

Untersuchungen über Maßnahmen zum Sturmflutschutz in der Elbe*)

Zusammenfassung

Die nach der Sturmflut vom Februar 1962 gewonnenen Erkenntnisse über den Ablauf von Sturmfluten in der Elbe, die Grundlage für den bisherigen Ausbau der Küstenschutzanlagen an der Unterelbe waren, behalten weiterhin ihre Gültigkeit. Neue Modellversuche bestätigen, daß die Eindeichungen in Nordkehdingen und Krautsand sowie in der Haseldorfer und Wedeler Marsch nur einen unbedeutenden Einfluß auf die Entwicklung der Scheitelwasserstände von Sturmfluten in der Unterelbe und im Hamburger Bereich haben. Die durch diese Baumaßnahmen erzeugten Wasserstandserhöhungen betragen auch bei extremen Sturmfluten zusammen nur etwa 1 dm.

Überlaufpolder an der Unterelbe im Großraum Hamburg für das bei Sturmfluten eindringende Wasser würden im günstigsten Falle zwar eine Wasserstandssenkung von etwa 9 dm bewirken, die Kosten würden jedoch in keinem wirtschaftlich vertretbaren Verhältnis zu den dafür durch die Überstauung erforderlichen Aufwendungen liegen. Bei der Einrichtung von Poldern in der Elbemündung können die Aufwendungen bei etwa gleicher Wasserstandsabsenkung zwar niedriger liegen, es käme aber hinzu, daß die mit einer Einengung des Mündungstrichters der Elbe verbundenen morphologischen und ökologischen Beeinträchtigungen sowie nautische Schwierigkeiten erheblich sein dürften.

Die Modellversuche haben gezeigt, daß ein Sturmflutsperrwerk in der Elbe bei Brokdorf von den hydraulischen und hydrologischen Bedingungen her möglich ist; die maximalen Wasserstände im Hamburger Hafengebiet wären auf NN + 4,5 m zu begrenzen. Wegen der Wasserstandsunterschiede am Sperrwerk sind jedoch erhebliche bautechnische und betriebliche Probleme zu erwarten, abgesehen von schwerwiegenden nautischen Bedenken.

Summary

The insights gained from the February 1962 storm surge, on the course of storm surges in the Elbe, are still valid. These were the basis for the design of the existing storm protection structures on the Lower Elbe. New model studies confirm that the maximum and minimum storm surge water levels in the Lower Elbe and in the vicinity of Hamburg are only minimally affected by the dikes at Nordkehdingen and Krautsand, as well as in the Haseldorf and Wedel Marsh. A water level increase of only approximately 1 dm is associated with these dikes during extreme storm surges.

Overflow polders on the Lower Elbe in the vicinity of Hamburg could, under favorable conditions, reduce the storm surge water levels by 9 dm. Their cost, however, would be out of proportion to the associated construction effort.

The placement of polders at the mouth of the Elbe would yield approximately the same lowering of the maximum water levels and would involve less construction effort. It must, however, be considered that the associated constriction could result in adverse morphological and ecological changes as well as hinder ship traffic.

The model studies show that a storm flood barrier at Brokdorf is reasonable from hydraulic and hydrological considerations; the maximum water level in Hamburg Harbour could be held to NN + 4.5 m. Extreme construction and operational problems can be expected due to the water level difference across the dike. Serious impairment of ship traffic might also occur.

*) Bericht des LENKUNGS-AUSSCHUSSES für Sturmflutuntersuchungen in der Elbe; eingesetzt von Bund und Küstenländern nach der Sturmflut 1976.

Inhalt

Vorwort	94
1. Durchgeführte Untersuchungen	96
1.1 Zugrunde gelegte Sturmfluten	96
1.1.1 Tatsächliche Sturmfluten	96
1.1.2 Hypothetische Sturmfluten	96
1.1.3 Denkbare sehr hohe Sturmfluten nach dem WADI-Modell	98
1.2 Modellversuche	98
1.2.1 Hydraulische Modellversuche	99
1.2.2 Mathematische Modellversuche	99
2. Bewertung der Modellversuche	100
2.1 Entlastung durch Polder	100
2.2 Wirkung einer Einengung des Mündungstrichters	100
2.3 Wirkung eines Sperrwerks	101
2.4 Wirkung der Eindeichungen	102
3. Ausblick	103

Vorwort

Der Mündungstrichter der Elbe verjüngte sich vor 1962 von etwa 18 km Breite bei Cuxhaven auf etwa 8 km zwischen den Deichen bei Brunsbüttel. Bis unterhalb von Finkenwerder verminderte sich die Flußbreite zwischen den Deichen bzw. zwischen Deich und Geestrand mehr oder weniger gleichmäßig auf etwa 2,5 km. Ab Neßhaken wird die Elbe dann auf etwa 600 m eingeengt. Daneben gab es die durchströmte Alte Süderelbe mit einer Breite von etwa 200 m. Auch flußabwärts von Hamburg beträgt der Abstand zwischen den Deichen im Mittel 600 m. Diese Form des Flußlaufes bestimmt weitgehend den Tideablauf bei Sturmfluten im Strom und im Stromspaltungsgebiet des Hamburger Hafens.

Sofort nach der Sturmflut von 1962 sind die Vorarbeiten für Sicherungsmaßnahmen eingeleitet worden, die Auswirkungen ähnlich hoher Sturmfluten auf das Binnenland in Zukunft verhindern sollen. Hierzu gehören:

- **Deicherhöhungen und verstärkungen** beiderseits der Elbe und auf den Elbinseln Wilhelmsburg und Veddel
- **Sperrwerke** in Ilmenau, Este, Lühe, Schwinge, Oste, Pinnau, Krückau und Stör
- **Eindeichungen** Bützflether Sand, Hahnöfer Sand, Nordkehdingen, Kraut-sand, Wedel-Haseldorf, Alte Süderelbe

Diese Veränderungen führen dazu, daß die Flußbreite bei Sturmfluten bereits oberhalb der Ostemündung auf etwa 3 km und stromaufwärts bis auf etwa 2 km unterhalb Finkenwerders eingeengt wird.

Die schweren Sturmfluten im Januar 1976 haben vor allem im Elbegebiet große Schäden angerichtet und in der Öffentlichkeit erneut Diskussionen über die Wirkungen derjenigen Baumaßnahmen aufkommen lassen, die nach 1962 durchgeführt, geplant und in Erwägung gezogen worden sind. Das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) hat daher auf seiner Sitzung am 23. 3. 1976 beschlossen, daß der Bund und die Länder Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Hamburg gemeinsam Untersuchungen über Sturmfluten in der Unterelbe ausführen lassen. Das Ziel sollte eine Überprüfung der Wirkungen der bisher durchgeführten Maßnahmen sowie bisher nicht ausgeführter Ideen zur Abminderung der Sturmfluthöhen der Elbe, besonders im Hamburger Bereich, sein. Zur Aufstellung des

Untersuchungsprogramms ist ein „Lenkungsausschuß“ aus Vertretern der zuständigen Verwaltungen gebildet und am 26. 4. 1976 beauftragt worden, die notwendigen Untersuchungen zu veranlassen und zu lenken. Dem Ausschuß gehörten als Mitglieder an:

BOE, C., (seit 1978)	Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Landwirtschaft,
Erster Baudirektor	Hamburg
KRAUSE, G., Ministerialrat	Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
KÜBLER, H., Erster Baudirektor	Baubehörde Hamburg
SCHERENBERG, R., Ministerialrat	beim Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Landes Schleswig-Holstein
STEHR, E., Dr.-Ing., (bis 1978)	Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Landwirtschaft,
Erster Baudirektor	Hamburg
ZANKER, K., Dr.-Ing., Ministerialrat	beim Bundesminister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten

Um mit den Untersuchungsergebnissen Grundlagen für ein Höchstmaß an Sicherheit zu schaffen und das Ergebnis breit abzusichern, waren neben den bekannten charakteristischen Sturmfluten auch extreme Sturmfluten zu behandeln, die auf der Basis von Zeitreihenanalysen zu ermitteln waren. Die Untersuchungen sollten in hydraulischen und parallel dazu in mathematischen Modellen durchgeführt werden. Dabei waren auch die Ergebnisse früherer hydraulischer Modellversuche mit zu erörtern. Außerdem sollten praktische Möglichkeiten wie Polder und Sperrwerke zur Verminderung der Sturmfluthöhen erfaßt werden.

Den Untersuchungen lag der heutige topografische Zustand der Elbe zugrunde. Berücksichtigt wurden also die Fahrwasservertiefung der Elbe auf 13,5 m, die Absperrung der Nebenflüsse, die Abdämmung der Süderelbe sowie Eindeichungen und Spülfelder.

Um ein dem heutigen Wissensstand entsprechendes Bild über Ablauf und Auswirkungen von Sturmfluten in der Elbe zu erhalten, wurden folgende Untersuchungen in Auftrag gegeben:

A. Hydraulische Modellversuche bei der *Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Außenstelle Küste*, in Hamburg (ab 1976):

- Einengung des Trichterquerschnitts im Mündungsbereich,
- Sperrwerkstandorte in der Unterelbe,
- Veränderung des Flutraumes durch Deiche und Polder.

B. Zwei- bzw. eindimensionale mathematische Modellversuche von Prof. SÜNDERMANN, Universität Hamburg, Prof. ZIELKE, Universität Hannover, und dem *Lehrstuhl für Strömungsmechanik* der Universität Hannover (ab 1977):

- Auswirkungen geplanter Baumaßnahmen, z. B. eines Sperrwerks in der Unterelbe,
- Veränderung des Flutraumes durch Deiche und Polder,
- Einfluß des Windes über der Elbe auf die Entwicklung von Sturmfluten.

Außerdem wurden zum Vergleich folgende Untersuchungen bzw. Berechnungen durchgeführt:

C. Vorhersage der extremen Bedingungen für das Auftreten von Sturmfluten auf der Basis von Zeitreihenanalysen durch Prof. PLATE und das *Institut für Wasserbau III* der Universität Karlsruhe (ab 1977):

- Ermittlung von ungünstigen Kombinationen historischer Ereignisse (hypothetische Sturmfluten).

D. Berechnung einer denkbaren sehr hohen Sturmflut nach dem WADI-Modell des *Strom- und Hafengebäude* durch Prof. SIEFERT (1979):

- Ermittlung aus den ungünstigsten Windstauverhältnissen der letzten 200 Jahre.

Ferner wurde eine Synthese aus den Modellversuchsergebnissen des *Franzius-Instituts* der Universität Hannover aus den Jahren 1962/67 und denen der BAW aus den Jahren 1976/79 (ab 1976) unter Beteiligung von Prof. PARTENSKY und Dr. SCHWARZE (Universität Hannover) erarbeitet.

Hamburg, im Februar 1982

C. Boe

1. Durchgeführte Untersuchungen

1.1 Zugrunde gelegte Sturmfluten

1.1.1 Tatsächliche Sturmfluten

Ausgangspunkt für die Untersuchungen war die Sturmflut vom 3. 1. 1976. Sie hat sich in der inneren Deutschen Bucht aus einem niedrigen Tideniedrigwasser (Tnw) über ein niedriges Tidehochwasser (Thw) in kurzer Zeit und bei fast völligem Ausbleiben der nächsten Ebbe zum bisher höchsten Wasserstand entwickelt und ist auf die ungewöhnlichen Windverhältnisse zurückzuführen. Andere Einflüsse, zum Beispiel eine Fernwelle aus dem Atlantik, wie im Jahre 1962, sind nicht festzustellen. Es hat ähnliche Abläufe auch schon früher gegeben (z. B. 16./17. 2. 1916, 23. 10. 1921, 10. 2. 1949, 23./24. 2. 1967), aber – solange Messungen vorliegen – noch niemals mit solcher Energie und Heftigkeit. Trotzdem hat sich die Höhe der Scheitelwasserstände überall im Rahmen derjenigen Bemessungswasserstände gehalten, die für den Bau der neuen Hochwasserschutzanlagen nach gründlichen Analysen der Sturmflut vom 16./17. 2. 1962 festgesetzt worden waren. Wo diese Anlagen inzwischen fertiggestellt waren, hat daher auch keine Gefahr für die Bevölkerung binnendeichs bestanden. Damit wurde bestätigt, daß das Ziel der Bemühungen um eine Verbesserung des Schutzes nach 1962 erreicht worden ist.

Die Sturmflut vom 16./17. 2. 1962 ist in das Programm aufgenommen worden, weil Untersuchungsergebnisse aus einem hydraulischen Modellversuch zum Vergleich zur Verfügung standen.

Die Sturmflut vom 20./21. 1. 1976 ist untersucht worden, weil es sich um eine füllige Sturmflut ähnlich der von 1962 handelte, die aber bei geändertem topographischem Zustand der Elbe ablief.

1.1.2 Hypothetische Sturmfluten

Auffällig ist die zunehmende Häufigkeit hoher Sturmfluten in den letzten beiden Jahrzehnten. Es wurde daher für erforderlich gehalten, die Eintrittswahrscheinlichkeit extremer Sturmfluten zu untersuchen. Dabei wurden auch hypothetische Sturmfluten in die Untersuchungen einbezogen.

Am *Institut für Wasserbau III* der Universität Karlsruhe wurden deshalb extreme Bedingungen für das Auftreten von Sturmfluten untersucht und auf der Basis von Methoden der Zeitreihenanalyse hypothetische Sturmfluten konstruiert. Diese Methoden ermöglichen es, physikalische Zusammenhänge zwischen verschiedenen Datenreihen unter Berücksichtigung der zufälligen Variabilität der Einzeldaten zu erkennen und zu erfassen. Sie schließen ein:

- Trendberechnungen für die Ermittlung säkularer Wasserstandsanstiege und der Änderung des Abflußverhaltens mit der Zeit,
- Extremwertstatistiken für die Bestimmung von Auftretenswahrscheinlichkeiten für Scheitelwasserstände, Windstau und abgeleitete Größen,
- lineare und nicht lineare Regressionen zur Darstellung der Abhängigkeit der Extremwasserstände in Cuxhaven und des Windes über der Elbe vom geostrophischen Wind sowie des Extremwasserstandes in Hamburg-St. Pauli von dem in Cuxhaven,
- Mehrfachregressionen zur Erfassung der gleichzeitigen Abhängigkeit des Windstauwertes in Cuxhaven von Dauer, Stärke und Richtung des geostrophischen Windes, ferner der Abhängigkeit des Extremwasserstandes in St. Pauli vom Wasserstand in Cuxhaven, von Windrichtung und Windstärke über der Elbe sowie von der Größe des Abflusses in der Elbe bei Neu Darchau,
- Methoden der linearen Übertragungsfunktion für die in Cuxhaven auftretenden Sturmflutwellen nach St. Pauli unter Berücksichtigung der zeitlichen Veränderung der Übertragungsfunktionen.

An Hand dieser Methoden wurden die folgenden Aufgaben gelöst (vgl. auch den entsprechenden Bericht an anderer Stelle):

- a) Es wurden die auf das Jahr 1980 umgerechneten Sturmtiden bestimmt, die in Cuxhaven aus der Addition des höchsten beobachteten Windstauwertes und des höchsten errechneten astronomischen Tidehochwassers entstehen können.
Sie werden mit HIST/1 (steil ansteigende Tidekurve, entspricht der Tide vom 20./21. 1. 1976) bzw. HIST/2 (langsam ansteigende Tidekurve, entspricht der Tide vom 3. 1. 1976) bezeichnet. Diese physikalisch mit Sicherheit möglichen Sturmtiden haben eine sehr geringe Eintrittswahrscheinlichkeit, die für den Scheitelwert berechnet wurde.
- b) Zwei auf das Eintreten im Jahre 1980 umgerechnete Sturmtiden bei Cuxhaven und bei Hamburg wurden bestimmt, deren Scheitelwerte eine mittlere Eintrittswahrscheinlichkeit von einmal in 100 Jahren, d. h. ein mittleres Wiederkehrintervall von 100 Jahren haben. Diese Wellen werden entsprechend mit 100/1 und 100/2 bezeichnet.
- c) Für Cuxhaven wurden Tidekurven ermittelt, bei denen in Hamburg der Scheitelwasserstand von NN + 1220 cm - 5 m, also NN + 7,20 m, auftritt. Sie wurden je nach Typus mit EXTR/1 bzw. EXTR/2 bezeichnet. Die zugehörige Eintrittswahrscheinlichkeit (ausgedrückt durch das mittlere Wiederkehrintervall) wurde ermittelt. Hierfür wurde von der Tidekurve Hamburg-St. Pauli ausgegangen und die zugehörige Tidekurve Cuxhaven bestimmt. Das Wiederkehrintervall des Scheitelwertes der Sturmflut in Hamburg-St. Pauli wurde dann aus der Extremwertstatistik des zugehörigen Cuxhavener Scheitelwertes bestimmt.

Für die Umrechnung der Tidekurven wurde das Jahr 1980 zugrunde gelegt. Dieser Zeitpunkt wurde gewählt, weil sich der für die letzten Jahrzehnte festgestellte nichtlineare Trend der Tidewasserstände in St. Pauli nicht zuverlässig auf spätere Zeiträume extrapolieren läßt. Für Cuxhaven erscheint dagegen eine Extrapolation möglich, weil nach den Ergebnissen dieser Untersuchung eine Erhöhung der Extremtiden nur durch den Säkulartrend bewirkt werden kann. Dieses Ergebnis für Cuxhaven wird allerdings durch andere wissenschaftliche Untersuchungen nicht bestätigt.

Unter Berücksichtigung eines säkularen Anstiegs von 26 cm in 100 Jahren und Anpassung der Extremwerte an fünf verschiedene Verteilungsfunktionen nach der Methode der Momente sowie der Annahme genügend hoher Deiche ergaben sich folgende Scheitelwasserstände für das Jahr 1980:

Typ	Wiederkehrperiode (etwa) Jahre	HThw _{Cux} cm (NN-5 m)	HThw _{Hbg} cm (NN-5 m)	Diff. Hbg-Cux cm
HIST/1	600 bis 1000	1080	1240	160
HIST/2	600 bis 1000	1080	1240	160
100/1	100	1010	1180	170
100/2	100	1010	1180	170
EXTR/1	400	1055	1220	165
EXTR/2	400	1075	1220	145

1.1.3 Denkbare sehr hohe Sturmfluten nach dem WADI-Modell

Seit 1976 wird bei Sturmflutvorhersagen in Hamburg ein Verfahren angewandt, das auf der Analyse von Windstaukurven, d.h. Differenzkurven zwischen eingetretener und für dieselbe Zeit geltender mittlerer Tidekurve, beruht. Als Eingangsdaten werden die bekannten Teile der Windstaukurven in Borkum und Cuxhaven sowie die Windverhältnisse auf Scharhörn benutzt. Damit ist es dann möglich, den gesamten Tideverlauf in Hamburg und – durch entsprechende Erweiterung – an allen Pegeln der Unterelbe vorherzusagen.

Das Verfahren ist so aufgebaut, daß es nicht nur bei aktuellen Vorhersagen einsetzbar, sondern auch zu beliebigen Simulationen verwendbar ist. Es wird zur Bestimmung einer denkbaren sehr hohen Sturmflut genutzt, um

- die für Hamburg ungünstigste Überlagerung von Tide und höchstem gemessenem Windstau in der Flußmündung zu finden,
- den höchsten aufgetretenen Windstau der letzten 200 Jahre einrechnen zu können,
- eine vorgegebene Sturmfluthöhe in Hamburg auf die zugehörigen Wind- und Windstauverhältnisse in der Flußmündung zurückführen zu können.

Damit ist dieses Verfahren auch zur Absicherung der Zeitreihenanalyse geeignet.

Es wurden die in den letzten 200 Jahren aufgetretenen ungünstigsten Windstauverhältnisse vom 3./4. 2. 1825 zugrunde gelegt und Winde mit 11 bis 12 Bft aus 280° über mehrere Stunden in der Deutschen Bucht angenommen. Die Scheitelwerte in Cuxhaven wurden durch Überlagerung von Tide und Windstau errechnet. Die Daten für Hamburg wurden ermittelt durch die Umrechnung der Cuxhaven-Werte nach dem WADI-Modell.

Die so nach den Unterlagen seit 1786 ermittelte denkbare sehr hohe und füllige Sturmflut würde in

Cuxhaven	1085 cm NN – 5 m und in
Hamburg	1250 cm NN – 5 m erreichen.

Diese Werte stimmen mit den für die hypothetischen Sturmfluten HIST/1 und HIST/2 ermittelten Werten bis auf wenige Zentimeter überein, obwohl sie auf ganz anderem Wege erarbeitet worden sind.

1.2 Modellversuche

In die Modellversuche sollten folgende Baumaßnahmen, von denen eine Beeinflussung der Sturmflut-Wasserstände in der Unterelbe ausgehen könnte, einbezogen werden:

- die Anlage von Hochwasserentlastungspoldern,
- die Einengung des Mündungstrichters,
- verschiedene Lagen eines Elbesperrwerkes.

Außerdem wurden die Auswirkungen der Eindeichungen Nordkehdingen, Krautsand und Wedel-Haseldorf überprüft.

1.2.1 Hydraulische Modellversuche

Für die hydraulischen Modellversuche wurde das Modell bei der BAW benutzt, da es sich um das z. Z. einzige Modell in Deutschland handelt, welches den gesamten Tidebereich der Elbe umfaßt. Es erstreckt sich von Strom-km 552 (Bleckede) bis km 755 (rd. 9 km seewärts der Insel Scharhörn). Der Breitenmaßstab beträgt 1 : 500, der Tiefenmaßstab 1 : 100. Die Topographie entspricht weitgehend dem Zustand von 1971 mit eingebauter Fahrinne auf 13,5 m Tiefe. Die Oberelbe ist bis Geesthacht generalisiert, oberhalb davon stilisiert wiedergegeben.

Mit einer Sturmflut, die nicht im gesamten Modellbereich der Elbe mit dem Verlauf der Sturmflut vom 3. 1. 1976 übereinstimmte, wurden zunächst Vorversuche gefahren, um grundsätzlich die Einflüsse von Einengungen des Mündungstrichters der Elbe, eines Sperrwerkes und von Poldern im Mündungsbereich sowie im Hamburger Bereich zu ermitteln.

Endgültige Aussagen über den Einfluß von Baumaßnahmen auf die Sturmflut-Scheitelwasserstände in der Elbe konnten aber erst unter exakten Versuchsbedingungen gemacht werden, d. h. mit den im gesamten Modellbereich naturähnlich nachgebildeten Sturmfluten verschiedenen Typs.

Schon bei der Durchführung der Vorversuche wurden die Schwierigkeiten bei der Simulation von Sturmfluten in einem Modell deutlich, in dem so unterschiedliche Bereiche wie Außenelbe, Unterelbe, Elbe im Hamburger Bereich und der Oberelbe bis Geesthacht dargestellt sind. Erst nach Anwendung von neu entwickelten Impulsstrahlrauhigkeiten gelang die naturähnliche Nachbildung der Sturmfluten vom 3. 1. 1976 und vom 21. 1. 1976 zufriedenstellend jeweils als Ausgangszustand für die Hauptversuche, über deren Ergebnisse an anderer Stelle berichtet wird.

1.2.2 Mathematische Modellversuche

Am *Lehrstuhl für Strömungsmechanik* der Universität Hannover wurden zwei Modelle entwickelt, und zwar ein eindimensionales Modell von Cuxhaven bis Neu Darchau und ein horizontal zweidimensionales von Helgoland bis Hamburg (Bunthaus) mit eindimensionaler Ergänzung bis Neu Darchau. Die Topographie in der Deutschen Bucht entspricht dem Stand von 1978, in der Unterelbe demjenigen von 1974/76, in der Oberelbe demjenigen von 1951. Hierbei wurden die aktuellsten Vermessungsunterlagen berücksichtigt. Die Vergleichbarkeit mit dem topographischen Zustand von 1971 in den hydraulischen Modellversuchen ist überprüft worden.

Die seeseitigen Wasserstände wurden durch Pegelaufzeichnungen von Wangerooge-Nord, Helgoland und Büsum (zweidimensionales Modell) bzw. Cuxhaven (eindimensionales Modell) vorgegeben. Für die Simulation der Sturmflutereignisse mußten teilweise lückenhafte Winddaten herangezogen werden. Es konnten deshalb nur die 1-Stunden-Mittelwerte im einheitlichen 3-Stunden-Abstand verwendet werden, wodurch Böeneffekte und drastische Windänderungen, die durch die 3-Stunden-Werte nicht aufgelöst werden können, nicht erfaßt sind. Für die innere Deutsche Bucht wurden Winddaten von Scharhörn benutzt; über der Elbe selbst wurden, beginnend in Cuxhaven, im ersten Feld die Winddaten aus Cuxhaven verwendet. Für das zweite Feld galten die Werte aus Brunsbüttel, für das dritte Feld die Werte aus

Stade, für das vierte Feld diejenigen von St. Pauli. Das fünfte Feld, das den Oberlauf der Elbe erfaßt, ist immer windfrei angenommen worden.

In beiden Modellen wurden die Schubspannungen an Oberflächen und Boden mit Hilfe des gleichen Reibungsgesetzes formuliert. Die Eichung des Modells erfolgte an Hand der gemessenen Wasserstände für vier zeitliche Intervalle mit charakteristisch unterschiedlichen Tiden:

18. bis 22. 8. 1975 windarm, geringer Oberwasserabfluß

18. bis 21. 11. 1975 Sturmflut bei Wind bis 7 Bft

1. bis 4. 1. 1976 Sturmflut bei Sturm bis 11 Bft, langsam ansteigende Tidekurve

19. bis 22. 1. 1976 Sturmflut bei Sturm bis 9 Bft, steil ansteigende Tidekurve

Reibungsbeiwert und Windschubbeiwert wurden so gewählt, daß die vier Ereignisse mit ein und demselben Koeffizientensatz gleichmäßig gut approximiert wurden. Die Windgeschwindigkeit dagegen wurde entsprechend den vorliegenden Daten für jedes Ereignis individuell vorgegeben.

Die beobachteten Scheitelwasserstände wurden dabei mit einer Genauigkeit im Dezimeterbereich reproduziert, während die Tideverläufe selbst größere Abweichungen aufweisen. Damit sind ausreichend verlässliche Aussagen über Veränderungen in den Scheitelwasserständen möglich. Über die Ergebnisse der Versuche wird an anderer Stelle berichtet.

2. Bewertung der Modellversuche

2.1 Entlastung durch Polder

Der Einfluß des Haseldorfer Polders auf die Sturmflutscheitel brachte für die günstigste Variante am Pegel Hamburg-St. Pauli eine Absenkung von 3 dm.

Die Thw-Absenkung durch den Polder Altes Land liegt in St. Pauli zwischen 6 und 8 dm. Das günstigste Ergebnis wurde allerdings nur durch eine Zusatzöffnung von 0,5 km Breite am Köhlbrand erreicht. Ersatzweise wäre aus hydraulischen Gründen ein Ergänzungspolder mit einem zweiten Zulauf unterhalb des Mühlenberger Lochs erforderlich.

Beim kombinierten Betrieb beider Polder (Haseldorf und Altes Land) würde die Absenkung am Pegel St. Pauli 9 dm und bei Wegfall des Einlaufes am Köhlbrand 8 dm betragen.

Wie die Versuche gezeigt haben, können Polder zwar durch Aufnahme von Wassermengen den Hochwasserscheitel einer Sturmflut senken, ihre Wirksamkeit bei zwei aufeinanderfolgenden Sturmtiden ist jedoch zweifelhaft. Da die Entleerung relativ langsam erfolgt, trifft die nachfolgende Sturmflut auf einen vorgefüllten Polder, wenn dieser nicht durch entsprechende Anlagen zwischenzeitlich entlastet werden kann. Darüber hinaus erscheinen Polderlösungen in besiedelten und landwirtschaftlich intensiv genutzten Gebieten gesellschaftspolitisch unrealistisch.

2.2 Wirkung einer Einengung des Mündungstrichters

Erst bei einer Einschnürung auf 0,8 km ist eine deutlichere Dämpfung der Tideschwingungen erkennbar. Die Abweichung der Strömungsgeschwindigkeiten im Einengungsquerschnitt bei Cuxhaven gegenüber dem Ausgangszustand ist allerdings erheblich. Die sich

daraus ergebenden Auswirkungen beschränken sich auf den Bereich zwischen Brunsbüttel und Scharhörn.

Bei Sturmfluten wie im Januar 1976 tritt nur bei zwei Ausbaukonzeptionen eine deutliche Absenkung der Scheitelwasserstände in Hamburg ein:

- Einschnürung auf 0,8 km: Die Vorversuche haben gezeigt, daß die Wasserstände zwar um 8 dm sinken, aber gleichzeitig die Strömungsgeschwindigkeiten bei Cuxhaven unzulässig hoch steigen.
- Einschnürung auf 2 bis 3 km in Verbindung mit einem Polder: Bei den für die Wasserstandsabsenkung günstigsten Varianten (Absenkung um rd. 10 dm) nehmen Flut- und Ebbestromung unterhalb von Cuxhaven in der Hauptrinne zu. In Höhe von Cuxhaven, also im Bereich der stärksten Einschnürung, erreicht die mittlere Flutstromgeschwindigkeit 150 bis 185 cm/s, das ist eine Zunahme zwischen 88 und 131 %. Der „günstigste“ Wert von 88 % gehört zu einer Variante mit einer Einengung auf 3 km bei Cuxhaven. Auch die Ebbestromgeschwindigkeit erhöht sich bis zu 30 %. Die Flutstromdauer nimmt zu, während die Ebbestromdauer kleiner wird, d. h., die Flutstromkomponente nimmt gegenüber der Ebbe verstärkt zu. Dabei wird der Polder neben der Einengungsstelle gefüllt, der zur Entleerung den Zeitraum mehrerer Tiden benötigt.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Wasserstandsabsenkung in Hamburg zwischen 8 und 10 dm liegen würde. Dafür müßte aber eine weitgehende Umformung der morphologischen und auch der ökologischen Verhältnisse in der Elbemündung mit noch unvorhersehbaren Folgen in Kauf genommen werden. Diesen Nachteilen ist der Nutzen einer Wasserstandsabsenkung in Hamburg gegenüberzustellen, wobei allerdings zu berücksichtigen ist, daß bei den Varianten mit Poldern dieser Nutzen bei zwei aufeinanderfolgenden Hochwassern geschmälert werden kann. Jedenfalls müßten noch eingehend Modellversuche durchgeführt werden, bevor eine solche Lösung in eine nähere Betrachtung einbezogen wird.

2.3 Wirkung eines Sperrwerks

Die Vorversuche im Modell der BAW ergaben in Verbindung mit dem Gutachten ENGELBRECHT und SELLHORN (1978) günstige Standorte im Raum Brokdorf. Aus hydraulischen und nautischen Gründen wurde der Raum Brokdorf als Sperrwerksstandort für die Hauptversuche ausgewählt. Bedingung für den Betrieb war, daß in Hamburg ein maximaler Wasserstand von NN + 4,5 m nicht überschritten werden darf. Um dies zu erreichen, müssen hohe Sturmfluten gekehrt werden. In den Hauptuntersuchungen im hydraulischen Modell der BAW und im mathematischen Modell sollte die Wasserstandsentwicklung in der Elbe für unterschiedliche Zeitpunkte des Schließbeginns (Schließzeitpunkte) und für unterschiedliche Oberwassermengen ermittelt werden. Dabei waren – bei Einhaltung dieses Grenzwertes in Hamburg – die max. Wasserstandsunterschiede zwischen Binnen- und Außenseite am geschlossenen Sperrwerk sowie die Erhöhung der Scheitelwasserstände unterhalb des Sperrwerks von besonderem Interesse. Für den Beginn des Schließvorgangs bei NN + 2 m und NN + 3 m jeweils für die Tiden vom 3. 1. 1976 und vom 20./21. 1. 1976 sowie für zwei zusätzlich mit anderem Schließbeginn gefahrene Sturmfluten ergeben sich nach den Untersuchungen der BAW am Sperrwerk max. Wasserstandsdifferenzen von mehr als 3 m, teilweise sogar von mehr als 4 m. Dieser Aufstau unterhalb des Sperrwerks ist neben dem Schließzeitpunkt entscheidend von der Form der Hochwasserwelle abhängig. Bei steil ansteigenden Tidekurven tritt kaum eine Änderung ein, während bei langsam ansteigenden aufgrund des

stärkeren Flutstromes beträchtliche Erhöhungen auftreten können, und zwar stärker als aus den Vorversuchen erkennbar.

Spätes Schließen ab Wasserständen von NN + 3 m bis NN + 4 m ist ungünstig hinsichtlich der oberhalb des Sperrwerks bei hohen Oberwasserabflüssen zu erwartenden Wasserstände, die höher als der max. zulässige Wasserstand sein können. Bei frühem Schließen, d. h. bei niedrigen Wasserständen, treten – insbesondere bei geringem Oberwasserabfluß – ungünstige Verhältnisse hinsichtlich der größten Wasserstandsunterschieden am Sperrwerk auf, die sich in der Regel zum Zeitpunkt des Thw der Hauptsturmflut einstellen. Bei Schließzeitpunkten bei einem Wasserstand von etwa NN + 2 m bleiben die größten Wasserstandsunterschieden selbst bei geringem Oberwasserzufluß unter 5 m.

Der günstigste Wasserstand, bei dem das Sperrwerk geschlossen werden sollte, liegt unter Berücksichtigung des Oberwasserzuflusses etwa bei NN + 2,5 m.

Beim Schließvorgang ist neben dem Sunk das Auftreten eines hohen Schwallts bedeutsam, der sich mit der Sturmflut sehr ungünstig überlagert. Es ist denkbar, daß ein stufenweises Schließen in Anpassung an die einlaufende Tidewelle einen wirksamen Schutz gewährt, ohne daß sich ein Schwallt in der festgestellten Größenordnung aufbaut. Einer solchen tideabhängigen Steuerung des Sperrwerks, die sicherlich eine Reihe von Schwierigkeiten, wie konstruktive Probleme und ungünstige Erosionsbedingungen, mit sich bringen würde, konnte in der Untersuchung jedoch nicht nachgegangen werden.

Abgesehen von diesen und anderen noch ungelösten Problemen, wie z. B. im Bereich Nautik und Ökologie, könnte ein Sperrwerk bei Brokdorf einen brauchbaren Sturmflutschutz für den oberhalb gelegenen Eldebereich bieten.

2.4 Wirkung der Eindeichungen

In beiden Modellen wurden die seit 1962 in der Elbe durchgeführten Eindeichungen mit ihrer Wirkung auf den Sturmflutablauf untersucht. Es handelt sich dabei um

- Eindeichung Nordkehdingen
- Eindeichung Krautsand
- Eindeichung der Haseldorfer und der Wedeler Marsch.

Darüber hinaus wurden vom „Lenkungsausschuß“ die aktuellen Ergebnisse im Modell der BAW mit den 1963/69 im Franzius-Institut ermittelten Daten (NASNER und PARTENSKY, 1977) verglichen und gewertet. Hierbei wurde auch die Eindeichung an der Mündung der Krückau und Pinnau berücksichtigt.

Alle Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Eindeichung Nordkehdingen: Die Wertung aller hydraulischen Modellversuche mit den Sturmfluten von 1962 und 1976 ergab, daß oberhalb der Baumaßnahme eine geringe Absenkung der Sturmflutspitze zu erwarten ist, die unter 1 dm liegt.

Das mathematische Modell erbrachte für die Sturmfluten von 1976 geringfügige Erhöhungen (bis 1,5 dm) unterhalb und ebenso große Absenkungen oberhalb der Baumaßnahme.

Eindeichung Krautsand: Nach den hydraulischen Modellversuchen ist keine Erhöhung der Sturmflutspitze oberhalb der Baumaßnahme zu erwarten. Das mathematische Modell ergab Erhöhungen bis rd. 2 dm unterhalb der Baumaßnahme und Erhöhungen oberhalb davon, allerdings nur um 0,5 dm.

Eindeichung Haseldorf/Wedel: Nach den bisherigen Erkenntnissen ist nur ein geringer Einfluß in Form einer Erhöhung der Sturmflutspitze oberhalb Schulaus um weniger als 1 dm

zu erwarten. Im mathematischen Modell wurden Erhöhungen bis zu 1 dm unterhalb und von rd. 0,5 dm oberhalb der Baumaßnahme festgestellt.

Eindeichung Krückau/Pinnau: Diese Maßnahme wurde nur in hydraulischen Modellen untersucht und ergab einen nicht meßbaren Einfluß.

Gesamtwirkung aller Eindeichungen: Nach Wertung aller hydraulischen Modellversuche ist beim heutigen Zustand in der Elbe für eine Sturmflut, wie sie am 3. 1. 1976 abgelaufen ist, nach Fertigstellung aller untersuchten Deichbaumaßnahmen mit einer Erhöhung um rd. 1 dm für die Scheitelwerte in Hamburg zu rechnen. Die Modellversuchsergebnisse veranlassen zu der Annahme, daß der Charakter verschiedener Sturmfluttypen (hervorgerufen durch Überlagerung von Tide- und Windstauwellen bei Cuxhaven) einen so großen Einfluß auf die Entwicklung der Sturmflut-Scheitelwasserstände in der Elbe hat, daß dabei die Auswirkungen der hier diskutierten Eindeichungsmaßnahmen weitgehend in den Hintergrund treten.

Nach dem mathematischen Modell bringen alle Eindeichungen gemeinsam im Bereich der Elbemündung unterhalb von Nordkehdingen eine geringfügige Erhöhung der Scheitelwasserstände bis zu 1,5 dm. Nach Oberstrom sind die Auswirkungen unterschiedlich: Während die Eindeichungen eine leichte Erhöhung der Extremwerte bei Krautsand bewirken (um etwa 1 dm), wird der Scheitel am Pegel St. Pauli um knapp 0,5 dm abgesenkt. Diese Tendenzen gelten für beide Sturmfluten vom Januar 1976.

Bei einer Genauigkeit des mathematischen Modells im Dezimeterbereich ergibt sich auch aus diesen Untersuchungen, daß die Eindeichungsmaßnahmen an der Unterelbe auf die Scheitelwasserstände von Sturmfluten praktisch keinen Einfluß haben. Diese Ergebnisse entsprechen denen früherer Untersuchungen.

3. Ausblick

Mit den Modellversuchen konnten aus zeitlichen Gründen und wegen des Mangels an geeignetem Datenmaterial nicht alle wünschenswerten Untersuchungen durchgeführt werden. Es empfiehlt sich daher, neben der allgemeinen Vertiefung der Sturmflutforschung in den folgenden Bereichen weitere Untersuchungen vorzunehmen:

- Intensivierung der Naturmessungen bei Sturmfluten und insbesondere deren Auswertung,
- Verbesserung des hydraulischen Modells für die Reproduktion von Sturmflutereignissen,
- Verbesserung der numerischen Modelle durch eine detaillierte Erfassung der topographischen Verhältnisse und daher auch eine verbesserte Reproduktion der Strömungen sowie Einbeziehung von Basis-, Regional- und weiteren Lokalmodellen,
- Überprüfung der statistisch ermittelten Signifikanz der Veränderung des Trends im Bereich der Unterelbe mit Erweiterung des Untersuchungsprogramms auch auf andere Stationen als St. Pauli,
- weitergehende Untersuchungen von säkularen Veränderungen, insbesondere des Klimas, des Oberwassereinflusses sowie des Windeinflusses über der Elbe,
- objektbezogene Untersuchungen für Sperrwerksbauten,
- objektbezogene Untersuchungen für Maßnahmen im Mündungsbereich, sofern die raumordnerischen und ökologischen Voraussetzungen gegeben sind.