

Untersuchungen zur Stauentwicklung in der Tideelbe (OPTEL-D)

Thomas Strotmann, Caroline Radegast und Ulrich Ferke

Zusammenfassung

Im Rahmen von OPTEL-D wurde eine umfassende Untersuchung der Stauentwicklung in der Tideelbe von Cuxhaven nach Hamburg bei Sturmfluten durchgeführt. Im Fokus stand eine Verbesserung der empirischen Sturmflutvorhersage für die Tideelbe. Dabei wurden die für die Staugenerierung und -übertragung ins Ästuar maßgeblichen Parameter identifiziert und - soweit möglich - quantifiziert. Die empirischen Untersuchungen von rd. 150 Sturmfluten in OPTEL-D haben wichtige Ergebnisse für die Sturmflutforschung im Elbeästuar geliefert:

- Zwischen Brokdorf und Hamburg-St. Pauli existiert eine zufriedenstellende lineare Übertragungsfunktion für den Stau mit einem mittleren Prognosefehler von ca. 10 cm. (Der Übertragungsfehler von Cuxhaven nach Hamburg-St. Pauli beträgt im Mittel etwa 20 cm).
- Lokale Windfelder im Mündungstrichter zwischen Cuxhaven und Brokdorf können einen erheblichen Einfluss auf die Entwicklung des Staus haben.
- Die windstauwirksamste Windrichtung im Elbmündungsgebiet (zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel) wurde zu 260° ermittelt.
- Ein in OPTEL entwickeltes empirisches Modell für die Prognose von Sturmflutwasserständen für Hamburg berücksichtigt den Stau in Cuxhaven, den Einfluss des Oberwassers und den lokalen Wind im Mündungsgebiet. Ein Hindcast mit diesem Modell zeigt signifikant verbesserte Vorhersageergebnisse für Sturmfluten in Hamburg.
- Darüber hinaus haben die Untersuchungen zur Kinematik des Staus einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung des phänomenologischen Prozessverständnisses der Sturmflutpropagation durch ein Ästuar geleistet. Die unterschiedlichen Mechanismen der Stauentwicklung und die daraus resultierende Wellenkinematik im Ästuar wurden in Detail erfasst und beschrieben. Auf dieser Grundlage ergibt sich weiteres Potenzial zur Verbesserung der Sturmflutvorhersage in Tideästuaren.

Schlagwörter

Elbe, Tideelbe, Hamburg, Sturmflut, Sturmflutvorhersage, Stau, Staudynamik

Summary

The project OPTEL-D aimed at an improvement of empirical storm surge forecasts for the tidal Elbe River and Hamburg. Within the scope of OPTEL-D an extensive analyses of the propagation of surges in the Elbe estuary from the mouth at Cuxhaven to Hamburg was carried out. Parameters affecting the generation and propagation of wind set-up in the tidal Elbe River were identified and – as far as possible

– quantified. The analyses are based on data from ca. 150 storm surges between 1980 and today. Based on the results obtained, a new empirical model for storm surge forecasts for Hamburg was developed, which considers the height of the surge peak at Cuxhaven, the fresh water discharge and the effects of the local wind in the mouth of the estuary on the water level. Hindcast-calculations with the empirical model show remarkable improvements of high water level forecasts for Hamburg. Further investigations in OPTEL-D, which led to a categorization of different storm surge types in terms of the “dynamics” of the surge generation revealed possibilities for further improvements of storm surge forecasts for tidal estuaries like the Elbe River.

Keywords

Elbe River, Hamburg, storm surge, storm surge forecast, wind set-up, storm surge dynamics

Inhalt

1	Einleitung und Aufgabenstellung.....	170
2	Sturmflutgeschehen in Tideästuaren.....	172
2.1	Tide und Windstau.....	172
2.2	Fluvialer Zufluss.....	173
2.3	Eigenwerte des Ästuars.....	174
3	Untersuchungen zur Stauentwicklung und -übertragung in der Tideelbe.....	175
3.1	Entwicklung eines empirischen Modells zur Stauübertragung.....	175
3.2	Untersuchungen zur Kinematik des Staus.....	184
4	Schriftenverzeichnis.....	189

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Bei der Vorhersage der Wasserstände für die Deutsche Nordseeküste und die Tideflüsse hat es in den letzten Jahren, nicht zuletzt auch durch den Einsatz immer leistungsfähigerer meteorologischer Prognosemodelle, deutliche Verbesserungen gegeben. Gleichwohl zeigen sich bei einzelnen Ereignissen, vornehmlich bei Sturmfluten, bisweilen immer noch unbefriedigende Vorhersagegenauigkeiten. Die Schwächen der Sturmflutprognosen betreffen dabei nicht nur die Erfassung des Systemverhaltens in der offenen Nordsee, sondern insbesondere auch die meteorologischen und hydrodynamischen Vorgänge und Wechselwirkungen beim Einlaufen einer Sturmflut in ein Tideästuar wie das der Elbe.

Grundsätzlich dürfen die hydrodynamischen Verhältnisse der Tideelbe auch in Bezug auf Sturmfluten als vergleichsweise gut untersucht bezeichnet werden. So ist beispielsweise bekannt, dass mit der absoluten Höhe des Sturmflut-Scheitelwasserstands in Cuxhaven auch die Sturmflut-Scheiteldifferenz zwischen Hamburg und Cuxhaven zunimmt. Ebenso ist das Maß der Beeinflussung der Wasserstandshöhen durch den Oberwasserzufluss aus der Mittel-Elbe seit langem in den Vorhersageverfahren verankert. Gleichwohl zeigt die Auswertung der Vorhersagen des Hamburger Sturmflutwarndienstes (WADI) der letzten Jahre, dass eine erstaunlich große Bandbreite bei der Stau-Übertragung von Cuxhaven nach Hamburg besteht. So liegt ein engerer, statistisch belastbarer Zusammenhang

zwischen der Wasserstandshöhe in Cuxhaven und Hamburg bei Sturmfluten nicht vor. Dies wird auch durch das folgende Beispiel deutlich: Die größte Sturmflut-Scheiteldifferenz zwischen Hamburg und Cuxhaven, die bislang registriert wurde, beträgt 166 cm; sie trat aber bei einer nicht besonders hohen Sturmflut (< 840 cm PN in Cuxhaven) auf. Andererseits war z. B. bei der sehr hohen Sturmflut vom 27.2.1990 (953 cm PN am Pegel Cuxhaven) zwischen Hamburg und Cuxhaven gerade einmal eine Höhendifferenz von 100 cm zu verzeichnen. Offenbar spielen bei der Scheitelhöhenentwicklung einer Sturmflut in der Unterelbe also noch andere Einflussgrößen als die absolute Höhe der Flut am Mündungspegel sowie die Oberwasserzuflussmenge eine nicht zu vernachlässigende Rolle.

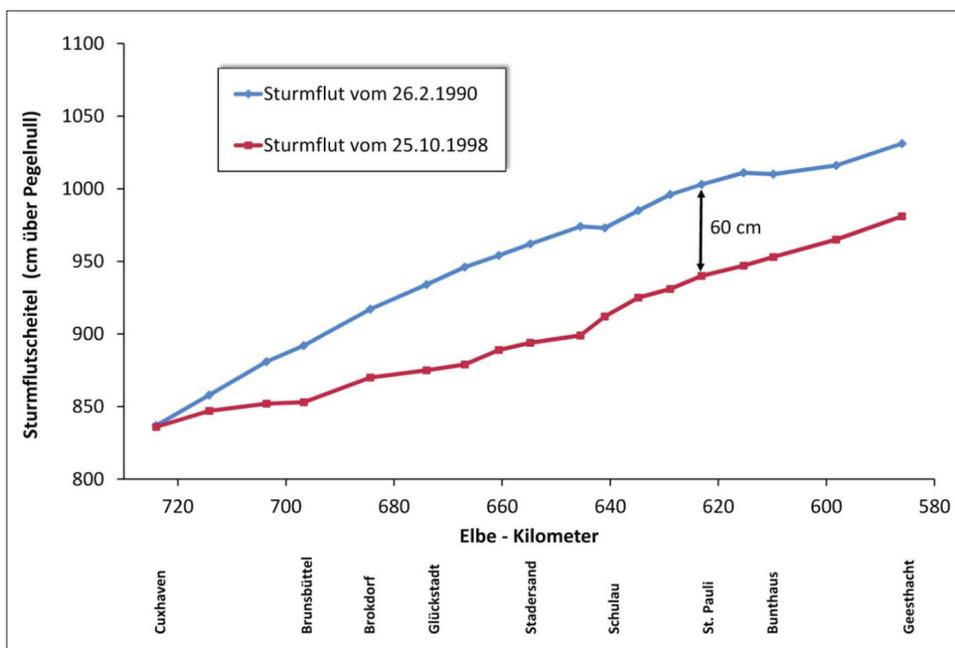


Abbildung 1: Scheitelhöhen der Sturmfluten vom 26.2.1990 und 25.10.1998 in der Tideelbe.

Abb. 1 veranschaulicht diesen Umstand anhand des Vergleichs der Sturmfluten vom 26.2.1990 und 25.10.1998. Beide Fluten wiesen in Cuxhaven mit knapp 840 cm PN fast exakt die gleiche Höhe auf, unterlagen zudem einem ähnlichen Oberwasserzufluss, entwickelten sich stromauf aber sehr unterschiedlich. Die Differenz der Scheitelhöhen beider Sturmfluten steigt kontinuierlich an; am Pegel St. Pauli beträgt sie schließlich 60 cm. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass trotz der erreichten Fortschritte der letzten Jahre eine weitere Verbesserung der Sturmflutprognosen für die Elbe erforderlich ist. Zum einen, um generell den Schutz von Menschen und Sachgütern optimieren zu können, zum anderen, um den laufenden Betrieb des Hafens besser auf Hochwasserereignisse vorzubereiten zu können. Ein solcher Bedarf besteht diesbezüglich nicht nur bei den auf numerischen Modellen basierenden Sturmflutprognosen des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), sondern auch beim bestehenden empirisch-statistischen Vorhersageverfahren des Hamburger Sturmflutwarndienstes der Hamburg Port Authority (HPA).

Ziel des von der HPA bearbeiteten Teilprojekts OPTEL-D war daher die empirische Untersuchung der Stautwicklung in der Tideelbe von Cuxhaven nach Hamburg und die Identifizierung der diese maßgeblich beeinflussenden Parameter. Im Fokus stand dabei zum einen die zuvor nur spärlich untersuchte Wirkung des lokalen Windes über dem Ästuar und zum anderen die „Dynamik“ der Stautwicklung (in der Literatur bisweilen auch mit „Charakter“ einer Sturmflut umschrieben). Die Ergebnisse sollten Grundlage für eine Verbesserung der Sturmflutvorhersage in Tideästuaren sein und einen Beitrag zum phänomenologischen Systemverständnis liefern.

2 Sturmflutgeschehen in Tideästuaren

Im Vergleich zur offenen Küste ist das Sturmflutgeschehen in einem Tideästuar deutlich komplexer. Es kann als Ergebnis des Zusammenwirkens verschiedener Rand- und Eigenwerte eines Systems betrachtet werden, wobei die Randwerte analog zum normalen Tidegeschehen auch bei Sturmfluten sowohl von unter- wie auch von oberhalb des Ästuars auf das System wirken. Im Wesentlichen sind in Anlehnung an SIEFERT (1978) die folgenden Einflussgrößen zu nennen:

- Gezeitensignal aus der Nordsee
- meteorologische und barometrische Einflüsse (insbesondere Windstau)
- fluvialer Zufluss aus dem Flusseinzugsgebiet
- Eigenwerte des Ästuars (u.a. Konvergenz, Rauigkeit, Reflexionseigenschaften)

Die einzelnen Einflussgrößen und ihre Bedeutung für den Sturmflutablauf in Ästuaren werden im Folgenden kurz erläutert.

2.1 Tide und Windstau

In der Nordsee wird das Gezeitensignal aus dem Atlantik durch meteorologische und barometrische Einflussgrößen überlagert. Dabei kann die erzeugende Komponente sowohl über der Nordsee wirken (statischer Luftdruck oder lokale Windfelder) als auch externen Ursprungs sein (external surge). Als bedeutendste Einflussgröße für die Deutsche Bucht ist der durch lokale Windfelder an dem besonders flachen Küstensaum der südöstlichen Nordsee generierte Windstau bzw. -sunk zu nennen. Durch die Reibung der Luftströmung an der Wasseroberfläche wird über Schubspannungen Energie in den Wasserkörper eingetragen. Der Energieeintrag erzeugt eine Teilchenbewegung in der Wassersäule, die ein lineares Strömungsprofil annimmt. In einem umrandeten Becken wie der Nordsee führt dieser Massentransport zu einer Schiefelage des Ruhewasserspiegels, die zum Erhalt des hydrostatischen Gleichgewichts eine dem Windangriff entgegengesetzte sohnnahe Rückströmung erzeugt (MALCHAREK 2010). Der Stau nimmt mit abnehmender Wassertiefe zu. Dies kann insbesondere in den küstennahen Flachwasserbereichen der Deutschen Bucht beobachtet werden. Bedingt durch die verringerte Wassertiefe wirkt sich der Windstauereffekt während des Tideniedrigwassers stärker aus als beim Tidehochwasser (GÖHREN 1968; NASNER 2009).

Der Wasserstandsverlauf einer Sturmflut wird durch mehrere Einflussgrößen und insbesondere deren zeitlichem Ablauf relativ zueinander bestimmt. Insbesondere die meteorologischen Einflüsse weisen eine hohe natürliche Variabilität hinsichtlich der Zugbahnen

der Tiefdrucksysteme, dem zeitlichen Ablauf und der Intensität der Sturmfelder auf. Der an der Küste durch einen Sturm entstehende Stau wird wesentlich durch die Phasenlage zu den Gezeiten geprägt (SIEFERT 1968; GÖNNERT 2003).

2.2 Fluvialer Zufluss

Der Oberwasserzufluss der Mittelelbe hat vorwiegend im Flussabschnitt zwischen Geesthacht und Schulau einen spürbaren Einfluss auf die Sturmflutwasserstände. Am Pegel St. Pauli führt eine Veränderung des (am Pegel Neu Darchau gemessenen) Oberwasserzuflusses um $100 \text{ m}^3/\text{s}$ (gegenüber dem mittleren Abfluss von etwa $700 \text{ m}^3/\text{s}$) zur Veränderung eines Sturmflutscheitels um etwa einen Zentimeter (SIEFERT und CHRISTIANSEN 1983). Oberhalb des Hamburger Stromspaltungsgebietes sind die Einflüsse des Oberwassers auf die Wasserstände deutlich größer (BAW 2000), da der hier vorhandene Querschnitt des Gewässerbetts der Tideelbe bzw. die hydraulische Leistungsfähigkeit vergleichsweise gering ist, und eine Änderung des Abflusses so zu einer entsprechenden Reaktion des lokalen Ruhewasserspiegels führt.

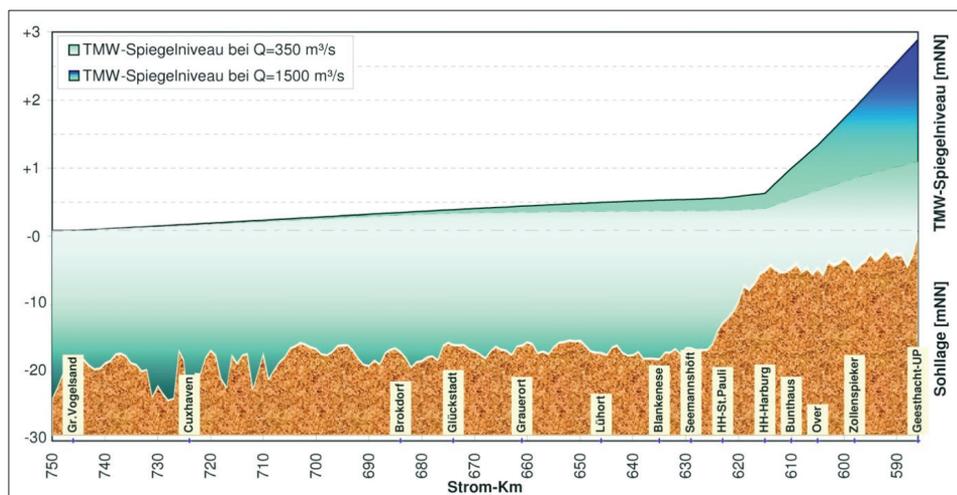


Abbildung 2: Unterschiede im Spiegelgefälle des Tidemittelwassers im Elbeästuar bei verschiedenen Oberwasserzuflüssen; ohne Windstaeinwirkung (FICKERT und STROTMANN 2009).

Phänomenologisch kann die Wirkung des Oberwassers auf die Tidedynamik nach FICKERT und STROTMANN (2009) wie folgt beschrieben werden: Das Oberwasser wird im Wechsel der Gezeiten über die Dauer des Flutstroms „eingestaut“ und muss zusätzlich zum Flutstromvolumen während der Ebbe abgeführt werden. In Verbindung mit dem Dichtegefälle und dem durch die Asymmetrie der Tidewelle bedingten Massentransport von See in das Ästuar hinein, bildet sich ein hydrostatischer Druckgradient aus, welcher durch die vorhandene Inklination des Tidemittelwasserspiegels zwischen der Mündung und der Sohlrampe beim Übergang vom seeschiffstiefen zum binnenschiffstiefen Fahrwasser (vgl. Abb. 2) zum Ausdruck kommt. Dieser dem Energieeintrag aus der Nordsee entgegen gerichtete hydrostatische Druckgradient beeinflusst die Transformation des Gezeitsignals. Die bei höheren Oberwasserabflüssen zu beobachtende

Verminderung des Tidehubs im Ästuar ist das Ergebnis verschiedener Faktoren. Zunächst kostet die Überwindung der Höhendifferenz im Ruhewasserspiegelgefälle der fortschreitenden Tidewelle potentielle Energie, was insbesondere oberhalb Hamburgs zu Buche schlägt und eine merkliche Dämpfung der Amplitude zur Folge hat. Pegelauswertungen zeigen aber auch eine Erhöhung des mittleren Tidehubs in Cuxhaven während der Perioden mit extrem hohem Oberwasserzufluss. Diese Beobachtung deutet daraufhin, dass es in der Tideelbe eine wandernde Reflektionszone gibt, deren Lage durch das Oberwasser bestimmt wird, und die bei extremem Oberwasserzufluss bis in die Mündung hinausgeschoben werden kann.

2.3 Eigenwerte des Ästuars

Bereits SIEFERT (1978) betonte die Bedeutung der Eigenwerte eines Ästuars für den Sturmflutablauf und nannte dabei u.a. die folgenden Einflussgrößen:

- Geometrie und Rauigkeit des Flusses (Länge, Tiefe, Breite, Querschnitte)
- Ausbauten, Hafengebäude, Vordeichungen, Absperrungen von Nebenflüssen
- Betrieb von Sperrwerken, Wehren
- Höhe und Haltbarkeit von Hochwasserschutzanlagen
- Örtliche Windeffekte

Physikalisch gesehen ist die Tideelbe ein einseitig offener Schwingungsraum, dessen Wassermasse durch die periodische Gezeitenschwingung an ihrer seeseitigen Öffnung zu eigenen Schwingungen angeregt wird. Nichtperiodische Komponenten aus lokalen Druckschwankungen sowie windgenerierter Stau oder Sunk überlagern das Eingangssignal am offenen Rand des Systems. Für die Tidedynamik der Elbe zwischen ihrer Mündung und dem Wehr in Geesthacht ist die hydromorphologische Beschaffenheit des Gewässerbettes von besonderer Bedeutung. Diese charakterisiert die Dämpfungs-, Absorptions- und Reflexionseigenschaften und damit die Eigenfrequenz des Schwingungsraumes Ästuar gegenüber dem Energie- bzw. Impulseintrag durch das Gezeitensignal. Die Transformation der Tidewelle von der Mündung eines Ästuars bis zur oberen Tidegrenze wird dabei maßgeblich durch die Rauheit seiner Gewässersohle und Ufer geprägt, welche durch Reibung Energie aus dem System entziehen. Die stromauf gesehen kontinuierlich fortschreitende Verjüngung der Flussbreite (Konvergenz) führt dagegen nach dem Gesetz der Energieerhaltung zwangsläufig zu einer Vergrößerung der Amplitude des seeseitigen Eingangssignals. Reflexionen unterschiedlichen Grades an Krümmungen, Strominseln und Sohlprüngen überlagern diese Prozesse. Die wohl prägnanteste Reflexion erfährt die Tidewelle in der Elbe am Sohlprung bei den Hamburger Elbbrücken, der durch den Übergang von seeschiffstiefen zu binnenschiffstiefen Fahrwasser bedingt ist. An dieser Stelle wird durch die Reduzierung der Wassertiefe ein eigenes Subschwingungssystem in der oberen Tideelbe angeregt. Am Wehr Geesthacht erfährt die Tidewelle schließlich bei mittleren Verhältnissen eine Totalreflexion. Bei Sturmfluten oder Hochwasser kann die Welle über das gelegte Wehr hinweg bis in die Mittelelbe fortlaufen (PROJEKTGRUPPE STROMBAU 2007).

Mit dem Einfluss der Geometrie und Rauigkeit des Gewässerbettes und insbesondere mit den Auswirkungen baulicher Veränderungen auf den Sturmflutablauf in der Elbe haben sich v.a. SIEFERT und HAVNØ (1989) umfassend auseinandergesetzt. TOMCZAK (1952) und SIEFERT (1978, 1991) haben sich mit dem Einfluss des örtlichen Windes auf

die Wasserstände im Ästuar befasst. SIEFERT (1991) kommt zum Ergebnis, dass der lokale Wind über der Elbe einen gewissen Einfluss auf die Wasserstände haben kann, ohne diesen Effekt jedoch quantifizieren zu können. Im Rahmen von modellgestützten Systemanalysen hat die BAW (2000) schließlich den Einfluss des Windes über der Elbe bei Sturmfluten erstmals konkret benennen können. Zuletzt befasste sich BREMER (2008) mit der Untersuchung des Windeinflusses über der Elbe. Insgesamt lässt sich der Kenntnisstand so zusammenfassen, dass der Wind über dem Elbästuar bei Sturmfluten eine beträchtliche Wirkung (mehrere Dezimeter) auf die Wasserstände haben kann, lokal aber deutliche Unterschiede in der Windwirkung bestehen.

3 Untersuchungen zur Stautwicklung und -übertragung in der Tideelbe

3.1 Entwicklung eines empirischen Modells zur Stauübertragung

Für die empirischen Untersuchungen in OPTEL-D wurde ein Untersuchungszeitraum von 1980 bis 2008 festgelegt; dieser kann im Hinblick auf anthropogene Beeinflussungen als weitgehend homogen eingestuft werden. Auch die in diesem Zeitraum durchgeführten großen Baumaßnahmen in der Elbe, z. B. der Fahrriennausbau von Unter- und Außenelbe (1999/2000), haben die Sturmflutverhältnisse in der Tideelbe nicht wesentlich verändert (WSA HAMBURG und HPA 2012). Das Sturmflutkollektiv umfasste alle Ereignisse aus diesem Zeitraum, bei denen der Stau am Pegel Cuxhaven mindestens 200 cm erreicht hat (egal, zu welcher Tidephase), sowie zusätzlich solche Hochwasser, die am Pegel Hamburg-St. Pauli einen Scheitelwasserstand von mindestens 900 cm PN aufwiesen. (Als Stau wird hier die Auslenkung des Wasserstandsverlaufs an einem Pegel gegenüber dem mittleren Tideverlauf bezeichnet. In der Staukurve sind die Einflüsse des Impulseintrags aus den Sturmfeldern über der Nordsee, der Luftdruckverteilung, der Temperatur- und Dichteeffekte, ggf. von Fernwellen und Eigenschwingungen in der Nordsee sowie astronomische Anteile zusammengefasst.) Auf Grundlage dieser Kriterien ergaben sich für OPTEL-D 153 Ereignisse. Die Untersuchungen in OPTEL-D zielten auf eine Verbesserung der Güte der Sturmflutvorhersagen ab. Der Fokus richtete sich insofern primär auf die Betrachtung des Hochwasserscheitels, zumal sich nur aus ihm unmittelbar der Grad der Gefährdung von Hochwasserschutzanlagen ableitet. Zudem erschien die Fokussierung der Analysen auf die Scheitelwerte zielführender um die „Problemfluten“, die nicht durch mittlere für die Mehrzahl geltende statistische Zusammenhänge beschreibbar sind, zunächst zu identifizieren und anhand dieser die möglichen Besonderheiten zu erkunden und daraus differenziertere Lösungen abzuleiten. Eine Übersicht über das Untersuchungsgebiet mit der Lage der in OPTEL-D verwendeten Pegel der Tideelbe zeigt Abb. 3.

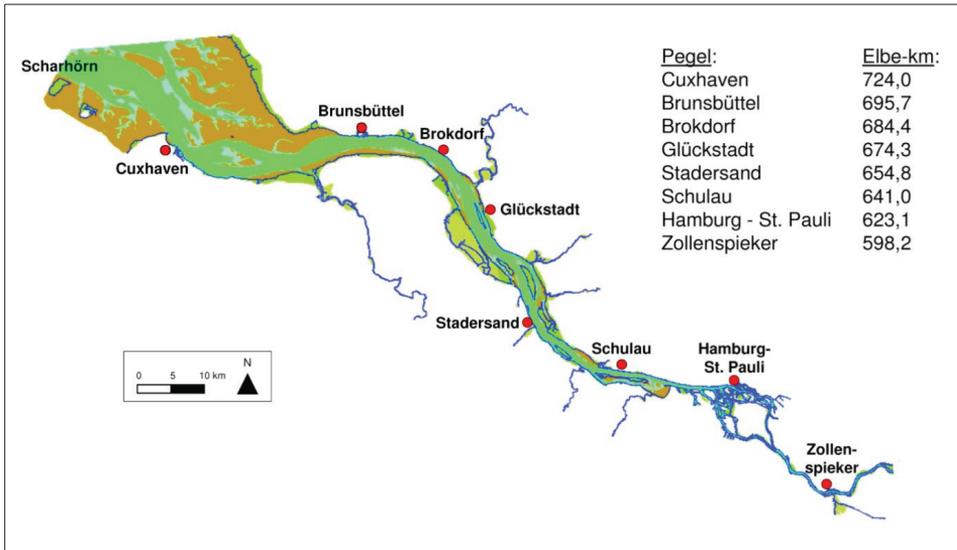


Abbildung 3: Das Untersuchungsgebiet im Überblick.

Um zu einer ersten Einschätzung der erreichbaren Verbesserungsmöglichkeiten für die Prognose von Hochwasserständen bei Sturmfluten in Hamburg zu gelangen, wurden neben dem im aktuellen WADI-Verfahren verwendeten Ansatz zwei weitere empirische Verfahren zur Übertragung von Sturmflutschreitern in einem Ästuar untersucht. Die dazu ausgewählten Verfahren stellen quasi den Status Quo der empirischen Verfahren zur Stauübertragung in der Unterelbe auf Basis parametrisierter Eingangsgrößen dar. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit dem WADI-Verfahren zu gewährleisten, wurden in diesen Verfahren zunächst nur die Hochwasser-Scheitelwerte einer Sturmflut berücksichtigt und eine direkte Übertragung vom Küstenpegel Cuxhaven auf den Pegel Hamburg-St. Pauli betrachtet.

WADI-Ansatz

Der im WADI-Verfahren (SIEFERT und CHRISTIANSEN 1983) des Hamburger Sturmflutwarndienstes zur Übertragung der Sturmflutschreitertiefen von Cuxhaven nach St. Pauli verwendete Ansatz besteht in einer linearen Superpositionierung verschiedener Variablen. Dabei handelt es sich im Einzelnen um eine Wasserstandsauslenkung in der inneren Deutschen Bucht, die empirisch aus der aktuellen Windentwicklung (Richtung, Geschwindigkeit) auf der seewärts von Cuxhaven gelegenen Insel Scharhörn ermittelt wird, dem Windstauanstieg am Pegel Borkum, dem Oberwasserabfluss am Pegel Neu Darchau sowie dem (vorausberechneten oder eingetretenen) Tidehochwasser am Pegel Cuxhaven. (Aus der zeitlichen Entwicklung des Winds auf Scharhörn werden empirisch sog. Windbeiwerte errechnet, die die windbedingte Änderung des Wasserstands (in cm) zum einen für Windrichtung (WR), zum anderen für Windgeschwindigkeit (WV) angeben.) Die für das OPTEL-D-Sturmflutkollektiv ermittelte Standardabweichung der

Differenzen zwischen Vorhersage und Eintrittshöhe des Hochwasserscheitels St. Pauli mit Hilfe des WADI-Ansatzes liegt bei rd. 24,5 cm.

Tidestieg-Ansatz

Die Auswahl des Stieg-Ansatzes beruht auf der Vorstellung, dass die Scheitelhöhe der Sturmflut in Hamburg weniger durch die absolute Hochwasserhöhe in Cuxhaven gesteuert wird, als vielmehr durch den Impuls, der Energie auf die im Ästuar mitschwingende Wassermasse überträgt. Der Impulseintrag soll bei diesem Gedankenmodell vereinfacht durch die am Mündungstrichter anstehende Änderung der potentiellen Energie über die Zeit abgebildet werden. Diese Änderung ist durch den Tidestieg beschreibbar, der die Differenz zwischen der Sturmflutscheitelhöhe und dem vorausgegangenen Tideniedrigwasser definiert. In dem zugrunde gelegten linearen Modellansatz wird davon ausgegangen, dass sich der Tidestieg in St. Pauli proportional zum Tidestieg in Cuxhaven darstellen lässt. Die resultierende absolute Sturmflutscheitelhöhe am Pegel St. Pauli ergibt sich dann durch Addition mit dem vorausgegangenen lokalen Tideniedrigwasser. Weitere Einflussgrößen wie der Oberwasserzufluss, können diese Beziehung überlagern.

Im Ergebnis zeigt der Ansatz einen linearen Zusammenhang zwischen dem Stieg in Cuxhaven und Hamburg-St. Pauli mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,94 an. Entgegen den Erwartungen, die zur Modellbildung geführt haben, ist allerdings kaum ein überproportionaler Zuwachs des Stiegs in St. Pauli mit wachsendem Stieg in Cuxhaven zu beobachten. Die ermittelte Standardabweichung bei der Bestimmung des Hochwasserscheitels St. Pauli liegt mit knapp 26 cm deutlich jenseits der zum Ziel gesetzten 20 cm. (Die Standardabweichung bezieht sich im Folgenden immer auf die Differenz zwischen Modellergebnis und Beobachtung). Die maximale Abweichung beträgt 92 cm bei der Sturmflut vom 14.1.1993 und hätte mit der Prognose eines Hochwasserscheitels von 1051 cm PN zu einer deutlichen Überschätzung des tatsächlich in Hamburg eingetreten Hochwassers von 959 cm PN geführt. Die maximale Unterschätzung hätte bei der Sturmflut vom 10.1.1995 immerhin noch 70 cm betragen. Statt der eingetretenen 1102 cm PN hätte das Modell nur einen Wert von 1032 cm PN prognostiziert.

Stau-Ansatz

Die Modellbildung für den Stau-Ansatz wird von der Vorstellung geleitet, dass der am Pegel Cuxhaven produzierte Stau sich ins Ästuar fortpflanzt und dabei infolge Konvergenz und Reflexionen zunimmt. Der Stau an den betrachteten Pegeln wurde für diese Untersuchung als Differenz zwischen dem beobachteten Sturmfluthochwasserscheitel und dem mittleren Tidehochwasser (MThw) gebildet. Das Ergebnis zeigt einen linearen Zusammenhang zwischen dem Stau in Cuxhaven und Hamburg-St. Pauli mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,93 an. Entsprechend den Erwartungen ist ein proportionaler Zuwachs des Staus in St. Pauli mit wachsendem Stau in Cuxhaven zu beobachten: Der Stau nimmt von Cuxhaven bis St. Pauli im Mittel um 21% zu. Die ermittelte Standardabweichung für das Hochwasser St. Pauli liegt mit knapp 20 cm exakt auf der Zielvorgabe. Für 72% der Ereignisse resultieren Differenzen zwischen Prognose und Beobachtung, deren Betrag kleiner ist als 20 cm. Die maximale Abweichung beträgt 79 cm bei der Flut vom 26.2.1990 und hätte mit der Prognose eines Hochwasserscheitels von 924 cm PN zu

einer deutlichen Unterschätzung des tatsächlich eingetreten Hochwassers von 1003 cm PN geführt. Die maximale Überschätzung hätte bei der Sturmflut vom 2.1.1995 immerhin noch 45 cm betragen. Statt der tatsächlich eingetretenen 903 cm PN hätte das Modell einen Wert von 948 cm PN prognostiziert.

Vergleichende Bewertung der drei empirischen Modelle

Zusammengefasst ergeben sich für die drei empirischen Ansätze zur Bestimmung des Sturmflutscheitels in Hamburg-St. Pauli folgende Standardabweichungen:

- WADI: 24,53 cm
- Tidestieg: 24,68 cm
- Stau: 19,56 cm

Außerhalb des ± 20 cm Toleranzbereiches lagen beim Stau-Ansatz 25 % der untersuchten Sturmfluten, beim Tidestieg-Modell waren es 41 % und beim WADI-Verfahren 33 %. Bemerkenswert ist, dass jedes Verfahren mit ganz unterschiedlichen Sturmfluten in der Vorhersage der Scheitelhöhen am Pegel St. Pauli seine Probleme hat. So ist z. B. die Sturmflut vom 26.2.1990, deren eingetretene Höhe im Stau-Modell um 80 cm unterschätzt wird, im Stieg-Modell lediglich um 30 cm zu niedrig vorhergesagt worden. Umgekehrt kann die Sturmflut vom 14.1.1993, die im Stieg-Modell um 99 cm zu hoch berechnet wird, mit dem Stau-Modell mit einer Abweichung von +11cm sehr genau berechnet werden. Gleiches gilt auch für die Sturmflut vom 10.1.1995, die im Stieg-Modell um 76 cm zu niedrig berechnet wird, aber im Stau-Modell nur um 25 cm unterschätzt wird. Bei der Sturmflut vom 18.3.2007, die im Stau-Modell zur größten positiven Abweichung von 45 cm führte, landet das Stieg-Modell mit +7 cm fast einen „Volltreffer“. Unabhängig davon bleibt festzuhalten, dass das Stau-Modell im Vergleich die kleinsten Standardabweichungen aufweist. Die weiterführenden Untersuchungen im Rahmen von OPTEL-D wurden vor diesem Hintergrund auf Basis des Stau-Ansatzes durchgeführt.

Stromauf – Entwicklung des Staus

Für diese Untersuchung werden die Stau-Werte in Hamburg-St. Pauli mit dem Stau aller Revierpegel in Beziehung gesetzt. Durch diese räumliche Betrachtung der Stau-Entwicklung entlang der Tideelbe sollten die möglichen lokalen Ursachen auf die bereits angesprochenen starken Abweichungen besser nachvollzogen werden. In Abb. 4 ist die Übertragung des Staus durch das Ästuar bis nach Hamburg ausgehend von unterschiedlichen Bezugspegeln dargestellt. Auf den x-Achsen befinden sich die Stauwerte an den Pegeln Cuxhaven, Brokdorf, Glückstadt und Schulau; auf der y-Achse ist stets der resultierende Stau am Pegel Hamburg-St. Pauli aufgetragen. Es ist erkennbar, dass die Korrelation der Stauwerte immer besser wird, je näher der Bezugspegel geographisch zu Hamburg liegt. Wird für die Abschätzung des Staus in Hamburg-St. Pauli ein Bezugspegel gewählt, der oberhalb von Brunsbüttel liegt, so sinkt die Standardabweichung auf unter 11 cm, ab Schulau gar auf unter 5 cm. Natürlich ist diese Feststellung für die Sturmflutvorhersage von geringem Wert, da der Hochwasserscheitelwert in Brokdorf bis zum Eintritt unbekannt ist und die anschließende Laufzeit des Scheitels bis nach Hamburg zu kurz, um noch rechtzeitig ggf. erforderliche Katastrophenschutzvorkehrungen treffen zu können.

Die genauere Inaugenscheinnahme der Veränderungen gibt aber neben der lokalen Eingrenzung des Entstehungsgebietes der Prognosefehler auch einen Hinweis auf die mögliche kausale Ursache für die zuvor unter Verwendung des Bezugspegels Cuxhaven registrierten „Ausreißer“. Insbesondere die Ereignisse, bei denen die Stauzunahme von Cuxhaven bis Hamburg durch das statistische Modell deutlich unterschätzt wird (Streu-punkte oberhalb der Regressionsgeraden), sind bei einer Übertragung ab Brokdorf nach Hamburg optisch nicht mehr auszumachen. Diese Beobachtung deutet darauf hin, dass es im Mündungsgebiet zwischen Cuxhaven und Brokdorf offenbar unter bestimmten Randbedingungen stauerhöhende Einflüsse gibt, die in dem statistischen Modell noch nicht berücksichtigt sind. Der theoretisch vorhandene Einfluss einer staubedingt vergrößerten Wassertiefe über dem Neufelder Watt auf das Maß des Stauzuwachses, konnte in den dazu durchgeführten Untersuchungen nicht signifikant nachgewiesen werden, weshalb diese Untersuchungen hier auch nicht weiter dargestellt werden.

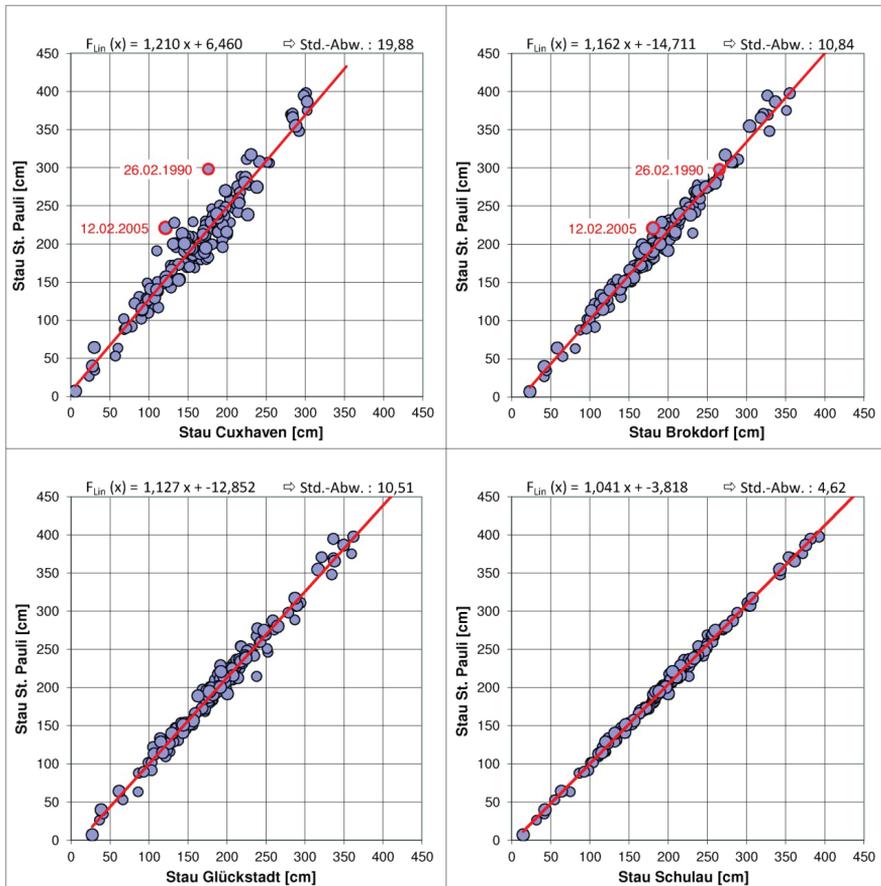


Abbildung 4: Übertragung des Staus vom Mündungspegel Cuxhaven über die Revierpegel bis nach Hamburg-St. Pauli (ohne Berücksichtigung des Oberwassers).

Ausmaß, Vorzeichen und Ort der Ergebnisbeeinflussung lassen die Schlussfolgerung zu, dass die größeren Unterschätzungen durch das Stau-Modell auf die Vernachlässigung lokal wirksamer Windbedingungen im Mündungstrichter zwischen Cuxhaven und Brokdorf zurückzuführen sind. Insbesondere die gesonderte Analyse der „Ausreißer“-Sturmflut vom 26.2.1990 zeigt, dass ganz offenbar der Wind im Mündungstrichter für überdurchschnittliche große Stauzuwächse maßgeblich mit verantwortlich ist. Angesichts der erstaunlichen Größenordnung der Stauüberhöhung bei einigen Ereignissen ist es erforderlich, den Einfluss des lokalen Windes im Mündungstrichter auf den Stauzuwachs weiter zu analysieren und zu quantifizieren.

Einfluss des lokalen Windes auf den Stauzuwachs

Ein Blick auf die geografische Lage des Mündungsgebiets der Elbe (Abb. 5) verdeutlicht, dass der Lauf des Elbestroms im Altenbrucher Bogen von See kommend in östliche Richtung schwenkt, bevor er in Höhe Brokdorf für die Flutströmung wieder auf eine süd-süd-östliche Richtung zurückschwenkt. Während ein Wind aus etwa 280 bis 285° aufgrund der Ausrichtung des Küstensaums der flachen Watten, die dem Mündungstrichter der Elbe vorgelagert sind, die besten Voraussetzungen mitbringt, um den Wasserspiegel in der Deutschen Bucht am effektivsten aufzustauen, findet ein Wind aus ca. 260° innerhalb des Mündungstrichters der Elbe die längste und damit theoretisch wirksamste Angriffsstrecke vor, um die Wassermassen einerseits weiter ins Ästuar hinein auf das senkrecht dazu verlaufende Ufer bei Brokdorf, aber auch auf das flache Neufelder Watt zu schieben (siehe auch SIEFERT 1978; BREMER 2008).



Abbildung 5: Stauwirksamste Windrichtungen für die Deutsche Bucht und das Elbmündungsgebiet.

Inwieweit diese auf der Basis geografischer Gegebenheiten angegebene theoretisch stauwirksamste Windrichtung auch den größten Stauzuwachs auf der Strecke Cuxhaven-Brokdorf produziert, wurde durch die im Folgenden dargestellte Regressionsanalyse verifiziert. Analysiert wird dabei der Zusammenhang zwischen dem Stauzuwachs von Cuxhaven nach Brokdorf und dem effektiven Windschubäquivalent des Windes im Mündungstrichter. Das effektive Windschubäquivalent τ_{eff} wird dabei durch die Vektorprojektion der quadrierten Windgeschwindigkeit WV auf die iterativ zu bestimmende stauwirksamste Richtung WR_0 abgebildet:

$$\tau_{eff} = \beta \cdot WV_i^2 \cdot \cos^2(WR_i - WR_0) \quad (1)$$

Der gesuchte Regressionskoeffizient β gibt die Steigung zwischen den in Abb. 6 aufgetragenen Größen an. Die windwirksamste Richtung WR_0 wird durch das Minimum der Summe der Fehlerquadrate zwischen dem Modellergebnis und den Beobachtungen minimieren, hier also zwischen dem effektiven Schubäquivalent τ_{eff} und dem Stauzuwachs von Cuxhaven nach Brokdorf $\Delta\text{Stau}_{\text{BRO}}$:

$$\sum \cdot [\Delta\text{Stau}_{\text{BRO}} - \tau_{eff}(WR_0)]^2 = \text{Min!} \quad (2)$$

Da direkt aus dem Mündungsgebiet keine gemessenen Windinformationen vorliegen, wurde das Modell sowohl für die Daten der Windmessstation Scharhörn als auch die von Brunsbüttel kalibriert und die Ergebnisse miteinander verglichen. Abb. 6 zeigt, dass grundsätzlich eine Beziehung zwischen dem Stauzuwachs und dem effektiven Windschubäquivalent vorhanden ist, die mit dem gewählten Modellansatz mathematisch beschreibbar wird. Unter Verwendung der Winddaten Brunsbüttel liefert das Modell insgesamt, aber insbesondere bei dem rot eingekreisten Sturmflutereignis vom 26.2.1990 eindeutig die besseren Ergebnisse als bei Verwendung der Winddaten Scharhörn. Die geringste Standardabweichung erzielt man unter Ansatz einer windstauwirksamsten Richtung WR_0 von 262° , womit die auf Basis der geografischen Gegebenheiten naheliegende theoretische Erwartung bestätigt wird.

Auch die Rolle des Zeitpunktes in dem der Wind den Stauzuwachs auf der Relation Cuxhaven - Brokdorf produziert, wurde variiert. Dabei konnte durch vergleichende Berechnungen herausgearbeitet werden, dass die lokalen Windbedingungen um eine Stunde vor bis zum Eintritt des Tidehochwasserscheitels in Cuxhaven die geringste Standardabweichung produzieren.

Die Sturmflut vom 26.2.1990 ist in Abb. 6 farblich hervorgehoben, da sie aufgrund des großen Prognosefehlers zu einer Unterschätzung des Hochwasserscheitels in St. Pauli von 80 cm führte und damit den Anlass für die Überprüfung des Windeinflusses gegeben hatte. Während sie bei der Analyse unter Verwendung des Windes der Station Scharhörn (21 m/s; 250°) noch mehr als 60 cm Abstand von der Regressionsgeraden aufweist, liegt sie unter Ansatz des Windes in Brunsbüttel (32 m/s; 260°) nun fast auf der Geraden. Gerade bei diesem Ereignis ist die offenbar deutlich höhere lokale Windgeschwindigkeit im Mündungstrichter für den außergewöhnlich großen Stauzuwachs bis Brokdorf verantwortlich. Die Standardabweichung dieses Ansatzes zur Übertragung des Staus von Cuxhaven nach Brokdorf auf Basis des Windschubäquivalents liegt bei knapp 11 cm und ist damit deutlich geringer als in dem einfachen Stau-Modell, das in Brokdorf bereits eine Standardabweichung von 15,5 cm produziert.

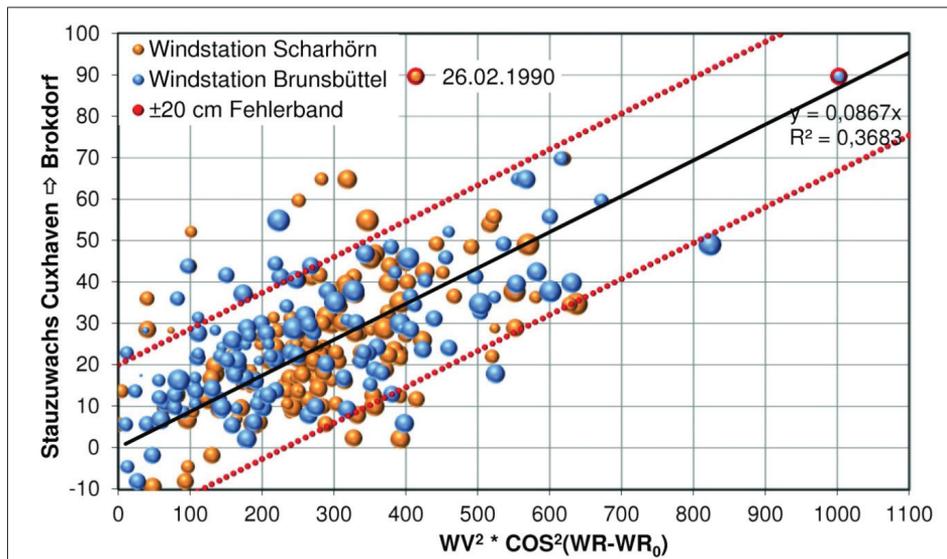


Abbildung 6: Einfluss des lokalen Winds auf den Stauzuwachs im Elbmündungsgebiet.

Damit wird die Rolle des lokalen Windfeldes über dem Mündungsgebiet zweifellos belegt und gleichzeitig klar, dass die Kenntnis und Berücksichtigung dieser lokal und nur selten in dem Ausmaß wie bei der Sturmflut vom 26.2.1990 wirkenden Einflussgröße auch zu einer deutlichen Verbesserung des Modells zur Übertragung des Staus von Cuxhaven nach Hamburg führen sollte.

Wie oben dargestellt, kann die weitere Entwicklung des Staus in der Tideelbe stromaufwärts von Brokdorf durch eine lineare Übertragung des Staus unter Berücksichtigung des Oberwassereinflusses in zufriedenstellender Güte beschrieben werden. Ein Einfluss des Windes auf den Stauzuwachs im Teilstreckenabschnitt Brokdorf bis Hamburg kann auch aus den Daten nicht identifiziert werden. Dies konnte aber auch nicht erwartet werden, da die Gewässerbreite zunehmend schmaler wird und die größere Rauheit der umgebenden Landflächen auch den Wind über dem Wasser reduziert. Auch sind die Teilstrecken zwischen den stromaufwärts von Brokdorf folgenden Richtungsänderungen des Flusslaufs zu kurz um einen bedeutenden Fetch (Windwirklänge) auszubilden (siehe auch SIEFERT 1978), und im Gegensatz zur geografischen Situation im Raum Brokdorf folgen keine weiteren vergleichbaren 90°-Richtungsänderungen des Flussverlaufs mehr, an denen das bei Sturmflut stromauf gedrückte Wasser derart eingestaut werden könnte.

Um für Hamburg zu einer verbesserten Stauprognose zu gelangen, wird der Einfluss des Windes im Mündungstrichter direkt in das Stau-Modell für Hamburg implementiert. In das um den Windeinfluss im Mündungstrichter erweiterte Staumodell für Hamburg - St. Pauli gehen damit nachfolgende Parameter ein:

- der Stau in Cuxhaven: Stau_{CUX}
- die Differenz des aktuellen Oberwasserabflusses Q am Pegel Neu Darchau (ND) zum langjährigen mittleren Oberwasserabfluss von $700\text{m}^3/\text{s}$: ΔQ_{ND}
- das zuvor definierte Windschubäquivalent auf der Relation Cuxhaven-Brokdorf mit den Windwerten der Station Brunsbüttel zur Eintrittszeit des Thw in Cuxhaven und einer windstauwirksamsten Richtung von $WR_0 = 262^\circ$

Im statistischen Modell soll sich der Stau in St. Pauli ($Stau_{STP}$) durch eine Superposition der einzelnen Einflussgrößen als geschlossene Lösung ergeben:

$$Stau_{STP} = m_1 \cdot Stau_{CUX} + m_2 \cdot \Delta Q_{ND} + m_3 \cdot \tau_{eff} \quad (3)$$

Mit Hilfe der multiplen Regressionsrechnung können die Koeffizienten m_i ermittelt werden:

$$Stau_{STP} = 1,1587 \cdot Stau_{CUX} + 0,0106 \cdot \Delta Q_{ND} + 0,0615 \cdot \tau_{eff} \quad (4)$$

Mit dieser Gleichung ist es möglich, den Stau von Cuxhaven nach Hamburg-St. Pauli unter Einbeziehung des windgenerierten Stauzuwachs im Mündungsgebiet direkt -ohne den Umweg über die Berechnung des Staus in Brokdorf- zu übertragen. Die bessere Korrelation der Stauübertragung zwischen Cuxhaven und St. Pauli zeigt sich deutlich in der Abb. 7. Dort sind die Modellergebnisse ohne (links) und mit (rechts) Berücksichtigung des lokalen Winds im Elbmündungsgebiet den Beobachtungen am Pegel Hamburg-St. Pauli gegenüber gestellt. Durch die Berücksichtigung des Windes im Mündungstrichter der Elbe weisen die Modellergebnisse für den Pegel St. Pauli insgesamt eine geringere Streuung im Vergleich zur Berechnung ohne Windeinfluss auf. Die Streupunkte befinden sich überwiegend innerhalb des angestrebten ± 20 cm Vertrauensbereich (rote gestrichelte Linien) oder aber deutlich näher daran. Dieser Eindruck kommt auch in der um $3,7 \text{ cm} \cong 20\%$ kleineren Standardabweichung von nunmehr 15,82 cm zum Ausdruck. Insbesondere konnten durch die Erweiterung des Staumodells um den Windeinfluss aber die größten Unterschätzungen (oberhalb der Diagonalen) der eingetretenen Sturmflutschichtelhöhen in Hamburg merklich reduziert werden. Bei einer Reihe von Sturmfluten sind bei der Übertragung Verbesserungen zwischen 20 bis 50 cm zu verzeichnen. Insbesondere bei den extrem hohen Ereignissen hat die Modifikation des Ansatzes aber auch zu einer geringfügigen Verschlechterung der Prognose geführt.

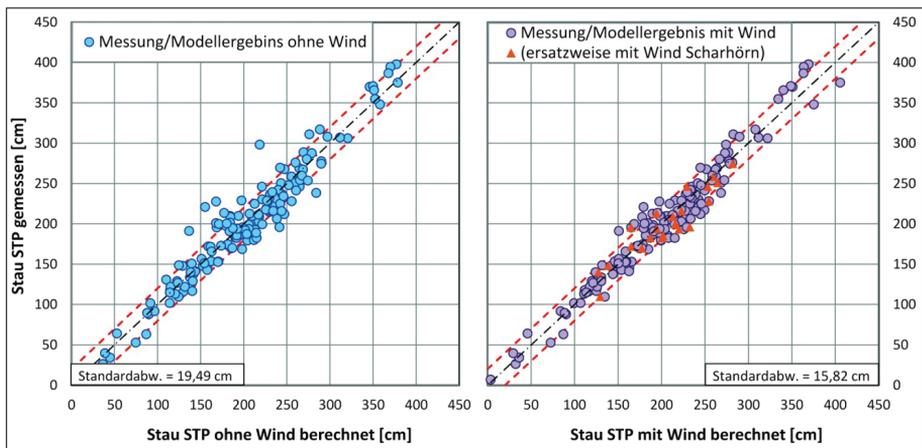


Abbildung 7: Übertragung des Staus von Cuxhaven nach Hamburg-St. Pauli ohne (links) und mit (rechts) Berücksichtigung des Winds im Mündungsgebiet.

Tab. 1 zeigt exemplarisch für sturmfluttypische Windgeschwindigkeiten und damit korrespondierende Stauhöhen in Cuxhaven die aus dem Modell resultierenden Anteile der

Komponenten Wellenkinematik/Hydrodynamik, Oberwasserabfluss und Wind, um die Größenordnung der einzelnen Komponenten besser einschätzen zu können. Es wird deutlich, dass durch die Komponente Wellenkinematik bzw. Hydrodynamik, d.h. durch die Morphologie und physikalische Einflüsse (z. B. Konvergenz und Reflexion), die im Ästuar eine Zunahme von etwa 16 % bezogen auf den Stau in Cuxhaven generieren, in der Regel der größte Anteil am Stauzuwachs in Hamburg beigetragen wird. Der Windstauereffekt im Mündungstrichter ist eine stark veränderliche Größe, da er von der lokalen Windrichtung und der Windgeschwindigkeit geprägt wird. Weht der Wind mit sehr hohen Geschwindigkeiten von über 25 m/s aus der windwirksamsten Windrichtung von 260°, kann der Anteil des lokalen Stauereffekts am Gesamtstauzuwachs mit mehr als einen halben Meter sogar größer werden als der Anteil der hydrodynamischen Komponente. Der Einfluss des Oberwasserabflusses aus der Mittelelbe ist dagegen mit 1,06 cm je 100 m³/s verhältnismäßig gering.

Tabelle 1: Anteil der Komponenten des statistischen Modells an der Übertragung des Staus von Cuxhaven nach Hamburg (Pegel St. Pauli).

Einflussgröße	Anteil an der Stauzunahme bis Hamburg (Pegel St. Pauli)		
Wind aus 260° mit V_{BRU}	20 m/s	25 m/s	30 m/s
Windstau im Mündungstrichter	24,6 cm	38,4 cm	55,4 cm
Grundstau Cuxhaven	200 cm	250 cm	300 cm
Wellenkinematik/ Hydrodynamik	31,7 cm	39,7 cm	47,6 cm
Oberwasserabfluss:	$\pm 1,06 \text{ cm}/100 \text{ m}^3/\text{s}$ (als Δ zu $Q_m = 700 \text{ m}^3/\text{s}$)		

3.2 Untersuchungen zur Kinematik des Staus

Eine wichtige Erkenntnis aus den Untersuchungen zur Transformation des Staus im Ästuar ist der Einfluss des lokalen Windes im Mündungsgebiet. Er kann eine wichtige Rolle bei der Entwicklung des Staus zwischen Cuxhaven und Brokdorf spielen, der sich dann auch auf die Scheitelhöhe in Hamburg niederschlägt. Doch nicht jede Sturmflut wird maßgeblich vom Windstau im Mündungsgebiet beeinflusst und kann trotzdem einen außergewöhnlich hohen Stauzuwachs auf dem Weg von Cuxhaven nach Hamburg erfahren. Dagegen erfahren andere Sturmfluten kaum einen Stauzuwachs. Vertiefende Untersuchungen, die im Rahmen von OPTEL-D durchgeführt wurden, zeigen, dass der Stau in Cuxhaven allein nur ein schwacher und gelegentlich auch trügerischer Prädiktor für die vorherzusagende Sturmflutscheitelhöhe in Hamburg ist. Die Tatsache, dass der zweithöchste beobachtete Stauzuwachs (nach der Sturmflut vom 26.2.1990 mit 122 cm) mit exakt 100 cm bei der Sturmflut vom 12.2.2005 auftrat, die in Cuxhaven einen Stau von lediglich 121 cm aufwies, zeigt, dass es - neben dem lokalen Wind - noch andere Ursachen innerhalb der Tideelbe geben muss, die eine maßgebliche Rolle für die Stauübertragung spielen. Die bei Einzelbetrachtungen von Sturmfluten festgestellten unterschiedlichen Charakteristika in der zeitlichen Entwicklung des Staus in Cuxhaven hinsichtlich

Geschwindigkeit des Stauanstiegs und der Phasenlage zum Tidesignal sind Veranlassung, die Kinematik des Staus näher zu beleuchten. Die Analyse der Staukinematik folgt der aus den Beobachtungen abgeleiteten Vorstellung, dass sich das aus der Nordsee einschwingende periodische Gezeitensignal und eine solitäre "Stauwelle" im Ästuar überlagern und sich gegenseitig in Abhängigkeit von der Dynamik der Staugenerierung nicht-linear beeinflussen. Durch eine vergleichende Betrachtung der Staugenerierung sowie der stromaufwärtigen Stautransformation von Cuxhaven nach St. Pauli für ein Teilkollektiv von 78 Sturmfluten ab 1992 wurden im Rahmen von OPTTEL-D in Anlehnung an SIEFERT und CHRISTIANSEN (1983) drei charakteristische „Stau-Typen“ definiert:

- dynamisch
- adynamisch
- kollabierend

Eine „dynamische“ Stauentwicklung ist dadurch geprägt, dass die Wasserspiegellage kurzfristig auf in der Deutschen Bucht plötzlich stark auffrischende und/oder auf Nordwest drehende Winde reagiert. Kennzeichnend für diesen Sturmfluttyp ist deshalb die Ausbildung einer solitären „Stauwelle“, die unabhängig vom Gezeitensignal in das Ästuar einschwingt und dabei den Gesetzen der Wellenkinematik unterliegt. Diese Stauwelle ist besonders ausgeprägt, wenn diese Beschleunigung zur Zeit des Tideniedrigwassers Cuxhaven oder während der anschließenden frühen Flutphase einsetzt. Treffen die Scheitel der Stauwelle und der Gezeitenwelle etwa zeitgleich in Hamburg ein, führt die Überlagerung der beiden Komponenten zu einer überdurchschnittlich großen Stauerhöhung im Hochwasserscheitel der Sturmflut. Ein charakteristisches Beispiel für eine dynamische Stauentwicklung mit der Besonderheit, dass die Staugenerierung erst kurz vor dem Hochwasserscheitel Cuxhaven einsetzt, stellt die Sturmflut vom 18.1.2007 dar (Abb. 8). In diesem Fall war die Windeinwirkung mit Geschwindigkeiten bis 26 m/s aus westlicher Richtung so stark, dass auch gegen die fallende astronomische Gezeit eine Wasserspiegelerhöhung produziert wird. Die Staukurve ist insofern deutlich geprägt von der dynamisch generierten Stauwelle, die stabil durch das innere Ästuar läuft und dabei infolge Konvergenz und Reflexion eine Erhöhung erfährt.

Hingegen werden Sturmfluten, bei denen die stauwirksamen Windbedingungen weitgehend konstant sind und der Stau zwischen dem Mündungspegel und dem inneren Ästuar nur geringfügig zunimmt, als „adynamisch“ bezeichnet. Solche Fluten sind durch eine relativ geringe Beschleunigung der Staukomponente gekennzeichnet. Infolge der weitestgehend gleich-bleibenden und vergleichsweise niedrigen Windgeschwindigkeiten reicht der Impulseintrag aus der Deutschen Bucht nicht aus, um eine separate „Stauwelle“ anzuregen. Der Stauzuwachs im Ästuar fällt aufgrund der kaum ausgeprägten Wellenkinematik deutlich niedriger aus als bei einer in Cuxhaven vergleichbar hohen dynamischen Sturmflut. Adynamische Sturmfluten sind durch ihre konstant hohen, aber in der Spitze meist schwächeren Windgeschwindigkeiten lediglich in der Lage, das Wasser im Ästuar „einzustauen“ („passiver Stau“), und somit eine übers gesamte Ästuar hinweg erhöhte Ruhewasserspiegellage zu erzeugen. Die staubildende Windsituation kann hierfür aber durchaus über mehrere Tage anhalten und so für eine Sturmflutkettentide sorgen. Ein charakteristisches Beispiel für eine adynamische Stauentwicklung ist das Sturmflut-Ereignis vom 1.11.2006 (Abb. 8).

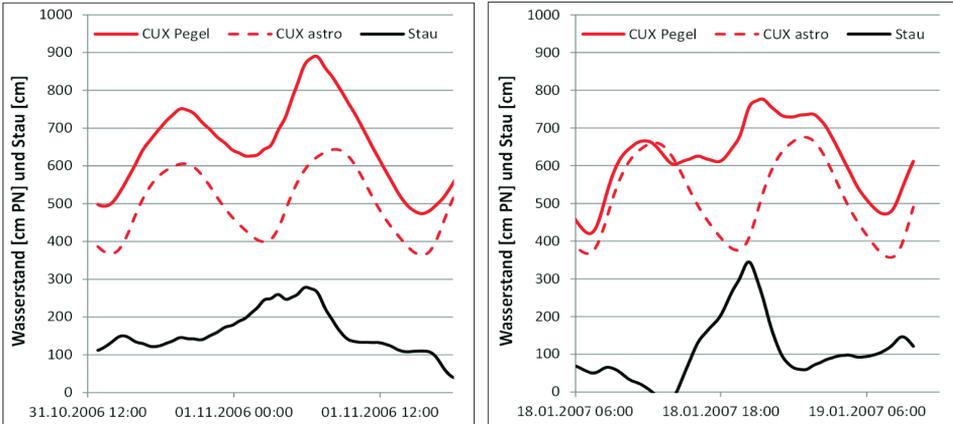


Abbildung 8: Beispiele für Sturmfluten mit adynamischem (links, Flut vom 1.11.2006) und dynamischem Stauverlauf (rechts, Flut vom 18.1.2007) am Pegel Cuxhaven.

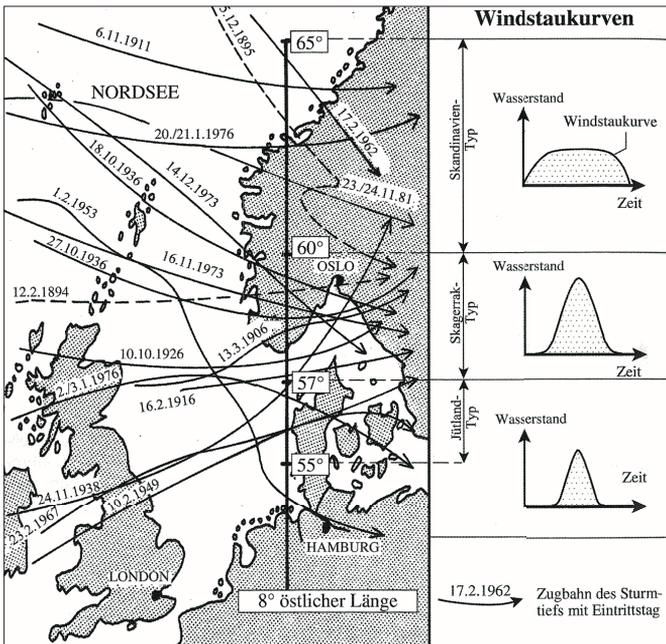


Abbildung 9: Sturmfluttypen an der deutschen Nordseeküste (aus: LECHER et.al 2001, S. 674).

Erwähnenswert ist, dass es einen recht engen Zusammenhang zwischen der Form der Windstaukurve und der Zugbahn des sturmflutauslösenden Tiefdruckgebiets über Europa gibt. Bereits PETERSEN und ROHDE (1991) haben darauf hingewiesen, dass solche Sturmtiefs, deren Zugbahn weit nördlich liegt, zumeist einen breiten, fülligen Windstaukurvenverlauf in der Deutschen Bucht verursachen, da diese Tiefs häufig stationär über Skandinavien verharren und insofern lang anhaltende Nordwestwinde über der Nordsee mit sich bringen. Derartige Zyklonen des „Skandinavien-Typs“ führen also in der Regel zu einem „adynamischen“ Windstauverlauf. Demgegenüber weisen Windstaukurven, die

von weiter südlich ziehenden Tiefs hervorgerufen werden, aufgrund der damit häufig verbundenen schnell durchziehenden, aber kräftigen Windfelder, eine steile, kurze Form auf. „Dynamische“ Stauentwicklungen sind deshalb also häufig mit Sturmtiefs verknüpft, die einen eher südlichen Verlauf über Nordeuropa haben. Nach der Definition von PETERSEN und ROHDE (1991) spricht man vom „Skagerrak-Typ“, wenn das Tief den 8. östlichen Längengrad zwischen 60 und 57° nördlicher Breite überquert; Orkane des „Jütland“-Typs ziehen südlich des 57. Breitengrads von West nach Ost (Abb. 9) und sorgen zumeist für besonders steile und kurze Windstaukurven. Diese „Faustregel“ kann für die Sturmflutvorhersage ein wichtiges Hilfsmittel sein.

Die dritte Kategorie bilden Sturmfluten mit „kollabierenden“ Stauentwicklungen. Dazu gehören Fluten, bei denen die staubildende Windeinwirkung noch vor Eintritt des astronomischen Hochwasserscheitels in Cuxhaven deutlich einbricht; der aufgebaute Stau kann sich folglich nicht bis zum Hochwasserscheitel der astronomischen Tide halten. Eine kollabierende Windsituation kann sowohl nach einer dynamischen als auch adynamischen Stauegenerierung eintreten. Der Einbruch des Windes hat geringere Hochwasserscheitel in Hamburg zur Folge als von den statistischen Modellen prognostiziert wird. In der überwiegenden Zahl der kollabierenden Ereignisse kann die Ursache dafür insbesondere bei adynamischen Staubebedingungen noch am ehesten auf die sich einstellende Gradienten im Ästuar zurückgeführt werden: Während das Tidemittelwasser am Küstenpegel auf den nachlassenden Wind unmittelbar reagiert, benötigt diese Information etwas Zeit bis es auch den Pegel St. Pauli erreicht. In der Zwischenzeit bildet sich je nach Größe und Geschwindigkeit des Küstenstauabsinks im Ästuar ein Gefälle aus, das von der einlaufenden Gezeit überwunden werden muss. Die Überwindung dieser Gradienten dämpft die Amplitude der Gezeit.

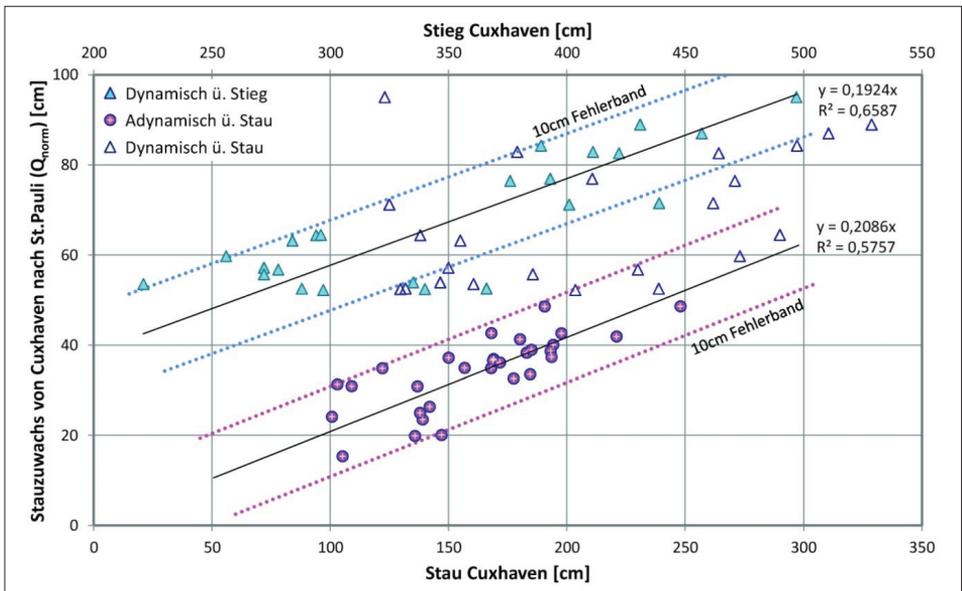


Abbildung 10: Stauzuwachs am Pegel Hamburg-St. Pauli in Abhängigkeit vom Stau bzw. Tidestieg am Pegel Cuxhaven, differenziert nach Stautypen.

Das Ergebnis der verschiedenen Wirkungsmechanismen auf die resultierende Sturmflut-scheitelhöhe in Hamburg wird durch Abb. 10 verdeutlicht, in der die Zunahme des Staus in St. Pauli über den Stau bzw. Stieg in Cuxhaven aufgetragen ist. Die einzelnen Ereignisse sind entsprechend ihrer Sturmflutcharakteristik durch unterschiedliche Symbole gekennzeichnet. Es wird deutlich, dass sich der Stauzuwachs bei den adynamischen Sturmfluten innerhalb eines relativ engen Fehlerbands von weniger als 10 cm direkt über den Stau in Cuxhaven beschreiben lässt. Hingegen ist bei den dynamischen Sturmfluten keine gute Korrelation zum Stau in Cuxhaven zu verzeichnen (leere Dreiecke). Der Stauzuwachs fällt hier im Vergleich zu den adynamischen Sturmfluten deutlich größer aus. Dagegen liefert eine Auftragung der dynamischen Sturmfluten über den Tidestieg in Cuxhaven (obere x-Achse, gefüllte Dreiecke) eine deutlich bessere Korrelation. Da der Tidestieg am Pegel Cuxhaven die Dynamik der Sturmflutentstehung in der Regel viel besser beschreibt als der Stau im Hochwasserscheitel, bestätigt dieses Ergebnis die Theorie bezüglich des maßgebenden Einflusses und der Notwendigkeit der Differenzierung unterschiedlicher Staugenerierung.

Die Untersuchungen zur Kinematik des Staus haben also gezeigt, dass die Höhenentwicklung des Staus im Ästuar ganz maßgeblich durch die Dynamik der Sturmflut geprägt wird. Ist die Beschleunigung der windgenerierten Wasserspiegelauslenkung groß genug, wird eine Stauwelle produziert, deren Auslenkung - maßgeblich infolge Konvergenz und Reflexion - bis nach Hamburg deutlich erhöht wird. Die maximale Erhöhung eines „dynamisch“ generierten Windstaus im Ästuar konnte bei der (Anatol)-Sturmflut vom 3.12.1999 mit einem Zuwachs im Peak der Stauwelle von 43 % bei einem Ausgangswert in Cuxhaven von 371 cm beobachtet werden. Die Dauer des Stau-Peaks beträgt zumeist nur wenige Stunden, so dass es für die resultierende Scheitelhöhe des summarischen Wasserstands aus Stau und Gezeit im Wesentlichen darauf ankommt, mit welcher Zeitdifferenz der Peak des Staus zum astronomischen Tidehochwasser eintritt. Bei der Anatol-Sturmflut lag der maximale Peak der Stauwelle weit genug vor der astronomischen Hochwassereintrittszeit, so dass in der Tideelbe keine neuen Höchstwasserstände aufgetreten sind.

Die „adynamischen“ Sturmfluten bilden dagegen kaum eine Stauwelle im Ästuar aus und weisen folglich auch nur einen durchschnittlichen Stauzuwachs von Cuxhaven nach Hamburg auf. Ihre Entwicklung an den Ästuarpegeln ist gekennzeichnet durch einen vergleichsweise langsamen und parallel zu Cuxhaven verlaufenden Anstieg des Staus. Adynamische Sturmfluten treten bei deutlich geringeren Windgeschwindigkeiten auf, die nur selten und dann auch nur kurzzeitig die 20 m/s-Schwelle überschreiten.

Komplexer gestalten sich die Sturmflutprognosen bei „kollabierenden“ Windbedingungen, die sowohl nach einer dynamischen als auch adynamischen Staugenerierung auftreten können. Tendenziell wird das Hochwasser in St. Pauli im Vergleich zu adynamischen und erst recht dynamischen Sturmfluten niedriger eintreten. Die Kriterien zur Definition einer kollabierenden Sturmflut sind aber nur sehr vage beschreibbar hinsichtlich der Größenordnung des erforderlichen Windeinbruchs sowie des Zeitpunktes bis zu dem diese Änderung eingetreten sein muss, so dass eine formale Beschreibung der zu erwartenden Höhe des Sturmflutscheitels in Hamburg bei diesem Typ misslingt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die durchgeführten Analysen einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung des phänomenologischen Prozessverständnisses der Sturmflut-propagation durch ein Ästuar geleistet haben und die verschiedenen Umstände aufgezeigt

haben, die zu berücksichtigen sind, um die Entwicklung des Staus im Ästuar ursachengerechter zu beschreiben. Die Ermittlung des Stauzuwachses in der Unterelbe kann bei adynamischen Sturmfluten hinreichend genau über die Höhe des Staus am Pegel Cuxhaven ermittelt werden. Dagegen empfiehlt sich bei dynamischen Sturmfluten eher die Höhe des Stiegs in Cuxhaven als Grundlage für die Berechnung des Stauzuwachses von Cuxhaven nach Hamburg. In beiden Fällen sollte der Stauzuwachs infolge des lokalen Windes im Mündungstrichter berücksichtigt werden. Bei den kollabierenden Sturmfluten müssen die Untersuchungen noch vertieft werden, um die Kriterien, denen eine Wind-Stau-Einbruch-Situation genügen muss, damit es zum rechtzeitigen Kollabieren kommt, besser greifbar und vor allem praxisgerecht zu machen. Zwischenzeitlich hat KARAGOUNIS (2012) Kriterien zur Einordnung der verschiedenen Sturmfluttypen aufgestellt und sich mit den Möglichkeiten einer Berücksichtigung selbiger im WADI-Vorhersageverfahren befasst.

Es sei ergänzend darauf hingewiesen, dass sich für die Verwendung des OPTEL-Staumodells im Rahmen des WADI-Sturmflutvorhersageverfahrens das Problem ergibt, dass eine wind- und/oder dynamikbedingte Stauerhöhung mittels Pegelmessungen während des Ereignisses erst spät erfasst werden kann: An Pegeln kann eine Stauüberhöhung erst am 40 km stromauf von Cuxhaven gelegenen Pegel Brokdorf sicher erkannt werden. Allerdings beträgt die Laufzeit eines Sturmflutscheitels von Brokdorf bis Hamburg-St. Pauli im Mittel nur noch etwa zwei Stunden. Das dem WADI-Vorhersageverfahren zu Grunde liegende Prinzip, Sturmflutprognosen allein auf Basis von gemessenen Werten zu ermitteln, kann deshalb u.U. exakte Prognosen erst sehr spät für eine rechtzeitige Alarmierung der Katastrophenschutzdienste liefern. Angesichts der gewonnenen Kenntnisse über die Bedeutung des lokalen Windes ist es deshalb erforderlich, auf Prognosen der lokalen Windverhältnisse zurückzugreifen. Eine im Zuge von OPTEL-D durchgeführte stichprobenartige Überprüfung der Güte von vorhergesagten Winddaten für das Elbmündungsgebiet ergab, dass die Prognosemodelle des Deutschen Wetterdienstes (DWD) nicht in allen Fällen zufriedenstellende Ergebnisse liefern können. Es besteht z. B. die Gefahr, dass kleinräumige Starkwindfelder, die im Elbmündungsgebiet eine zusätzliche Stauerhöhung bewirken können, von den Prognosemodellen nicht korrekt erfasst werden können. Eine weitere Verbesserung der Windprognosen des DWD, auch im Hinblick auf eine höhere räumliche Auslösung, ist vor diesem Hintergrund wünschenswert.

Abschließend sei an dieser Stelle allen am Projekt OPTEL beteiligten Mitarbeitern und Institutionen ein herzlicher Dank für die sehr gute Zusammenarbeit und den wertvollen wissenschaftlichen Austausch ausgesprochen!

4 Schriftenverzeichnis

- BREMER, J.-A.: Entwicklung der Sturmfluten entlang der Tideelbe von Cuxhaven bis Hamburg-St. Pauli. Diplomarbeit am Fachbereich Geographie der Philipps-Universität Marburg, 2008.
- BAW (BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU): Untersuchung regionaler Windwirkungen, hydrodynamischer Systemzustände und Oberwassereinflüsse auf das Geschehen in Tideästuaren. Bericht zum KFKI-Forschungsvorhaben „Sturmfluten in den Ästuaren“, Hamburg, 2000.

- FICKERT, M. und STROTMANN, T.: Zur Entwicklung der Tideverhältnisse in der Elbe und dem Einfluss steigender Meeresspiegel auf die Tidedynamik in Ästuaren. In: Tagungsband zum HTG-Kongress 2009, 196-203, 2009.
- GÖHREN, H.: Tidewasserstände und Windstau im Elbmündungsgebiet. *Hamburger Küstenforschung*, 3, Hamburg, 1968.
- GÖNNERT, G.: Sturmfluten und Windstau in der Deutschen Bucht - Charakter, Veränderungen und Maximalwerte im 20. Jahrhundert. In: *Die Küste*, 67, 2003.
- KARAGOUNIS, C.: Implementierung von Sturmfluttypen in das WADI-Verfahren. Diplomarbeit im Studiengang Bauingenieurwesen und Umwelttechnik an der TU Hamburg-Harburg, 2012.
- LECHER, K.; LÜHR, H. P. und ZANKE, U.: Taschenbuch der Wasserwirtschaft, Berlin, Wien, 2001.
- MALCHAREK, A.: Gezeiten und Wellen. Die Hydromechanik der Küstengewässer, Wiesbaden, 2010.
- NASNER, S.: Grenzen statistischer Extrapolationen unter Berücksichtigung physikalischer Randbedingungen am Beispiel des Windstaus über der Deutschen Bucht. Diplomarbeit an der TU Hamburg-Harburg, Hamburg, 2009.
- PETERSEN, M. und ROHDE, H.: Sturmflut - Die großen Fluten an den Küsten Schleswig-Holsteins und in der Elbe, Neumünster, 1991.
- PROJEKTGRUPPE STROMBAU: Bericht zum ganzheitlichen Strombau- und Sedimentmanagementkonzept für die Unter- und Außenelbe. (unveröffentlicht), Hamburg, 2007.
- RADEGAST, C.; STROTMANN, T. und FERK, U.: Studies on Development of Wind Set-Up in the River Elbe. In: *Coastline Reports* 16, 63-70, 2010.
- RADEGAST, C.; STROTMANN, T. und FERK, U.: Studies on the Development of Wind Set-Up in the River Elbe - Further Analyses. In: *Coastline Reports* 17, 147-154, 2011.
- SIEFERT, W.: Sturmflutvorhersage für den Tidebereich der Elbe aus dem Verlauf der Windstaukurve in Cuxhaven. In: *Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der TU Hannover*, 30, 1-142, 1968.
- SIEFERT, W.: Über das Sturmflutgeschehen in Tideflüssen. In: *Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts der Technischen Universität Braunschweig*, 63, 33-166, 1978.
- SIEFERT, W.: Über Eintrittswahrscheinlichkeiten von Windstau, Oberwasser und örtlichem Wind in einem Tidefluss am Beispiel der Elbe. In: *Die Küste*, 52, 171-190, 1991.
- SIEFERT, W. und CHRISTIANSEN, H.: Entwicklung und Stand der Sturmflutvorhersagen des Hamburger Sturmflutwarndienstes. In: *Hamburger Küstenforschung*, 42, Hamburg, 1983.
- SIEFERT, W. und HAVNØ, K.: Sturmflutuntersuchungen für die Elbe mit den mathematisch-hydraulischen Modellen des Dänischen Hydraulischen Instituts. In: *Hamburger Küstenforschung*, 46, Hamburg, 1989.
- STROTMANN, T.; RADEGAST, C. und FERK, U.: Windstaudstudien und Entwicklung eines Operationellen Tideelbemodells (OPTTEL). Abschlussbericht des Teilprojekts OPTTEL-D: Studien zur Stauentwicklung in der Elbe, Hamburg, 2011.

- TOMCZAK, G.: Der Einfluss der Küstengestalt und des vorgelagerten Meeresbodens auf den windbedingten Anstau des Wassers, betrachtet am Beispiel der Westküste Schleswig-Holsteins. In: Deutsche Hydrographische Zeitschrift, 5, 114-131, 1952.
- WSA HAMBURG (WASSER- UND SCHIFFFAHRTSAMT), HPA (HAMBURG PORT AUTHORITY): Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt. Abschlussbericht 2011 zur Beweissicherung, Hamburg, 2012.