Die Küste, 47 (1988), 51-101

Einfluß von Baumaßnahmen in und an der Tideelbe auf die Höhe hoher Sturmfluten

von Winfried Siefert und Karsten Havnoe

Zusammenfassung

Der Bericht behandelt den Einfluß der von 1950 bis 1980 vorgenommenen Eingriffe in und an der Elbe auf den Ablauf hoher Sturmfluten. Neue Basis bei diesen Untersuchungen sind die Ergebnisse aus numerischen Elbemodellen, die im Dänischen Hydraulischen Institut entwickelt wurden.

Die Auswirkungen einzelner Maßnahmen werden der Größenordnung nach angegeben, wobei sie den Ergebnissen aus früher verwendeten Modellen gegenübergestellt werden (Kap. 3 sowie Abb. 7 bis 9 und 12 bis 24). Schließlich wird die gemeinsame Wirkung aller untersuchten Maßnahmen präsentiert.

Die somit heute möglichen Aussagen gehen hinsichtlich der Scheitelhöhen hoher Sturmfluten aus Tab. 4 hervor. Es ist erwiesen, daß hohe Sturmfluten in der Elbe generell erhöht wurden, und zwar bei Brokdorf um 2,5 bis 4 dm, bei Kollmar um 3 bis 4,5 dm, bei Stadersand um 3,5 bis 5 dm, im Hamburger Hafenbereich um 5 bis 6 dm und bei Zollenspieker um 6,5 bis 9 dm. Diese Beträge sind wesentlich größer als noch vor wenigen Jahren vermutet.

Summary

This report deals with the influence of construction measures between 1950 and 1980 in the Elbe estuary and along its banks on the behaviour of high storm surges. Basic investigations were carried out with the Danish Hydraulic Institute's numerical Elbe models.

The effects of man-made changes are given in their order of magnitude, and they are compared with results from earlier models (Chap. 3 and Fig. 7 to 9 and 12 to 24). Finally the overall influence from all of the changes is presented.

The actual knowledge concerning peak heights of high storm surges is given in Table 4. It is indicated that these heights have generally increased by 2.5 to 4 dm at Brokdorf (see Fig. 1), by 3 to 4.5 dm at Kollmar, by 3.5 to 5 dm at Stadersand, by 5 to 6 dm in the Hamburg area, and by 6.5 to 9 dm at Zollenspieker. These amounts are much higher than had been stated some years ago.

Inhalt

1. Früher zur Sturmflutsimulation in der Elbe verwendete Modelle 54
2. Zu den Modellen des Dänischen Hydraulischen Instituts (dhi) 55
   2.1 Grundlagen 55
   2.2 Modellfamilie 58
   2.3 Kalibrierung und Verifizierung 61
3. Einfluß einzelner Maßnahmen 64
   3.1 Staustufe Geesthacht 64
   3.2 Absperrung von Nebenflüssen 66
   3.3 Vordeichungen von Geesthacht bis zur Billwerder Bucht 71
   3.4 Neue Deichlinie von Harburg bis zur Este mit Absperrung der Alten Süderelbe 74
   3.5 Eindeichungen des Hahnöfer Sandes und vor den Schwinge-, Pinnau- und Krückaumündungen 76
   3.6 Eindeichung der Haseldorfer Marsch 78
   3.7 Eindeichung des Krautsandes 80

Die Küste, 47 (1988), 51-101

3.8 Eindeichung Nordkehdingens 83
3.9 Fahrwasservertiefungen 84
4. Gemeinsame Wirkung aller untersuchten Maßnahmen von 1950 bis 1980 88
4.1 Ergebnisse 88
4.2 Statistische Analysen und Genauigkeiten 98
5. Nicht untersuchte Eingriffe 99
6. Schriftenverzeichnis 100

Vorwort der Länderarbeitsgruppe[1]

Schon bald nach Veröffentlichung des Berichtes des LENKUNGSAUSSCHUSSES STURMFLUTEN ELBE (1983) gaben die Erkenntnisse, die die Freie und Hansestadt Hamburg durch neue Sturmflutuntersuchungen nach modernsten Methoden gewonnen hatte, Anlaß, die Ergebnisse des Ausschusses kritisch zu bewerten. Schließlich kam auch die Länderarbeitsgruppe bei ihrer Tätigkeit zur Bestimmung einer Bemessungssturmflut für die Elbe zu dem Schluß, daß einige frühere Ergebnisse der Berichtigung bedurften. Dies stellte sich bei Verwendung der Aussagen aus den Modellrechnungen des Dänischen Hydraulischen Instituts als relativ einfach machbar heraus. Die Hauptaussage besteht nach umfangreichen Modellrechnungen für hohe Sturmfluten in der Elbe, nach Prüfung der Verläßlichkeit einzelner Aussagen und nach paralleler Analyse der eingetretenen Sturmfluten darin, daß

> die Höhe hoher Sturmfluten bei Hamburg-St. Pauli von etwa 1950 bis etwa 1980 aufgrund von Baumaßnahmen in und an der Tideelbe um 5 bis 6 dm angestiegen ist.

Demgegenüber hatte die Hamburger „UNABHÄNGIGE KOMMISSION STURMFLUTEN“ noch 1974 festgestellt[2], daß

> „die nach 1962 an und in der Tideelbe ausgeführten oder noch in der Planung befindlichen Hochwasserschutzanlagen, Strombauten, Fahrwasservertiefungen, Eindeichungen, Absperrungen und Begradigungen nach ihrer Fertigstellung insgesamt eine Erhöhung der Sturmflutscheitelwerte in Hamburg in der Größenordnung bis zu einem Dezimeter hervorbringen können.“

Auch 1976 führte diese Kommission noch aus*:

> „Die Ergebnisse der wissenschaftlichen Untersuchungen aus Anlaß der Sturmfluten im Herbst 1973 haben sich vollauf bestätigt. So haben auch 1976 die in der Elbe und im Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg nach 1962 ausgeführten Hochwasserschutzbauten keine nennenswerte Erhöhung der Sturmflutscheitel in Hamburg bewirkt“.

Der LENKUNGSAUSSCHUSS STURMFLUTEN ELBE (1983) hat den aufgekommenen Zweifeln nicht genügend Raum gegeben, auch wenn er in seinem Vorwort u. a. schreibt:

---

[1] Die Länderarbeitsgruppe, deren eigentliche Arbeit in der Bestimmung einer Bemessungssturmflut für die Elbe bestand (siehe den entsprechenden Bericht in diesem Heft), wird gebildet von den Herren
MR KRAUSE, Niedersächsisches Umweltministerium, Hannover
BD KROKER, Baubehörde, Hamburg
RBD PROBST, Amt für Land- und Wasserwirtschaft, Itzehoe
MR SCHERENBERG, Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei, Kiel
Prof. Dr.-Ing. SIEFERT, Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Landwirtschaft, Hamburg (Obmann)

[2] Grundlagen waren die Modellversuche im FRANZIUS-INSTITUT der Universität Hannover sowie in der BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (BAW) in Hamburg sowie (für den Lenkungsausschuß) die Modellrechnungen von SÜNDERMANN und ZIELKE (1983).

Die Küste, 47 (1988), 51-101

„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 beschlossen, daß der Bund und die Länder Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Hamburg gemeinsam Untersuchungen über Sturmfluten in der Unterelbe ausführen lassen.

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 Stumfluthöhen 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."

Über die Wirkung der Eindeichungen heißt es dann u. a.:

„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 Haseldorfer und 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 PARTENSCKY, 1977) verglichen und gewertet. Hierbei wurde auch die Eindeichung an der Mündung der Krückau und Pinnau berücksichtigt.

Gesamtwirkung aller Eindeichungen: Nach Wertung aller h y d r a u l i s c h e n Modellversuche ist beim heutigen Zustand in der Elbe für eine Sturmflut, wie sie am 03. 01. 1976 abgelaufen ist, nach Fertigstellung aller untersuchten Deichbaumaßnahmen mit einer Erhöhung um rd. 1 dm für die Scheitelwerte in Hamburg zu rechnen.

Nach dem m a t h e m a t i s c h e n 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."

Der Unterschied zur heutigen Aussage „Erhöhung in Hamburg um 5 bis 6 dm" erklärt sich bei näherer Betrachtung außerdem dadurch, daß letzterer Betrag die Auswirkungen aller in Kap. 3 behandelten Maßnahmen enthält, der Bericht des Lenkungsausschusses dagegen nur (die) vier (von dem Ausschuß untersuchten bzw. für maßgebend erachteten):*

1. Gesamtwirkung „aller" Eindeichungen nach dem Verständnis des LENKUNGSAUSSCHUSSES (1983) auf der Basis
   1.a) hydraulischer Modellversuche + rd. 1 dm
   1.b) eines mathematischen Modelles ± rd. 0 dm

* Die Vergleichszahlen gelten für Hamburg (-St. Pauli).

Die Küste, 47 (1988), 51-101

1.c) Addition der Auswirkungen derselben Maßnahmen
aus dem dhi-Modell:
−0,5 + (0 bis 1) + 0,5+0,5 dm = + 0,5 bis 1,5 dm

2. Auswirkungen aller tatsächlich vorgenommenen
Eindeichungen aus dem dhi-Modell: + 3,5 bis 5 dm

Der Mangel des Ausschußberichtes besteht also darin, nicht alle Eindeichungen in ihrer Wirkung erneut beleuchtet bzw. die Einschränkungen nicht genügend verdeutlicht zu haben. Ein Grund dafür ist, daß die herangezogenen Modelle dies gar nicht zuließen, vor allem auch die Fahrwasservertiefungen in der Elbe.

Die folgende Arbeit mit den neuen, auf ausreichend abgesicherten Grundlagen basierenden Erkenntnissen soll dazu dienen, die Auswirkungen der Baumaßnahmen in und an der Tideelbe zu erläutern.

1. Früher zur Sturmflutsimulation in der Elbe verwendete Modelle

Die Simulation von Sturmfluten in Modellen ist ein Vorgang, der durch die astronomische Tide, den Windstau an der Mündung, den lokalen Wind und den Oberwasserzufluß bestimmt wird. Die Simulationsgenauigkeit steigt mit der Genauigkeit der Reproduktion der Topographie, mit der Wahl der Modellgrenzen, dem Windansatz, der Eingabe der Randwerte und dem Kalibrierspektrum, d. h. der Anzahl und der Varianz der zum Einspielen verwendeten Ereignisse. Auf die Schwierigkeiten, die bei den einzelnen Modellen auftraten, ist stets nur sehr zurückhaltend hingewiesen worden.

Nach 1960 wurden für Sturmflutanalysen in der Elbe (Abb. 1) folgende Modelle verwendet:

- Physikalisches Modell des Franzius-Instituts der Universität Hannover von Stiepelse (Strom-km 545) bis zum Buchtloch (Strom-km 730) mit einem Breitenmaßstab 1:500 und einem Höhenmaßstab 1:100. Es wurde von 1962 bis 1969 betrieben. Es stellte etwa den Zustand von 1960 dar und wurde mit einer Tide von 1943 gesteuert. Lokaler Wind blieb unberücksichtigt.
- Physikalisches Modell der Bundesanstalt für Wasserbau. Das Modell 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, wie im Modell des Franzius-Instituts. Die Topographie entspricht weitgehend dem Zustand von 1971 mit eingebauter Fahrrinne auf 13,5 m Tiefe. Die Oberelbe ist bis Geesthacht generalisiert, oberhalb davon stilisiert wiedergegeben. Lokaler Wind bleibt unberücksichtigt.
- Hydrodynamisch-numerisches Modell von Hansen. Das Modell war eindimensional mit Gitterpunktabständen von 6 bis 33 km, berücksichtigte aber bereits den Wind über der Elbe.
- Hydrodynamisch-numerisches Modell von Sündermann und Zielke. Am Lehrstuhl für Strömungsmechanik der Universität Hannover wurde ein zweidimensionales Modell von Helgoland bis Hamburg (Bunthaus) mit eindimensionaler Ergänzung bis Neu Darchau entwickelt. Die Topographie in der Deutschen Bucht entspricht dem Stand von 1978, in der Unterelbe demjenigen von 1974/76, in der Oberelbe demjenigen von 1951. Der Wind wird berücksichtigt.
- Hydrodynamisch-numerisches Modell von Theunert und Zielke. Ebenfalls am Lehrstuhl für Strömungsmechanik der Universität Hannover wurde ein zweidimensionales

Die Küste, 47 (1988), 51-101

Finite-Elemente-Modell der Unterelbe von Cuxhaven bis Blankenese im Zustand von etwa 1975 und eindimensionaler Fortsetzung wie oben erstellt. Der Wind wird ebenfalls eingerechnet.

2. Zu den Modellen des Dänischen Hydraulischen Instituts (dhi)

2.1 Grundlagen

Mit dem im dhi entwickelten System 11 kann man ein eindimensionales Modell eines einschichtigen, vertikal homogenen Gebietes eines Gewässers erstellen, und es eignet sich besonders zur Anwendung auf Flüsse, Kanäle und Fjorde. Hier wird das hydrodynamische Modell S11HD, das den örtlichen und zeitlichen Verlauf der Wasserstände und der Durchflußmengen in einem willkürlichen Kanalnetz berechnet, verwendet. Hinzu kommen diverse EDV-Programme zur graphischen und statistischen Behandlung der Datenausgaben. Detailliertere Beschreibungen des gesamten Komplexes können einer vorgesehenen umfangreicheren Veröffentlichung entnommen werden*.

Das hydrodynamische Modell löst die Grundgleichungen (die instationären Impuls- und Kontinuitätsgleichungen der eindimensionalen Gerinneströmungen von Saint Venant) auf einem Netz, dessen Punkte beliebig festgelegt werden können und dessen Ergebnisse sich automatisch verändern, ob nun die Ufer überschwemmt sind oder trocken liegen. Ein hochentwickeltes implizites Differenzenverfahren wird verwendet.

Das Berechnungsnetz besteht aus alternierenden h- und Q-Punkten, wo die Wasserstände (h) bzw. die Durchflußmengen (Q) berechnet werden. Der Endpunkt einer Flußstrecke kann ein geschlossener Rand (Q = 0), ein offener Rand oder ein Knotenpunkt sein. An einem offenen Rand, der Verbindung zu anderen Gewässern hat, werden entweder ein h-Punkt oder ein Q-Punkt angebracht. Im ersten Fall werden bekannte Wasserstandsschwankungen als Randwerte verwendet, im zweiten entweder bekannte Variationen der Durchflußmengen oder eine Relation zwischen Durchflußmenge und Wasserstand.

In den Knotenpunkten werden drei Zweige in einem Punkt gesammelt; die Grundgleichungen können dann nicht unmittelbar verwendet werden. Statt dessen wird die Kontinuitätsgleichung mit einer Energiebilanz-Bedingung angesetzt.

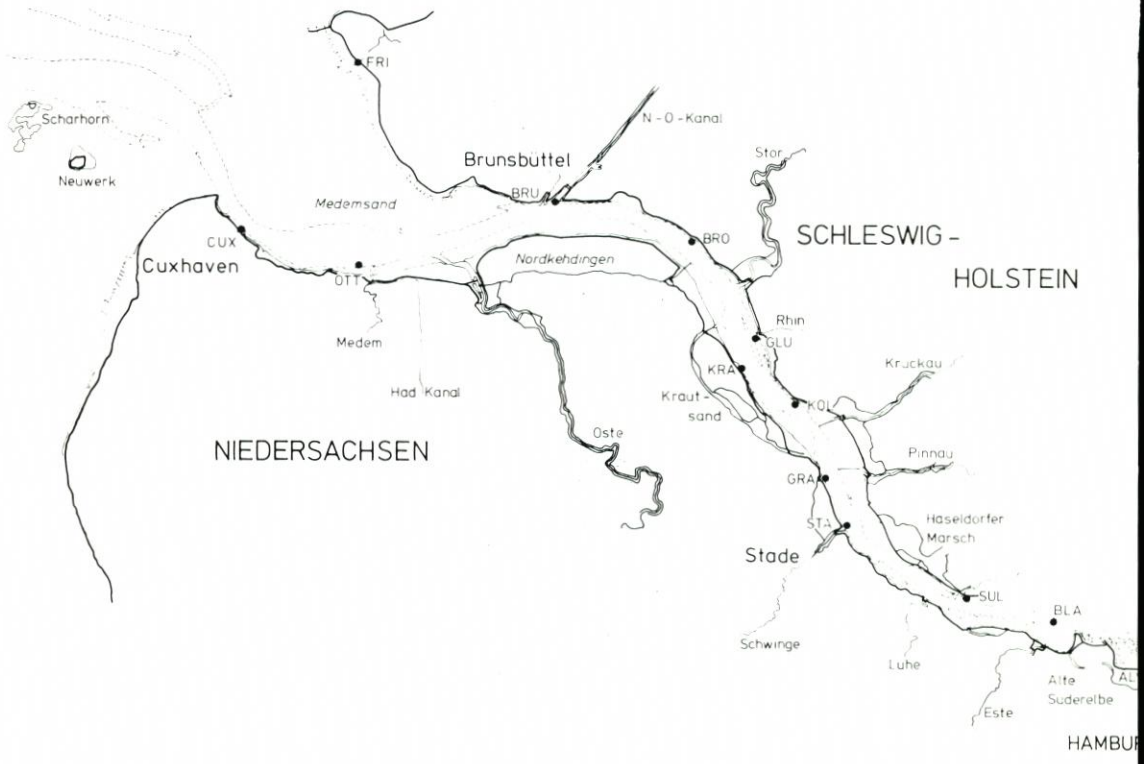
Bei Schematisierungen einer komplizierten Topographie ist es nicht möglich, alle Nebenflüsse, Hafenbecken und Buchten mit dem Berechnungsnetz zu erfassen. Um eine genaue Beschreibung zu erreichen, werden solche Gebiete als Mehrspeicherkapazität mitgeführt und an die nächstliegenden Berechnungspunkte geknüpft. Nebenrinnen und Niederschlag können in den einzelnen Berechnungspunkten angebunden werden.

Das Modell ist so generell aufgebaut, daß bei geringer Änderung der Eingabewerte neue Zweige und Knotenpunkte oder veränderte Wassertiefenverhältnisse in die Modellgeometrie eingeführt werden können.

Für die Windreibung wird ein Ansatz unter Berücksichtigung der Windgeschwindigkeit und der örtlichen topographischen Einflüsse verwendet. Nach Vergleichen für den Nov. 1977 wurde davon ausgegangen, daß die Windgeschwindigkeit in Hamburg bei mittelhohen Sturmfluten nur etwa halb so groß wie vor der Küste ist. Daraus geht eine Abnahme des Windreibungskoeffizienten hervor. So wurde für alle Sturmfluten mit dem vollen Wert bei Cuxhaven und mit linear auf 20 % bis Hamburg abnehmenden Werten über der Unterelbe gerechnet.

*Noch für 1989 für das Jahrb. der Hafenbautechn. Ges. geplant.

Die Küste, 47 (1988), 51-101



Die Elbe

von Schnackenburg bis zur See

mit Nebenflüssen, Deichen und Pegelstandorten

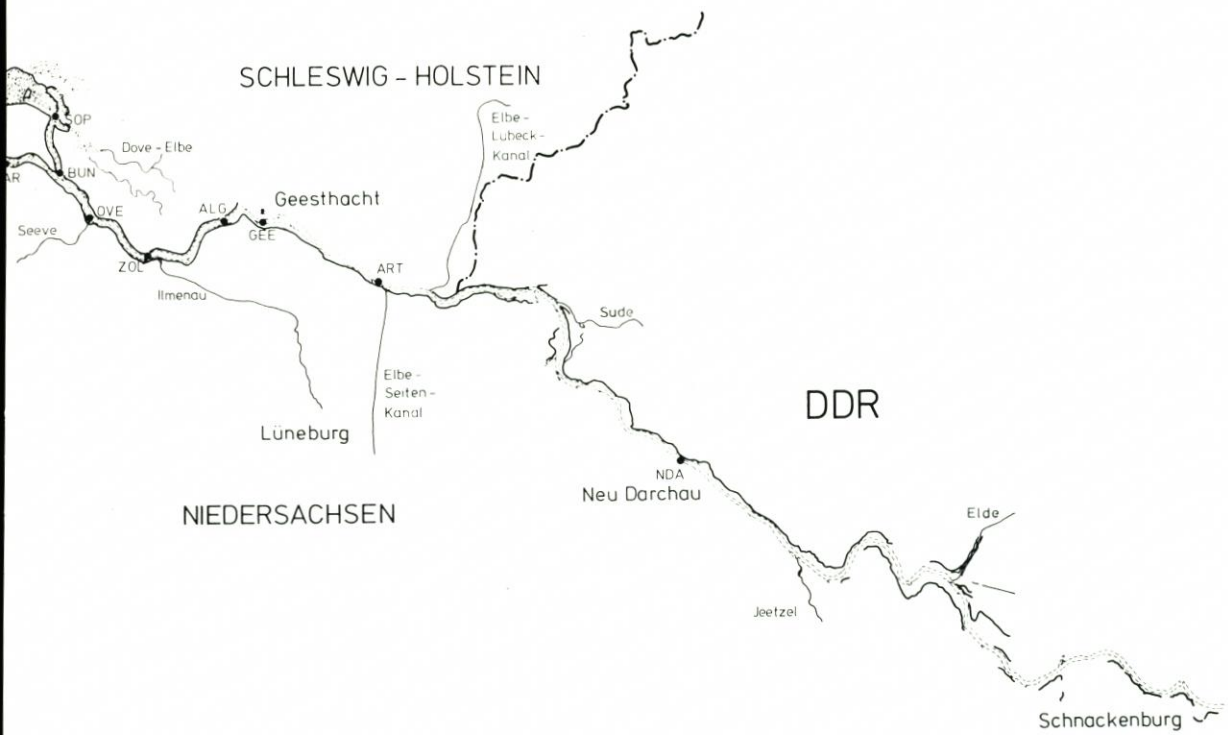
0 10 20 km

Abb. 1: Übersichtsplan der Elbe

Die Küste, 47 (1988), 51-101

Abkürzungen für die Pegelstandorte

CUX	Cuxhaven	GRA	Grauerort	BUN	Bunthaus
FRI	Friedrichskoog	STA	Stadersand	OVE	Over
OTT	Otterndorf	SUL	Schulau	ZOL	Zollenspieker
BRU	Brunsbüttel	BLA	Blankenese	ALG	Altengamme
BRO	Brokdorf	STP	Hbg.-St. Pauli	GEE	Geesthacht
GLU	Glückstadt	SOP	Schöpfstelle	ART	Artlenburg
KRA	Krautsand	ALW	Altenwerder	NDA	Neu Darchau
KOL	Kollmar	HAR	Harburg		



Die Küste, 47 (1988), 51-101

2.2 Modellfamilie

Im Laufe 10jähriger Untersuchungen wurde das zunächst erstellte Modell der Elbe von Brunsbüttel bis nach Cuxhaven und darüber hinaus sowie von Geesthacht bis nach Neu Darchau erweitert (Abb. 1). Mit zunehmender Intensivierung der Sturmflutanalysen und ständiger Verwendung bei aktuellen planerischen Fragen entstand Bedarf an einer regelrechten Modellfamilie. Sie umfaßt inzwischen vier Mitglieder:

„Urmodell" 1977

Dieses Modell beschreibt den Zustand der Unterelbe von 1977, also nach Abschluß der Fahrwasservertiefung auf 13,5 m und aller großen Eindeichungsmaßnahmen. Die Elbe oberhalb Hamburgs wurde nach Kartenmaterial aus den Jahren 1976/77 berechnet, die Strömungen im Stromspaltungsgebiet wurden nach Messungen aus 1977, 1979 und 1982 kalibriert, die Tidewasserstände nach der mittleren Tide des Jahres 1979.

Das Modell wurde anfangs häufig vereinfachend mit „Zustand 1980" charakterisiert. Abb. 2 zeigt beispielhaft die numerische Bearbeitung des Hamburger Stromspaltungsgebietes.

Modell 1950

Es wurde ein mathematisch-hydraulisches Modell der Tideelbe von Neu Darchau bis Brunsbüttel für 1950 aufgestellt. Die Topographie wurde so gut, wie das zugängliche Material (Seekarten und Peilpläne) es zuließ, reproduziert. Bei Geesthacht ist die Elbe offen; Billwerder Bucht und Alte Süderelbe sind nicht, die Dove Elbe ist dagegen bei Tatenberg abgesperrt (Abb. 2).*

Berechnungen der Wasserstandsverhältnisse im Verlaufe einer gewählten 10-Tage-Periode des Jahres 1950 haben gezeigt, daß eine zufriedenstellende Reproduktion unter Anwendung der bei der Kalibrierung des Modells 1977 gefundenen Bettreibungskoeffizienten erreicht wird, wenn auch nicht ganz so gut wie in der Situation von 1977; es zeigte sich allerdings, daß sie nicht ohne weiteres durch Verwendung anderer Koeffizientenwerte verbessert werden kann.

Berechnungen von mittleren Tidesituationen in den Jahren 1950 und 1977 mit den jeweiligen Modellen lassen erkennen, daß sehr genaue Reproduktionen von mittleren Hoch- und Niedrigwasserständen möglich sind. Außerdem zeigt ein Vergleich auch die bedeutenden Änderungen der Eintrittszeiten, die Resultate der in den Jahren 1950 bis 1977 vorgenommenen Veränderungen sind:

	Höhen St. Pauli in cm PN				Thw-Eintrittszeit-Differenzen in h von Cuxhaven nach St. Pauli	
	MThw		MTnw			
	1950	1977	1950	1977	1950	1977
gemessen	667	695	428	366	4.12	3.46
berechnet	666	697	430	364	4.20	3.50

* Dieser Zustand war 1950 tatsächlich noch nicht erreicht: Die Tatenberger Schleuse wurde im Frühjahr 1951 in Betrieb genommen, die Dove Elbe im Juni 1951 abgesperrt. Eine modellmäßige Nachbildung der Dove Elbe bis zur Gose-Elbe (1925 abgesperrt) und bis zur 1934 bei Bergedorf errichteten Schleuse wäre wegen mangelhafter Tiefendaten ohnehin problematisch gewesen. Wegen der niedrigen Sommerdeiche (2,3 m NN und höher) hätten bei der Simulierung hoher Sturmfluten zudem Überströmungen und Brüche eingerechnet werden müssen.

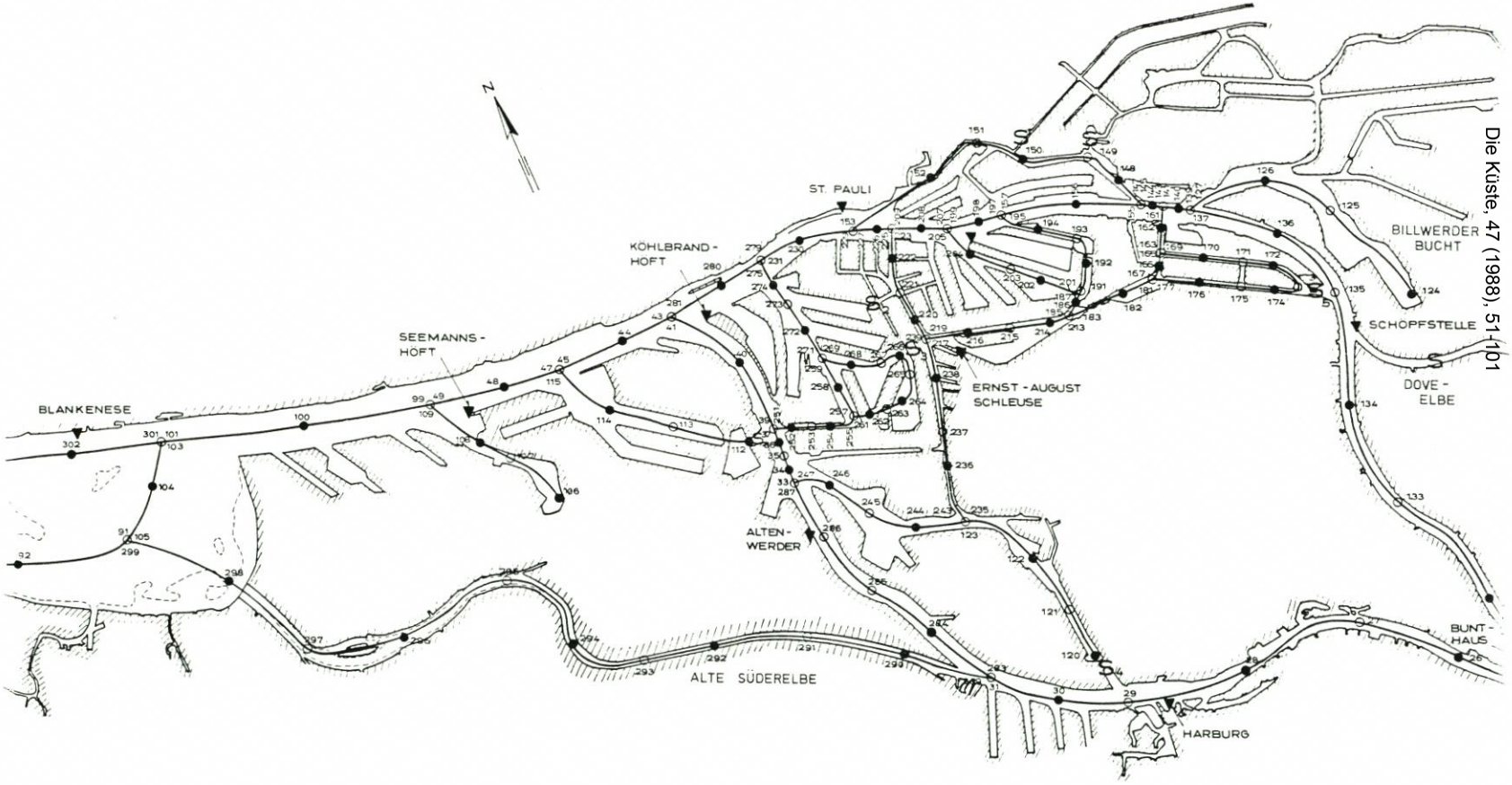


Abb. 2: Berechnungsnetz der dhi-Modelle (Ausschnitt)

Der Umstand, daß das Modell 1950 unter Anwendung der Kalibrierungswerte für das Urmodell zufriedenstellende Reproduktionen von Naturmessungen in einer zweiten topographisch unterschiedlichen Situation geben kann, macht eine Modellfamilie zu einem gut geeigneten Prognosewerkzeug. Hätte man diese im Jahre 1950 zur Verfügung gehabt, so hätte man allein auf der Grundlage der Kennnis der Situation für das Jahr 1977 die kommenden MThw und MTnw mit einer Genauigkeit von 2 cm vorhersagen können, wie aus obiger Tabelle hervorgeht.

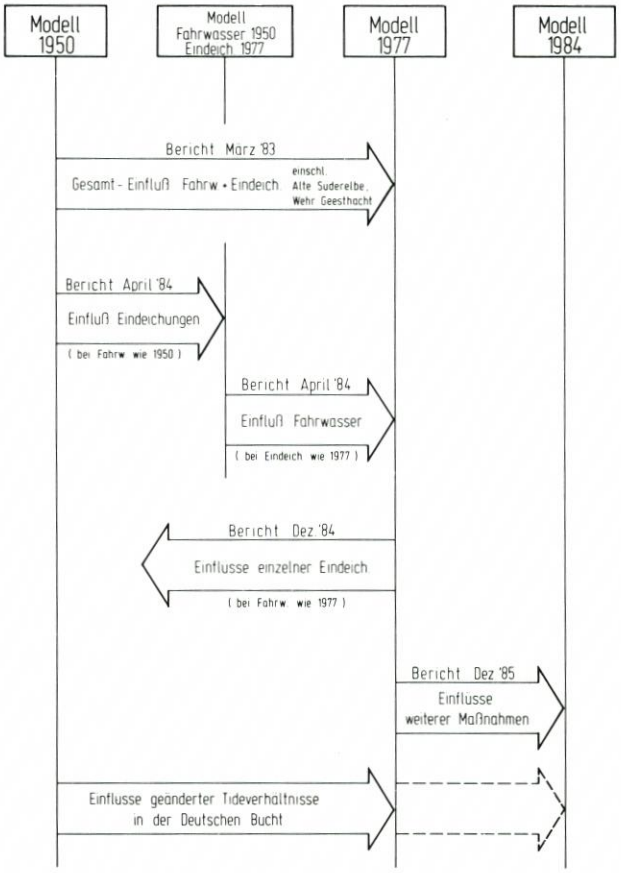


Abb. 3: Untersuchungsmöglichkeiten mit der „Modellfamilie" mit Angabe der entspr. dhi-Berichte

Modell 1950/77

Seit 1950 sind laufend Fahrwasservertiefungen in der Elbe und dem Hafen vorgenommen worden. Um den relativen Einfluß der Fahrwasservertiefungen auf die Wasserstände zu untersuchen, wurde eine fiktive Modelltopographie in das Berechnungsmodell eingebracht, im folgenden als Modell 1950/77 bezeichnet. Sie ergibt sich wie folgt:

- Die Flußbettbeschreibung entspricht dem Zustand in 1950 unterhalb und in 1977 oberhalb Tnw in folgenden Flußabschnitten:
  1. Unterelbe vom Köhlbrandhöft bis Brunsbüttel. Die zwischen 1950 und 1977 aufgespülten Sände wurden im heutigen Zustand belassen.

Die Küste, 47 (1988), 51-101

2. Norderelbe von Schöpfstelle bis Köhlbrandhöft
3. Süderelbe von Harburg bis Köhlbrandhöft

– Die Flußbettbeschreibung entspricht dem Zustand in 1977 in den Querschnitten:
1. Oberelbe von Geesthacht bis Bunthaus
2. Norderelbe von Bunthaus bis Schöpfstelle
3. Süderelbe von Bunthaus bis Harburg
– Alle Hafenflächen sind entsprechend der Situation in 1977 beschrieben.
– Die übrigen Modellparameter (Sperrwerk bei Geesthacht, Absperrung der Alten Süderelbe usw.) sind entsprechend der Topographie in 1977 beschrieben.

Auf diese Weise kann der Einfluß der topographischen Änderungen des Flußbettes isoliert werden.

Außer Änderungen aufgrund von Fahrwasservertiefungen berücksichtigen die so ermittelten Querschnitte auch erosions- und sedimentationsbedingte Änderungen. Diese sind in hohem Maße als Folgen von Fahrwasservertiefungen anzusehen und daher in das erarbeitete Modell einbezogen worden, dessen Berechnungsnetz mit dem bei der Situation 1977 identisch ist.

Modell 1984

Inzwischen sind die Modellquerschnitte aufgrund neuer Peilungen (1983–1985) aktualisiert worden. In den Hafenkanälen sind die Änderungen minimal und rufen nur lokale Änderungen des Strömungsbildes hervor. Die größten Modelländerungen stammen von Vertiefungen in der Norderelbe, etwa von der Freihafen-Elbbrücke stromabwärts.

Damit stehen vier Modelle zur Verfügung, die durch Parallelbetrieb die Einflüsse verschiedener künstlicher und natürlicher Veränderungen auf den Ablauf von Tiden und Sturmfluten erkennen lassen, wie dies Abb. 3 schematisch zeigt.

2.3 Kalibrierung und Verifizierung

Für Sturmfluten liegen so gut wie keine Strömungsmessungen aus dem Elbegebiet vor. Kalibrierung und Verifizierung mußten sich damit also auf Wasserstände beschränken. Da sich ohnehin die für mittlere Tideverhältnisse ermittelten und für sämtliche Modelle gleichen Widerstandskoeffizienten als sehr stabil erwiesen, ist der Nachteil aus fehlenden Strömungsmessungen nicht ausschlaggebend. Andererseits wurde darauf geachtet, daß soviel unterschiedliche Sturmfluttypen wie möglich herangezogen wurden.

Modell 1950

Zur Kalibrierung des bis Cuxhaven erweiterten Modells 1950 wurde die Sturmflut vom 9./10. 2. 1949 verwendet (Tab. 1), einschließlich der mittleren Tidekurve um 1950. Während der Läufe zeigte sich schnell, daß eine Änderung der Windbeschreibung gegenüber dem Modell 1977 nötig war, um eine zufriedenstellende Kalibrierung zu erhalten.

Im Unterschied zu den später auf Scharhörn gemessenen Windgeschwindigkeiten stammen die im Modell 1950 verwendeten nämlich vom Feuerschiff „Elbe 1". Mit der revidierten Windreibungsbeschreibung wurde eine befriedigende Kalibrierung und Verifizierung des Modells erreicht: Der Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Wasserständen bei Hbg.-St. Pauli für die Sturmflut Nr. 57* ist in Abb. 4 wiedergegeben.

---

* zur Numerierung der Sturmfluten siehe Tab. 1.

Die Küste, 47 (1988), 51-101

Tabelle 1. Zusammenstellung der in den dhi-Modellen verwendeten Tiden und Sturmfluten

Ereignis		Thw/Tnw bzw. HThw an den Pegeln				Q_o
		Cuxhaven cm NN–5 m	Stadersand cm NN–5 m	Hbg.-St. Pauli cm NN–5 m	Zollenspieker cm NN–5 m	Neu Darchau m^3/s
mittlere Tiden						
1948/52		637/360	649/396	667/428	696/541	~565
1975/79		645/346	663/375	696/373	734/523	~760
1981/85		652/350	674/379	708/368	744/518	~740
Sturmfluten*						
57	09./10. 02. 49	791	861	880	894	348
59	24. 10. 49	866	839	841	815	232
61	16. 01. 54	869	897	914	904	260
62	16./17. 01. 54	835	851	870	873	260
64	22. 12. 54	883	915	935	934	518
65	23. 12. 54	787	881	915	927	518
66	23./24. 12. 54	816	827	850	864	518
67	12./13. 01. 55	854	860	883	906	1700
78a	16. 02. 62	829	859	898	924	952
78	16./17. 02. 62	(995)	1074	1070	1057	952
79	17. 02. 62	843	886	912	933	952
125	03. 01. 76	1010	1106	1145	1134	460
126	03./04. 01. 76	862	882	919	945	460
127	20./21. 01. 76	970	1015	1058	1076	1400
127a	21. 01. 76	836	865	917	951	1400
128	21./22. 01. 76	880	936	980	1014	1400
131	14./15. 11. 77	872	ausgefallen	953	972	837
132	15. 11. 77	829	ausgefallen	905	936	837
133	24. 12. 77	827	ausgefallen	943	964	847
134	30./31. 12. 77	890	ausgefallen	955	971	825
146	23./24. 11. 81	825	870	923	959	1338
147	24. 11. 81	951	1037	1081	1099	1338
148	24./25. 11. 81	903	965	1012	1041	1338
156	01. 02. 83	808	887	938	961	860
157	01./02. 02. 83	899	978	1016	1032	860
158	02. 02. 83	771	817	857	902	860

* Die Daten für Cuxhaven, Hbg.-St. Pauli und Q_o entstammen Ref. Hydr. Unterelbe (1985), wo alle Ereignisse numeriert sind; die Nummern werden im folgenden häufig verwendet.

Zur Verifizierung des Modells wurden u. a. die Sturmfluten Nr. 59 und 61/62 (24. 10. 49 bzw. 16./17. 1. 54) herangezogen, da sich in den Jahren 1950 bis 1953 keine nennenswerten Sturmfluten ereignet hatten. Vergleiche zwischen gemessenen und berechneten Werten bei Hbg.-St. Pauli sind dafür ebenfalls auf Abb. 4 angegeben. Sie zeigen gleich gute Übereinstimmung. Zusammenfassend kann geschlossen werden, daß das Modell 1950 in der Lage ist, Sturmflutereignisse mit guter Genauigkeit zu simulieren. Sehr hohe Sturmfluten konnten nicht herangezogen werden, weil solche um 1950 nicht auftraten.

Modell 1977

Das bis Cuxhaven und Neu Darchau erweiterte Modell 1977 wurde zunächst mit den mittelhohen Sturmfluten Nr. 131 und 132 kalibriert. Gemessene und berechnete Tidekurven

Die Küste, 47 (1988), 51-101

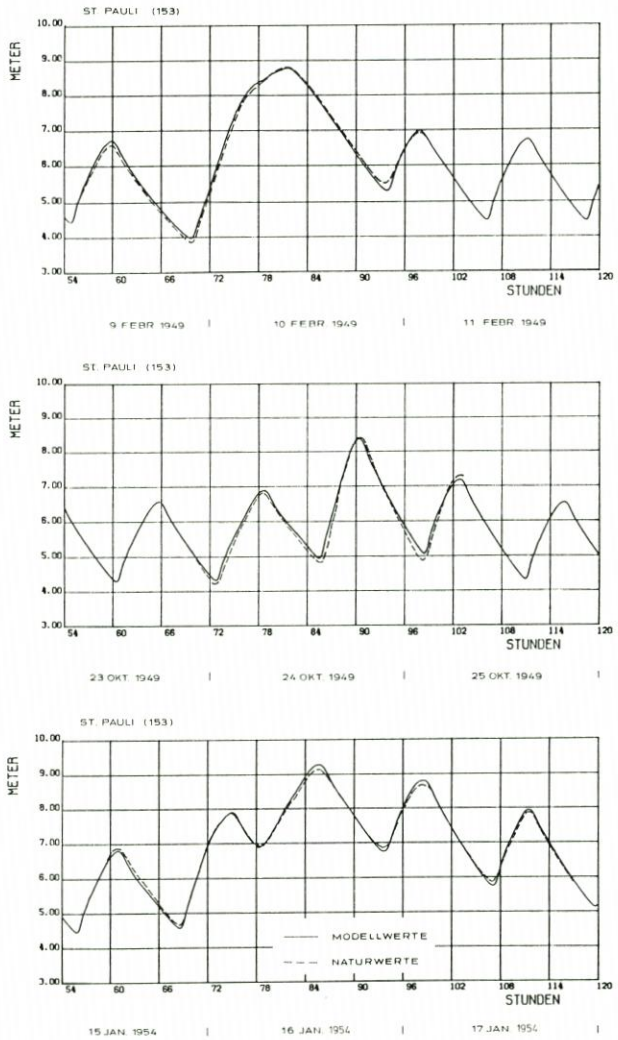


Abb. 4: Sturmfluten von 1949 und 1954 bei Hbg.-St. Pauli im Modell 1950; Höhenangaben hier wie auf den folgenden Darstellungen in m PN mit PN = NN−5 m

wurden für Brokdorf, Krautsand, Hbg.-St. Pauli und Bunthaus (Abb. 1) verglichen und brachten gute Übereinstimmungen bei unveränderten Manning-Koeffizienten.

Zur Verifizierung hinsichtlich mittelhoher Sturmfluten wurden die Ereignisse Nr. 133 und Nr. 134 herangezogen. Bei dem ersteren nimmt der Wind während der Flut stark zu (sog. verzögerte Sturmflut), bei dem letzteren stark ab (sog. kollabierende Sturmflut). Schließlich konnte das Modell mit drei hohen Sturmfluten verifiziert werden (Nr. 125, 127, 147, siehe Tab. 1). Es handelt sich auch hier um unterschiedliche Sturmfluttypen bei Zuflüssen zwischen 460 und 1400 m^3/s. Wie Abb. 5 beispielhaft zeigt, sind die Übereinstimmungen im Tideverlauf bei Stadersand wie bei Hbg.-St. Pauli so gut, daß das Modell für weitere Analysen verwendet werden konnte. Tab. 2 gibt einen Überblick über die im Laufe der Zeit erzielten Veränderungen der Modell-HThw.

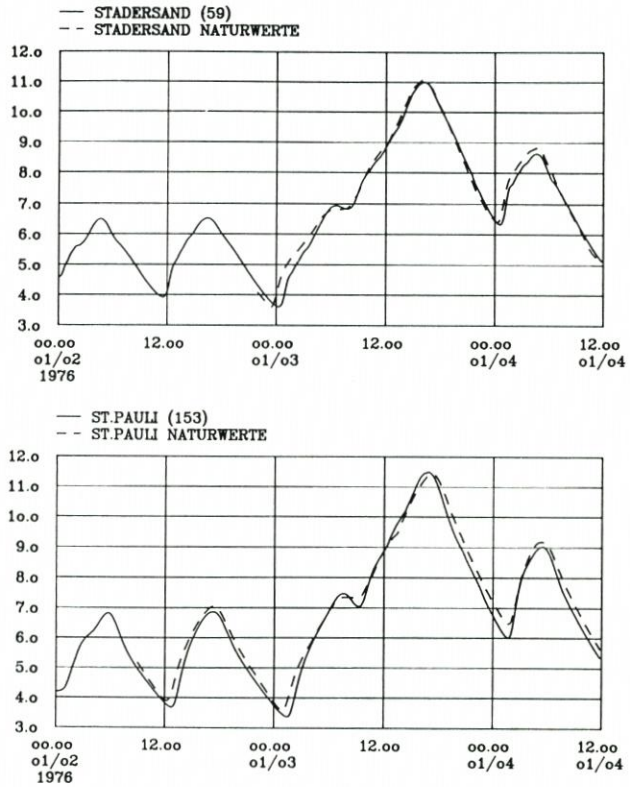


Abb. 5: Sturmflut vom 3. 1. 76 bei Stadersand und Hbg.-St. Pauli im Modell 1977

Modell 1984

Zur Verifizierung wurden die Sturmfluten Nr. 156 bis 158 herangezogen. Sie sind für Brokdorf, Hbg.-St. Pauli und Zollenspieker mit HThw-Abweichungen zwischen 0 und 1 dm und guter Übereinstimmung des Kurvenverlaufes sehr befriedigend simuliert worden.

3. Einfluß einzelner Maßnahmen

3.1 Staustufe Geesthacht

Das Wehr liegt in einem flachen Rechtsbogen der Elbe bei km 585,9 (Abb. 1). Gebaut wurde die Staustufe in den Jahren 1957 bis 1961. Wegen des Betriebes des kurz oberhalb gelegenen Pumpspeicherwerkes und zum Schutz der Deiche an der Oberelbe wird im Bereich der Wehröffnungen generell ein Wasserstand von NN + 4 m angestrebt. Da die selbsttätige hydraulische Steuerung der Sektoren eine Spiegeldifferenz zwischen OW und UW erfordert, werden die vier Wehrverschlüsse geöffnet, sobald der Unterwasserstand den Oberwasserstand erreicht. Mit fallendem Wasserstand wird so verfahren, daß möglichst schnell bei geschlossenen Segmenten das Stauziel wieder erreicht wird. Je nach Sturmflutablauf und Oberwasserzufluß werden die Verschlüsse unterschiedlich gesteuert. Damit ist die in den Modellversuchen des Franzius-Instituts in den 1960er Jahren angesetzte Prämisse „bei Sturmfluten ist das

Die Küste, 47 (1988), 51-101

Tabelle 2. In dhi-Modellen berechnete HThw-Höhen

Sturmflut Nr.	gemessen	HThw Hbg.-St. Pauli berechnet in dhi-Bericht (cm PN)				
		02. 82	02. 83	04. 84	01. 85	12. 85
57	881	877				
59	842	838				857
61	914	927				
64	936		927	935		935
65	915		878	882		900
66	850		850	850		
78	1070		1071			
79	912		905			
125	1145		1150	1151	1151	1153
126	919		913	913		922
127	1058		1064			1079
127a	917		920			928
128	980		972			986
131	953	963	957	958		
132	905	900	900	900		
133	943	942	942		928	941
134	955	926	928		936	
146	923		900	910	904	920
147	1081		1069	1072	1070	1082
148	1012		990	997	993	1006
156	938					937
157	1016					1000
158	857					850
Mittel der absoluten Abweichungen von Rechnung zu Messung in cm:		9,4 ± 9,5	10,2 ± 10,5	9,0 ± 9,6	14,3 ± 5,9	7,8 ± 6,2
relative Abweichung der Mittel in cm:		−2,9	−7,9	−6,8	−12,3	+1,7

Wehr gelegt“ für den heutigen Betrieb unzutreffend. Das numerische Modell konnte dagegen genauer geeicht werden. So stellen sich bei Steuerung im Modell, wie sie tatsächlich praktiziert wird, im Vergleich Modell-Natur folgende HThw-Differenzen* ein:

* Hier wie auch im weiteren Bericht werden Veränderungen stets in Dezimetern ausgedrückt, um nicht den Eindruck von Scheingenauigkeiten zu erwecken.

Pegel	HThw-Differenzen Modell-Natur in dm für Sturmflut Nr. (Tab. 1)		
	125	147	2085A*
Stadersand	0	−0,5	+0,5
Hbg.-St. Pauli	+1	0	0
Bunthaus	+1		0
Zollenspieker	+1	+0,5	0
Geesthacht			−0,5

* Diese Flut wurde 1986 von der Länderarbeitsgruppe als Bemessungssturmflut für die Elbe vorgeschlagen. Einzelheiten dazu in „Die Küste", H. 47, 1988

Würde man das Wehr bei Sturmfluten durchgehend geschlossen lassen, so ergäben sich in Hamburg folgende HThw-Erhöhungen:

Pegel	HThw-Erhöhungen in dm bei geschlossenem Wehr für Sturmflut Nr. (Tab. 1)		
	78	125	147
Hbg.-St. Pauli	0,5	0,5	0
Bunthaus	1	1,5	0,5
Zollenspieker	4	4	2

Für die Sturmflut Nr. 78 (16./17. 2. 62) wurde das Schließen des Wehres auch im hydraulischen Modell des FRANZIUS-INSTITUTS untersucht und brachte für St. Pauli 0 (dhi: +0,5), Bunthaus +2 (+1) und für Zollenspieker +4,5 (+4) dm (NASNER u. PARTENSCKY, 1977).

Ohne auf weitere Details einzugehen, lassen die Simulationen den Schluß zu, daß der Bau der Staustufe bei Geesthacht nicht zu einer Sturmfluterhöhung im Stromspaltungsgebiet geführt hat, wenn die Verschlüsse entspr. obigen Ausführungen gesteuert werden. Eine Optimierung der Steuerung ist anzustreben. Dazu könnten Modellrechungen dienen.

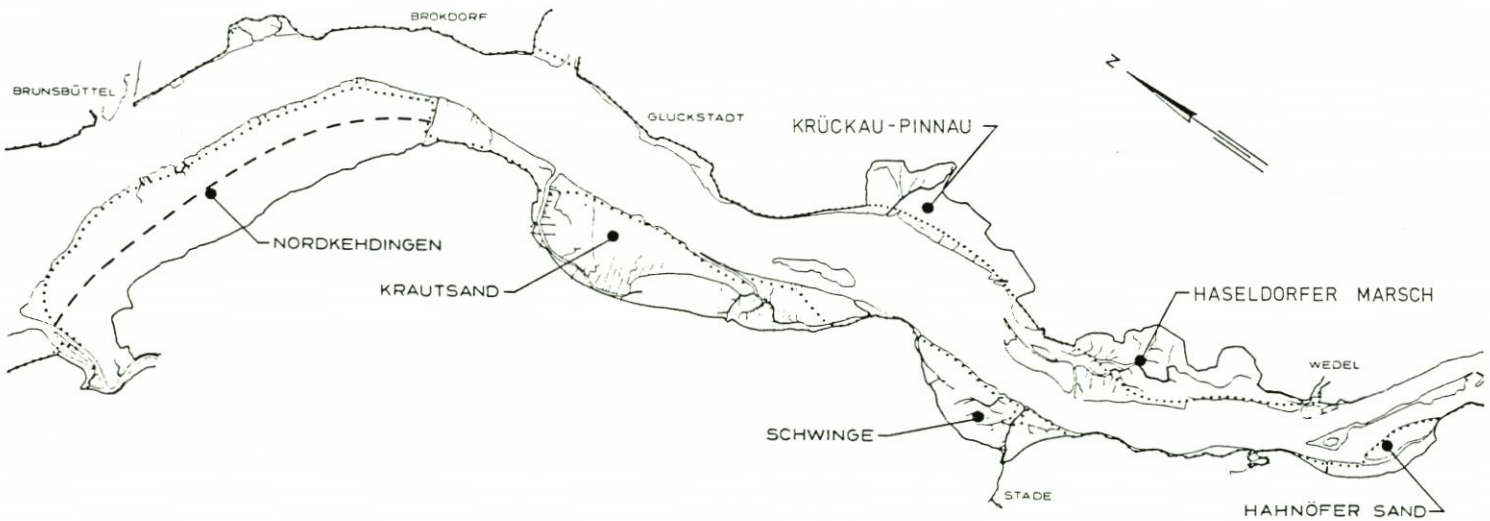
3.2 Absperrung von Nebenflüssen

Die Nebenflüsse der Elbe waren nicht in das dhi-Modell einbezogen; die großen mündungsnahen, besonders wirksamen Überflutungsgebiete sind allerdings enthalten. Abb. 6 zeigt sie für die Schwinge, Krückau, Pinnau, Stör und Oste. Entsprechendes gilt oberhalb Hamburgs auch für Ilmenau und Seeve.

Die Wirkung einer Absperrung eines Nebenflusses auf die Sturmfluthöhen in der Elbe entsteht durch

- Entzug des mündungsnahen Raumes (im Modell berücksichtigt),
- Entzug des Stauraumes im oberen Nebenfluß (zeitlich erst spät wirksam; nicht im Modell enthalten),
- Entzug des Zuflusses in die Elbe (nicht im Modell enthalten, aber in einer Studie speziell untersucht; Thw-Erhöhungen bleiben unter 0,5 dm).

Die erste Teilwirkung kann je nach Lage des Gebietes zum örtlichen Wind positiv – durch



—— Lage von Deichen in 1950
····· Lage von Deichen in 1977
---- Lage von Sommerdeichen. 1950.

Abb. 6: Lage der an der Unterelbe untersuchten Eindeichungen

Anstau des Wassers im Einflußgebiet der Absperrung – oder negativ – durch Entzug vormals örtlich entstehenden Flachwasser-Windstaus – sein und stromauf im Betrag zunehmen. Die beiden übrigen Teilwirkungen sind dagegen kleiner und gegeneinander gerichtet hinsichtlich der Wasserstände in der Elbe.

Da die Nebenflüsse durch Sturmflutsperrwerke gesichert sind, die erst geschlossen werden, wenn Wasserstände 0,5 bis 1,5 m über MThw liegen oder erwartet werden, ist der Einfluß auf das mittlere Tidegeschehen unbedeutend*. Zur Wirkung der Absperrung der Nebenflüsse auf die Sturmfluthöhen gab es folgende Untersuchungen:

- Franzius-Institut (1963 bis 1968) für Nr. 78 sowie eine gegen diese um 1 m erhöhte Sturmflut:
  a) Ilmenau und Seeve:

Hbg.-St. Pauli:	0 dm	Zollenspieker:	+ 0,5 bis 1 dm
Bunthaus:	+ 0,5 dm	Geesthacht:	0 dm

  b) Lühe: Mündungssperrwerk im Vergleich zum 1939 gebauten Sperrwerk ohne Einfluß
  c) Schwinge:

Kollmar:	0 dm	Stadersand:	0 dm
Grauerort:	+ 0,5 dm	Hbg.-St. Pauli:	0 dm

  d) Krückau und Pinnau:

Glückstadt:	0 dm	Stadersand:	0 dm
Mündungsbereich:	+ 0,5 dm	Hbg.-St. Pauli:	0 dm

  e) Stör: Keine merkliche Wirkung, obwohl dieser Nebenfluß bis Itzehoe im Modell nachgebildet war.
- Hansen (1965):
  Abdämmung aller Nebenflüsse von Geesthacht bis zur See erhöht das HThw der Sturmflut Nr. 78 in Hbg.-St. Pauli um 0,5 dm.
- dhi-Modell:
  Die Untersuchungen im dhi-Modell brachten folgende HThw-Erhöhungen:

Ort	HThw-Erhöhung in dm infolge Absperrung der			
	Ilmenau		Seeve	
	Nr. 125	147	125	147
Hbg.-St. Pauli	0	0	0,5	0,5
Bunthaus	0,5	0,5	1,5	1
Over	1	0,5	2	1,5
Zollenspieker	1,5	1	2	1
Uhlenbusch	1,5	1	2	1
Altengamme	1		1,5	

* Die Sperrwerke werden geschlossen, sobald erwartet werden:

	über	Fertigstellung:
Oste:	2,0 m NN	1968
Stör, Krückau, Pinnau:	2,5 m NN	1975/1969/1969
Schwinge:	2,2 m NN	1971
Lühe:	2,0 bis 2,2 m NN	1967
Este:	2,8 m NN	1967
Billwerder Bucht:	3,5 m NN	1966
Seeve:	3,3 m NN	1966
Ilmenau:	3,3 m NN	1973

Somit kann davon ausgegangen werden, daß alle Sperrwerke geschlossen sind, wenn $HThw_{Cux} > 750$ cm NN – 5 m eintritt.

Die Küste, 47 (1988), 51-101

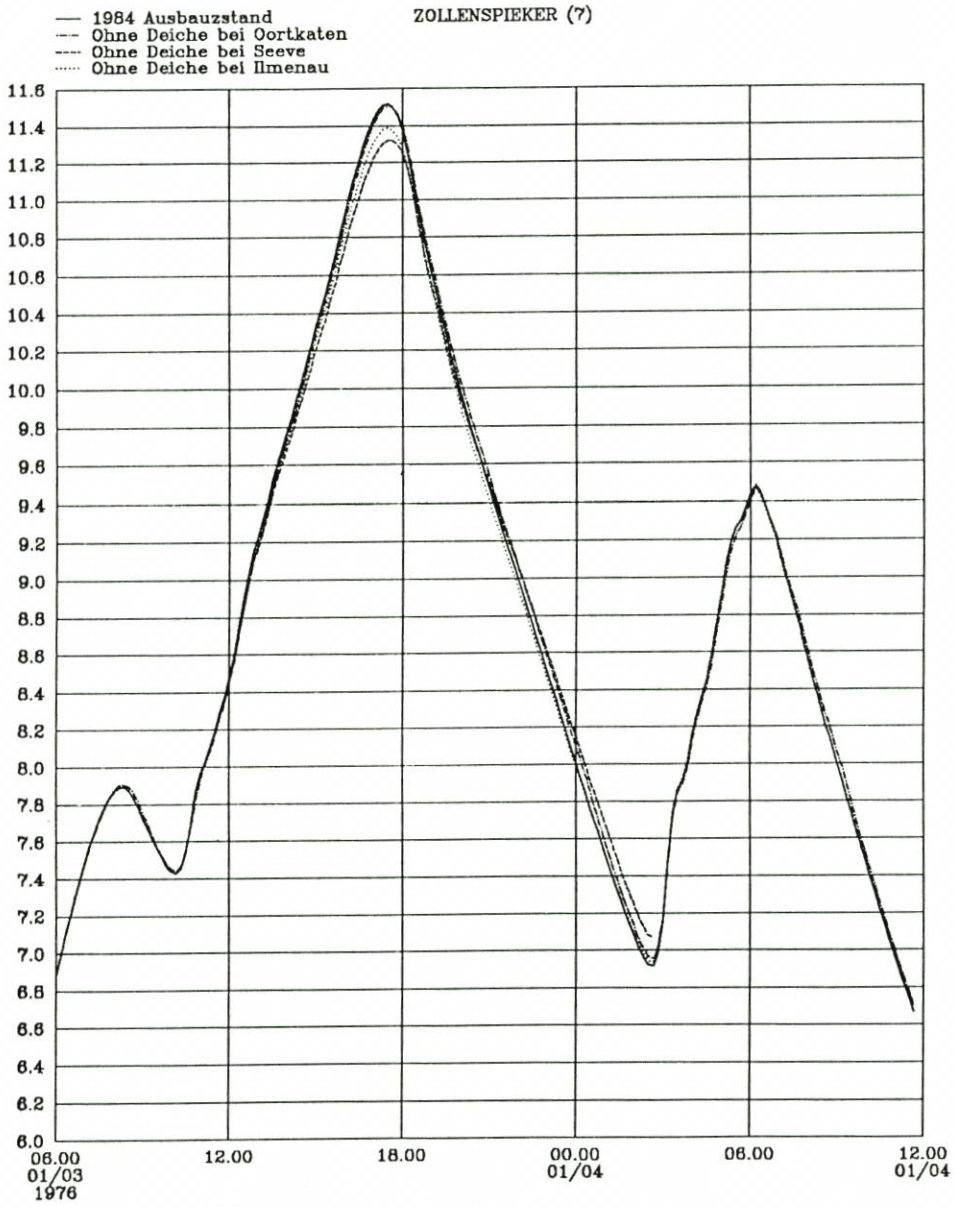


Abb. 7: Wirkung der Eindeichung bei Oortkaten und der Absperrungen von Seeve und Ilmenau auf den Ablauf der Sturmflut vom 3.1. 76 bei Zollenspieker (nacheinander wurden die Deiche vor O., I. und S. entfernt)

Die Daten wurden ermittelt, indem bei sonst wie heute vorhandenen Deichen jeweils die zu untersuchende Absperrung beseitigt wurde. Die sich dadurch z. B. bei Zollenspieker zeigenden Entlastungen sind auf Abb. 7 abzulesen. Dabei muß diese Abminderung durch Öffnung im Zustand 1984 nicht zwangsläufig genauso groß sein wie die Erhöhung durch Absperrung eines Nebenflusses im (Modell-)Zustand 1960, als in den in Kap. 1 beschriebenen

Vorläufer-Modellen die übrigen Vordeichungen noch nicht ausgeführt waren. Man kann sogar davon ausgehen, daß die meßbare Wirkung in letzterem Falle kleiner ausfiel, weil die zur Verfügung stehende Ausgleichsfläche größer war.

So sind die Ergebnisse aus den einzelnen Modellen für die HThw-Veränderungen bei verschieden hohen Sturmfluten nicht als widersprüchlich zu deuten, womit als generelle Aussage steht:

Die Absperrungen von Ilmenau und Seeve erhöhen die Scheitel hoher Sturmfluten bei Zollenspieker um 2 bis 3 dm, bei Hbg.-St. Pauli um 0,5 bis 1 dm, unterhalb Hamburgs nicht.

Im Modell 1977 wurde – ebenfalls durch Öffnung bei ansonsten heutiger Deichlinie – der gemeinsame Einfluß aus den mit Vordeichungen verbundenen Absperrungen von Schwinge, Pinnau und Krückau einschl. der Eindeichung des Hahnöfer Sandes mit Abdämmung der Borsteler Nebenelbe (Abb. 6) untersucht. Dabei ist festzustellen, daß die Insel Hahnöfer Sand schon 1962 im Gelände auf 5,3 m NN lag und daher diese Maßnahme allein nur geringe Wirkung haben konnte.

Die gen. Veränderungen brachten im Modell folgende HThw-Erhöhungen:

Pegel	HThw-Erhöhung in dm für Sturmflut Nr.					
	78	125	147	148	HIST/1*	Nach-HIST/1*
Brunsbüttel	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Kollmar	1	1	1,5	1,5	1,5	1
Stadersand	1	1	1	1	1,5	1
Hbg.-St. Pauli	0,5	1	1	1	1	1
Zollenspieker	1	1	1,5	1	1,5	1,5

* Eine Reihe von Untersuchungen wurde mit der von PLATE (1983) konstruierten sehr hohen Sturmflut vorgenommen ($HThw_{Hbg}$ = rd. 7,5 m NN); die Nachtide ist als „Nach-HIST/1" bezeichnet

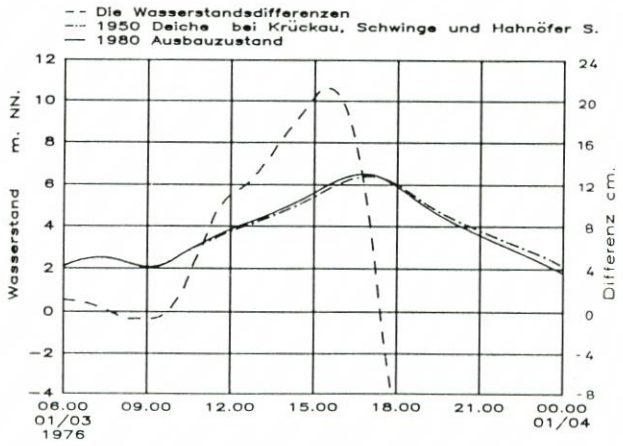


Abb. 8: Wirkung der Absperrung der Mündungsgebiete von Krückau, Pinnau und Schwinge sowie der Eindeichung des Hahnöfer Sandes auf den Ablauf der Sturmflut vom 3. 1. 76 bei Hbg.-St. Pauli einschl. der (in größerem Maßstab gezeichneten) Differenzkurve

Die Küste, 47 (1988), 51-101

Das Beispiel auf Abb. 8 zeigt für Hbg.-St. Pauli neben den Tidekurven vor und nach Ausführung der Baumaßnahme auch die Differenzkurven zwischen beiden, letztere in starker Vergrößerung. Dabei wird deutlich, daß diese Kurven ihr Maximum vor dem HThw erreichen, daß also zwar während der Flut am 3. 1. 76 Erhöhungen bis über 2 dm auftreten, die vor dem HThw aber schnell wieder abnehmen und kurz danach bereits zu Absenkungen führen. So ist die Differenz zwischen den (wegen Phasenverschiebung nicht zeitgleich eintretenden) HThw zwar ein wichtiger Parameter, ist aber nicht repräsentativ für den Verlauf der Wasserstandsdifferenzen.

Setzt man wenige Zentimeter als HThw-Erhöhung durch Abdämmung der Borsteler Nebenelbe an, so erlauben die Darstellungen auf Abb. 9 folgende generelle Aussage:

Die Sturmflutsperrwerke vor der Schwinge, Pinnau und Krückau erhöhen – vor allem wegen der beträchtlichen Vorlandeindeichung – die Scheitel hoher Sturmfluten bei Stadersand und bei Hbg.-St. Pauli um rd. 1 dm, bei Zollenspieker um 1 bis 1,5 dm.

Ergänzende Untersuchungen mit der Bemessungssturmflut 2085A brachten damit weitgehend übereinstimmende Ergebnisse: Die Absperrung des Schwingemündungsgebietes bewirkt von Brunsbüttel bis Zollenspieker HThw-Erhöhungen um rd. 0,5 dm, diejenige des gemeinsamen Mündungsgebietes von Krückau und Pinnau – allerdings einschließlich der Absperrung der Billwerder Bucht – von Brunsbüttel bis Altengamme noch einmal denselben Betrag.

3.3 Vordeichungen von Geesthacht bis zur Billwerder Bucht

Der Einfluß der Vordeichungen zwischen Geesthacht und Billwerder Bucht auf die Höhe der Sturmflutscheitel in der Elbe wurde von Hansen (1965) zu 1 dm Erhöhung in Hbg.-St. Pauli bestimmt. Auf Abb. 7 sind die Absperrungen von Seeve (5,5 km²) und Ilmenau (6,5 km²) sowie Vordeichungen bei Oortkaten (1,6 km²) berücksichtigt. Für den heutigen Zustand der Elbe lassen sich deren Wirkungen als Erhöhungen hoher Sturmflutscheitel wie folgt zusammenfassen (dhi-Modell 1984):

Blankenese	0 bis 0,5 dm
Hbg.-St. Pauli	0,5 bis 1 dm
Harburg	1 bis 1,5 dm
Bunthaus	1,5 bis 2,5 dm
Over	2 bis 3 dm
Zollenspieker	2 bis 3 dm
Uhlenbusch	2 bis 3 dm
Altengamme	rd. 2 dm

Damit ist der Einfluß auf der Strecke Uhlenbusch–Over am größten, und er klingt stromabwärts langsam bis Blankenese ab. Stromauf reicht er deutlich über Altengamme und – bei geöffnetem Wehr – sicher auch über Geesthacht hinaus.

Die Wirkung der Absperrung der Billwerder Bucht (mit anschließenden Kanälen rd. 1,7 km²; siehe Abb. 10) wurde im Model 1984 mit der Sturmflut 2085A untersucht, wie in Kap. 3.2 bereits erwähnt. Durch Vergleich der Zustände vor und nach gleichzeitiger Absperrung von Billwerder Bucht, Krückau und Pinnau mit dem für andere hohe Sturmfluten untersuchten Einfluß der gleichzeitigen Abdämmung von Krückau, Pinnau und Schwinge sowie der Absperrung allein der Schwinge ist festzustellen, daß die Abdämmung der Billwerder Bucht praktisch keinen Einfluß auf hohe HThw hat, auch nicht im Stromspaltungsgebiet. Einzelheiten gehen aus Tab. 4 und 5 hervor.

Die Küste, 47 (1988), 51-101

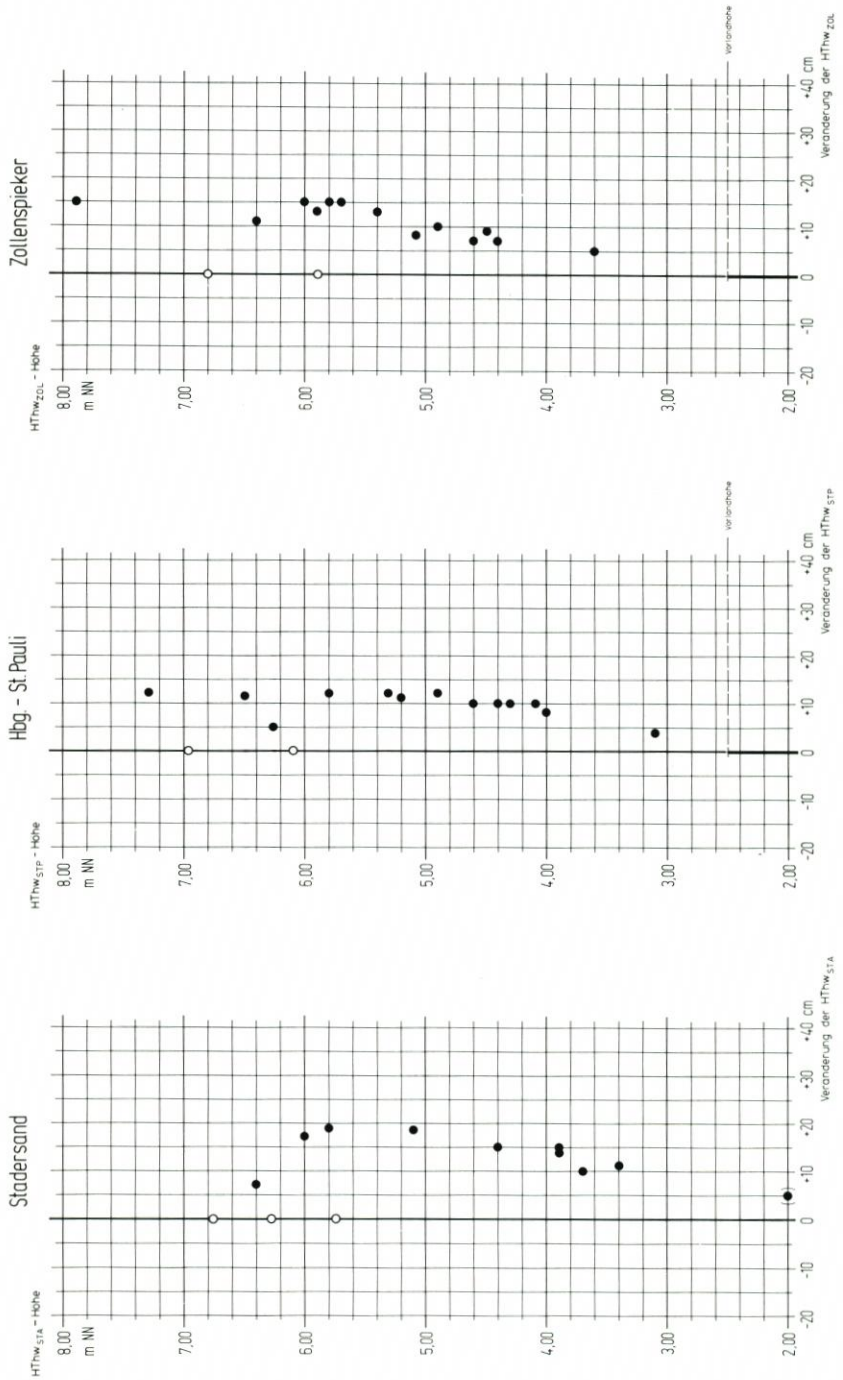


Abb. 9: Wirkung der Absperrung der Mündungsgebiete von Krückau, Pinnau und Schwinge sowie der Eindeichung des Hahnöfer Sandes auf die HThw-Höhen verschieden hoher Sturmfluten nach dhi; offene Kreise zeigen die Ergebnisse des Franzius-Instituts

Die Küste, 47 (1988), 51-101

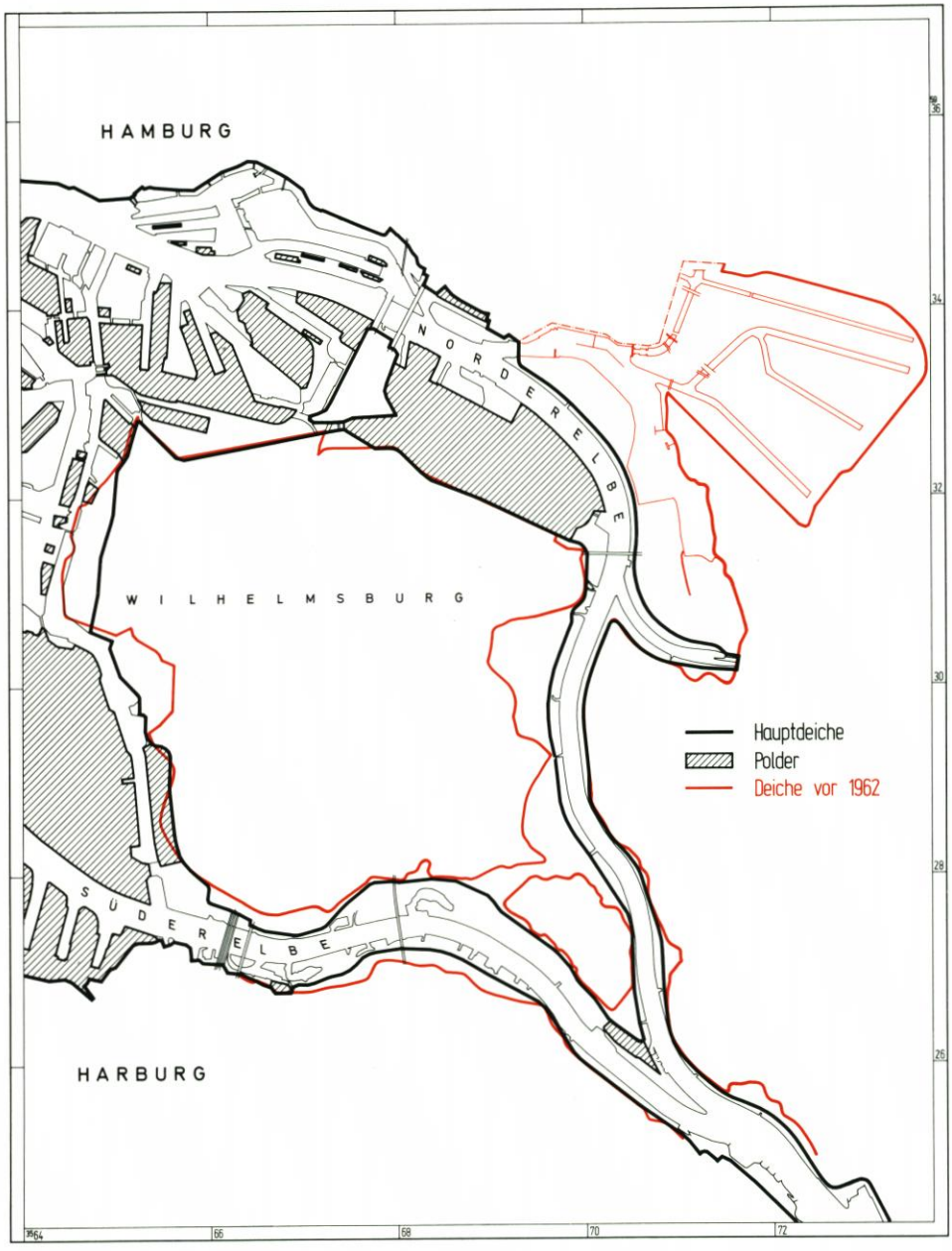


Abb. 10: Lage der Hauptdeiche im östlichen Stromspaltungsgebiet vor 1962 und heute

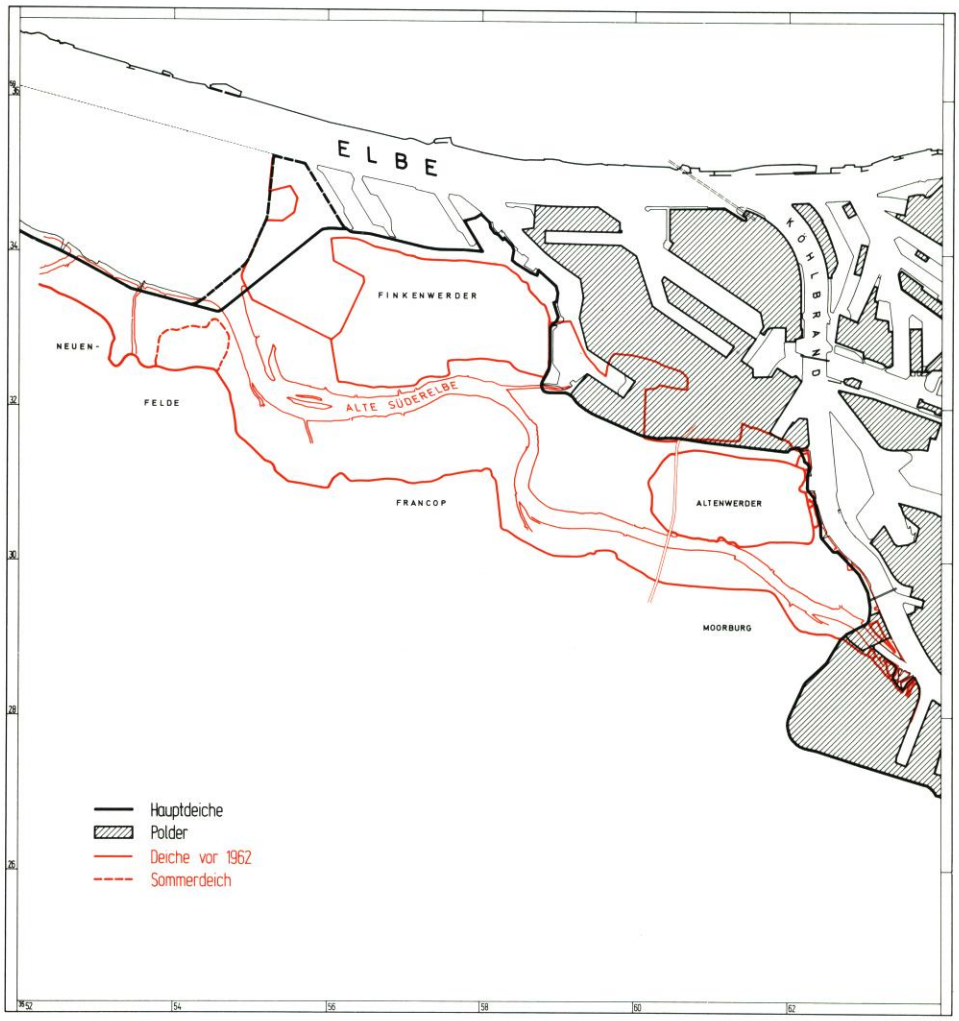


Abb. 11: Lage der Hauptdeiche im westlichen Stromspaltungsgebiet vor 1962 und heute

3.4 Neue Deichlinie von Harburg bis zur Este mit Absperrung der Alten Süderelbe

Die Absperrung der alten Süderelbe mit der neuen Deichlinie ab 1962 (Abb. 11) wurde zuerst im Modell des FRANZIUS-INSTITUTS (1962 bis 1965) untersucht. Dort brachte sie beim topographischen Zustand der Elbe etwa z. Zt. der Baumaßnahme (1962) folgende Erhöhungen hoher Sturmfluten:

Mündung bis Stadersand	0
Schulau	0 bis 1 dm
Blankenese	0 bis 0,5 dm
Hbg.-St. Pauli, Bunthaus	0,5 dm

Die Küste, 47 (1988), 51-101

Das Modell 1977 des dhi ergab folgende HThw-Erhöhungen:

Ort	HThw-Erhöhung in dm für Sturmflut Nr.			
	78	125	147	2085A
Brunsbüttel	0	0	0	0
Brokdorf	1	0,5	0,5	0
Stadersand	2	1,5	2	0,5
Schulau				1
Hbg.-St. Pauli	1	1,5	1,5	0,5
Schöpfstelle				0,5
Altenwerder	1	1,5	1,5	
Bunthaus	1	1,5	1,5	0,5
Zollenspieker	1,5	1,5	2	0,5
Geesthacht				0,5

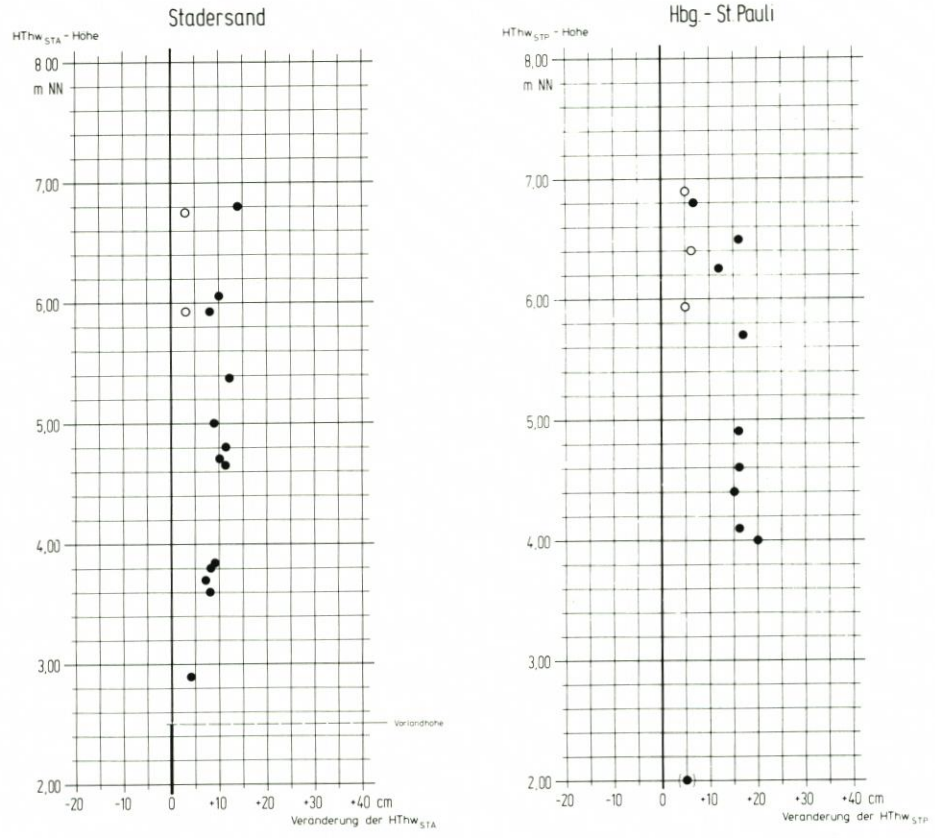


Abb. 12: Wirkung der neuen Deichlinie von Harburg bis zur Este auf die HThw-Höhen verschieden hoher Sturmfluten nach dhi; offene Kreise zeigen die Ergebnisse des Franzius-Institus

Da die Voraussetzungen in den physikalischen und numerischen Untersuchungen nicht gleich waren, können Übereinstimmungen in den Ergebnissen für den Hamburger Bereich nicht erwartet werden. Die detaillierten Darstellungen auf Abb. 12 erlauben die Zuordnung der Wirkung zur HThw-Höhe für

Stadersand mit bis 2 dm
Hbg.-St. Pauli und Bunthaus mit 0,5 bis 1,5 dm

für hohe Sturmfluten.

Nach den Erfahrungen aus den physikalischen Modellversuchen war zu vermuten, daß die Eindeichung auf Grund ihrer Lage nur im eigentlichen Hafengebiet bedeutsamen Einfluß zeigen würde. Dies bestätigen die Berechnungen nicht, denn die Erhöhung der Sturmfluten stromab von Hamburg erwies sich als ebenso deutlich: Die Erhöhung der HThw verschwindet erst weit stromab und ist in Brunsbüttel unbedeutend klein. Auf Grund der heutigen Kenntnisse werden die Ergebnisse des dhi eher als richtig angesehen. Danach nimmt allerdings die Wirkung dieser Maßnahme mit der Höhe hoher Sturmfluten leicht ab.

Zusammenfassend ist festzuhalten, daß die Schließung der Alten Süderelbe und die damit verbundenen Eindeichungen erheblichen Einfluß auf die Sturmflutverhältnisse sowohl im Hafen als auch im oberen Teil der Unterelbe und in der Oberelbe bis Geesthacht haben.

3.5 Eindeichungen des Hahnöfer Sandes und vor den Schwinge-, Pinnau- und Krückaumündungen

Die Wirkungen der gen. Eindeichungen (Abb. 6) sind bereits großenteils in Kap. 3.2 behandelt worden, siehe dazu Abb. 8 und 9 sowie Abb. 13. Es handelt sich dabei um

- die Eindeichung des Hahnöfer Sandes mit Absperrung der Borsteler Nebenelbe (5,6 km^2),
- die Absperrung der Schwinge mit Eindeichung des Bützflether Sandes (11,4 km^2),
- die Absperrung von Pinnau und Krückau mit Eindeichung des zwischenliegenden Vorlandes (16,5 km^2).

Modellversuche im Franzius-Institut brachten ergänzend zu den Ausführungen in Kap. 3.2 das Ergebnis, daß „selbst bei einer Sturmflut, wie sie am 16./17. 2. 1962 eingetreten war, und auch bei einer noch höheren Sturmflut die Eindeichung von Hahnöfersand* mit Durchdämmung der Binnenelbe an beiden Enden keinen nennenswerten Einfluß auf die Scheitelwasserstände hat. Eine Erhöhung des Scheitelwasserstandes einer extremen Sturmflut um etwa 2 cm wird am Pegel Schulau zu erwarten sein. Diese Erhöhung wird bereits kurz oberhalb von Hahnöfersand, bestimmt noch vor Blankenese, abgeklungen sein. Nach unterstrom wird sich der Einfluß der Eindeichung höchstens noch bis zur Abzweigung der Hahnöfer Nebenelbe von der Unterelbe nachweisen lassen“ (Nasner u. Partenscky, 1977).

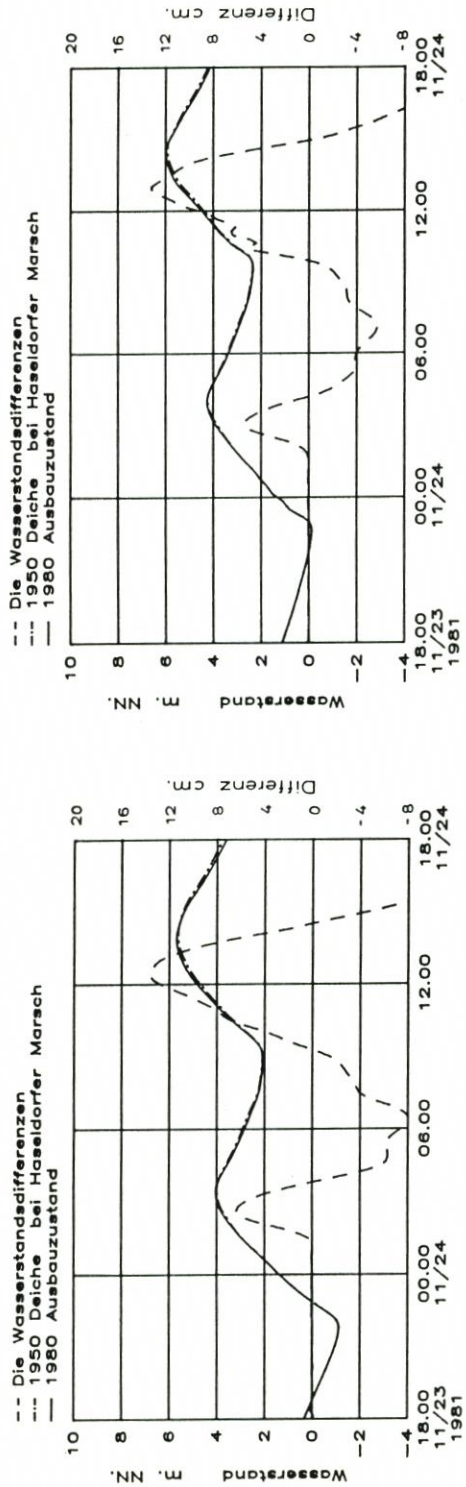
Zusammenfassend ist festzustellen, daß diese Maßnahmen, die zwischen Estemündung und Kollmar durchgeführt wurden, nach dhi-Berechnungen HThw-Erhöhungen bewirken, die für hohe Sturmfluten

bei Stadersand	1 bis 1,5 dm
bei Hbg.-St. Pauli	0,5 bis 1,5 dm
bei Zollenspieker	1 bis 1,5 dm

betragen (Abb. 9).

* während der Sturmflut von 1962 lag das Gelände dieser Insel bereits auf 5,3 m NN.

Die Küste, 47 (1988), 51-101



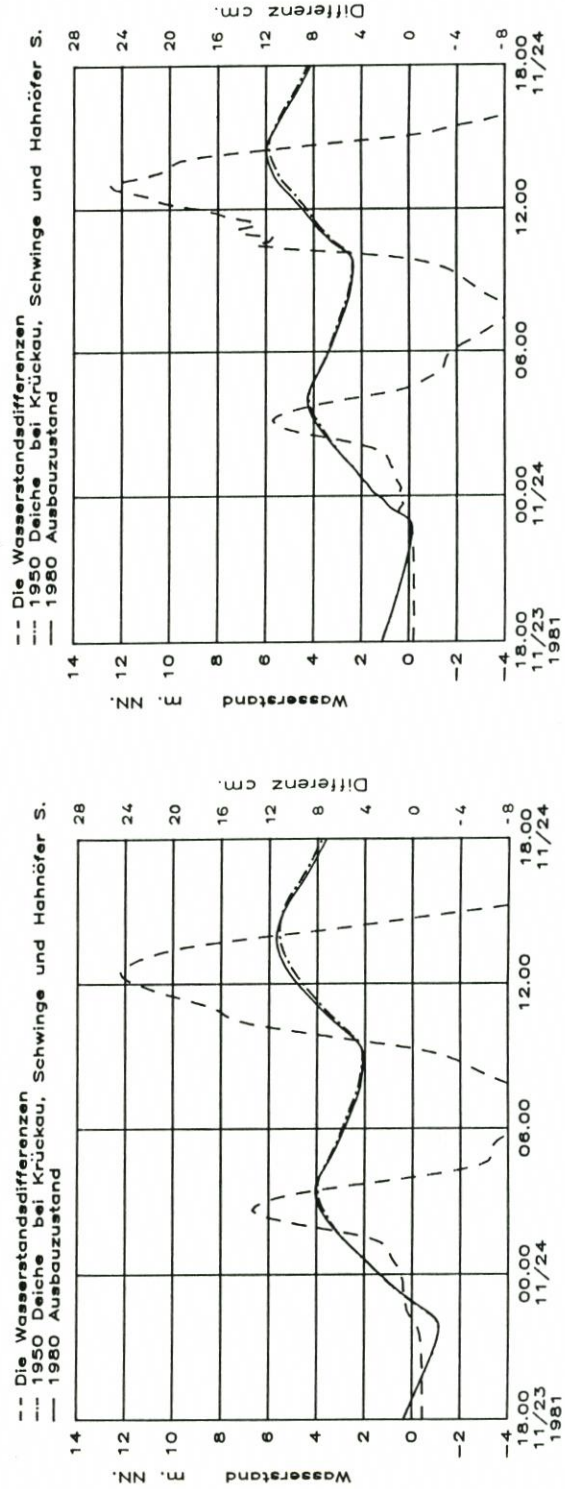


Abb. 13: Wirkung der Eindeichung der Haseldorfer Marsch (oben) sowie der Absperrung der Mündungsgebiete von Krückau, Pinnau und Schwinge mit Eindeichung des Hahnöfer Sandes (unten) auf den Ablauf der Sturmflut vom 24.11. 81 bei Hbg.-St. Pauli (links) und Bunthaus einschl. der Differenzkurven

Die Küste, 47 (1988), 51-101

3.6 Eindeichung der Haseldorfer Marsch

Die Eindeichung der Haseldorfer Marsch (21 km²) wurde in mehreren Modellen simuliert, und zwar

- im Franzius-Institut 1966 für die Sturmflut Nr. 78 ohne Deichbrüche; zu den Vordeichungen am nördlichen Elbufer heißt es bei Nasner und Partenscky:
  „Die Vordeichungen bei Glückstadt, bei Haseldorf und zwischen Hetlingen und Schulau (Abb. 6) sind für die Tideverhältnisse in der Elbe so unbedeutend, daß auch bei extrem hohen Sturmfluten kein merklicher Einfluß durch sie an den Pegeln in der Elbe festzustellen ist";
- bei der Bundesanstalt für Wasserbau für die Sturmfluten Nr. 125 und 127 ohne Deichbrüche mit dem Resultat
  Erhöhung der HThw

Cuxhaven bis Ostemündung	0
Ostemündung bis Hamb. Hafen	0,5 bis 1 dm
Hamb. Hafen bis Geesthacht	0 bis 1 dm

  nach Berndt et al. (1983);
- von Sündermann und Zielke (1983) mit dem Ergebnis von Erhöhungen für dieselben Sturmfluten von

Otterndorf	0
Brunsbüttel bis Krautsand	0 bis 0,5 dm
Stadersand	1 dm
Schulau, Hbg.-St. Pauli	0,5 dm

- von Theunert und Zielke (1983) für die Sturmflut Nr. 125 mit einer Erhöhung der HThw wie folgt:

Otterndorf	0
Brunsbüttel bis Hbg.-St. Pauli	0,5 dm

- Die Untersuchungen im dhi ergaben folgende Zahlen, wiederum ermittelt im Modell 1977 durch Beseitigung dieser Maßnahme. Daraus ist abzuleiten:

Ort	HThw-Erhöhung in dm für Sturmflut Nr.				
	78	125	147	HIST/1	Nach-HIST/1
Brunsbüttel	0,5	0	0	0,5	0
Brokdorf	0,5	0,5	0,5	1	0,5
Kollmar	0,5	1	1	1	1
Stadersand	0,5	0,5	1	1	1
Hbg.-St. Pauli	0	0,5	0,5	0,5	0,5
Bunthaus	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Zollenspieker	0,5	0,5	0,5	1	1

Wie sich die Wasserstandsdifferenzen in der Elbe durch die Eindeichung der Haseldorfer Marsch für die Sturmflut Nr. 147 einstellen, zeigt Abb. 13 für die Pegel Hbg.-St. Pauli und Bunthaus. Der Einfluß wirkt zuerst bei Stadersand, dann bei Hbg.-St. Pauli und schließlich etwa zeitgleich bei Brokdorf und Bunthaus. Einzelheiten über die HThw-Veränderungen gibt Abb. 14. Danach ist zusammenzufassen, daß – in weitgehender Übereinstimmung von Untersuchungen an fünf verschiedenen Modellen – die hier behandelte Eindeichung zu folgenden Erhöhungen bei hohen Sturmfluten führt:

Die Küste, 47 (1988), 51-101

Brunsbüttel:	0 bis 0,5 dm
Brokdorf:	0 bis 1 dm
Stadersand:	0,5 bis 1 dm
Hbg.-St. Pauli:	0 bis 1 dm
Zollenspieker:	0,5 bis 1 dm

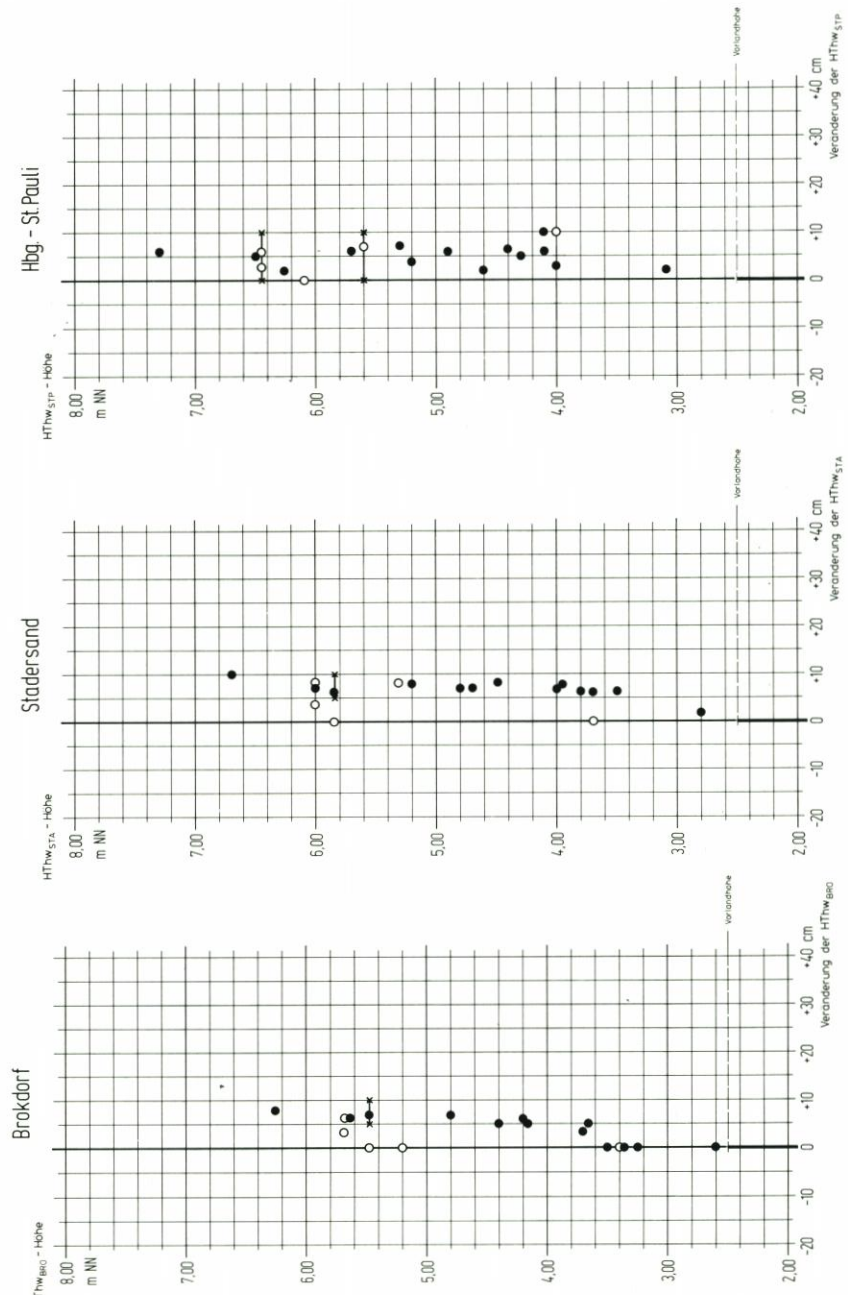


Abb. 14: Wirkung der Eindeichung der Haseldorfer Marsch auf die HThw-Höhen verschieden hoher Sturmfluten nach dhi; offene Kreise zeigen die Ergebnisse des Franzius-Institus, von Sündermann/Zielke und von Theunert/Zielke, Kreuze diejenigen der Bundesanstalt für Wasserbau

Die Küste, 47 (1988), 51-101

3.7 Eindeichung des Krautsandes

Die Eindeichung der Elbinsel Krautsand einschl. Abdämmung von Ruthenstrom und Wischhafener Nebenelbe (Abb. 6) ist mit 30 km² die zweitgrößte hier behandelte. Der Einfluß auf die Scheitelwasserstände wurde folgendermaßen ermittelt:

- Franzius-Institut 1966 für die Sturmflut Nr. 78 sowie eine um 1 m erhöhte Flut ohne Deichbrüche:

Brunsbüttel	0
Brokdorf	+ 0,5 dm (Erhöhung)
Glückstadt	− 0,5 dm (Ermäßigung)
Stadersand bis Zollenspieker	− 1 dm (Ermäßigung)

  (Dieses Modell ist das einzige, das für diese Maßnahme eine HThw-Ermäßigung brachte. Daher muß davon ausgegangen werden, daß es im Bereich Krautsand nicht richtig geeicht war.)
- Bundesanstalt für Wasserbau für die Sturmfluten Nr. 125 und 127 ohne Deichbrüche:

Cuxhaven bis Ostemündung	0
Ostemündung bis Geesthacht	0 bis + 1 dm

  nach Berndt et al. (1983) und internen Berichten.
- Sündermann und Zielke (1983), ebenfalls für diese beiden Sturmfluten:

Otterndorf	0
Brunsbüttel	+ 1 bis 1,5 dm
Brokdorf	+ 1 bis 2 dm
Krautsand	+ 1,5 bis 2,5 dm
Stadersand bis Hbg.-St. Pauli	+ 0,5 dm

- Theunert und Zielke (1983) für die Sturmflut Nr. 125:

Otterndorf	+ 0,5 dm
Brunsbüttel, Brokdorf	+ 1 dm
Krautsand bis Hbg.-St. Pauli	+ 0,5 dm

- dhi im Zustand der Elbe von 1977:

Ort	HThw-Erhöhung in dm für Sturmflut-Nr.					
	78	125	147	HIST/1	Nach-HIST/1	2085A
Brunsbüttel	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Brokdorf	0,5	1	1	1	0,5	1
Kollmar	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
Glückstadt						0,5
Staderstand	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5
Hbg.-St. Pauli	0	0,5	1	1	0,5	0,5
Bunthaus	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Zollenspieker	0,5	1	1	1	0,5	0,5
Geesthacht						0,5

Die Entwicklung der Wasserstandsdifferenzen bei der Sturmflut Nr. 125 zeigt Abb. 15 für Brokdorf und Stadersand. Das Maximum der Abweichung liegt während der Flut und ist zuerst bei Brokdorf und dann folgend bis Bunthaus erkennbar. Die Untersuchungen der HThw-Erhöhungen durch die Baumaßnahme zeigen übereinstimmend (außer Franzius-Institut für Stadersand und Hbg.-St. Pauli) für hohe Sturmfluten Erhöhungen (Abb. 16 mit drei Pegeln):

Die Küste, 47 (1988), 51-101

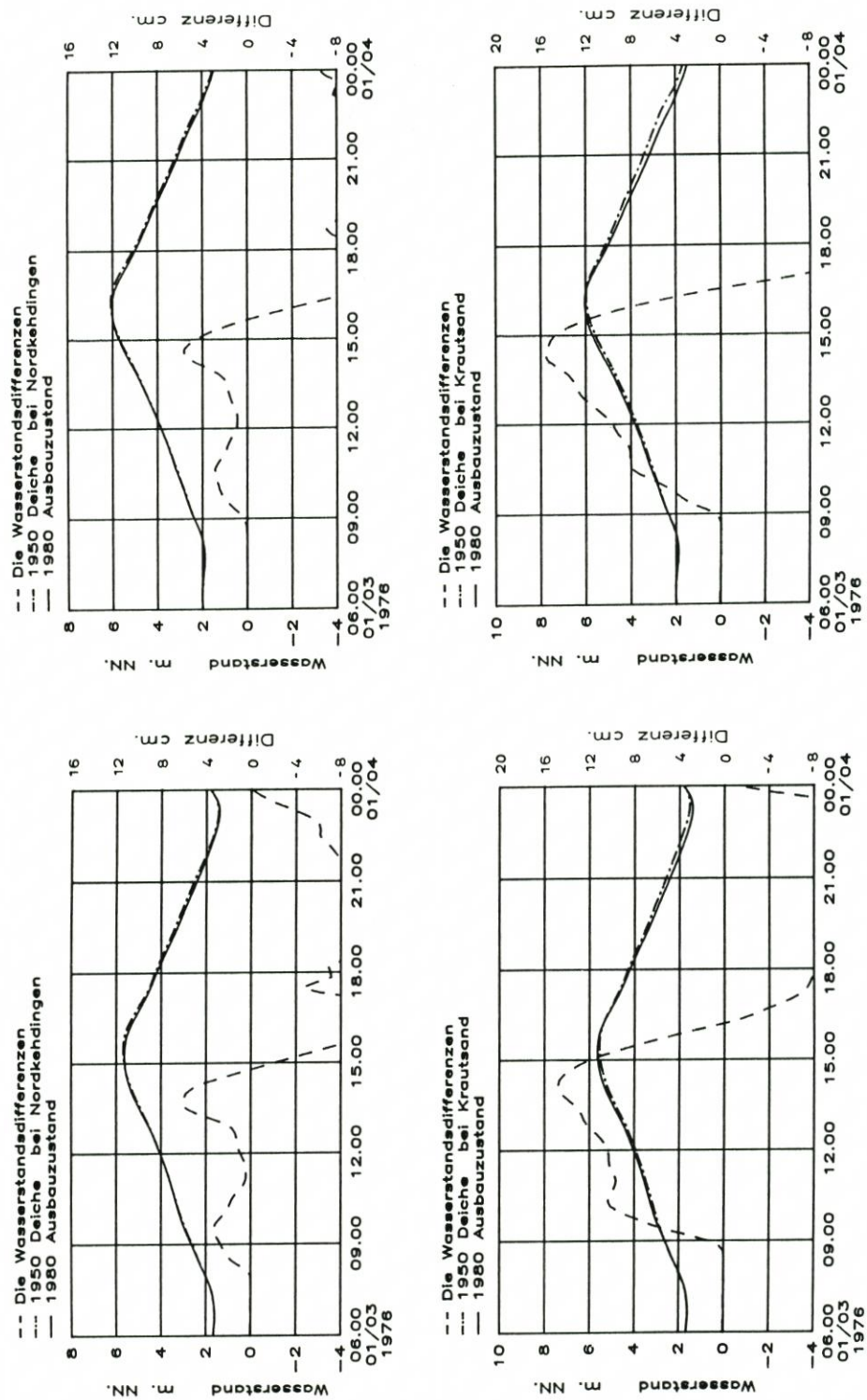


Abb. 15: Wirkung der Eindeichung von Nordkehdingen (oben) und Krautsand (unten) auf den Ablauf der Sturmflut vom 3.1. 76 bei Brokdorf (links) und Stadersand einschl. der Differenzkurven

Brunsbüttel	rd. 0,5 dm
Brokdorf	rd. 1 dm
Stadersand	rd. 0,5 dm
Hbg.-St. Pauli	0 bis 1 dm
Zollenspieker	0,5 bis 1 dm

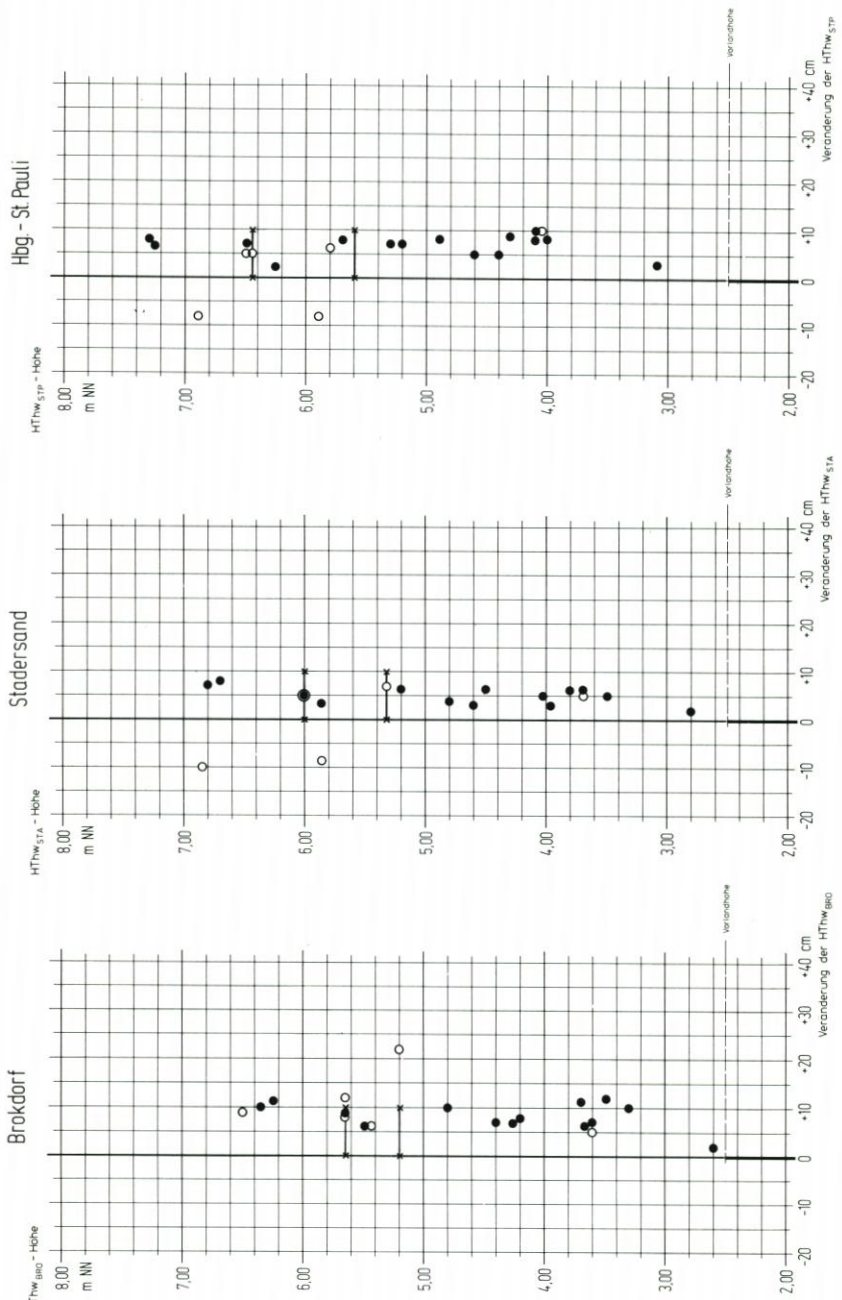


Abb. 16: Wirkung der Eindeichung des Krautsandes auf die HThw-Höhen verschieden hoher Sturmfluten nach dhi; offene Kreise zeigen die Ergebnisse des Franzius-Institus, von Sündermann/Zielke und von Theunert/Zielke, Kreuze diejenigen der Bundesanstalt für Wasserbau

Die Küste, 47 (1988), 51-101

3.8 Eindeichung Nordkehdingens

Mit rd. 55 km² Fläche zwischen Freiburg und der Ostemündung, von der etwa die Hälfte zuvor durch einen Sommerdeich geschützt war, ist die Eindeichung des Nordkehdinger Außendeichslandes die größte durchgeführte Maßnahme (Abb. 6). Auch ihre Wirkung wurde inzwischen in den o. g. fünf Modellen untersucht, wobei der Einfluß des Sommerdeiches bzw. der Bauzustände 1973 und 1976 unberücksichtigt bleiben. Es ergaben sich interessanterweise meist Ermäßigungen (−) ab Brunsbüttel:

- Franzius-Institut 1966 für Nr. 78:

Otterndorf	+ 0,5 dm
Brunsbüttel bis Stadersand	− 2 dm
Hbg.-St. Pauli bis Zollenspieker	− 1,5 dm

- Bundesanstalt für Wasserbau nach Berndt et al. (1983) für die Sturmfluten Nr. 125 und 127:

Cuxhaven bis Ostemündung	+ 0,5 bis 1 dm
Ostemündung bis Hamb. Hafen	0 bis + 0,5 dm
Hamb. Hafen bis Geesthacht	− 0,5 dm bis 0

  (Diese Versuche liefern als einzige für einen Großteil der Unterelbe HThw-Erhöhungen.)

- Sündermann und Zielke (1983) für dieselben Sturmfluten:

Otterndorf	+ 0,5 bis + 1,5 dm
Brunsbüttel	− 1 bis + 0,5 dm
Brokdorf	− 1,5 dm
Krautsand bis Schulau	− 2 dm
Hbg.-St. Pauli	− 2 bis − 1,5 dm

  (Nur die Ergebnisse in diesem Modell liefern HThw-Absenkungen in Hamburg um 2 dm und fallen damit aus dem Rahmen.)

- Theunert und Zielke (1983) für Sturmflut Nr. 125:

Cuxhaven bis Brunsbüttel	0
Brokdorf bis Hbg.-St. Pauli	− 0,5 dm

- dhi mit unterem Modellrand 40 km unterhalb Cuxhavens:

Ort	HThw-Veränderung in dm für Sturmflut Nr.				
	78	125	147	HIST/1	Nach-HIST/1
Brunsbüttel	0	0	0	−0,5	0
Brokdorf bis Stadersand	−0,5	−0,5	−0,5	−0,5	0
Hbg.-St. Pauli bis Zollenspieker	−0,5	−0,5	−0,5	−1	0

Die Entwicklung der Wasserstandsdifferenzen an zwei Pegeln zeigt Abb. 15. Sie gestalten sich anders als durch die Eindeichung von Krautsand: Bei Flut sind zwei Maxima ausgebildet, die sich von Brokdorf mit der Tide bis Bunthaus fortpflanzen. Da der Abfall nach dem zweiten Maximum sehr früh beginnt, werden die HThw ermäßigt.

Die Abhängigkeit der HThw-Veränderung von der Sturmfluthöhe zeigt Abb. 17 für Brokdorf und für Hbg.-St. Pauli. Daraus und aus obiger Tabelle gehen folgende HThw-Ermäßigungen für hohe Ereignisse bei ziemlich großer Streuung hervor:

Brunsbüttel	0,5 bis 0 dm
Brokdorf, Stadersand	rd. 0,5 dm
Hbg.-St. Pauli, Zollenspieker	1 bis 0 dm

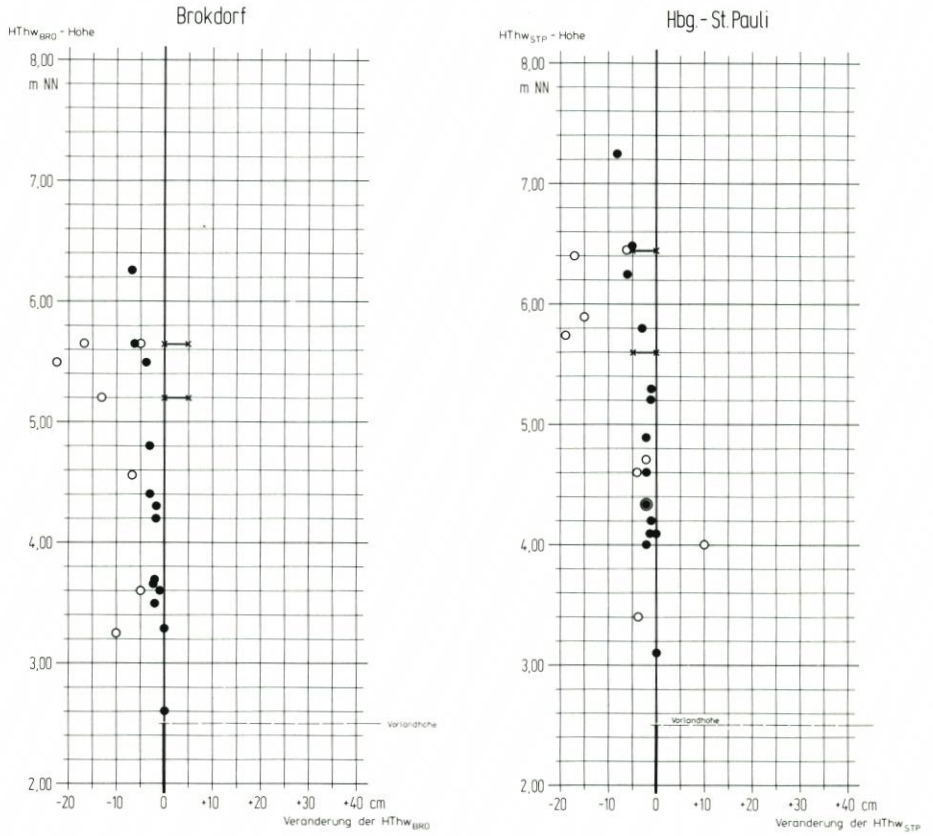


Abb. 17: Wirkung der Eindeichung Nordkehdingens auf die HThw-Höhen verschieden hoher Sturmfluten nach dhi; offene Kreise zeigen die Ergebnisse des Franzius-Instituts, von Sündermann/Zielke und von Theunert/Zielke, Kreuze diejenigen der Bundesanstalt für Wasserbau

3.9 Fahrwasservertiefungen

Schon seit Mitte des 19. Jahrhunderts bemühte man sich, das Fahrwasser der Elbe von der Mündung bis nach Hamburg zu vertiefen. Zunächst galt es nur, einzelne Barren zu beseitigen, mit der Zeit dehnte sich das Baggergebiet jedoch immer weiter aus, bis schließlich für den 13,5-m-Ausbau auch schon Strecken der Außenelbe vertieft werden mußten. Die letzten Maßnahmen waren:

1936 bis 1950 Ausbau auf 10 m unter KN
1957 bis 1961 Ausbau auf 11 m unter KN
1964 bis 1969 Ausbau auf 12 m unter KN
1974 bis 1978 Ausbau auf 13,5 m unter KN

Das Modell 1950 des dhi enthält also ein 10 m tiefes Fahrwasser*, das Modell 1977 ein 13,5 m tiefes, das Modell 1950/77 ein 10 m tiefes* bei Deichen wie 1977, das Modell 1984 ein 14 m tiefes Fahrwasser.

---

* Norderelbe oberhalb der Elbbrücken: 5 m unter KN, Köhlbrand und Süderelbe bis Harburg: 8 m unter KN

Tabelle 3. Einfluß der Fahrwasservertiefung in der Elbe von 10 auf 13,5 m KN auf die Höhen des MThw, mittelhoher (Nr. 64, 65, 66, 126, 131, 132, 146, 148) und hoher Sturmfluten (vgl. Tab. 1)

Ort	Thw- bzw. HThw-Veränderung in dm für Sturmflut-Nr.														
	mittl. Tide	64	65	66	125	126	131	132	146	147	148	HIST/1	Nach-HIST/1	2085A	2085A*
Brunsbüttel	0	0	0	0	0	0	0	0	−0,5	−0,5	−0,5	0	−0,5	0	1
Brokdorf	−0,5	0	0,5	0	0	−1	−1	−1	−1	0	−1	0	−0,5	0,5	1
Glückstadt														1	1
Kollmar	0	0,5	0,5	−0,5	0,5	−1	0	0	0	0	0	0,5	0		
Stadersand	1	1	0,5	0	1	0	1	0,5	1	0,5	0,5	1	0,5	1,5	1,5
Schulau														1,5	2
Hbg.-St. Pauli	2	1	0,5	0,5	1	1	1,5	1	2,5	1,5	1	1	0,5	1,5	1,5
Bunthaus	1,5	1	0	0,5	1	1	2	1	2,5	1	0,5	1	0,5	1	1
Zollenspieker	1,5	1	0	0	1	1	2	1,5	2	1,5	1	1	0,5	1	1
Geesthacht														1	1

* Einfluß der Fahrwasservertiefung *vor* der (damals tatsächlich noch nicht fertigen) Eindeichung von Hahnöfer Sand, Haseldorfer Marsch, Nordkehdingen und Krautsand.

Zur Untersuchung des Einflusses von Fahrwasservertiefungen in der Elbe auf die Höhe von Sturmflutscheitelwasserständen fanden eine Reihe von Modellversuchen statt, allerdings alle mit unterschiedlichen Randbedingungen, so daß sie nur bedingt vergleichbar sind:
– Franzius-Institut 1967 im Zustand der Elbe von 1960 (tatsächliche Fahrwassertiefe: knapp 11 m, in Berichten jedoch stets als „12 m" angegeben), aber mit allen Eindeichungen, für eine Vertiefung auf 15 m unter KN mit einer Sohlbreite, die fast das Doppelte der später auf 13,5 m ausgebauten betrug, und ohne Verifizierungsmöglichkeit für das vertiefte Modell. Dazu geben Nasner und Partenscky (1977) folgende Erhöhungen an:

Ort	Thw- bzw. HThw-Erhöhung in dm für		
	mittl. Tide	Sturmflut Nr. 78	78, um 1 m erhöht
Brunsbüttel	0	2	1
Glückstadt	0	2	1,5
Stadersand	2	4	4,5
Schulau	2,5	3,5	4,5
Hbg.-St. Pauli	2	4	4
Bunthaus	3	4	4,5
Zollenspieker	3	2,5	3,5

– Bundesanstalt für Wasserbau im Zustand der Elbe von etwa 1971 für eine Vertiefung von 12 auf 13,5 m bei der Sturmflut Nr. 78: Erhöhung des HThw bei Hbg.-St. Pauli um 1 dm.
– Theunert und Zielke (1983) im Zustand der Elbe von etwa 1975 mit folgenden Erhöhungen für eine Vertiefung von 11 auf 13,5 m KN:

Ort	Thw- bzw. HThw-Erhöhung in dm für	
	mittl. Tide	Sturmflut Nr. 125
Brunsbüttel	0	1,5
Brokdorf	0,5	1,5
Krautsand	1	1,5
Stadersand	2	1,5
Schulau	2,5	1,5
Hbg.-St. Pauli	2,5	1

Die Untersuchungen im dhi umfassen wiederum eine große Zahl von Sturmfluten, die in den Modellen 1950/77 und 1977 zu Vergleichen simuliert wurden. Sie bringen im einzelnen Veränderungen durch den Fahrwasserausbau von 1950 (10 m KN) auf 1977 (13,5 m KN) gemäß Tab. 3. Eine Beeinflussung durch den Oberwasserzufluß ist nicht zu erkennen.

Abb. 18 zeigt den Verlauf der Sturmflut Nr. 125 in drei Modellen des dhi – und damit auch die Vertiefungswirkung – an den Pegeln Kollmar, Stadersand, Hbg.-St. Pauli und Bunthaus. Abb. 19 demonstriert den Einfluß der topographischen Veränderungen unterhalb MTnw von 1950 bis 1978 für vier Pegel entlang der Elbe. Die Daten aus den in diesem Kapitel genannten älteren Quellen sind in Klammern angegeben, da sie – wie oben geschildert – eigentlich nicht mit denen des dhi vergleichbar sind. Generell ergeben sich für mittlere Tiden/hohe Sturmfluten folgende Einflüsse durch die Vertiefung von 10 auf 13,5 m KN:

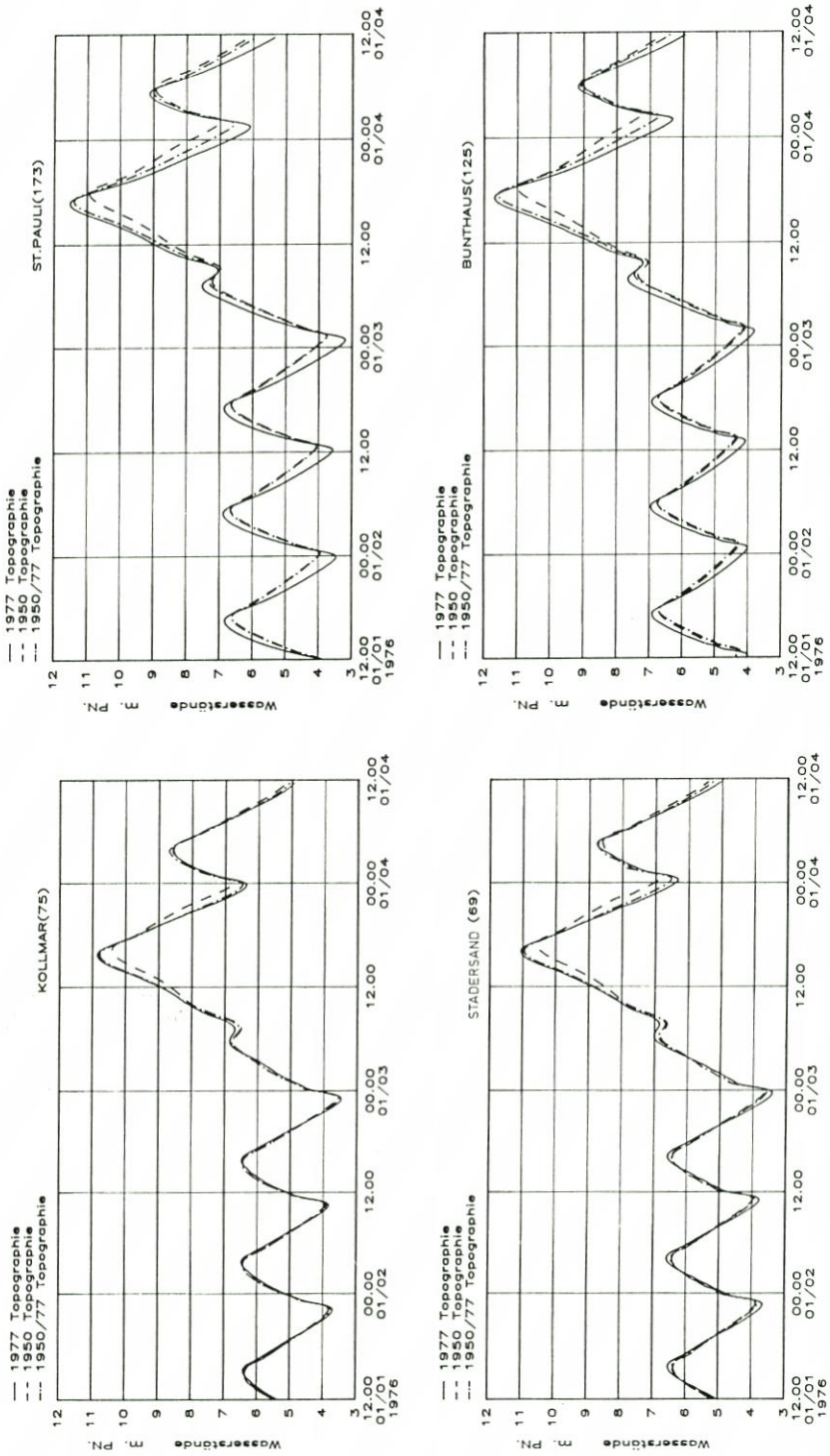


Abb. 18: Wirkung aller untersuchten Maßnahmen (Vergleich 1950 auf 1977) sowie der Fahrwasservertiefung allein (Vergleich 1950/77 auf 1977) auf den Ablauf der Sturmflut vom 3. 1. 76 an vier Orten

Brunsbüttel	0 dm/– 0,5 bis + 1 dm
Brokdorf	– 0,5 dm/– 0,5 bis + 1 dm
Stadersand	+ 1 dm/+ 0,5 bis 1,5 dm
Hbg.-St. Pauli	+ 2 dm/+ 1 bis 1,5 dm
Zollenspieker	+ 1,5 bis 2 dm/+ 0,5 bis 1,5 dm

Die Streuung der Ergebnisse ist im Stromspaltungsgebiet und in der Oberelbe recht groß. Die Veränderungen im Fahrwasser wirken sich dergestalt aus, daß von Brunsbüttel bis Kollmar viele Sturmfluten niedriger auflaufen, da sich die Strömungsverhältnisse geändert haben. Etwa ab Stadersand werden die Sturmfluten generell erhöht, in stärkerem Maße im Raume Hbg.-St. Pauli, aber auch noch deutlich in der Oberelbe.

Außerdem wird auf Abb. 18 deutlich, daß die Tnw und Thw oberhalb von Stadersand durch den Fahrwasserausbau früher eintreten. Das gilt zwar auch für die Sturmflutscheitel; bei diesen ist aber auch eine merkliche Wirkung durch die Eindeichungen vorhanden.

Es kann vermutet werden, daß die Ergebnisse des FRANZIUS-INSTITUTS deswegen aus dem Rahmen fallen, weil das Modell möglicherweise im Raume Brokdorf–Stadersand nicht richtig kalibriert war. Das könnte auch eine Erklärung für die Widersprüche in Kap. 3.7 und die großen Werte in Kap. 3.8 sein.

4. Gemeinsame Wirkung aller untersuchten Maßnahmen von 1950 bis 1980

4.1 Ergebnisse

Die gemeinsame Wirkung aller untersuchten Maßnahmen wurde lediglich durch Vergleich der Ergebnisse in den dhi-Modellen ermittelt. Andere Quellen liefern nur Teilaussagen* und sind an den entsprechenden Stellen zitiert. Um die Modellergebnisse zu prüfen, wurden schließlich einige weitere Untersuchungen vorgenommen, die in der zweiten Hälfte dieses Abschnittes vorgestellt werden.

Abb. 18 zeigt bereits für vier Pegel die Ergebnisse für die Sturmflut vom 3.1. 76. Insgesamt wirken die einzelnen Baumaßnahmen auf die jeweiligen Sturmfluten unterschiedlich, so daß somit der Gesamteinfluß aus allen Maßnahmen nicht durch Addition der Einzeleinflüsse bestimmt werden kann, wie sie aus Tab. 4 hervorgehen. Für einige Eingriffe wurden auch verschiedene Modellversuche mit ungleichen Ergebnissen gerechnet, so etwa:

Elbe im Zustand 1950, jedoch m i t Maßnahme x, oder: Elbe im Zustand 1977, jedoch o h n e Maßnahme x. Tatsächlich aber wurde die Maßnahme x z. B. 1970 bis 72 durchgeführt.

Daher lassen die Untersuchungen für die Einzelmaßnahmen eine Angabe der Größenordnung zu, wenn auch die Hauptaussage auf dem geschlossenen Ergebnis für alle Veränderungen liegt. Dazu liegen auf Abb. 20 bis 23 sehr viele Ergebnisse vor. Sie zeigen zusammengefaßt folgende Erhöhung der Scheitel hoher Sturmfluten:

Brokdorf	2	bis 4	dm
Kollmar	3	bis 4,5	dm
Stadersand	3	bis 5	dm
Hbg.-St. Pauli	5	bis 6	dm
Altenwerder	5	bis 6	dm
Bunthaus	6	bis 9	dm
Zollenspieker	6,5	bis 9	dm

* Siehe dazu das Vorwort

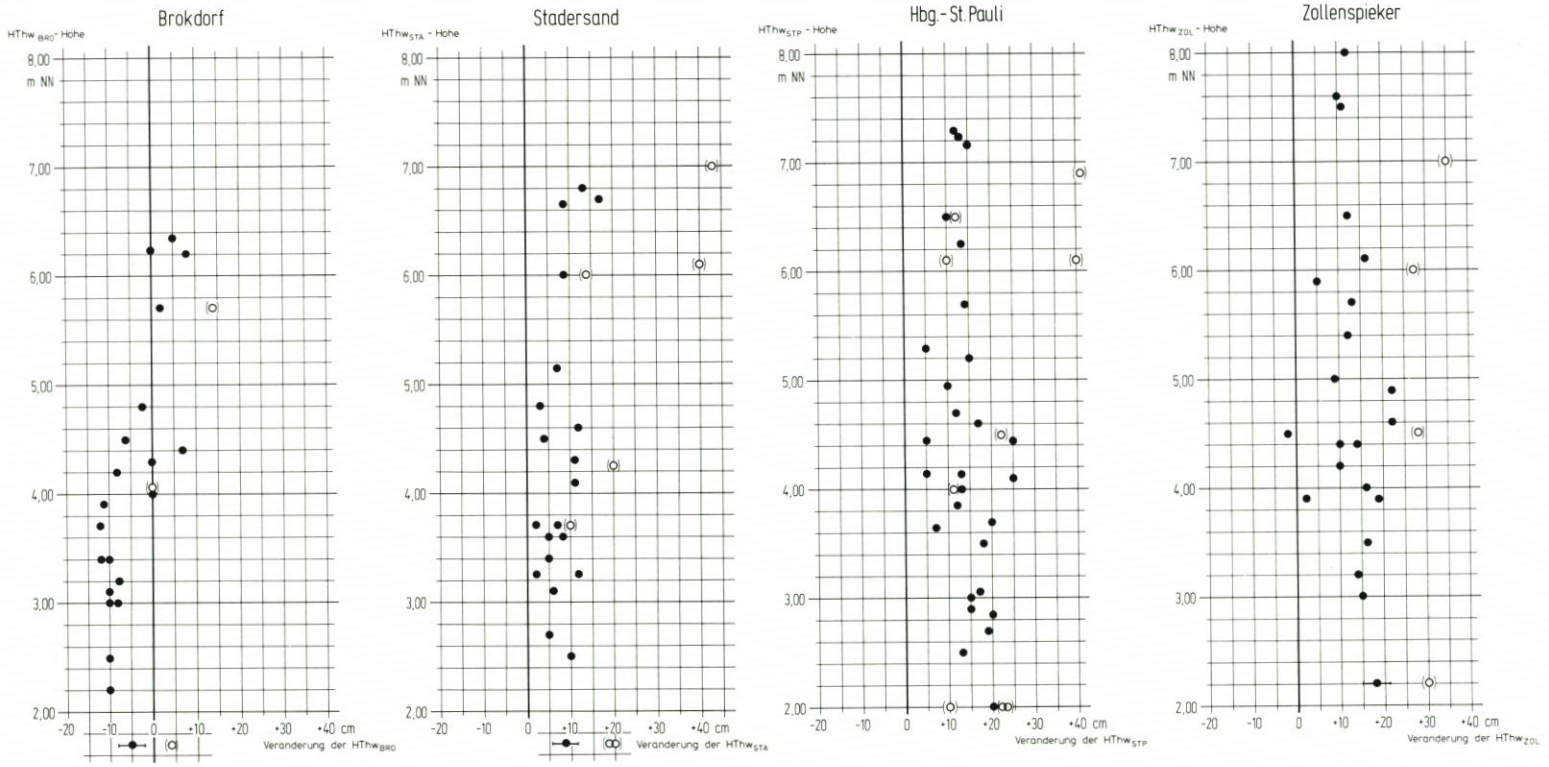


Abb. 19: Wirkung der Fahrwasservertiefung von 1950 bis 1977 auf die HThw-Höhen verschieden hoher Sturmfluten und mittlerer Tiden nach dhi; frühere, nicht identische Untersuchungsergebnisse sind angedeutet

Tabelle 4. Wirkung von Baumaßnahmen in und an der Tideelbe auf die Scheitelwasserstände sehr hoher Sturmfluten in der Elbe

Maßnahme	HThw-Erhöhung in dm bei			
	Brokdorf	Stadersand	Hbg.-St. Pauli	Zollenspieker
Absperrung von Seeve, Ilmenau und Billwerder Bucht; Vordeichung Oortkaten	0	0	0,5 bis 1	2 bis 3
Neue Deichlinie Harburg bis Este; Absperrung Alte Süderelbe	0 bis 1	0,5 bis 2	0,5 bis 1,5	0,5 bis 2
Eindeichung Hahnöfer Sand; Absperrung Schwinge, Krückau und Pinnau	0,5 bis 1	1 bis 1,5	0,5 bis 1,5	1 bis 1,5
Absperrung von Lühe und Stör	0	0	0	0
Eindeichung Haseldorfer Marsch	0 bis 1	0,5 bis 1	0 bis 1	0,5 bis 1
Eindeichung Krautsand	rd. 1	rd. 0,5	0 bis 1	0,5 bis 1
Eindeichung Nordkehdingen	−0,5 bis 0	−0,5 bis 0	−1 bis 0	−1 bis 0
Fahrwasservertiefung von 10 auf 13,5 m KN	−0,5 bis +1	0,5 bis 1,5	1 bis 1,5	0,5 bis 1,5
Vergleich 1950 auf 1980	2 bis 4	3 bis 5	5 bis 6	6,5 bis 9

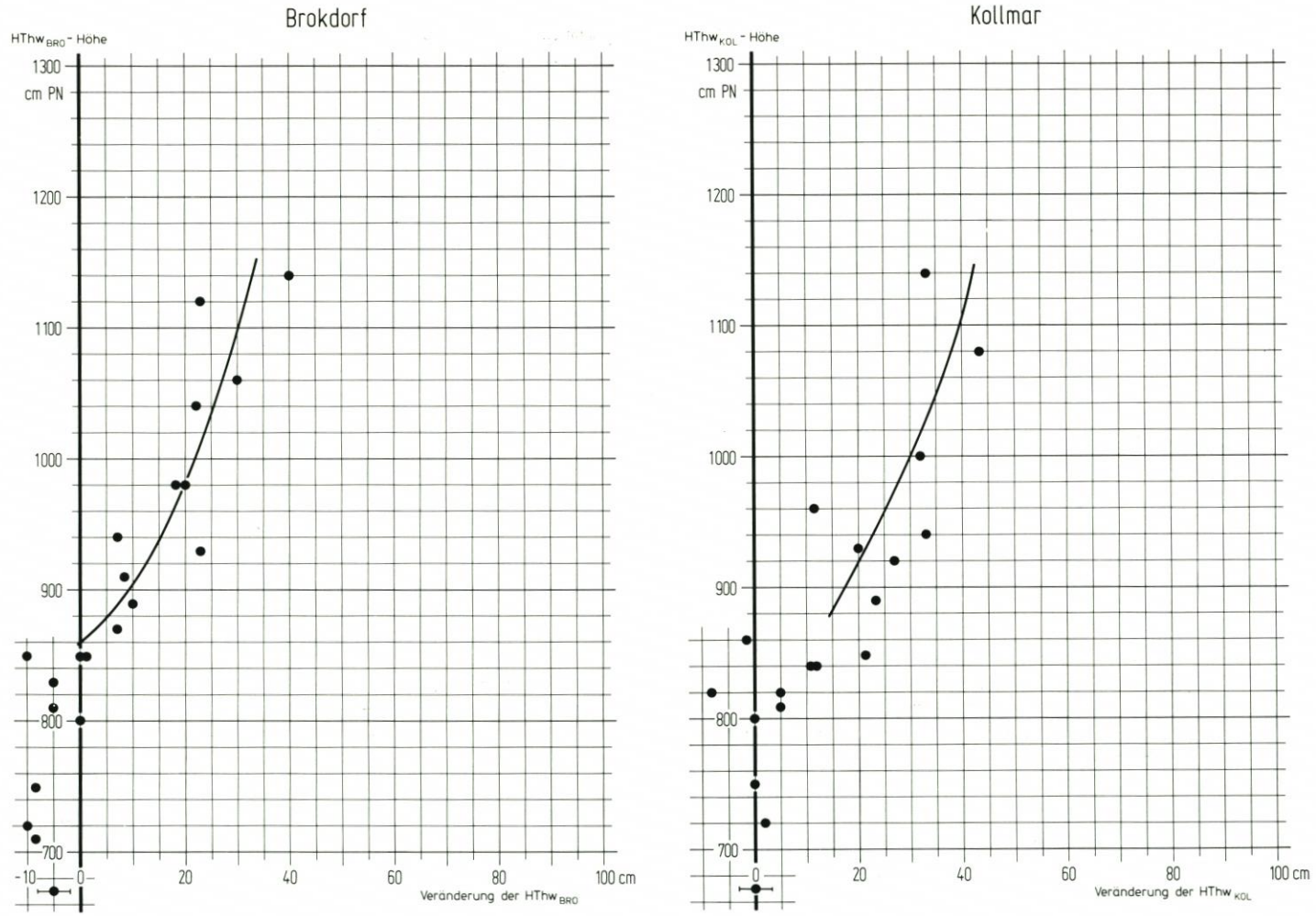


Abb. 20: Gemeinsame Wirkung aller vom dhi untersuchten Baumaßnahmen auf die HThw-Höhen verschieden hoher Sturmfluten und mittlerer Tiden bei Brokdorf und Kollmar mit Trendangabe im oberen Bereich

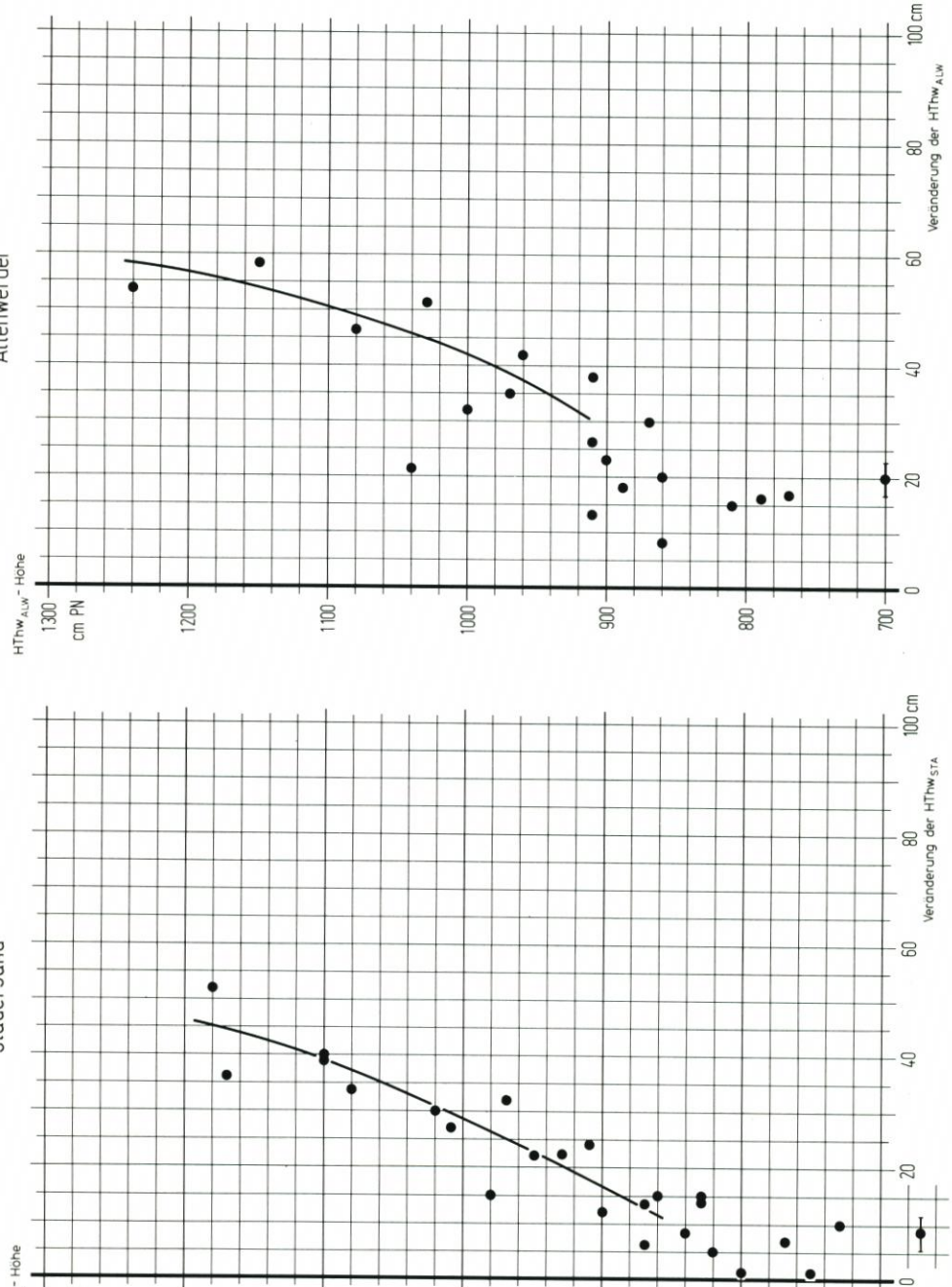


Abb. 21: Gemeinsame Wirkung aller vom dhi untersuchten Baumaßnahmen auf die HThw-Höhen verschieden hoher Sturmfluten und mittlerer Tiden bei Stadersand und Altenwerder mit Trendangabe im oberen Bereich

Die Küste, 47 (1988), 51-101

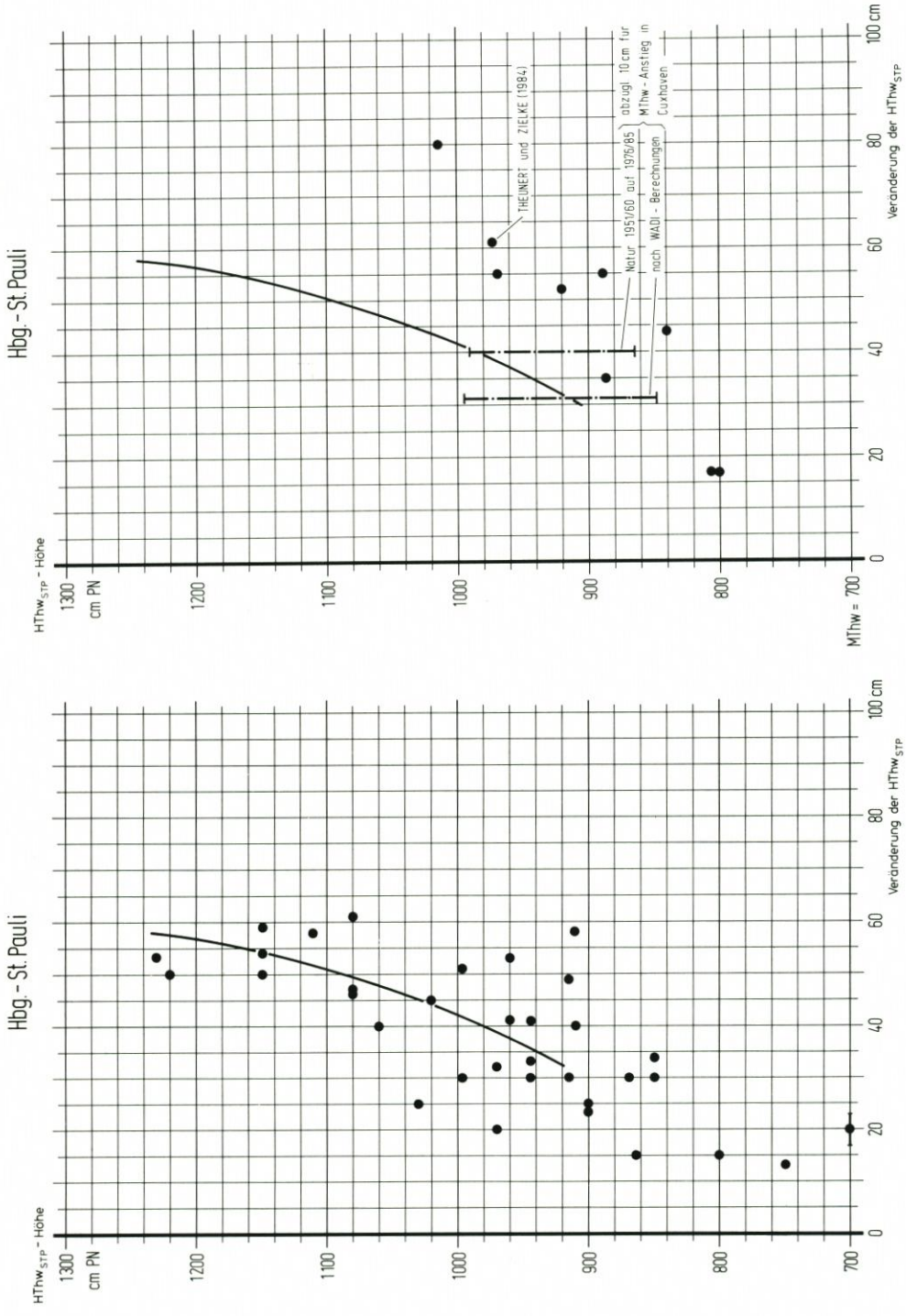


Abb. 22: Gemeinsame Wirkung aller vom dhi untersuchten Baumaßnahmen auf die HThw-Höhen verschieden hoher Sturmfluten und mittlerer Tiden bei Hbg.-St. Pauli mit Trendangabe im oberen Bereich (links) und weiteren Analysen

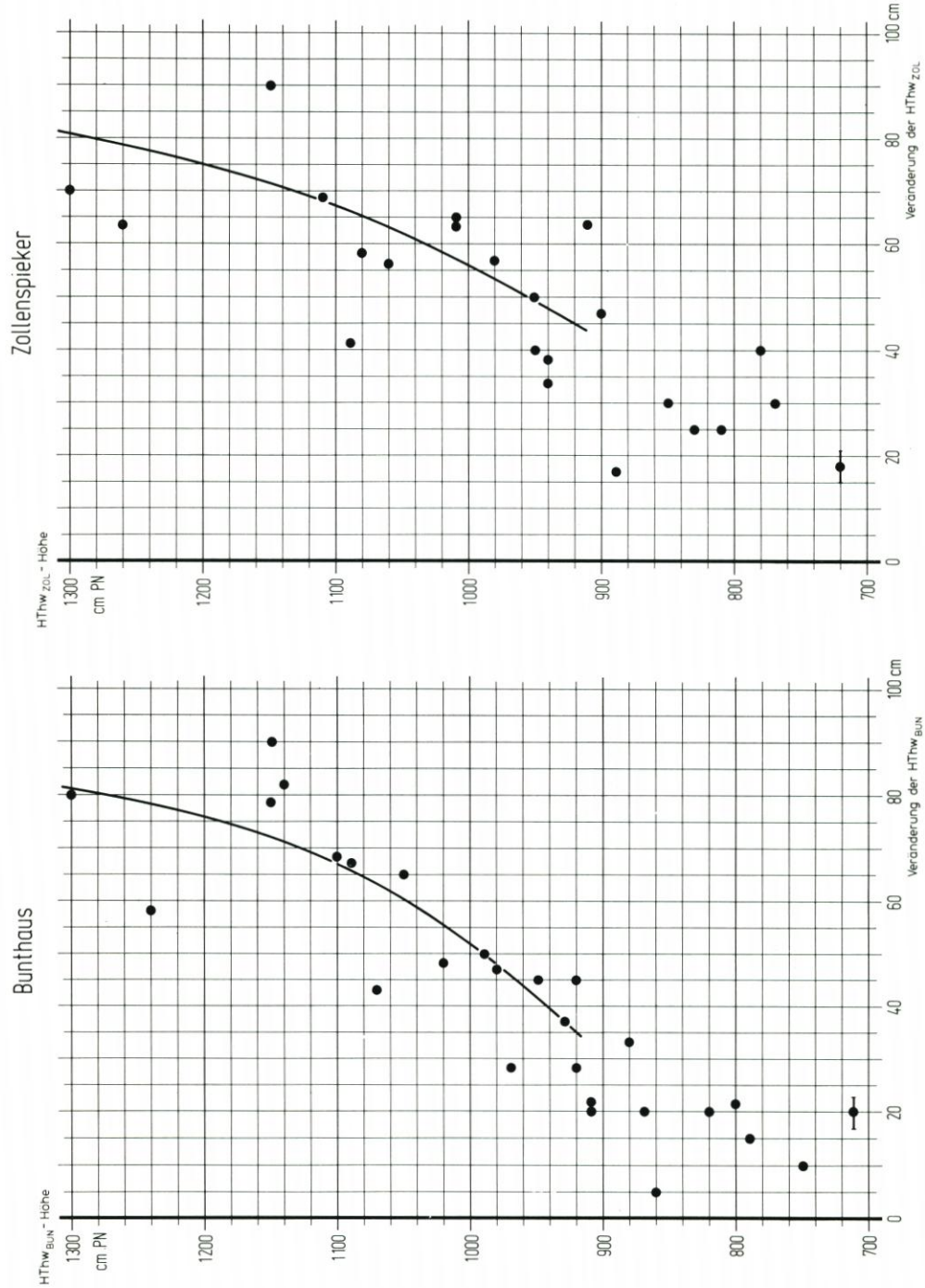


Abb. 23: Gemeinsame Wirkung aller vom dhi untersuchten Baumaßnahmen auf die HThw-Höhen verschieden hoher Sturmfluten und mittlerer Tiden bei Bunthaus und Zollenspieker mit Trendangabe im oberen Bereich

Die Küste, 47 (1988), 51-101

Um den tatsächlichen Ablauf der Veränderungen näherungsweise nachvollziehen zu können, wurden schließlich vom dhi mit der Bemessungssturmflut 2085A die folgenden 10 Simulationen durchgeführt:

1. Zustand 1950: Modell 1950, Fahrwassertiefe 10 m, einschließl. Überschwemmungsgebiete der Nebenflüsse
2. Zustand 1961: Modell 1950 (Pkt. 1) mit Wehr bei Geesthacht
3. Zustand 1963 wie 2., aber zusätzlich Alte Süderelbe abgesperrt
4. Zustand 1970: wie 3., aber zusätzlich Billwerder Bucht, Krückau und Pinnau abgesperrt
5. Zustand 1972: wie 4., aber zusätzlich Schwinge abgesperrt
6. Zustand 1974: wie 5., aber zusätzlich Seeve und Ilmenau abgesperrt sowie Vordeichung bei Oortkaten
7. Zustand 1977: wie 6., jedoch mit Fahrwassertiefe 13,5 m
8. Zustand 1978: wie 7., jedoch zusätzlich Hahnöfer Sand, Haseldorfer Marsch und Nordkehdingen eingedeicht
9. Zustand 1979: wie 8., jedoch zusätzlich Krautsand eingedeicht (dies ist identisch mit dem dhi-Modell 1977)
10. wie 9., jedoch im Modell 1950.

Ergebnisse dieser Simulation sind für verschiedene Orte an der Elbe auf Tab. 5 zusammengestellt. In Kap. 5 werden die nicht untersuchten Eingriffe kommentiert.

Die Zahlen sind zwar durch viele Modellrechnungen im dhi gestützt, müssen damit aber nicht zwangsläufig die natürlichen Verhältnisse richtig wiedergeben. Um diesen Nachweis zu erbringen, wurden parallel von THEUNERT und ZIELKE (1984) in deren Modell die höchsten Sturmfluten um 1950 gerechnet. Dabei mußten die Windverhältnisse über der Elbe geschätzt werden, da Daten fehlen. Die Differenz „Rechnung im Zustand 1975 minus Natur um 1950" läßt Rückschlüsse über die Veränderungen zu (Abb. 22 für Hbg.-St. Pauli). Die Autoren kommen zu einer „Erhöhung von rd. 50 cm und einer Laufzeitverkürzung von rd. 1 h". Interne Untersuchungen mit dem WADI-Modell des STROM- UND HAFENBAU HAMBURG führten für mittelhohe Sturmfluten einschl. der Veränderung der mittleren Tide an der Mündung zu einem Mittelwert von 41 cm bei Hbg.-St. Pauli. Ein Vergleich der Höhen aller mittelhohen Sturmfluten (weil es hohe um 1950 nicht gab!) von 1951/60 und von 1976/85 liefert einschl. aller meteorologischen und säkularen Wirkungen einen Anstieg um 50 cm. Damit werden für diese Höhen und diesen Pegel die dhi-Berechnungen bestätigt, wenn von den letzten beiden Vergleichen jeweils 10 cm für den MThw-Anstieg in Cuxhaven in den letzten 30 Jahren abgezogen werden (Abb. 22). Sie werden abgesichert durch Untersuchungen des dhi mit konstruierten Windstaukurven, die für mittelhohe Sturmfluten bei Hbg.-St. Pauli i. M. 4 dm Erhöhung brachten.

Abb. 24 zeigt generalisiert die Abhängigkeit der Sturmfluterhöhung von der Sturmfluthöhe nach den dhi-Ergebnissen. Weiterhin ermöglichen die Eintrittszeit- und Höhendifferenzen der wichtigsten Elbepegel zu den Werten in Cuxhaven einen Überblick über die zeitlichen und höhenmäßigen Variationen und Entwicklungen von 1951/55 bis 1976/80. Für insgesamt 16 Stationen wurden die täglichen Wasserstände sortiert und gemittelt (SAARE u. SIEFERT, 1985):

Die Sturmfluthöhen sind in den letzten 30 Jahren an der Mündung in Cuxhaven deutlich angestiegen. Diese Entwicklung ist nicht Elbe-spezifisch, sondern allgemein an der deutschen Nordseeküste festzustellen. In der Elbe selbst, wo heute hohe Sturmfluten bis Hamburg stromauf ansteigen und dann bis Zollenspieker etwa gleich hoch bleiben, ist die Entwicklung

Tabelle 5. Höhe der „Bemessungssturmflut" 2085A in verschiedenen Ausbauzuständen in und an der Elbe; nähere Erläuterungen in Kap. 4.1

Zustand	HThw-Höhe 1950 (in m NN) sowie Veränderungen gegen 1950 (in m) an den Pegeln									
	Geesthacht	Altengamme	Zollenspieker	Harburg	Hbg.-St. Pauli	Schulau	Stadersand	Glückstadt	Brokdorf	Brunsbüttel
1950	7,45	7,16	6,94	6,78	6,73	6,47	6,29	6,05	5,96	5,83
1961	−0,05	0,01	0	0	0	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
1963	−0,02	0,04	0,04	0,05	0,06	0,11	0,10	0,07	0,05	0,04
1970	0,02	0,09	0,09	0,11	0,12	0,17	0,16	0,14	0,11	0,08
1972	0,06	0,14	0,14	0,15	0,16	0,21	0,20	0,20	0,17	0,11
1974	0,34	0,45	0,44	0,34	0,28	0,25	0,22	0,21	0,17	0,11
1977	0,45	0,54	0,55	0,46	0,43	0,43	0,39	0,32	0,25	0,21
1978	0,47	0,57	0,57	0,47	0,44	0,45	0,45	0,39	0,30	0,24
1979	0,54	0,64	0,63	0,53	0,50	0,51	0,52	0,46	0,40	0,31
1950/1979	0,42	0,52	0,53	0,41	0,37	0,37	0,39	0,38	0,35	0,29

Die Küste, 47 (1988), 51-101

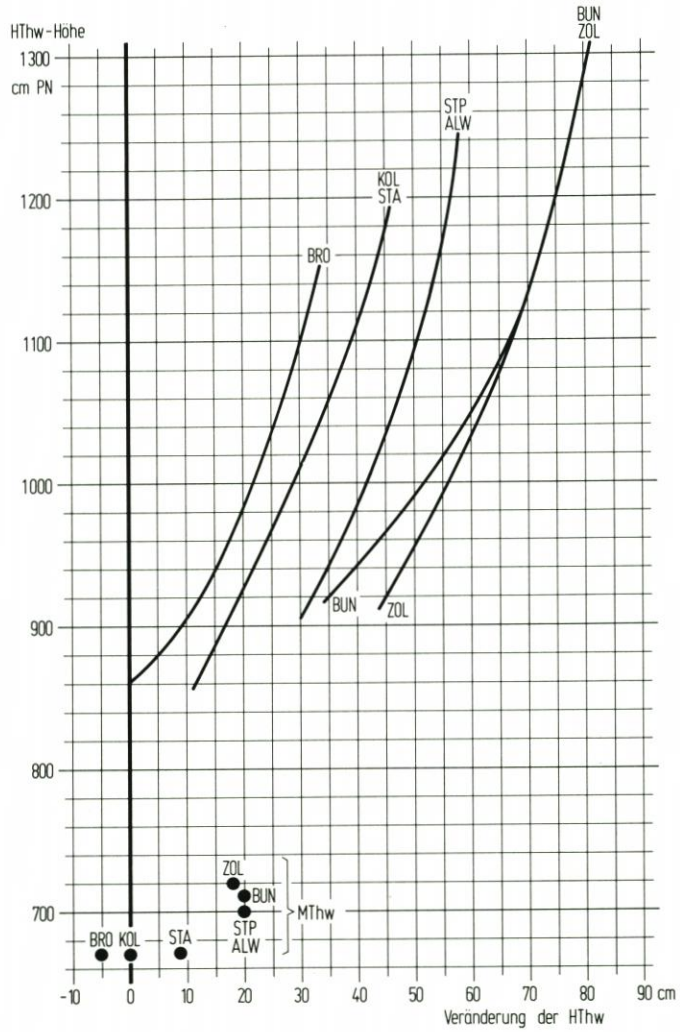


Abb. 24: Gemeinsame Wirkung aller vom dhi untersuchten Baumaßnahmen auf die HThw-Höhen verschieden hoher Sturmfluten und mittlerer Tiden in der Elbe (generalisiert)

differenzierter: In Hamburg ist ein fast gleichmäßiger HThw-Anstieg erkennbar. Dieser ist vor 1966/75 in der Elbe von Cuxhaven bis Stadersand nicht vorhanden; erst danach wird er deutlich. In Brokdorf verändern sich die Höhendifferenzen gegen Cuxhaven in all den Jahrzehnten kaum, so daß bis hier fast nur der seeseitige Einfluß wirkt.

Für das Kollektiv aller Sturmfluten, die in Cuxhaven mindestens 850 cm NN – 5 m erreichten, ergeben sich von 1951/55 (3 Ereignisse) auf 1976/80 (6 Ereignisse) folgende HThw-Erhöhungen, die auch die Eigenarten der jeweiligen, für beide Zeiträume unterschiedlichen, Windstauverhältnisse enthalten:

Pegel	Differenzen zu Cuxhaven (einschl. Standardabweichungen; in dm)		
	1951/55	1976/80	Zunahme
Brokdorf	1 ± 1	1,5 ± 1,5	0,5
Kollmar	1,5 ± 1,5	3 ± 3	1,5
Stadersand	2 ± 1,5	4 ± 3	2
Schulau	2,5 ± 1,5	6 ± 3	3,5
Blankenese	3 ± 1	7 ± 3	4
Hbg.-St. Pauli	4 ± 1	8,5 ± 2,5	4,5
Schöpfstelle	4,5 ± 1	9,5 ± 3	5
Altenwerder	4 ± 1,5	8,5 ± 2,5	4,5
Harburg	4,5 ± 1	9 ± 2,5	4,5
Bunthaus	4,5 ± 0,5	9,5 ± 2,5	5
Zollenspieker	4,5 ± 1	10 ± 2	5,5

Diese Zahlen sind nicht unmittelbar mit den Modellrechnungsergebnissen nachvollziehbar, weil es sich um einen Vergleich unterschiedlicher Ereignisse aus zwei Zeiträumen und nicht um identische Ereignisse in zwei Elbezuständen handelt, sie bestätigen aber, daß die Wirkung der Eingriffe in den letzten drei Jahrzehnten in der Oberelbe stärker als in Hbg.-St. Pauli und auch in der Unterelbe noch bemerkenswert ist.

Die Eintrittszeit-Differenzen der HThw gegen Cuxhaven verhalten sich in der Elbe etwas anders: In Brokdorf haben sie sich bis heute praktisch nicht verändert (rd. 1.30 h). In Stadersand nehmen sie seit 1971/80 ab, von Schulau bis Zollenspieker etwa seit 1966/75. Die Verkürzung dieser Differenzen ist erheblich (in Hamburg rd. 50 min/20 Jahren, in Zollenspieker rd. 60 min/20 Jahren). Berücksichtigt man dabei den starken Anstieg der Höhendifferenzen zu Cuxhaven an diesen Orten und den HThw-Anstieg in Cuxhaven selbst, so ist generell von einer Erhöhung der Sturmfluthöhen in der Elbe bei gleichzeitiger Verkürzung der Laufzeit auszugehen, wobei beides verstärkt für den Bereich oberhalb von Stadersand gilt.

4.2 Statistische Analysen und Genauigkeiten

Die gemessenen und vom dhi berechneten Wasserstände (HThw) sind in Tab. 2 aufgestellt. Es liegt eine sehr gute Übereinstimmung ohne einseitige Abweichung vor. Der Korrelationskoeffizient zwischen gemessenen und simulierten Werten ist 0.996 in den Modellen 1977 und 1984 und 0.989 im Modell 1950. Durch mehrere kleinere Modellverbesserungen in Verbindung mit den verschiedenen Sturmflutstudien haben sich die modellsimulierten Hochwasserstände etwas von Studie zu Studie geändert, wie die Tabelle ausweist.

Zu den Genauigkeiten seien schließlich Bloss und Zielke (1986) zitiert, die speziell die Brauchbarkeit der dhi-Modelle zu untersuchen hatten:

„Es muß ausdrücklich festgestellt werden, daß die vom dhi aufgrund seiner Modellrechnungen getroffenen Hauptaussagen nicht angezweifelt werden können. Diese betreffen die Quantifizierung der in den letzten dreißig Jahren beobachteten Änderungen der Sturmflutwasserstände und vor allem ihre anteilige Zuordnung zu den Ursachen, d. h. den Deichmaßnahmen in Unterelbe, Hamburg und Oberelbe, Fahrwasservertiefung, Wehr Geesthacht und Absperrung von Nebenflüssen. Betont sei, daß die Unsicherheiten, die hier zum Ausdruck kommen, nicht eine unzureichende Modelltechnik ausdrücken, sondern die Abhängigkeit vom individuellen Sturmflutereignis zum einen und die Fehlerhaftigkeit von Eingangsdaten

Die Küste, 47 (1988), 51-101

zum anderen. Bei Vorgabe einer historischen oder synthetischen Sturmflut an der Elbemündung, bei Vorgabe eines Windfeldes und des Oberwasserzuflusses und bei noch zu verbessernden topographischen Daten vor allem für die Vorländer kann erwartet werden, daß die Sturmfluten längs der gesamten Elbe mit einer Genauigkeit von etwa 10 cm berechnet werden. Dies berücksichtigt die verbesserte Eichung der Modelle, die z. T. nach den hier beschriebenen Untersuchungen weitergeführt wurde.

Es gibt gegenwärtig keinen Grund für die Annahme, daß die anthropogene Erhöhung noch wesentlich weiter fortschreitet. Als Begründung für diese Aussage sei wiederum der verhältnismäßig geringe Einfluß der veränderten Flußmorphologie auf die Höchstwasserstände angeführt; die Deichlinien und Sperrwerke sind in den letzten acht Jahren nicht mehr verändert worden. Es ist aber nötig, die numerischen Modelle ständig den neuesten topographischen Daten anzupassen."

5. Nicht untersuchte Eingriffe

Neben den untersuchten verbleiben eine Reihe weiterer Eingriffe, die im folgenden aufgeführt und – soweit möglich – hinsichtlich ihrer Wirkung abgeschätzt werden. Zur Lage der anthropogenen Veränderungen sei auf Abb. 1, 6, 10 und 11 verwiesen.

a) Maßnahmen in der Elbe:
Ausbau der Rhinplatte bei Glückstadt bis 1 m über MThw (1953/60); Ufervorspülung vom Stör-Leitdamm bis zum Bütteler Hafenpriel (1964/69); Verbindungsdamm zwischen Neßsand und Hanskalbsand ca. 2 m über MThw (1967/68); Aufspülung des Schwarztonnensandes auf 1,5 bis 1,8 m über MThw (1972/77).
Es handelt sich ausschließlich um kleinere Maßnahmen, die nur lokale Veränderungen hervorrufen konnten, da sie weder das Strömungsverhalten noch das Tidevolumen nennenswert veränderten. Bei mittleren wie hohen Sturmfluten sind keine Auswirkungen zu erwarten.

b) Absperrung von Oste (1968) und Stör (1975):
In Kap. 3.2 wird darauf hingewiesen, daß die Wirkung der Absperrung der Stör nur im Modell des FRANZIUS-INSTITUTS untersucht wurde und sich als vernachlässigbar klein ergab. Es drängt sich ein Vergleich mit der Wirkung der Maßnahmen vor Schwinge, Pinnau und Krückau auf (Erhöhung hoher Sturmfluten bis 1 dm). Der Unterschied liegt jedoch auf der Hand: Oste und Stör wurden 4 bzw. 1 km oberhalb ihrer jeweiligen Mündungen in die Elbe ohne zusätzliche Eindeichungen abgesperrt. Außerdem ist wegen geringer Wassertiefen und stark gewundener Flußläufe der Tidefortschritt in den Nebenflüssen nur etwa halb so groß wie in der Elbe (SIEFERT, 1976), und damit wäre ohne Sperrwerk praktisch keine Entlastung der Sturmfluthöhen in der Elbe zu erwarten, selbst wenn dabei die erhöhende Wirkung des Oberwasserzuflusses vernachlässigt wird.

c) Maßnahmen im Hamburger Stromspaltungsgebiet:
Sperrwerke für die Alsterfleete (1962/67); Absperrung der Dove Elbe (Tatenberger Schleuse, 1951); Vordeichungen auf Wilhelmsburg und zwischen Gauert und Oortkaten (1966/69)
In Kap. 3.2 ist erwähnt, daß die Eindeichungen zwischen Oortkaten und Warwisch (1,6 km^2) lediglich zu HThw-Erhöhungen bis 0,5 dm führen, und zwar nur örtlich eng begrenzt. Da die übrigen, oben gen. Eindeichungen flächenmäßig wesentlich kleiner und örtlich verstreut sind, ist deren Einfluß sicherlich vernachlässigbar.
Durch die Tatenberger Schleuse wurde ein Überschwemmungsgebiet von i. M. 0,5 km

Breite zwischen den Hauptdeichen (und etwa der Hälfte zwischen den Sommerdeichen) und etwa 10 km Länge abgesperrt. Da diese Fläche vor 1951 nur langsam und erst sehr spät gefüllt werden konnte, konnte die Wirkung auf die Sturmflutscheitel nur gering sein.

d) Hafenpolder in Hamburg:

Nach der Sturmflut vom 3. 1. 1976 wurden im Hafengebiet rd. 60 öffentliche und private Hochwasserschutzpolder geschaffen, deren Wand- bzw. Deichhöhe meist bei 7,5 m NN liegt, sowie einzelne Flächen auf 7,2 m NN aufgehöht. Die eingepolderten Flächen weisen fast ausnahmslos Geländehöhen über 5 m NN, zu etwa einem Viertel über 6 m NN, auf. Da sämtliche dhi-Rechnungen mit 100%iger Einpolderung (als Folge unendlich hoch angenommener Kaimauern) durchgeführt wurden, könnten die Wirkungen der Hafenpolder erst bei $HThw_{Hbg}$ deutlich über 5 m NN auftreten, also nur bei hohen Sturmfluten, wogegen sie ja auch konzipiert sind. Nach Siefert und Lassen (1986) ergeben sich für das Stromspaltungsgebiet folgende Flächen:

Norder- und Süderelbe:	1230 ha
Hafenflächen:	1230 ha
Landflächen über 5,5 m NN:	2000 ha (1976)
	300 ha (1981)

Dennoch zeigt dort ein Vergleich von Sturmflutabläufen vor und nach Einpolderung praktisch keine Veränderungen. Wenn sie bemerkbar wären, so müßte sich dieses dadurch gezeigt haben, daß hohe Sturmfluten in den dhi-Berechnungen höher als in der Natur simuliert wurden, sofern sie vor dem Bau der Hafenpolder eintraten. Tab. 2 zeigt dazu für Hbg.-St. Pauli keine signifikanten Hinweise. Bei noch höheren Sturmfluten müßte eine Wirkung der Polder zudem zu höheren HThw-Erhöhungen als für die Flut vom 3. 1. 76 führen. Das ist jedoch eindeutig nicht der Fall, so daß tatsächlich die Wirkung der Hafenpolder unbedeutend sein muß.

6. Schriftenverzeichnis

Berndt, D., Harten, H. u. Rohde, H.: Hydraulische Modellversuche zum Sturmflutgeschehen. Die Küste, H. 38, 1983.

Bloss, S. u. Zielke, W.: Sturmflutereignisse in der Unterelbe – Vergleich und Bewertung von hydraulischen, numerischen und statistischen Untersuchungen. Inst. für Strömungsmechanik der Univ. Hannover, 1986.

Hansen, W.: Wissenschaftliches Gutachten über die Grundlagen für die künftige Gestaltung des Hochwasserschutzes in Hamburg, 1965 (unveröff.).

Krause, M. u. Reuter, F.: Die Staustufe Geesthacht. Teil 1 bis 5. Die Wasserwirtschaft, H. 4, H. 7, H. 9, H. 10, H. 11, 1963.

Lenkungsausschuss: Untersuchungen über Maßnahmen zum Sturmflutschutz der Elbe. Die Küste, H. 38, 1983.

Nasner, H. u. Partenscky, H.-W.: Modellversuche für die Tideelbe. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 45, 1977.

Plate, E. J.: Zeitreihenuntersuchung der Sturmfluten im Mündungsbereich der Elbe. Die Küste H. 38, 1983.

Ref. Hydrol. Unterelbe: Sturmfluten von 1901 bis 1984 vor der südlichen Nordseeküste und in Hamburg. Hamb. Küstenf., H. 44, 1985.

Saare, H.-O. u. Siefert, W.: Die Sturmflutentwicklung in der Elbe von 1950–1980 als Mittelwerte über 5 und 10 Jahre. Ref. Hydr. Unterelbe, Studie Nr. 62, 1985 (unveröff.).

Siefert, W.: Hydrologische Daten aus dem Tidegebiet der Elbe und ihrer Nebenflüsse. Hamb. Küstenf., H. 35, 1976.

Siefert, W. u. Christiansen, H.: Entwicklung und Stand der Sturmflutvorhersagen des Hamburger Sturmflutwarndienstes. Hamb. Küstenf., H. 42, 1983.

Die Küste, 47 (1988), 51-101

Siefert, W. u. Lassen, H.: Entwicklung und Ablauf von Sturmfluten in Ems, Weser und Elbe (Abschlußber. eines KFKI-Proj.). Die Küste, H. 44, 1986.

Sündermann, J. u. Zielke, W.: Mathematisches Modell zur Simulation von Sturmflutereignissen in der Unterelbe. Die Küste, H. 38, 1983.

Theunert, F. u. Zielke, W.: Bericht über das Vorhaben Tidedynamik in Ästuarien und ihre Veränderung durch bauliche Maßnahmen, Teil 2. Inst. für Strömungsmechanik der Univ. Hannover, 1983.

Theunert, F. u. Zielke, W.: Sturmflutserien 1954. Numerische Untersuchungen zu deren Ablauf bei jetzigem Ausbauzustand der Unterelbe. Inst. für Strömungsmechanik der Univ. Hannover, 1984.