiedenen Gesichtspunkten ausgewertet werden kann und dadurch wertvolle Aussagen ermöglicht.

Im folgenden soll die Veränderung der Höhenlage der Scheitelwerte hoher Sturmfluten in Hamburg im Vergleich mit Cuxhaven dargestellt werden. Die Entwicklung an den beiden Orten verlief unterschiedlich. Eine wesentliche Ursache dafür sind offensichtlich die verschiedenen Baumaßnahmen, die im Laufe der Zeit an der Tideelbe ausgeführt worden sind. Anhand von Modellrechnungen haben SIEFERT und HAVNOE (1988) den Einfluß der einzelnen zwischen 1950 und 1980 in der Tideelbe ausgeführten Baumaßnahmen auf die Höhe hoher Sturmfluten untersucht. Diese Ergebnisse sollen mit den Aussagen der vorliegenden, rein empirischen Arbeit verglichen werden, die die Zeitspanne von 1788 bis 1990 erfaßt.

## 2. Der säkulare Anstieg des MThw und sein Einfluß auf die Sturmflutscheitelhöhen

Seit an der deutschen Nordseeküste regelmäßige Wasserstandsbeobachtungen ausgeführt werden, wird ein Anstieg des MThw festgestellt. Er ist nicht gleichmäßig, vielmehr sind an allen Küstenpegeln mehr oder weniger große Schwankungen festzustellen, die aber zum größten Teil an den verschiedenen Orten gleichsinnig verlaufen. Durch übergreifende Mittelbildungen und auch durch Mittelung zwischen den an den verschiedenen Orten gewonnenen Werten lassen sich mehr oder weniger stark geglättete Ganglinien des MThw herstellen, wie sie in den letzten Jahrzehnten von zahlreichen Autoren mitgeteilt worden sind, z. B. von ROHDE (1964 und 1977), JENSEN (1984), FÜHRBÖTER u. JENSEN (1985) sowie FÜHRBÖTER (1986). Die Ganglinien der Küstenpegel zeigen im allgemeinen vom Beginn der Beobachtungen bis in die zwanziger Jahre des 20. Jahrhunderts einen mittleren Anstieg des MThw von etwa 25 bis 35 cm pro Jahrhundert, dann für die nächsten 4 bis 5 Jahrzehnte einen wesentlich schwächeren und in den letzten 20 Jahren wieder einen verstärkten Anstieg. Auf die möglichen Ursachen dieser Entwicklung soll hier nicht eingegangen werden, insbesondere auch nicht auf die Frage, ob der stärkere Anstieg in der letzten Zeit ein Hinweis auf die Auswirkung des Treibhauseffektes sein könnte. Sichere Aussagen dazu sind heute noch nicht möglich. Insgesamt läßt sich sagen, daß der mittlere Anstieg des MThw an der deutschen Nordseeküste seit Beginn der regelmäßigen Pegelbeobachtungen bis zur Gegenwart mit 20 bis 30 cm oder etwa mit 25 cm im Jahrhundert angesetzt werden kann.

In den Tideflüssen liegen die Verhältnisse anders. Hier wirken sich die im Laufe der Zeit ausgeführten Baumaßnahmen aus. So ist z. B. in der Ganglinie des MThw von Tönning durch den Bau der Eiderabdämmung Nordfeld 1936 ein Sprung von 14 cm eingetreten, der sich in der Ganglinie übergreifender Mittelwerte als eine Strecke mit besonders starker Steigung ausdrückt (ROHDE, 1964). Nach Inbetriebnahme des mündungsnahen Eidersperrwerks 1972 werden alle hohen Tiden gekehrt, so daß die MThw-Ganglinie oberhalb des Sperrwerks abgesunken ist. Dabei hängt die Höhe des jährlichen MThw in Tönning von der Anzahl der Sperrungen ab. 1981 lag MThw in Tönning mit  $PN + 593$  cm um 52 cm niedriger als MThw 1971, dem Jahr vor Inbetriebnahme des Eidersperrwerks. Die Differenz des MThw Tönning zum MThw von Büsum und Husum betrug 1981 sogar 72 cm bzw. 74 cm. Während MThw in Tönning in den Jahren zwischen 1960 und 1971 eine ähnliche Höhe hatte wie das MThw in Husum und Büsum, hat es in den letzten 10 Jahren zwischen 36 cm und 74 cm niedriger gelegen.



In Hamburg ist die Ganglinie der 19jährigen Mittel des MThw vom Ende des 18. Jahrhunderts bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts um etwa 10 cm angestiegen, also etwas geringer als der säkulare MThw-Anstieg in Cuxhaven während derselben Zeit betragen hat (ROHDE, 1971). Danach verlief die Ganglinie des MThw für viele Jahrzehnte etwa horizontal, um erst seit 1940 (1931/49) stark anzusteigen. Die Ganglinie von Cuxhaven stieg dagegen bis 1923 (1914/32) mit etwa 25 cm im Jahrhundert stetig an und verlief von 1923 bis 1968 wesentlich flacher. Erst danach ist wieder ein stärkerer Anstieg zu erkennen (LÄNDER-ARBEITSGRUPPE, 1988). Wenn man mit guter Näherung annehmen kann, daß die MThw-Ganglinie von Cuxhaven das Verhalten des MThw an der Küste der inneren Deutschen Bucht ohne wesentliche Störung wiedergibt, so ist dagegen der Verlauf der Ganglinie von Hamburg durch zahlreiche Ausbaumaßnahmen in der Tideelbe und im Hamburger Hafen zu erklären. Den grundsätzlichen Einfluß von Baumaßnahmen auf die Wasserstände in einem Tidefluß hat erstmals HENSEN (1941) dargestellt. Von HENSEN (1955) und ROHDE (1971) werden diese Grundsätze auf die Wasserstandsentwicklung in der Tideelbe angewandt.

Mit ersten Stromregelungsmaßnahmen in der Elbe wurde Mitte des vorigen Jahrhunderts im Hamburger Stromspaltungsgebiet und etwas unterhalb im Bereich Blankenese/Schulau begonnen. Die Baggermengen waren relativ gering. Der Pegel St. Pauli lag dabei zunächst in der Regelungsstrecke, so daß ein Absinken des MThw zu erwarten war. Es wurde aber durch den allgemeinen Anstieg des MThw an der Elbmündung kompensiert. Die Ausbaumaßnahmen wurden dann stromabwärts fortgesetzt, wobei nach 1900 eine deutliche Zunahme der Baggermengen zu verzeichnen war (ROHDE, 1971; KEIL, 1985). Das daraus zu erwartende Ansteigen des MThw in Hamburg wurde nun aber ausgeglichen durch die gleichzeitig ständige Vergrößerung der Flächen der Hafenbecken in Hamburg (HENSEN, 1955; ROHDE, 1971, Abb. 23). Als nach 1914 die Hafenflächen nur noch geringfügig zunahmen, war der allgemeine säkulare Anstieg des MThw an der Küste auch nur noch gering, wie die Ganglinie von Cuxhaven zeigt. Entsprechend verlief die MThw-Ganglinie von Hamburg weiterhin horizontal. Der starke Anstieg des MThw ab 1940 (1931/49) ist wohl auf die nach dem 2. Weltkrieg wiedereinsetzende stärkere Baggerung zur Wiederherstellung des 10 m tiefen Fahrwassers und die dann in kurzen Zeitabständen folgenden Fahrwasservertiefungen auf 11 m, 12 m und 13,5 m unter KN zurückzuführen, für die große Baggermengen erforderlich waren (ROHDE, 1971; KEIL, 1985). Es erfolgte keine Kompensierung mehr wie früher durch Vergrößerung der Hafenfläche, sondern im Gegenteil eher eine Verstärkung des Anstiegs durch die Abdämmung von Nebenarmen (z.B. Alte Süderelbe) und das Zuschütten von Hafenbecken.

Interessant ist die Entwicklung der Differenz zwischen dem MThw an der Küste (Cuxhaven) und Hamburg. Da von der Mitte des 19. Jahrhunderts bis etwa 1920 das MThw in Cuxhaven stetig anstieg, in Hamburg aber bis um 1940 horizontal verlief, nahm die MThw-Differenz zwischen beiden Orten allmählich von etwa 40 cm bis auf 20 cm ab. Seit etwa 1935 wird die Differenz wieder größer, da die MThw-Ganglinie in Hamburg wesentlich stärker ansteigt als in Cuxhaven. Die Differenz hat seit dem Minimum von 20 cm zwischen etwa 1920 und 1935 auf gegenwärtig 55 cm (1986/90) zugenommen. Diese Entwicklung läßt sich aus Abb. 4 des Berichtes der LÄNDER-ARBEITSGRUPPE (1988) deutlich ablesen. In Abb. 1 sind die Differenzen der jährlichen MThw von Hamburg und Cuxhaven sowie die fünfjährigen Mittel dargestellt. Sie zeigen die oben geschilderte Entwicklung im einzelnen.

Grundsätzlich muß sich der säkulare Anstieg des MThw an der Küste, der nach den obigen Ausführungen im Mittel mit 25 cm im Jahrhundert angesetzt werden kann, auch auf die Höhe der Sturmflutscheitel auswirken. Nun ist aber jede Sturmflut eine Einzelercheinung, bei der die Höhe des eingetretenen Scheitelwertes von sehr vielen Faktoren abhängig ist.

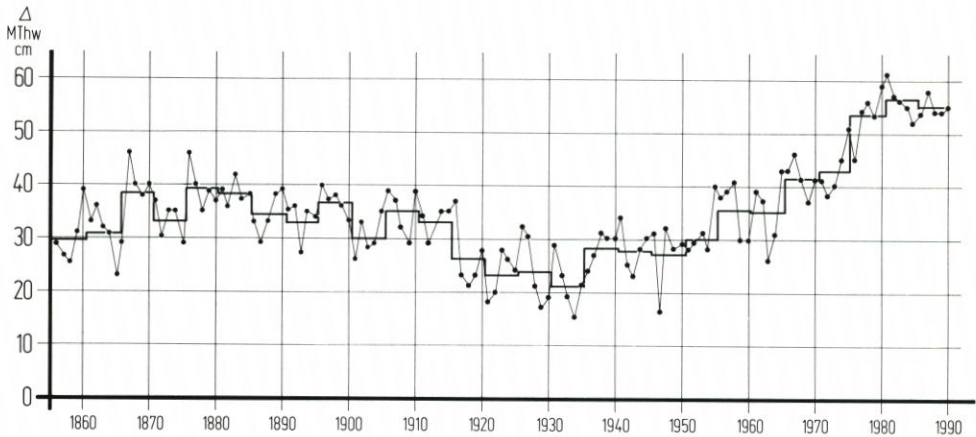


Abb. 1. Differenz zwischen den MThw Hamburg und Cuxhaven (Jahresmittel und fünfjährige Mittel)

Würden für den Ablauf einer Sturmflut nach 100 Jahren genau die gleichen Randbedingungen wieder vorliegen (u.a. gleicher Verlauf der Vortiden, gleiche Windverhältnisse, gleiche topographische Verhältnisse), so müßte der Scheitel der Sturmflut um den säkularen MThw-Anstieg an der Küste höher eintreten, also um etwa 25 cm. Ein solcher Fall kann jedoch völlig ausgeschlossen werden. Man kann allenfalls erwarten, anhand der Auftragung einer langen Zeitreihe von hohen Sturmflutscheiteln einen Trend des Anstiegs der Sturmflutscheitel zu erkennen. Für solche Zeitreihen liegen Daten vor, die aus Zeiten stammen, die zum Teil weit vor dem Beginn regelmäßiger Pegelaufzeichnungen liegen. Von einigen besonders schweren historischen Sturmfluten sind nämlich für mehrere Küstenorte die Scheitelhöhen überliefert, sei es durch Höhenmarken an Gebäuden oder durch Hinweise in der Literatur, bei denen ein Bezug zu modernen Höhenmarken möglich ist.

Wie der Verfasser gezeigt hat (ROHDE, 1977), lassen sich bei der Auftragung der Sturmflutscheitel für verschiedene Küstenorte seit dem 16. oder 17. Jahrhundert jeweils durch die Verbindung von zwei extremen Sturmflutscheiteln Begrenzungsgeraden eintragen, die bisher noch bei keiner Sturmflut überschritten worden sind. Ihre Steigung liegt zwischen etwa 20 und 30 cm im Jahrhundert und entspricht damit dem säkularen Anstieg des MThw an der deutschen Nordseeküste. Dabei entstehen Begrenzungsgeraden an den verschiedenen Orten durch die Verbindung ganz unterschiedlicher Sturmfluten, z.B. Emden 1570/1906, Dangast 1717/1825, Bremerhaven 1717/1962 und Cuxhaven 1825/1976. Abb. 2 zeigt die aus ROHDE (1977) entstammende Darstellung der höchsten Sturmflutscheitelwerte von Cuxhaven seit 1717 und die zwischen den Scheitelwerten von 1825 und 1976 eingetragene Begrenzungsgerade mit einer Steigung von 30 cm im Jahrhundert. Die Darstellung ist ergänzt um die seit 1976 eingetretenen Sturmflutscheitel mit Höhen über PN + 880 cm. Alle neuen Werte liegen unterhalb der Begrenzungsgeraden; es handelt sich also um Sturmfluten, die schwächer als die vom 3. 1. 1976 waren. Ein Sturmflutscheitel mit einer Höhe von 1015 cm über PN hätte im Winter 1989/90 noch im Trend des allgemeinen säkularen küstennahen MThw-Anstiegs gelegen.

Entsprechende Aussagen lassen sich auch für alle anderen Küstenorte treffen, die in der genannten Arbeit dargestellt sind. (Bei Tönning sind wegen des Betriebs des Eidersperrwerks seit 1972 keine Sturmflutscheitel mehr zu verzeichnen gewesen.)

Der säkulare Anstieg des MThw in einem Tidefluß läßt sich dort nicht in gleicher Weise



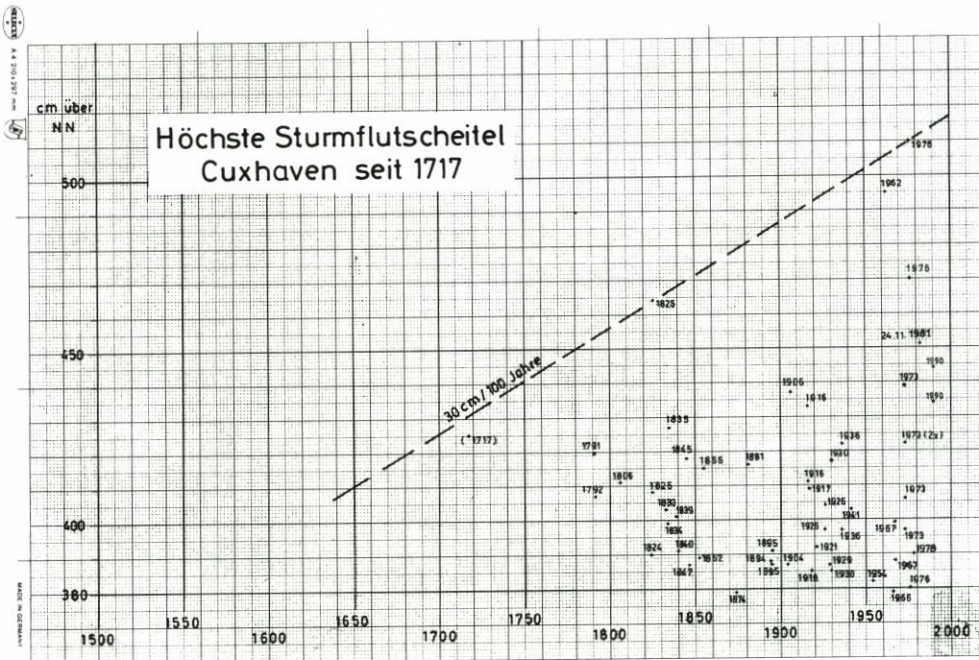


Abb. 2. Die höchsten Sturmflutschreit in Cuxhaven 1717-1990 nach Rohde (1977)

auf den Anstieg der Sturmflut-Scheitelwasserstände übertragen wie an der Küste. Die verschiedenen Ausbaumaßnahmen im und am Fluß wirken sich ganz unterschiedlich auf niedrige, mittlere und hohe Tiden aus. Eindeichungen im Vorland beeinträchtigen z. B. das MThw nicht, dagegen die Sturmtiden. Dabei ist es für die Höhe der Sturmflutschreit von Bedeutung, ob durch eine Vordeichung das Hochwasserprofil des Flusses stark eingeschränkt oder ob eine große Einbuchtung in der Deichlinie durch deren Begradigung abgeschnitten wurde. Im ersten Fall ist ein Absinken der Sturmflutschreit oberhalb der Einschnürung zu erwarten, im anderen Fall ein Anstieg.

### 3. Die Entwicklung der Sturmflutschreit Höhen in Hamburg 1901 bis 1990

Wie schon von ROHDE (1977) erläutert, fällt die Scheitelhöhe der Sturmflut vom 3. 1. 1976 in Hamburg völlig aus dem Rahmen. Sie lag mehr als 70 cm über der Begrenzungsgeraden der Sturmflutschreit vor 1962. Als Grund wurde angegeben, daß bei allen früheren schweren Sturmfluten an der Unterelbe an zahlreichen Stellen die Deiche gebrochen sind, sich dadurch die Wassermassen der Sturmflutwelle weit über das Flachland ausbreiten konnten und infolgedessen die Sturmflutschreit in Hamburg weniger hoch aufliefen. Das war zuletzt noch am 17. 2. 1962 der Fall gewesen. Wie Modellversuche des Franzius-Institutes ergeben haben, wäre die Februar-Sturmflut 1962 in Hamburg-St. Pauli 43 cm höher eingetreten, wenn die Deiche der Unterelbe zwischen Hamburg und Cuxhaven nicht gebrochen wären (NASNER u. PARTENSKY, 1977). In ähnlicher Weise werden auch die Scheitel der schwersten Sturmfluten früherer Jahrhunderte erniedrigt worden sein, denn von allen sind zahlreiche Deichbrüche mit großen Überflutungen an der Unterelbe bekannt, und ihre Scheitelhöhen liegen in der

Nähe einer mit 25 cm bzw. 28 cm pro Jahrhundert steigenden Begrenzungsgeraden, die sich aus der Verbindung der Scheitelhöhen von 1756 und 1962 ergibt (ROHDE, 1977). Im Januar 1976 war es nur zu sehr wenigen Deichbrüchen gekommen, und die Überflutungsflächen waren klein. Man kann daher – vielleicht etwas überspitzt – sagen, daß Hamburg jahrhundertlang davon profitiert hat, daß die Deiche an der Unterelbe bei sehr schweren Sturmfluten nicht standgehalten haben.

Von den nach dem 3. 1. 1976 eingetretenen hohen Sturmflutscheiteln lag nur der vom 24. 11. 1981 mit PN + 1081 cm 6 cm über der Begrenzungsgeraden der Sturmflutscheitel vor 1962; er lag noch um 64 cm unter dem Scheitel vom 3. 1. 1976. Der Scheitel vom 27./28. 2. 1990 lag mit PN + 1075 cm noch 3 cm unter der Begrenzungsgeraden (vgl. Abb. 7). Die Scheitel beider Sturmfluten lagen aber in Cuxhaven 44 cm bzw. 61 cm niedriger als der Scheitel vom 16. 2. 1962, hätten also wahrscheinlich in der Unterelbe auch vor Ausführung der modernen Deichverstärkungen keine oder nur wenige Deichbrüche hervorgerufen. Wenn beide Sturmfluten in Cuxhaven in der Höhe eingetreten wären wie die Sturmflut von 1962 und man annimmt, daß sie um die genannten Differenzbeträge in Hamburg höher aufgelaufen wären, so hätten ihre Scheitel in Hamburg noch wesentlich höher gelegen als nur um den Betrag, um den 1962 die Deichbrüche den Scheitelwert abgesenkt hatten.

Der Gedanke lag nun nahe, einmal alle Sturmfluten mit einer besonders großen Scheitelhöhe in Hamburg in ihrer Abhängigkeit von der Scheitelhöhe in Cuxhaven aufzutragen. Dafür wurde die vom Referat Hydrologie Unterelbe, Cuxhaven, erarbeitete Zusammenstellung der Sturmfluten von 1901 bis 1984 (REF. HYD., 1985) herangezogen. Dankenswerterweise hat das Referat Hydrologie Unterelbe (Prof. Dr. SIEFERT) dem Verfasser eine Ergänzung der genannten Zusammenstellung zur Verfügung gestellt, die bis zum 28. Februar 1990 (Sturmflut Nr. 191) reicht. Es wurden alle Sturmfluten berücksichtigt, deren Scheitel in Cuxhaven mehr als 2,0 m über dem MThw des jeweiligen Jahres lagen, insgesamt 82 Scheitelwerte. Eine erste Auftragung zeigte, daß diese Sturmfluten deutlich in zwei unterschiedliche Kollektive zerfallen und zwar in die Sturmfluten bis einschließlich 1967 (Kollektiv A) und ab 1968 (Kollektiv B). Abb. 3 zeigt die Auftragung der am Pegel Hamburg-St. Pauli aufgetretenen Scheitelhöhen der 57 Sturmfluten des Kollektivs A von 1901 bis 1967 in Abhängigkeit von der Scheitelhöhe in Cuxhaven. Außerdem ist die Ausgleichsgerade eingetragen, deren Gleichung mit

$$Y = -194,75 + 1,252 X \quad (\text{Gerade A})$$

ermittelt wurde\*). Das Kollektiv ist recht geschlossen, der Korrelationskoeffizient beträgt 0,867.

Der Sturmflutscheitel Nr. 78 (16./17. 2. 1962) liegt in der Nähe der Ausgleichsgeraden. Nur der Scheitelwert Nr. 94 kann als „Ausreißer“ bezeichnet werden; er ist in Hamburg relativ zu hoch eingetreten. Es handelt sich dabei um die Sturmflut vom 23./24. 2. 1967. Die Scheitelwerte der beiden benachbarten hohen Sturmfluten (Nr. 90 vom 30. 11./1. 12. 1966 und 95 vom 28. 2./1. 3. 1967) liegen dagegen ganz in der Nähe der Ausgleichsgeraden. Eine Ursache für die zu hohe Lage des Scheitels Nr. 94 kann möglicherweise der hohe Oberwasserzufluß gewesen sein, der nach REF. HYD. (1985) für Nr. 94 1692 m<sup>3</sup>/s, Nr. 95 1430 m<sup>3</sup>/s und Nr. 90 774 m<sup>3</sup>/s betragen hat. Diese Abflüsse sind das Mittel der letzten 6 Tage vor der Sturmflut. Bei einigen früheren Sturmfluten des Kollektivs A waren die Abflüsse zwar noch

\*) Die Korrelationsrechnungen wurden von Herrn Dr.-Ing. Jensen von der Außenstelle Küste der Bundesanstalt für Wasserbau in Hamburg ausgeführt, wofür ihm der Verfasser sehr dankbar ist.



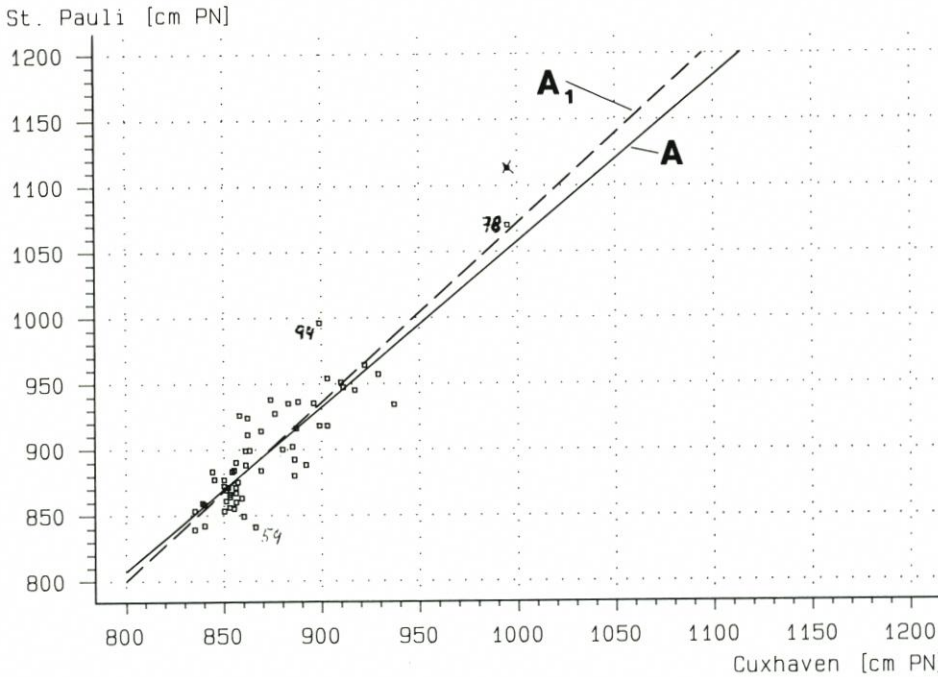


Abb. 3. Die Abhängigkeit hoher Sturmflutwasserstände in Hamburg-St. Pauli von den Sturmflutscheitelhöhen in Cuxhaven (1901-1967) (Gerade A)

größer als bei Nr. 94, trotzdem lagen die Punkte in der Nähe der Ausgleichsgeraden. Bei der Sturmflut Nr. 94 waren mit den Absperungen von Seeve, Billwerder Bucht sowie Vering- und Schmidtkanal (alle Sperrwerke seit 1966 in Betrieb) jedoch gerade im Hamburger Bereich Baumaßnahmen wirksam geworden, die in Verbindung mit hohem Oberwasserzufluß zu einer verhältnismäßig hohen Lage des Sturmflutscheitels geführt haben können. Die größte Abweichung nach unten hat im Kollektiv A der Sturmflutscheitel Nr. 59 vom 24. 10. 1949. Hier war der Oberwasserzufluß mit  $232 \text{ m}^3/\text{s}$  besonders niedrig.

Daß der Sturmflutscheitel vom 17. 2. 1962 in der Nähe der Ausgleichsgeraden liegt, ist eigentlich verwunderlich. Der Scheitelwert war, wie die Modellversuche ergeben haben, infolge der Deichbrüche und Überflutungen 43 cm zu niedrig eingetreten. Alle anderen Sturmflutscheitel des Kollektivs A sind dagegen nicht oder nur geringfügig durch Deichbrüche beeinflusst gewesen. Wären 1962 keine Deichbrüche vorgekommen und hätte der Scheitelwert in Hamburg 43 cm höher auf PN + 1113 cm gelegen (als Kreuz in Abb. 3 eingetragen), so wäre er in dem Kollektiv A ein echter „Ausreißer“ gewesen. Auch für diesen Fall wurde eine Korrelationsrechnung ausgeführt. Die Lage der Ausgleichsgeraden wird durch den erhöhten Wert für 1962 nur geringfügig beeinflusst, der Korrelationskoeffizient ist sogar 0,873. In Abb. 3 ist gestrichelt die Ausgleichsgerade A 1 eingetragen, die für diesen Fall gilt.

Als Abb. 4 sind die in St. Pauli eingetretenen Scheitelhöhen der 25 Sturmfluten des Kollektivs B von 1968 bis 1990 dargestellt. Die Gleichung der Ausgleichsgeraden ist:

$$Y = -190,91 + 1,316 X \quad (\text{Gerade B}).$$

Der Korrelationskoeffizient ist mit 0,909 größer als beim Kollektiv A; echte „Ausreißer“ kommen nicht vor.

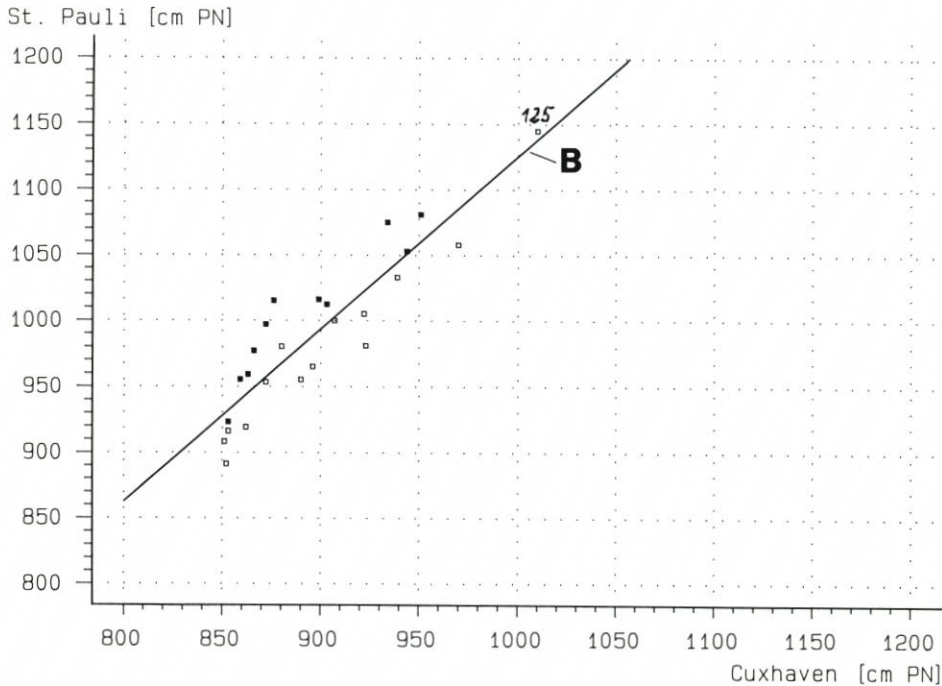


Abb. 4. Die Abhängigkeit hoher Sturmflutwasserstände in Hamburg-St. Pauli von den Sturmflutscheitelhöhen in Cuxhaven (1968–1990) (Gerade B)

Es wurde überlegt, ob sich evtl. eine noch bessere Korrelation ergeben würde, wenn jeder Scheitelwert auf einen mittleren Oberwasserzufluß beschickt würde. Die Auswirkung des Oberwasserzuflusses ist aber nicht konstant. Sie ist u. a. abhängig vom Ausbauzustand der Elbe. Aus hydraulischen Modellversuchen, bei denen die Elbe im Zustand von 1966 nachgebildet war (etwa Beginn des Ausbaus auf KN -12 m), ergab sich für mittlere Tiden eine Erhöhung bzw. Erniedrigung des MThw in Hamburg von 3,5 cm pro 100 m<sup>3</sup>/s Oberwasserzufluß (ROHDE, 1971), nach Modellversuchen mit dem 13,5-m-Ausbau von 2,1 cm pro 100 m<sup>3</sup>/s (BAW, 1983). Die Auswirkung des Oberwasserzuflusses auf hohe Tiden ist aber geringer, sie wurde von der LÄNDER-ARBEITSGRUPPE (1988) mit 1 cm pro 100 m<sup>3</sup>/s nach Untersuchungen des Dänischen Hydraulischen Instituts angenommen. Da dieser Betrag nur gering ist und man auch nicht weiß, welche Beträge bei den verschiedenen Ausbauzuständen der Elbe seit 1901 anzusetzen wären, wurde von der Berücksichtigung unterschiedlicher Oberwasserzuflüsse abgesehen.

In Abb. 5 sind die beiden Kollektive A und B mit ihren Ausgleichsgeraden zusammen aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, daß fast alle Werte des Kollektivs A unter der Ausgleichsgeraden des Kollektivs B liegen. Die einzige echte Ausnahme ist der schon erwähnte Scheitelwert Nr. 94. Umgekehrt liegen alle Werte des Kollektivs B über der Ausgleichsgeraden des Kollektivs A.

Da die Scheitel aller hier verwendeten Sturmfluten in Cuxhaven größere Höhen als 2,0 m über MThw erreichten, lagen bei allen Sturmfluten in der Elbmündung etwa gleiche Ausgangsbedingungen vor. Trotzdem erreichten die Sturmfluten nach 1968 in Hamburg wesentlich größere Scheitelhöhen als die von 1901 bis 1967.

Aus dem Abstand der Ausgleichsgeraden ergibt sich der mittlere Anstieg der Scheitelhö-



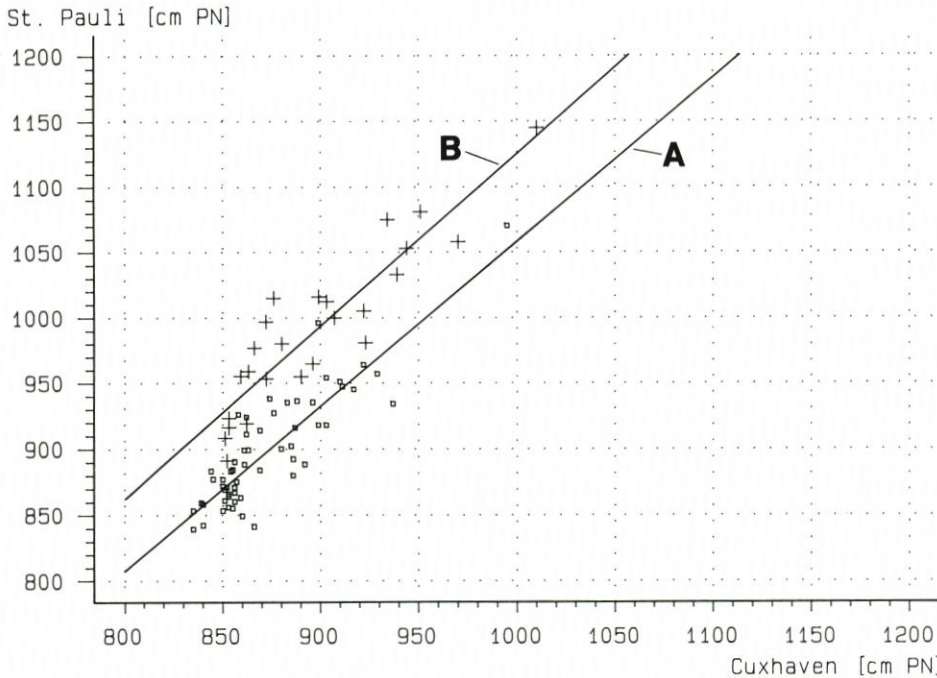


Abb. 5. Die Abhängigkeit hoher Sturmflutwasserstände in Hamburg-St. Pauli von den Sturmflutscheitelhöhen in Cuxhaven (1901-1990) (Geraden A und B)

hen in Hamburg bei Sturmfluten, deren Scheitel in Cuxhaven PN + 850 cm erreichten, von 58 cm, bei Scheitelhöhen in Cuxhaven von PN + 1000 cm von 68 cm. Die Ursache für diese Scheitelerhöhungen kann nur in dem veränderten Zustand der Unterelbe gesehen werden, und zwar sowohl in den Fahrwasserausbauten als auch in den Maßnahmen des Schutzes gegen Sturmfluten – Vordeichungen, Aufhöhen von niedrigen Flächen, Abdämmungen von Nebenarmen, Betrieb von Sturmflutsperrwerken. Vor Mitte 1967 waren nur die oben schon genannten Sperrwerke mit verhältnismäßig kleinen Einzugsgebieten fertiggestellt, die Alte Süderelbe abgedämmt und einige Flächen zwischen Billwerder Bucht und Geesthacht eingedeicht worden (SIEFERT u. HAVNOE, 1988). Danach kamen folgende Sperrwerke in Betrieb (GÄTJEN, 1979): Estemündung (1967), Freiburg (1967), Oste (1968), Lühemündung (1968), Pinnau (1969), Krückau (1969), Baumwall (1969), Nikolafleet (1969), Schwingemündung (1971), Abbenfleth (1971), Stör (1975), Ilmenau (1974), Wedeler Au (1976), Wischhafener Süderelbe (1978) und Ruthenstrom (1978). Auch die Eindeichungen Hanöfer Sand, Nordkehdingen und Haseldorfer Marsch wurden erst in dem zweiten Zeitabschnitt voll wirksam. Von den Elbeausbauten lagen der 12-m- und der 13,5-m-Ausbau nach 1967 (KEIL, 1985).

Die verschiedenen Maßnahmen in ihrer Auswirkung auf die Erhöhung der Scheitel schwerer und sehr schwerer Sturmfluten im einzelnen zu beurteilen, ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht möglich. Eine solche Einzelbewertung wurde anhand von Modellrechnungen von SIEFERT u. HAVNOE (1988) vorgenommen. Dabei wurden 26 Sturmfluten zwischen 1949 und 1983 für die Untersuchungen herangezogen, von denen einige aber in Cuxhaven geringere Scheitelhöhen als 2 m über MThw hatten. Im Gesamtergebnis ergibt sich eine recht gute Übereinstimmung mit den vorliegenden Untersuchungen. SIEFERT u. HAVNOE gaben als Gesamtwirkung aller Baumaßnahmen zwischen 1950 und 1980 eine Scheitelerhö-

hung von 5 bis 6 dm für Hamburg-St. Pauli an, während sich nach der vorliegenden Arbeit 6 bis 7 dm ergeben. Dabei ist zu berücksichtigen, daß bei den Modellrechnungen einige Maßnahmen, die am Schluß der Arbeit von SIEFERT und HAVNOE (1988) aufgeführt sind, nicht untersucht wurden, so z. B. die Absperrung von Oste und Stör und der Alsterfleete sowie die Einpolderungen im Hafen. Außerdem sind manche Eindeichungsmaßnahmen erst zwischen 1976 und 1981 voll wirksam geworden (SIEFERT u. LASSEN, 1986). In der Summe könnten diese Einflüsse in der Größenordnung von einem Dezimeter liegen.

In diesem Zusammenhang ist von Interesse, daß die Scheitel der ab 1981 eingetretenen Sturmfluten fast ohne Ausnahme über der Ausgleichsgeraden in Abb. 4 liegen, die vor 1981 unter ihr. Die Scheitelwerte von 1981 bis 1990 sind in Abb. 4 als kleine schwarze Quadrate dargestellt, die von 1968 bis 1980 als offene Quadrate. Die Ausgleichsgerade teilt also das Kollektiv B in zwei zeitlich unterschiedliche Teilkollektive. Dieses Verhalten kann so interpretiert werden, daß die Sturmflutscheitel der ab 1981 eingetretenen Sturmfluten gegenüber denen, die zwischen 1968 und 1980 eintraten, noch etwas angestiegen sind.

Lediglich der Einfluß der Fahrwasserausbauten läßt sich aufgrund der vorliegenden Arbeit abschätzen. Die Fahrwasserausbauten wirken sich in erster Linie auf die Lage der mittleren Scheitelwasserstände aus, also auf MTnw und MThw. Dabei interessiert hier nur der Einfluß auf das MThw, der wesentlich geringer ist als der Einfluß auf das MTnw (HENSEN, 1941; ROHDE, 1971). Zwischen 1900 und 1965 lag nach Abb. 1 die Differenz der fünfjährigen Mittelwerte des MThw von Hamburg und Cuxhaven etwa zwischen 20 und 35 cm, im Mittel auf 30 cm. 1965/70 stieg die Differenz auf rd. 42 cm an und liegt gegenwärtig (1986/90) bei 55 cm. Der Anstieg der MThw-Differenz zwischen Hamburg und Cuxhaven beträgt also in dem zweiten Zeitabschnitt im Mittel insgesamt 25 cm und ist wohl zum großen Teil auf die Fahrwasservertiefungen zurückzuführen.

Interessant ist in diesem Zusammenhang, daß die drei deutlich ausgeprägten Sprünge in der Ganglinie der fünfjährigen Mittel der Differenzen der MThw von Hamburg und Cuxhaven in Abb. 1 nach 1945 ungefähr mit den Zeiten übereinstimmen, in denen die 11-m-, 12-m- und 13,5-m-Ausbauten ausgeführt wurden. Etwas wirkt sich auch die Erhöhung der Sturmfluten durch die oben geschilderten Maßnahmen des Sturmflutschutzes auf die Erhöhung des MThw aus. Enthalten sind darin ebenfalls die Auswirkungen von Verkleinerungen des Flutraumes bei mittleren Tiden, z. B. durch das Zuschütten alter Hafenbecken. Der Einfluß der beiden letzten Fahrwasserausbauten auf die Änderung des MThw wird also geringer sein als 25 cm und dürfte etwa 15 bis 20 cm betragen. Die Erhöhung des MThw wirkt sich aber nicht im gleichen Maße auf die Höhenlage der hohen Sturmfluten aus, sondern geringer. Der von SIEFERT u. HAVNOE (1988) angegebene Einfluß der Fahrwasservertiefungen auf die Höhe hoher Sturmfluten, der mit Ausnahme der Sturmflut vom 24./25. November 1981 zwischen 0,5 dm und 1,5 dm angegeben wird, stimmt mit den vorstehenden Überlegungen überein, ebenfalls die mit 2 dm angegebene Erhöhung des MThw.

#### 4. Sturmflutscheitelhöhen in Hamburg vor 1901

Von CHRISTIANSEN u. a. (1985) sind insgesamt 153 Sturmfluthöhen aus der Zeit von 1661 bis 1901 zusammengestellt. Zum Teil sind die Höhen aber nur für einen der Orte Cuxhaven oder Hamburg angegeben. Der Gedanke lag daher nahe, die Scheitelhöhen auch der Sturmfluten, für die sowohl für Hamburg als auch Cuxhaven Daten überliefert sind, in derselben Weise auszuwerten wie für die Zeit ab 1901.

Zunächst soll der Zeitabschnitt von 1855 bis 1900 betrachtet werden. Für diesen



Zeitabschnitt ist die Lage des Pegelnullpunktes von Cuxhaven einwandfrei rekonstruiert worden (LASSEN u. a., 1984), so daß die Scheitelhöhen der Sturmfluten exakt angegeben werden können. CHRISTIANSEN u. a. (1985) hatten allerdings die Umrechnung nach den Angaben von LASSEN u. a. (1984) noch nicht vorgenommen, so daß diese Berichtigung der Scheitelhöhen erst noch ausgeführt werden mußte. Es wurden dann die bei CHRISTIANSEN u. a. (1985) verzeichneten 34 Sturmfluten mit Scheitelhöhen von 2,0 m über MThw Cuxhaven, für die auch für Hamburg Werte vorlagen, in derselben Weise aufgetragen, wie die Kollektive A und B im vorigen Abschnitt (Abb. 6). Für einen weiteren Wert von Cuxhaven fehlt die Angabe der Scheitelhöhe von Hamburg. Die Ausgleichsgerade dieses Kollektivs C hat die Gleichung:

$$Y = -276,47 + 1,346 X \quad (\text{Gerade C})$$

Der Korrelationskoeffizient ist 0,800. Zu diesem Kollektiv ist zu sagen, daß es nicht ganz den Kollektiven A und B gleichwertig ist. Zum einen wurden in Hamburg die Ablesungen von 1855 bis 1863 an einem Lattenpegel vorgenommen, in Cuxhaven sogar bis 1898; sie sind daher weniger genau als die Schreibpegelaufzeichnungen, die den Kollektiven A und B zugrunde liegen. Außerdem fehlen für Cuxhaven möglicherweise zwischen 1855 und 1863 einige Sturmfluten, da dort der Pegel nur zwischen 5 Uhr und 20 Uhr abgelesen wurde.

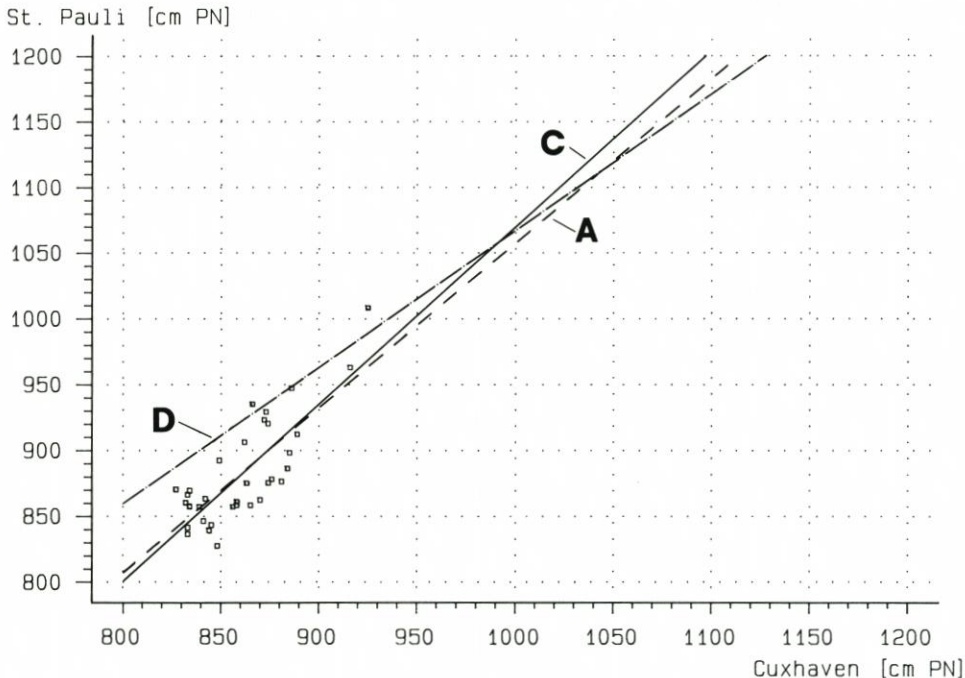


Abb. 6. Die Abhängigkeit hoher Sturmflutwasserstände in Hamburg-St. Pauli von den Sturmflutscheitelhöhen in Cuxhaven (1855-1900) (Gerade C)

In Abb. 6 ist gestrichelt die Ausgleichsgerade des Kollektivs A zusätzlich eingetragen. Es zeigt sich, daß die beiden Ausgleichsgeraden in dem maßgeblichen Bereich zwischen den Abszissenwerten 820 cm und 930 cm sehr dicht beieinander verlaufen. Die Unterschiede sind so gering, daß sie bei der unterschiedlichen Genauigkeit der Daten nicht als signifikant angesehen werden können und man aus der Abweichung der beiden Geraden voneinander

keine Aussage herleiten kann. Das heißt aber, daß alle Baumaßnahmen, die von 1855 bis 1900 an der Unterelbe ausgeführt worden sind, praktisch keinen Einfluß auf die Scheitelhöhen der Sturmfluten in Hamburg gehabt haben können. Auch die Differenz der MThw von Hamburg und Cuxhaven ist nach Abb. 1 in der Zeitspanne praktisch unverändert geblieben. Die fünfjährigen Mittelwerte der Differenzen schwanken zwischen 30 cm und 40 cm und betragen im Mittel 35 cm.

Die erste Sturmflut, für die sowohl von Cuxhaven als auch von Hamburg Scheitelwerte in dem Verzeichnis von CHRISTIANSEN u. a. (1985) enthalten sind, ist die vom 25. 1. 1788. Für die 67 Jahre bis 1854 enthält das Verzeichnis insgesamt 49 Sturmfluten mit Scheitelhöhen von 2,0 m und mehr über MThw Cuxhaven. Davon sind für 37 die Daten für Hamburg und Cuxhaven bekannt, für 12 nur die Werte von Cuxhaven. Bei weiteren 6 Sturmfluten sind die für Hamburg überlieferten Scheitelwerte so hoch, daß die zugehörigen Scheitelwerte von Cuxhaven wahrscheinlich auch mehr als 2,0 m über MThw gelegen haben werden. Wahrscheinlich ist das Kollektiv aber nicht vollständig, da nicht alle Sturmfluten erfaßt wurden. Außerdem ist zu bedenken, daß die Höhenangaben von Cuxhaven ungenau sind, weil die Höhenlage des Nullpunktes des alten Pegels Cuxhaven vor 1855 nicht sicher festgestellt werden kann (LASSEN u. a., 1984). Ferner haben die Pegelstandorte in dem Zeitabschnitt gewechselt, in Hamburg stand der Pegel bis 1840 am Niederbaum und seit 1841 etwa 800 m elbabwärts an den St.-Pauli-Landungsbrücken (ROHDE, 1976).

Trotz der genannten Unsicherheiten und Ungenauigkeiten wurde auch für die 37 Wertepaare des Kollektivs D zwischen 1788 und 1854 eine Korrelationsrechnung ausgeführt. Die Ausgleichsgerade hat die Gleichung:

$$Y = 27,325 + 1,0398 X \quad (\text{Gerade D}).$$

Der Korrelationskoeffizient ist 0,821. In Abb. 6 ist zu den Geraden A und C auch die Gerade D gestrichelt eingetragen. Sie liegt im unteren Bereich beträchtlich über, im Bereich der höchsten Scheitelwerte, die zu der damaligen Zeit nach Abb. 2 in Cuxhaven zu erwarten waren (PN + 970 cm), dagegen ganz in der Nähe der Geraden C.

Zehn der 12 Sturmfluten, deren Scheitelhöhen nach CHRISTIANSEN u. a. (1985) für Cuxhaven, aber nicht für Hamburg bekannt sind, lagen mit ihren Scheiteln zwischen 202 cm und 217 cm über MThw Cuxhaven und zwischen PN + 815 und 825 cm. Es ist wahrscheinlich, daß auch die Scheitelhöhen der Sturmfluten, die nicht überliefert worden sind, überwiegend zu denen gehört haben werden, die nur wenig mehr als 2,0 m über MThw lagen. Würde man alle diese Sturmfluten mit in das Kollektiv D einbeziehen können, so würde der linke Teil der Geraden D abgesenkt werden und dichter an die Gerade C herankommen. Unter Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte und der schon genannten Ungenauigkeiten bei den Daten für diesen Zeitabschnitt liegt die Gerade D recht nahe an der Geraden C, und es sind keine Schlüsse aus dem unterschiedlichen Verlauf der Geraden D und C auf Ursachen möglich, die im Zustand der Unterelbe liegen. Es ist eher die Annahme berechtigt, daß sich auch für die Zeitspanne von 1788 bis 1854 keine signifikante Änderung in der Abhängigkeit der Scheitelhöhe hoher Sturmfluten in Hamburg von der Eintrittshöhe in Cuxhaven ergeben hat.

## 5. Schlußbetrachtung

Aus den vorstehenden Untersuchungen ergibt sich, daß wesentliche Änderungen in den Scheitelhöhen hoher Sturmfluten in Hamburg erst nach 1968 festzustellen sind und daß diese Änderungen auf die von 1962 bis zur Gegenwart ausgeführten Baumaßnahmen an und in der



Tideelbe zurückgeführt werden müssen. Es ergab sich eine gute Übereinstimmung mit den von SIEFERT u. HAVNOE (1988) veröffentlichten Ergebnissen von Modellrechnungen.

Das in der vorliegenden Arbeit verwertete Datenmaterial läßt hinsichtlich der Häufigkeit hoher Sturmfluten in der Elbemündung weitere interessante Aussagen zu. In der Zeitspanne von 1901 bis 1967 wurde die Scheitelhöhe von 2,0 m über MThw in Cuxhaven 57 mal erreicht oder überschritten, im Mittel 0,85 mal im Jahr. In der Zeitspanne von 1968 bis 1990 wurde der Wasserstand von 2,0 m über MThw in Cuxhaven 25 mal erreicht oder überschritten also 1,09 mal im Jahr. Diese Zunahme in der Häufigkeit ist naturbedingt und nicht durch Baumaßnahmen an der Elbe beeinflusst worden. Betrachtet man noch die beiden früheren Zeitabschnitte, für die Daten vorliegen, so sind zwischen 1855 und 1900 mindestens 35 entsprechende Sturmfluten in Cuxhaven eingetreten oder 0,76 im Jahr. Wie weiter oben erwähnt, sind in Cuxhaven zwischen 1855 und 1863 wahrscheinlich einige Sturmfluten nicht erfaßt worden. Wenn aber nur die Daten von vier Sturmfluten fehlen würden, so wäre die mittlere jährliche Häufigkeit mit 0,85 ebenso groß wie im Zeitabschnitt 1901 bis 1967. Daraus ergibt sich, daß in beiden Zeitabschnitten die Anzahl von Sturmfluten, deren Scheitel in Cuxhaven 2,0 m oder mehr über MThw lagen, im Mittel praktisch unverändert geblieben ist.

Für den Zeitabschnitt von 1788 bis 1854 sind mindestens 55 entsprechende Sturmfluten bekannt, was im Mittel 0,82 im Jahr ergibt und damit der mittleren Häufigkeit für die Zeitspanne von 1901 bis 1967 etwa entspricht. Sehr wahrscheinlich sind von 1788 bis 1854 weit mehr als 55 Sturmfluten mit Scheitelhöhen von 2,0 m über MThw in Cuxhaven aufgetreten, so daß die mittlere Häufigkeit größer als 0,85 sein dürfte. Wahrscheinlich muß man den Zeitabschnitt 1788 bis 1854 unterteilen in einen Abschnitt mit besonders großer und einen mit geringerer Sturmfluthäufigkeit. Nach CHRISTIANSEN u. a. (1985) sind allein von 1791 bis 1807 in Cuxhaven 16 hohe Sturmfluten überliefert. Für diese Zeitspanne von 17 Jahren ergibt sich daraus eine mittlere Häufigkeit von 0,94 mal im Jahr. Tatsächlich dürften noch einige Sturmfluten mehr vorgekommen sein, so daß im Mittel etwa die gleiche Häufigkeit vorgelegen haben dürfte wie 1968 bis 1990. Die gegenwärtig große Häufigkeit hoher Sturmfluten ist also keineswegs ein einmaliges Ereignis!

Zum Schluß soll noch aufgrund der in den Abschnitten 2 bis 4 dargestellten Ergebnisse versucht werden, entsprechend Abb. 2 die wahrscheinliche Entwicklung der höchsten Sturmflutscheitel für Hamburg darzustellen. Dazu wird auf die von ROHDE (1977) als Abb. 14e veröffentlichte Darstellung der höchsten Sturmflutscheitel in Hamburg zurückgegriffen. In Abb. 7 sind alle Sturmflutscheitel von Hamburg eingetragen, die die Höhe von NN + 450 cm (= PN + 950 cm) erreicht oder überschritten haben. Die Abbildung enthält Daten von 1661 bis 1990. Für die Zeit von 1661 bis 1756 wurden die von CHRISTIANSEN u. a. (1985) angegebenen Werte verwendet. Die Verbindungslinie der Scheitelwerte von 1756 und 1962 ergibt die „Begrenzungsgerade“ nach ROHDE (1977), die bis 1962 noch nie überschritten worden ist. Für einige der in der Nähe dieser Begrenzungsgeraden liegenden Scheitelwerte von 1663, 1697, 1717, 1751, 1756, 1791, 1792, 1825 kann angenommen werden, daß sie infolge zahlreicher Deichbrüche und Überflutungen im Gebiet der Unterelbe in Hamburg stark erniedrigt eingetreten sind. Als Wert für die Kappung der Scheitelwerte sollen 4 dm angesetzt werden, entsprechend der Absenkung des Scheitelwertes von Hamburg von 43 cm nach den Modellversuchen des Franzius-Instituts (NASNER u. PARTENSKY, 1977). Die sich daraus ergebende Begrenzungsgerade ist in Abb. 7 eng gestrichelt eingetragen. In der Nähe dieser Geraden hätten außer der Sturmflut von 1962 wahrscheinlich auch die Scheitel einiger der obengenannten acht besonders schweren Sturmfluten gelegen, wenn an der Unterelbe keine Überflutungen als Folge von Deichbrüchen eingetreten wären. Nach 1962 hat sich dann ein sprunghafter Anstieg der Begrenzungsgeraden infolge der verschiedenen Baumaßnahmen in und an der

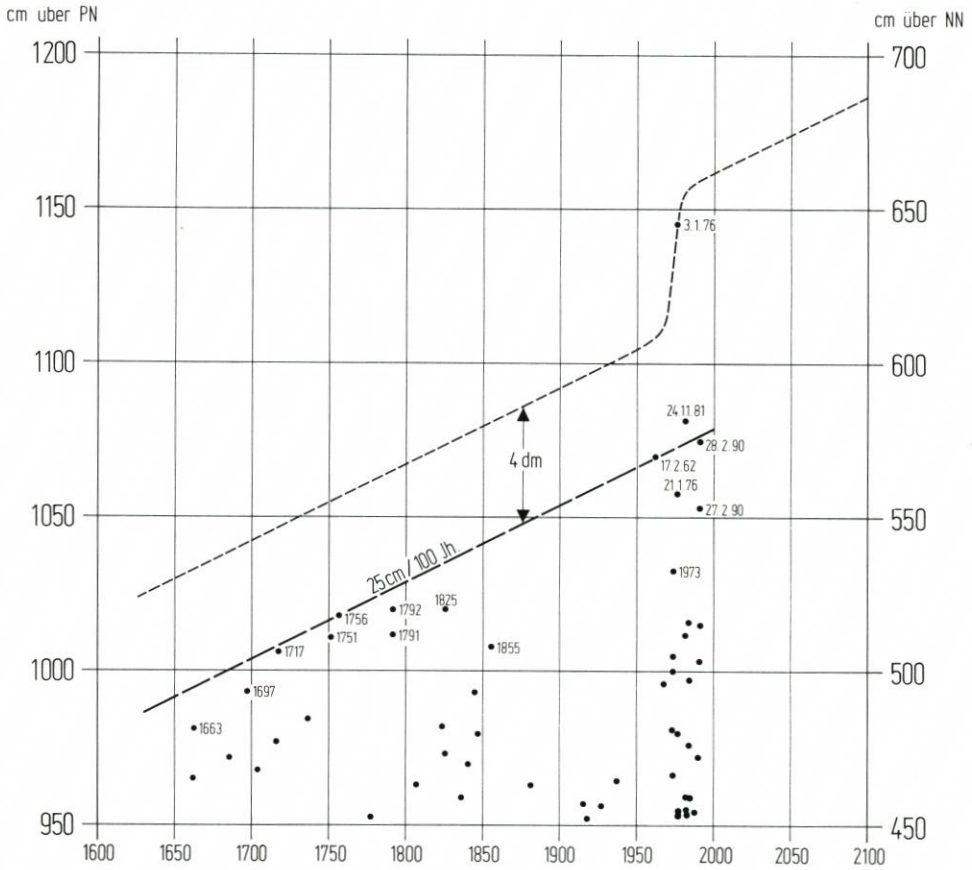


Abb. 7. Die höchsten Sturmflutscheitel in Hamburg 1661–1990 nach Rohde (1977)

Elbe ergeben. Da solche Maßnahmen auch noch nach 1976 ausgeführt worden sind (SIEFERT u. LASSEN, 1986), kann aufgrund der Ausführungen im Abschnitt 3 angenommen werden, daß 1990 die Scheitel einer Sturmflut, die in Cuxhaven mit der gleichen Scheitelhöhe eingetreten wäre wie die vom 3. 1. 1976, in Hamburg wahrscheinlich um 1 bis 2 dm höher eingetreten wäre wie die vom 3. 1. 1976. Nimmt man weiter an, daß die Begrenzungsgerade auch bis zum Jahre 2100 mit derselben Steigung verläuft wie in den 300 Jahren vor 1962, so ergibt sich der in Abb. 7 eingetragene Verlauf der Begrenzungslinie zwischen 1962 und 2100.

Aus der in Abb. 7 eingetragenen Begrenzungsgerade bis zum Jahre 2100 ergibt sich die Aussage, daß wahrscheinlich Sturmfluten, die in der Elbemündung Scheitelhöhen über MThw haben wie die von 1717, 1825, 1962 und 1976, die nach Abb. 2 in der Nähe der Begrenzungsgerade von Cuxhaven liegen, unter heutigen Umständen in Hamburg Scheitelhöhen erreichen werden, die in der Nähe der in Abb. 7 eingetragenen Begrenzungsgerade zwischen 1800 und 2100 liegen. Der Scheitel einer solchen extremen Sturmflut würde also bis zu 8,5 dm höher liegen, als er vor Fertigstellung aller nach 1962 an und in der Elbe ausgeführten Baumaßnahmen eingetreten wäre. Diese Aussage steht in keinem Widerspruch zu der Angabe von 6 bis 7 dm in Abschnitt 3, denn dort handelt es sich um die mittlere Erhöhung aller hohen Sturmfluten. Die Gültigkeit der Begrenzungsgerade nach Abb. 7 setzt voraus, daß an der



Unterelbe in Zukunft keine weiteren Baumaßnahmen ausgeführt werden, die sich auf die Höhenlage der Sturmflutscheitel auswirken können und daß in der Elbemündung keine Sturmfluten auftreten, deren Scheitel über der bis zum Jahr 2100 verlängerten Begrenzungsgeraden nach Abb. 2 liegen. Sollten, z.B. infolge Klimaänderung, künftig die MThw an der Küste und damit auch die extremen Sturmflutscheitel dort sehr viel stärker ansteigen als im Mittel um 20 bis 30 cm pro Jahrhundert, so gelten die in Abb. 2 und 7 eingetragenen Begrenzungsgeraden nicht mehr!

Die Begrenzungsgeraden bedeuten aber auch nicht, daß sie unter den gegenwärtigen klimatischen und hydrologischen Verhältnissen niemals überschritten werden können. Sie geben lediglich die Grenzen an, die wahrscheinlich nicht überschritten werden, solange keine Sturmflut vorkommt, deren Eintrittswahrscheinlichkeit unter der in den letzten 300 Jahren beobachteten liegt. Sturmfluten mit Scheitelhöhen, die über der Begrenzungsgeraden liegen, sind durchaus möglich, wenn auch nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit, wenn z.B. ein extrem hoher Windstau mit der theoretisch höchsten Springtide extrem ungünstig zusammentrifft und zugleich ein besonders hoher Oberwasserzufluß stattfindet. Derartige extreme Bedingungen mußte die LÄNDER-ARBEITSGRUPPE (1988) bei der Festlegung der Bemessungswasserstände für die Elbe berücksichtigen, die denn auch für Hamburg noch um gut 4 dm über der Begrenzungsgeraden nach Abb. 7 liegen.

## 6. Schriftenverzeichnis

- BAW: Bericht über Wasserstandsuntersuchungen im Elbmodell mit fester Sohle. Bericht Nr. 194 der Bundesanstalt für Wasserbau – Außenstelle Küste –, Hamburg, Dez. 1983 (unveröff.)
- CHRISTIANSEN, H., SAARE, H.-O. u. SIEFERT, W.: Sturmflutscheitelhöhen in Cuxhaven und Hamburg von 1661 bis 1984. Studie Nr. 59 Strom- u. Hafenbau, Ref. Hydrol. Unterelbe, Cuxhaven, 1985.
- FÜHRBÖTER, A.: Veränderungen des Säkularanstiegs an der deutschen Nordseeküste. Wasser und Boden, H. 6, 1986.
- FÜHRBÖTER, A. u. JENSEN, J.: Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht. Die Küste, H. 42, 1985.
- GÄTJEN, B.: Die Sturmflutsperrwerke an der deutschen Nordseeküste – Aufgaben, Planung und Bau. Jb. HTG, Bd. 36, 1979.
- HENSEN, W.: Die Entwicklung der Fahrwasserverhältnisse in der Außenelbe. Jb. HTG, Bd. 18, 1941.
- HENSEN, W.: Stromregulierungen, Hafenbauten, Sturmfluten in der Elbe und ihre Einfluß auf den Tideablauf. Hamburg, Großstadt und Welthafen. Kiel, 1955.
- JENSEN, J.: Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste. Mitt. des Leichtweiß-Inst. TU Braunschweig, H. 83, 1984.
- KEIL, G.-W.: Die schrittweise Anpassung der Elbe an die Entwicklung des Seeschiffsverkehrs. Jb. HTG, Bd. 40, 1985.
- LASSEN, H., LINKE, G. u. BRAASCH, H. W.: Säkularer Meeresspiegelanstieg und tektonische Senkungsvorgänge an der Nordseeküste. Vermessungswesen u. Raumordnung, Jg. 46, H. 2, 1984.
- LÄNDER-ARBEITSGRUPPE: Bemessungswasserstände entlang der Elbe. Die Küste, H. 47, 1988.
- NASNER, H. u. PARTENSKY, H.-W.: Modellversuche für die Tideelbe. Mitt. des Franzius-Inst. Univ. Hannover, H. 45, 1977.
- REFERAT HYDROLOGIE UNTERELBE: Sturmfluten von 1901 bis 1984 vor der südlichen Nordseeküste und in Hamburg. Hamburger Küstenforschung, H. 44, 1985.
- ROHDE, H.: Die Häufigkeit hoher Wasserstände an der Westküste von Schleswig-Holstein. Die Küste, Jg. 12, 1964.
- ROHDE, H.: Eine Studie über die Entwicklung der Elbe als Schifffahrtsstraße. Mitt. des Franzius-Inst. TU Hannover, H. 36, 1971.

- ROHDE, H.: Wasserstandsbeobachtungen vor der Mitte des 19. Jahrhunderts im Küstengebiet der Bundesrepublik Deutschland. Die Küste, H. 28, 1976.
- ROHDE, H.: Sturmfluthöhen und säkularer Wasserstandsanstieg an der deutschen Nordseeküste. Die Küste, H. 30, 1977.
- SIEFERT, W. u. HAVNOE, K.: Einfluß von Baumaßnahmen in und an der Tideelbe auf die Höhe hoher Sturmfluten. Die Küste, H. 47, 1988.
- SIEFERT, W. u. LASSEN, H.: Entwicklung und Ablauf von Sturmfluten in Ems, Weser und Elbe. Die Küste, H. 44, 1986.