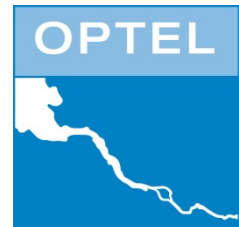


Windstaustudien und Entwicklung eines Operationellen Tideelbemodells (OPTEL)



Abschlussbericht des Teilprojekts OPTEL-D: Studien zur Stauentwicklung in der Tideelbe

Autoren: Thomas Strotmann, Caroline Radegast, Ulrich Ferk
Bearbeitung durch: Hamburg Port Authority
Bearbeitungszeitraum: 01.04.2008 – 31.09.2010
Fördernummer: BMBF 03KIS072 / KFKI 101
Datum: 22. Mai 2011

Das Projekt wurde gefördert vom:



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Aktueller Wissenstand zu Sturmfluten und Stau in der Elbe	3
2.1 Phänomenologisches Verständnis der Tidedynamik in einem Ästuar.....	3
2.1.1 Gezeiteneinfluss	3
2.1.2 Meteorologische und barometrische Einflüsse.....	5
2.1.3 Oberwasserzufluss.....	8
2.1.4 Hydromorphologie der Tideelbe	10
2.2 Definition von Sturmfluten	11
2.3 Sturmfluten in der Deutschen Bucht	12
2.4 Sturmflutgeschehen in einem Tideästuar.....	13
2.4.1 Charakteristische Rand- und Eigenwerte des Systems.....	13
2.4.2 Lokaler Windeinfluss über dem Flussgebiet.....	14
2.4.3 Einfluss baulicher Veränderungen auf das Sturmflutgeschehen.....	15
2.4.4 Wirkung und Steuerung des Wehres Geesthacht	19
2.5 Sturmflutvorhersageverfahren für die deutsche Nordseeküste.....	20
2.5.1 Sturmflutvorhersagen des BSH.....	20
2.5.2 Sturmflutwarndienst des NLWK für die niedersächsische Küste	20
2.5.3 Hamburger Sturmflutwarndienst (WADI).....	21
2.5.4 Sturmflutwarnungen für Schleswig-Holstein.....	21
3 Auswahl und Aufbereitung der Datengrundlagen	22
3.1 OPTEL-D.....	22
3.2 Szenarienwahl für Hindcast-Rechnungen mit den HN-Modellen in OPTEL-A und -C.....	23
3.2.1 Szenario 1: Mittlere hydrologische Verhältnisse.....	26
3.2.2 Szenario 2: Extremes Oberwasser (ansteigender Ast).....	27
3.2.3 Szenario 3: Extremes Oberwasser (abfallender Ast)	28
3.2.4 Szenario 4: „Sturmebbe“	29
3.2.5 Szenario 5: Sturmflut mit fülliger Staukurve	30
3.2.6 Szenario 6: Sturmflut mit steiler Staukurve.....	31

4 Empirische Untersuchungen im Teilprojekt OPTEL-D.....	32
4.1 Zielsetzung	32
4.2 Empirische Ansätze zur Übertragung von Sturmflutscheiteln ins Ästuar	32
4.2.1 Methodik.....	32
4.2.2 Grundzüge empirisch-statistischer Verfahren	33
4.2.3 Ansatz im WADI(3)-Verfahren	34
4.2.4 Konzept und Modellbildung mit dem Stieg-Ansatz	36
4.2.5 Konzept und Modellbildung mit dem Stau-Ansatz.....	38
4.2.6 Berücksichtigung des Oberwassereinflusses in den empirischen Modellansätzen.....	42
4.2.7 Fehlerstatistik und vergleichende Bewertung der empirischen Modelle.....	44
4.3 Untersuchung der lokalen Stauentwicklung in der Tideelbe	46
4.3.1 Vorstudien zur Stauentwicklung im Rahmen der Diplomarbeit J. BREMER	46
4.3.2 Stromauf-Entwicklung des Staus im Scheitelpunkt der Sturmflut.....	47
4.3.3 Vergleichende Betrachtung der lokalen Entwicklung von Stau, Stieg und MThb	49
4.4 Detailanalyse von Sturmflutereignissen mit größeren Prognosefehlern.....	51
4.4.1 Sturmflut Nr. 187 (Stau-Modell-Prognose unterschätzt HThw St. Pauli)	52
4.4.2 Sturmflut Nr. 256 (Stau-Modell-Prognose überschätzt HThw St. Pauli).....	54
4.4.3 Sturmflut Nr. 206 (Stieg-Modell-Prognose überschätzt HThw St. Pauli).....	55
4.4.4 Sturmflut Nr. 221 (Stieg-Modell-Prognose unterschätzt HThw St. Pauli)	56
4.4.5 Folgerungen aus den Einzelanalysen für die weiteren Untersuchungen	57
4.5 Einfluss des lokalen Windes im Mündungstrichter auf den Stauzuwachs.....	58
4.5.1 Ermittlung der für den Mündungstrichter stauwirksamsten Windrichtung.....	58
4.5.2 Erweiterung des Staumodells St. Pauli um den Windeinfluss im Mündungstrichter.....	61
4.5.3 Größenordnung der an der Stauübertragung teilhabenden Modellkomponenten	65
4.5.4 Verwendung von Windvorhersagen zur Stauübertragung im Mündungstrichter.....	66
4.6 Vertiefende Untersuchungen zur Kinematik des Staus	69
4.6.1 Motivation zur Analyse der 'Staukinematik'	69
4.6.2 Zur Eignung des Tidemittelwassers einer Sturmflut als Stauäquivalent.....	70
4.6.3 Methodik zur Analyse der 'Staukinematik'	72
4.6.4 Charakteristiken einer „adynamischen“ Stauentwicklung	77
4.6.5 Charakteristiken einer „dynamischen“ Stauentwicklung	80
4.6.6 Charakteristiken einer „kollabierenden“ Stauentwicklung	84
4.6.7 Zusammenfassung und Empfehlungen zur Verwertung der Erkenntnisse	87

5 Evaluation der Ergebnisse.....	92
5.1 Verwendung der Ergebnisse aus OPTEL im WADI-Verfahren.....	92
5.2 Modifikation der OPTEL-Formel	94
6 Übertragbarkeit der Ergebnisse von OPTEL-D auf andere Ästuar.....	97
7 Literatur.....	99
8 Anhang	103
8.1 Sturmflutereignisse für die empirischen Untersuchungen in OPTEL.....	103
8.2 Übersicht über die vorhandenen Daten für jede Sturmflut	106

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Drehwellensysteme und amphidromische Zentren in der Nordsee, (www.wikipedia.de, 2007)...	3
Abbildung 2: Spannungsgleichgewicht über die Wassertiefe (ANDERSEN, 2007)	5
Abbildung 3: Unterschiede im Spiegelgefälle des Tidemittelwassers im Elbeästuar für mittleres Sommer- und Winteroberwasser; ohne Windstaeinwirkung (FICKERT, M.; STROTMANN, T., 2009)	8
Abbildung 4: Entwicklung des Tidehubs im Elbe – Ästuar, Quelle (Projektgruppe Strombau, 2007)	10
Abbildung 5: Definition Staukurve, (LECHER, K.; ZANKE, U.; LÜHR, H.P., 2001)	11
Abbildung 6: Sturmfluttypen an der deutschen Nordseeküste, (LECHER, K.; ZANKE, U.; LÜHR, H.P., 2001)	12
Abbildung 7: HThw - Höhendifferenzen St. Pauli – Cuxhaven, (GÖNNERT, G. & FERK, U., 1996) aktualisiert....	17
Abbildung 8: Lage und Strom-km der ausgewählten Pegel entlang der Elbe (WSA Hamburg)	22
Abbildung 9: Positionen der Dauer- und Langzeitmessstationen der WSÄ, (WSV & HPA, 2007)	24
Abbildung 10: Szenario 1 - Wasserstände in Cuxhaven und St. Pauli sowie Windgeschwindigkeit und Windrichtung von Scharhörn	26
Abbildung 11: Szenario 2 & 3 - Wasserstände in Cuxhaven und St. Pauli, Oberwasserabfluss Neu Darchau sowie Windgeschwindigkeit und Windrichtung von Scharhörn	27
Abbildung 12: Großwetterlage mit ausgeprägtem Hoch über Osteuropa während des Szenarios 4	29
Abbildung 13: Szenario 4 - Wasserstände in Cuxhaven und St. Pauli sowie Wind in Scharhörn	29
Abbildung 14: Szenario 5 - Wasserstände der Sturmflut Nr. 252 in Cuxhaven und St. Pauli; Wind in Scharhörn	30
Abbildung 15: Füllige Staukurve bei der Sturmflut-Nr.252 vom 01.11.2006	30
Abbildung 16: Szenario 6 - Wasserstände der Sturmflut Nr. 255 in Cuxhaven und St. Pauli, Wind in Scharhörn	31
Abbildung 17: Steile Staukurve bei der Sturmflut-Nr.255 vom 18.01.2007.....	31
Abbildung 18: Schematische Darstellung zur Berechnung des Tidehochwassers bei Sturmflut in Hamburg nach dem WADI-Verfahren.....	34
Abbildung 19: Abhängigkeit der Scheitelhöhendifferenz St. Pauli – Cuxhaven von der Scheitelhöhe in Cuxhaven für Sturmfluten ab 1980 (einschl. pauschalierte Ansätze im WADI-Verfahren)	35
Abbildung 20: Definition des Stiags als Differenz zwischen HThw und vorausgegangen Tnw	36
Abbildung 21: Korrelation des Stiags in St. Pauli mit dem Stieg in Cuxhaven (links) und qualitativer Vergleich von berechneten und eingetreten HThw-Scheiteln in St. Pauli (rechts)	37
Abbildung 22: Definition des Staus als Differenz des eingetretenen Tidehochwassers zum MThw	38
Abbildung 23: Zeitliche Entwicklung des MThw _(5j) zwischen 1980 und 2008 an verschiedenen Pegeln der Elbe	39
Abbildung 24: Korrelation des Staus in St. Pauli mit dem Stau in Cuxhaven (links) und qualitativer Vergleich von berechneten und eingetreten HThw-Scheiteln in St. Pauli (rechts)	40
Abbildung 25: Veränderung der Fehlerstatistik durch die Berücksichtigung des Oberwassers im Stieg-Modell .	43
Abbildung 26: Veränderung der Fehlerstatistik durch die Berücksichtigung des Oberwassers im Stau-Modell..	43
Abbildung 27: Vergleichende Gegenüberstellung der Abweichungen aus den drei Untersuchungsverfahren....	44
Abbildung 28: Übertragung des Staus vom Küstenpegel Cuxhaven über die Revierpegel bis nach Hamburg	47

Abbildung 29: Übertragung des Staus vom Küstenpegel Cuxhaven zum Revierpegel Brokdorf (links) und vom Revierpegel Brokdorf nach Hamburg (rechts)	48
Abbildung 30: Übertragung des Stiegs vom Küstenpegel Cuxhaven auf die Revierpegel bis nach Hamburg	49
Abbildung 31: Lokale Entwicklung des relativen mittleren Stiegs, Staus und MThb in der Tideelbe.....	50
Abbildung 32: Übersicht zur Lage der in OPTEL berücksichtigten Windmessstationen.....	51
Abbildung 33: Zeitlicher Verlauf der Wasserstände und des Windes bei der Sturmflut Nr. 187 am 26.02.1990.	52
Abbildung 34: Zeitlicher Verlauf der Wasserstände und des Windes bei der Sturmflut Nr. 256 am 18.03.2007.	54
Abbildung 35: Zeitlicher Verlauf der Wasserstände und des Windes bei der Sturmflut Nr. 206 am 13.01.1993.	55
Abbildung 36: Zeitlicher Verlauf der Wasserstände und des Windes bei der Sturmflut Nr. 221 vom 09.01.1995	56
Abbildung 37: Stauwirksamste Windrichtungen für die Deutsche Bucht und das Mündungsgebiet	58
Abbildung 38: Einfluss des lokalen Windes auf den Stauzuwachs im Mündungsgebiet	59
Abbildung 39: Vergleichende Betrachtung der Modellergebnisse zur Übertragung des Staus von CUX nach STP ohne (links) und mit (rechts) Berücksichtigung des Windes im Mündungsgebiet	62
Abbildung 40: Chronologische Auftragung der Differenzen zwischen Beobachtung und Modellprognose für den Pegel St. Pauli unter Berücksichtigung des lokalen Windes in Brunsbüttel bzw. Scharhörn ..	62
Abbildung 41: Ganglinien der Wasserstände und des Staus Sturmflut-Nr. 147 vom und 148 vom 24.11.1981...	64
Abbildung 42: Auszug aus dem COSMO-EU-Gitter für die Windvorhersage beim DWD mit den Messstationen (Scharhörn, Cuxhaven, Brunsbüttel) sowie ausgewählten Gitterpunkten	67
Abbildung 43: Verhältnis der quadrierten Windgeschwindigkeiten der vorhergesagten und eingetretenen Windgeschwindigkeiten für E760 und Scharhörn für 13 ausgewählten Sturmfluten.....	68
Abbildung 44: Stauzuwachs Cuxhaven-Brokdorf und Brokdorf-St. Pauli vor dem Grundstau in Cuxhaven	69
Abbildung 45: Scheinbarer Stau durch Phasenverschiebung der astronomischen Ganglinie um 15 Minuten.....	71
Abbildung 46: Tidemittelwasser und Tmw-Residuum (η) der Sturmflut-Nr. 247a vom 02.01.2005 im Vergleich zum Stau und der für Cuxhaven und St. Pauli vorausberechneten astronomischen Gezeit.....	73
Abbildung 47: Synchronisierung der Ganglinien der Pegel Cuxhaven und St. Pauli anhand der Gradienten des Tidemittelwassers am Beispiel der Sturmflut-Nr. 247a vom 02.01.2005	75
Abbildung 48: Nahezu parallele Entwicklung des phasensynchronisierten Tidemittelwassers im Vorfeld und während der Sturmflut-Nr. 215 vom 23.01.1994 im Vergleich zur Stauentwicklung	77
Abbildung 49: Entwicklung des Staus und Tidemittelwassers am Pegel Cuxhaven im Vergleich zum skalierten Schubspannungsäquivalent (τ_{wEq}) Scharhörn während der Sturmflut-Nr. 215 vom 23.01.1994	78
Abbildung 50: Besonders dynamische Stauentwicklung während der Sturmflut-Nr. 250 vom 12.02.2005	81
Abbildung 51: Kollabierende Stauentwicklung während der Sturmflut-Nr. 206 vom 13.01.1993.....	84
Abbildung 52: Stauzuwachs St. Pauli in Abhängigkeit vom Stau Cuxhaven differenziert nach Stautypen	88
Abbildung 53: Stauzuwachs St. Pauli in Abhängigkeit vom Stieg Cuxhaven sortiert nach Stautypen.....	89
Abbildung 54: Amplitudenstau in Abhängigkeit von der RWS-Spiegeldifferenz im Ästuar	90
Abbildung 55: Amplitudenstau in Abhängigkeit von der RWS-Niveau im Ästuar	90
Abbildung 56: Sortierung der Sturmfluten in Sturmflutkategorien	94
Abbildung 57: Ergebnisse mit der modifizierten OPTEL-Formel ($_{mod1}$).....	95
Abbildung 58: Ergebnisse mit der modifizierten OPTEL-Formel ($_{mod2}$).....	96
Abbildung 59: Übersichtsgrafik zu den deutschen Ästuaren an der Nordsee.....	97

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ergebnisse der Systemuntersuchungen der BAW zur Windwirkung entlang der Elbe (Bezug: HThw der Sturmflut vom 28.1.1994), (Bundesanstalt für Wasserbau, 2000).....	15
Tabelle 2:	Szenarien zur Kalibrierung und Validierung der operationellen Modelle	24
Tabelle 3:	Strömungs- und Temperaturdaten für die ausgewählten Szenarien	25
Tabelle 4:	Salzgehaltsdaten für die ausgewählten Szenarien	25
Tabelle 5:	Standardfehler der drei untersuchten Modelle.....	44
Tabelle 6:	Auswertungen zu den Sturmfluten, die außerhalb des Toleranzbereiches liegen (in [%]) sowie den maximalen Abweichungen je Untersuchungsverfahren.....	45
Tabelle 7:	Verbesserung/ Verschlechterung der Stauprognose durch die Berücksichtigung des lokalen Windes bei der Übertragung des Staus von Cuxhaven nach Hamburg	63
Tabelle 8:	Anteil der Komponenten des erweiterten statistischen Modells an der Übertragung des Staus von Cuxhaven nach Hamburg	65
Tabelle 9:	Ausgewählte Sturmfluten für den Test der COSMO-EU- Windprognosen	66
Tabelle 10:	Gauß-Krüger-Koordinaten der Gitternetzpunkte für die Windvorhersage	67
Tabelle 11:	Stauwerttabelle für Wind Brunsbüttel (Angaben in cm)	93
Tabelle 12:	Vergleich der Ergebnisse von WADI und OPTEL an ausgewählten Beispielen (Werte in cmPN)..	93
Tabelle 13:	Standardfehler der Verfahren.....	93
Tabelle 14:	Veränderung der OPTEL-Formelkoeffizienten bei der Modifikation der Wichtung der SF-Klassen	95
Tabelle 15:	Vergleich der Standardfehler von WADI, OPTEL und OPTEL_mod	96

1 Einleitung

Das Projekt „OPTEL – Windstaudstudien und Entwicklung eines Operationellen Tideelbemodells“ ist eine Kooperation zwischen dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), dem Deutschen Wetterdienst (DWD) und der Hamburg Port Authority (HPA). Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 03KIS072 gefördert. Die Forschungskoordination und die wissenschaftliche Begleitung des Projektes erfolgten durch das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI).

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 extremen Bedingungen wie Sturmfluten und/oder sehr hohen Oberwasserabflüssen, bisweilen immer noch (zu) deutliche Vorhersageungenauigkeiten. Ein gutes Beispiel aus der jüngeren Vergangenheit für unbefriedigende Sturmflutprognosen sind die Sturmfluten vom 1. November 2006 (Allerheiligenflut) und vom 18./19. Januar 2007 (Orkan „Kyrill“).

Während die Notwendigkeit einer weiteren Optimierung der Sturmflutvorhersagen, auch angesichts des klimabedingten Meeresspiegelanstiegs und einer möglicherweise damit einhergehenden Zunahme der Sturmaktivität im Nordseeküstenraum, auf der Hand liegt, ist aufgrund einer Vielzahl von Aspekten in den letzten Jahren aber auch die Nachfrage nach einer Verbesserung der permanenten Wasserstandsvorhersage für die deutschen Tideflüsse gestiegen. Als größter Bedarfsträger ist hier die Seeschifffahrt zu nennen. Reeder großer Containerschiffahrtlinien streben stets an, ihre Schiffe mit einer möglichst vollen Auslastung, d.h. mit einem hohen Tiefgang fahren zu lassen, weil dies am wirtschaftlichsten ist. Angesichts der begrenzten maximal zugelassenen Schiffstiefgänge auf Elbe und Weser ist insofern von dieser Seite das große Interesse an präzisen und möglichst langfristigen Wasserstandsvorhersagen, mit Blick auf eine rechtzeitige Anpassung der jeweiligen Beladung des Schiffs, nachvollziehbar. Die wirtschaftliche Bedeutung einer präzisen Wasserstandsvorhersage wird z.B. deutlich, wenn man sich vergegenwärtigt, dass bei einem großen, modernen Containerschiff, wie es auf der Elbe im Überseeverkehr eingesetzt wird, eine Ladungsmenge von 1.000 Standardcontainern (TEU) einer Veränderung des Tiefgangs von rd. 1 Meter bewirkt. Eine Veränderung des Tide-niedrigwasserstandes von nur ± 20 cm kann für ein großes, modernes Containerschiff auf der Unter- und Außenelbe also eine Mehr- bzw. Minderladung von etwa 200 Standardcontainern (TEU) ausmachen. Dies zeigt, dass eine verbesserte Wasserstandsvorhersage ein beachtliches Potenzial für eine weitere Optimierung der Wirtschaftlichkeit des Schiffsverkehrs auf Elbe und Weser birgt.

Zudem ist, verstärkt durch die Größenentwicklung in der internationalen Seeschifffahrt, auch der Bedarf an permanenten und räumlich detaillierten Strömungsvorhersagen für die Elbe und den Hafen gestiegen. Diese haben beispielsweise im Hinblick auf Drehmanöver von Schiffen oder auch in Bezug auf bestehende zeitliche nautische Restriktionen in bestimmten Hafenteilen eine besondere Bedeutung. Hinzu kommen viele weitere Fragen wie beispielsweise bezüglich der Schadstoffausbreitung nach Havarien oder (prospektiv) die Verdriftung und der Verbleib von im Gewässer umgelagerten Baggernengen aus der Wasserstraßenunterhaltung, die den Bedarf nach permanenten Strömungsvorhersagen für den Hafen und die gesamte Elbe unterstreichen.

Vor diesem Hintergrund geht es im Rahmen von OPTEL darum, die Werkzeuge für Prognosen für verschiedene hydrologische Parameter (insbesondere Wasserstand, aber auch Strömung, Salinität und Temperatur) für jeden Ort der Tideelbe zur Verfügung zu stellen. Ziel der Teilprojekte OPTEL-A (BSH) und OPTEL-C (BAW-DH) ist daher die Entwicklung hydronumerischer operationeller Modelle für die Tideelbe, die eine verbesserte Wasserstands- und Strömungsvorhersage für den gesamten tidebeeinflussten Abschnitt der Elbe zwischen Cuxhaven und Geesthacht ermöglichen, und zwar auch für extreme Wind- und Oberwassersituationen. Wesentlicher Bestandteil dieser Verbesserung ist dabei zum einen die Ausweitung der Vorhersagen auf den gesamten Verlauf der Tide sowie zum anderen eine flächendeckende Ausgabe der Prognosen für den gesamten Bereich der Tideelbe. Der DWD hat im Rahmen von OPTEL-B modellierte Windfelder bereitgestellt und somit eine zentrale Grundlage für die Arbeiten des BSH und der BAW geliefert. Bestandteil von OPTEL-A und OPTEL-C ist zudem die Sicherstellung einer Übertragbarkeit der entwickelten Vorhersageverfahren auf die Weser und die Ems.

Die eingangs erwähnten Schwächen bei den Sturmflutprognosen betreffen nicht nur die überwiegend auf numerischen Modellen basierenden Prognosen des BSH, sondern auch das bei der HPA bestehende empirisch-statistische Vorhersageverfahren des Hamburger Sturmflutwarndienstes (WADI). Zwar dürfen die hydrodynamischen Verhältnisse der Untereibe auch in Bezug auf Sturmfluten als vergleichsweise gut untersucht bezeichnet werden, gleichwohl zeigt sich beispielsweise anhand der Auswertung der WADI-Vorhersagen der letzten Jahre, dass bei der Übertragung der Wasserstände bzw. des Staus von der Mündung (Cuxhaven) nach Hamburg weiterhin Forschungsbedarf besteht. So ist zwar bereits durch die Arbeiten von SIEFERT bekannt, dass mit der Höhe der Sturmflutscheitelwasserstände in Cuxhaven auch die Sturmflut-Scheiteldifferenzen zwischen Hamburg und Cuxhaven zunehmen, gleichwohl ein direkter, statistisch gesicherter Zusammenhang zwischen diesen beiden Parametern nicht besteht. Zuletzt wurde von BREMER [2008] auf die beträchtliche Bandbreite der Stau-Übertragung von Cuxhaven nach Hamburg bei Sturmfluten und insofern bestehende Unsicherheiten bei empirischen Sturmflutvorhersagen hingewiesen.

Ziel des von der HPA bearbeiteten Teilprojekts OPTEL-D ist daher die empirische Untersuchung der Stauentwicklung auf der Tideelbe von Cuxhaven nach Hamburg und die Identifizierung der diese maßgeblich beeinflussenden Parameter. Im Fokus steht dabei zum einen die bislang nur spärlich untersuchte Wirkung des lokalen Windes über dem Ästuar sowie zum anderen die Dynamik der Stauentwicklung (in der Literatur bisweilen auch mit „Charakter“ einer Sturmflut umschrieben). Auch für die Untersuchungen von OPTEL-D ist eine grundsätzliche Übertragbarkeit der ermittelten Ergebnisse auf andere Ästuarare (Weser, Ems) zu prüfen.

Gegenstand von OPTEL-D ist zudem die Bestimmung und Abgrenzung unterschiedlicher hydrologischer Ereignisse aus der jüngeren Vergangenheit (z.B. verschiedene Sturmflutereignisse und Oberwasserwellen) sowie die Zusammenstellung von entsprechenden Kollektiven hydrologischer Daten aus dem gesamten Tideelbegebiet (Wasserstände, Strömungen, Salzgehalte), die für die Validierung der in den Teilprojekten OPTEL-A und OPTEL-C entwickelten operationellen Modelle des BSH und der BAW Verwendung finden.

2 Aktueller Wissenstand zu Sturmfluten und Stau in der Elbe

2.1 Phänomenologisches Verständnis der Tidedynamik in einem Ästuar

Die Hydrologie der Tideelbe wird im Wesentlichen durch folgende Faktoren bestimmt:

- Gezeitensignal aus der Nordsee
- meteorologische und barometrische Einflüsse
- fluvialer Zufluss aus dem Flusseinzugsgebiet
- hydromorphologische Beschaffenheit des dazwischen liegenden Gewässerbettes

Diese Faktoren und ihre Bedeutung für das Tidegeschehen in der Unter- und Außenelbe werden - soweit phänomenologisch verstanden - im Folgenden skizziert.

2.1.1 Gezeiteinfluss

Das Tidegeschehen in der Deutschen Bucht hat maßgeblichen Einfluss auf die hydrodynamischen Prozesse im Elbeästuar. Die hydrologischen Kenngrößen werden bis zur künstlichen Tidegrenze am Wehr in Geesthacht -bei hohem Oberwasserzufluss oder Sturmfluten auch darüber hinaus- durch das Gezeitensignal aus der Nordsee geprägt. Für das Verständnis der Tidedynamik in den Ästuaren steht somit zunächst eine Betrachtung der Randbedingungen in der Nordsee im Vordergrund.

Die Nordsee gilt als Randmeer des nördlichen atlantischen Ozeans. Aufgrund des flachen Gewässers wird der Meeresgrund, der nicht tiefer als 200 m unter dem mittleren Meeresspiegel auf der Kontinentalkruste liegt, auch Kontinentalschelf genannt und die Nordsee ist daher auch als Schelfmeer zu bezeichnen. Lediglich ein kleiner Teil der Nordsee vor der Küste Norwegens liegt nicht mehr auf dem Kontinentalschelf und verfügt daher über größere Wassertiefen.

Die Gezeiten der Nordsee können im Wesentlichen als sogenannte Mitschwingungsgezeiten bezeichnet werden, die durch das Gezeitensignal des Nordatlantiks zum Mitschwingen angeregt werden. Die Gezeit aus dem Nordatlantik schwingt über den offenen Rand zwischen den Shetland-Inseln und Norwegen in das flache Schelfmeer ein und pflanzt sich als sogenannte Shetland- oder Silberrinnenwelle nach Süden fort. Durch Reflektion an der über den englischen Kanal einlaufenden Gezeit sowie den Corioliseffekt wird die Strömung im Süden der englischen Küste nach Osten abgelenkt. Durch weitere Reflektionen an den Beckenrändern der Deutschen Bucht dreht sie schließlich entlang der nordfriesisch-dänischen Küste nach Norden ab. So entsteht eine zweidimensionale stehende Kelvinwelle, die sich entgegen dem Uhrzeigersinn um ihr amphidromisches Zentrum dreht.

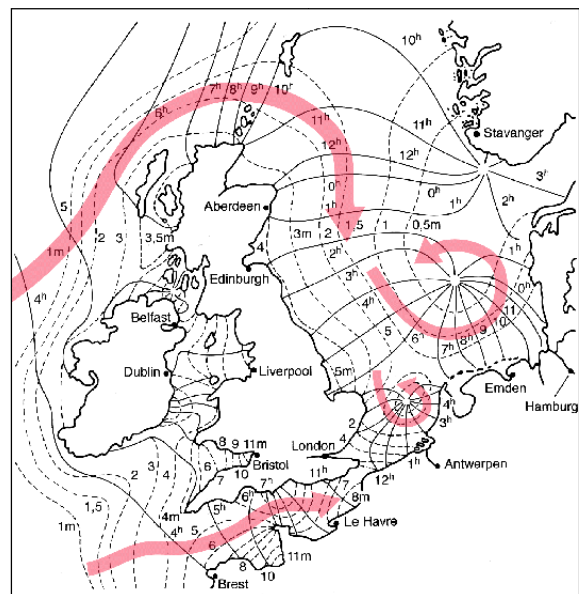


Abbildung 1: Drehwellensysteme und amphidromische Zentren in der Nordsee,

Während die Amplitude der Welle im Zentrum einer Amphidromie minimal ist, vergrößert sie sich mit zunehmender Entfernung vom Zentrum, weshalb unterschiedlich hohe Tidehübe an den die Nordsee umgebenden Küsten auftreten. Die Amphidromie, deren Zentrum etwa auf der Breite von Esbjerg und der Länge von Terschelling liegt, ist diejenige, welche die in der Deutschen Bucht dominanten halbtägigen Tiden prägt.

Die südliche Nordsee, die für diese Untersuchungen von besonderem Interesse ist, bildet den flachsten Teil des Meeres mit mittleren Tiefen von etwa 20 bis 30 Metern. Für die Tidedynamik des Elbeästuars ist die Tidedynamik in der Deutschen Bucht von besonderem Interesse. Die Deutsche Bucht umfasst den südöstlichen Teil des Meeres vor der niederländischen Küste am Westrand der Westfriesischen Inseln bis zu den Nordfriesischen Inseln vor der dänischen Westküste. Im Nordwesten ist sie durch die Doggerbank, in der nur Tiefen von etwa 13 Metern vorherrschen, begrenzt. Die Doggerbank reicht etwa von der Küste vor Middlesbrough in England bis zum Ringkøbingfjord in Dänemark.

Die Charakteristik der Gezeitenküste verändert sich aufgrund von Erosion und Sedimentation sowie anthropogenen Eingriffen wie Landgewinnung oder Rohstoffentnahmen ständig. Die südöstliche Nordsee ist geprägt durch ausgedehnte Wattgebiete die eine Fläche von etwa 8.000 km² aufweisen. Den Watten vorgelagert sind Barriereinseln, die sich an den Brandungskanten der Küste gebildet haben. Bei den Nordfriesischen Inseln handelt es sich größtenteils um übrig gebliebene Reste von Geestkerninseln, die durch Sturmfluten separiert wurden. Des Weiteren sind hier auch Halligen als Reste alten Marschlandes, das von Sturmfluten überspült wurde, verblieben.

Von den Außenrändern der Deutschen Bucht in den westlichen Niederlanden und im Norden vor der dänischen Küste Jütlands beträgt der mittlere Tidehub zum Teil weniger als 1,5 m (mikrotidaler Bereich), zum Mündungstrichter der Elbe hin wächst der mittlere Tidehub auf bis zu 3 m (Cuxhaven) an und liegt damit im mesotidalen Bereich. Binnenseitig den Barriereinseln, die mit zunehmendem Tidehub immer kleiner werden, herrschen teilweise auch makrotidale Bedingungen mit mittleren Tidehüben von über 3 m.

Nicht-lineare Effekte im flachen Küstensaum verformen die senkrecht zur Küstenlinie propagierende Tidewelle, sogenannte Seichtwassertiden bilden sich aus. Die ansteigende Gewässersohle erhöht die Wirkung der Bodenreibung. Zum einen wird dadurch Energie dissipiert, zum anderen aber auch die Fortschrittsgeschwindigkeit der Tidewelle gebremst, wobei kinetische Energie in potentielle Energie verlagert wird. Eine Folge dieses auch mit dem Shoaling von Wellen vergleichbaren Effektes, ist ein Anstieg des Tidehubs in Küstennähe, der durch Reflektionen in den Beckenecken und an den aus den größeren Strömen eingespeisten fluvialen Zuflüssen noch verstärkt wird.

Phänomenologisch wahrnehmbar führen die Flachwassereffekte zu einer Asymmetrie der Tidekurve an den Küstenpegeln – der Flutast wird bei verkürzter Flutdauer steiler und der Ebbeast entsprechend flacher, während die Kenterpunkte der Gezeitenströmung zu den Scheitelpunkten wandern. Bei einer Spektralanalyse der Wasserstandsganglinie stellen sich diese nichtlinearen Effekte durch die Verlagerung von Energieanteilen in höherfrequenten Partialtiden dar. Eine besondere Rolle spielen dabei die höher-harmonischen Komponenten der M_2 und S_2 -Gezeit. Analysen der in Relation zur M_2 -Amplitude ausgedrückten Partialtidenkomponenten M_4 , MS_4 und M_6 weisen am Pegel Cuxhaven das 1,3-fache (M_4) bis 2,5-fache (M_6) des v.H.-Anteils auf, den sie am Pegel Helgoland ausmachen.

2.1.2 Meteorologische und barometrische Einflüsse

Das Gezeitensignal aus dem Atlantik wird überlagert durch meteorologische und barometrische Einflussgrößen, die zu einer temporären und räumlich unterschiedlich stark ausgeprägten Fluktuation der mittleren Wasserspiegellage im Nordseebecken führen. Dabei kann die erzeugende Komponente sowohl über der Nordsee wirken (statischer Luftdruck oder lokale Windfelder) als auch externen Ursprungs sein ('external surge'). Zu differenzieren ist dabei auch zwischen den innerhalb weniger Tage wechselnden Einwirkungen durch meteorologische und barometrische Effekte und den langperiodischen saisonal auftretenden Variationen des Ruhewasserspiegels infolge der jahreszeitlich bedingten Temperaturänderungen des Nordatlantiks und der damit verbundenen thermischen Ausdehnung des Wasserkörpers.

Windgenerierter Stau bzw. Sunk

Als bedeutendste Einflussgröße für die Deutsche Bucht ist der durch lokale Windfelder an den besonders flachen Küstensaum der südöstlichen Nordsee generierte Windstau bzw. -sunk zu nennen.

Durch die Reibung der Luftströmung an der Wasseroberfläche, die eine durch den windgenerierten Seegang definierte hydraulische Rauheit aufweist, wird über Schubspannungen an der turbulenten Grenzschicht Energie in den Wasserkörper eingetragen. Der Energieeintrag erzeugt eine Teilchenbewegung in der Wassersäule, die für den reinen Windschub ein lineares Strömungsprofil annimmt. Über die Wassertiefe nimmt die Strömung ab, bis sie an der Sohle bedingt durch die Sohlreibung den Wert Null erreicht (theoretisch).

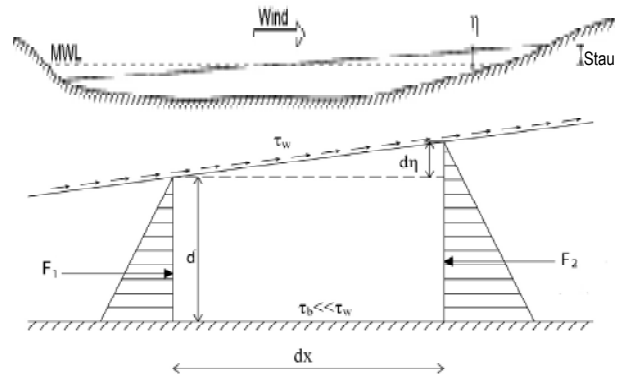


Abbildung 2: Spannungsgleichgewicht über die Wassertiefe (ANDERSEN, 2007)

In einem umrandeten, also endlichen Becken wie der Nordsee, wo die horizontale Strömungsgeschwindigkeit an der Küste zu Null werden muss, führt dieser Massentransport zu einer Schiefelage des Ruhewasserspiegels, die zum Erhalt des hydrostatischen Gleichgewichts eine dem Windangriff entgegengesetzte sohlnahe Rückströmung erzeugt.

In linearisierten Differenzialgleichungen bzw. mathematischen Modellen zur numerischen Beschreibung des Stauphänomens steht die durch die Rückströmung aktivierte Sohlenschubspannung zumeist in Balance zur Windschubspannung und dem hydrostatischen Druckgradienten und wird durch einen empirischen Faktor, der das Verhältnis von Windschubspannung zur Sohlenschubspannung ausdrücken soll, vereinfacht (DEAN & DALRYMPLE, 1991). Die Windschubspannung an der Oberfläche und die Sohlreibung sind jedoch gemäß (TANG, GRIMSHAW, SANDERSON, & HOLLAND, 1996) nicht ausbalanciert.

Da die aktivierte Sohlenschubspannung mit dem Quadrat der Geschwindigkeit anwächst und die Geschwindigkeit der Rückströmung außer vom hydrostatischen Druckgradienten auch von der für die Rückströmung zur Verfügung stehenden Schichtdicke der Wassersäule bestimmt wird, steigt der generierte Stau bei auflandigem Wind und abnehmender Wassertiefe überproportional stark an. Dies kann insbesondere in den Flachwasserbereichen der Deutschen Bucht beobachtet werden. So kön-

nen durch den Einfluss des Windes je nach vorherrschender Windrichtung und -stärke selbst im Jahresmittel noch Schwankungen des Ruhewasserspiegels von -10 bis + 16 cm gegenüber dem langjährigen Mittel dem Windstau effekt zugeschrieben werden (FICKERT, M. & STROTMANN, T., 2007).

Der Windstau effekt wirkt sich dabei insbesondere während des Tideniedrigwassers bedingt durch die verringerte Wassertiefe überproportional aus. Parameterstudien zur den stauwirksamen Faktoren in der Deutsche Bucht (NASNER, 2009) haben gezeigt, dass im Mündungsgebiet der Elbe (unmittelbar vor Cuxhaven) bei mittlerem Tideniedrigwasser eine Erhöhung von knapp 17 % gegenüber dem Stau für gleiche Windbedingungen bei Tidemittelwasser (Tmw) zu verzeichnen ist. Dagegen fällt der Stau bei mittlerem Tidehochwasser um gut 10 % geringer aus als während des Tidemittelwassers.

Die letzten 40 km vor Cuxhaven weisen bei einer konstanten Windgeschwindigkeit von 20m/s aus der stauwirksamsten Richtung aufgrund des relativ flach ansteigenden Küstenprofils eine Inklination des mit dem Windstau beaufschlagten astronomischen Tidehochwassers von rund 2 cm/km auf. Sobald die Wassertiefe tidebedingt geringer wird, wird die Inklination ungleich größer, bei MTmw sind es bereits 2,7 cm/km und bei MTnw 3,7 cm/km (NASNER, 2009). Diese Werte decken sich mit Ergebnissen zu Staugradienten aus einer Studie von (GÖHREN, 1968), in der über mehrere Pegel vor Cuxhaven ein Gradient für vier Windstauereignisse ermittelt wird.

Der säkulare Meeresspiegelanstieg vergrößert die Wassertiefe sowie die überströmbaren Wattflächen (sofern die vorhandene Sedimentmenge kein "Mitwachsen" der Watten ermöglicht) und hat mutmaßlich auch einen Einfluss auf die Lage der Drehtidezentren (Amphidromien) der Nordsee (FICKERT, M. & STROTMANN, T., 2007). Laut (PLÜß, A., 2004) deuten Untersuchungen bereits auf eine Verlagerung der Amphidromien in der Vergangenheit hin, die auf eine Erhöhung des Tidehubs in der Deutschen Bucht sowie einen erhöhten Energieeintrag in das Ästuar hindeuten. Weiterhin führt der Meeresspiegelanstieg im Bereich der Mündung von Ästuaren zu einer Vergrößerung der Fließquerschnitte, die wiederum einen erhöhten Energieeintrag ins Ästuar zulassen.

Barometrischer Effekt - Einfluss des lokalen Atmosphärendrucks

Ein zusätzlicher Einfluss auf den Wasserspiegel geht vom lokalen Atmosphärendruck aus. Schon 1663 wurde von Pascal erkannt, dass von der Erdatmosphäre ein Oberflächendruck ausgeht, der über dem Meeresspiegelniveau im Mittel bei 1013 hPa liegt. Unter Hochdruckgebieten erhöht sich der Druck während er sich unter Tiefdruckgebieten erniedrigt. So können die jeweilige Verteilung des barometrischen Druckes sowie seine zeitliche und räumliche Änderung einen entscheidenden Einfluss auf die lokale Meeresspiegelhöhe ausüben.

Eine Veränderung des Druckes von 1 hPa hat etwa eine Veränderung des Meeresspiegels von 1 cm zur Folge. Hierbei gilt, dass eine Verringerung des Druckes zu einer Meeresspiegelerhöhung führt und umgekehrt, weshalb man auch vom inversen barometrischen Effekt spricht. Die Anpassung des Meeresspiegels erfolgt, bedingt durch die Trägheit des Wasserkörpers, verzögert und erfordert eine Druckänderung über einem größeren Gebiet (SINGH & AUNG, 2005). Tiefdruckgebiete über der Nordsee bedingen somit einen Anstieg des mittleren Ruhewasserspiegels. In einem Orkan, in dessen Zentrum der Druck auf 980 hPa gegenüber den mittleren 1013 hPa abfällt, kann auf diese Weise eine zusätzliche Erhöhung des Wasserspiegels von rd. 30 cm auftreten. In flacheren Gewässern sind die barometrischen Effekte jedoch von untergeordneter Bedeutung, hier ist der Einfluss der Windschubspannung auf die Erhöhung der Wasserspiegelauslenkung dominierend.

External Surge - Fernwelle

Bei 'external surges' handelt es sich um meteorologisch hervorgerufene Auslenkungen der Wasseroberfläche des Nordost-Atlantiks, die beim Übergang auf das sprunghaft ansteigende europäische Schelf durch Massenstromkonvergenz einen kräftigen „Schwapp“ in die Nordsee hinein bewirken. Innerhalb der Nordsee kann sich diese temporäre Erhöhung des Wasserstands, „die nicht durch Windfelder in der Nordsee bedingt ist“ (GÖNNERT, G., 2003), ganz ähnlich wie die Tidewelle entlang der englischen Ostküste über die Hoofden in die deutsche Bucht fortpflanzen. Im deutschen Sprachraum hat sich wohl auch deshalb der Begriff Fernwelle für diese Variante des Staus durchgesetzt, obwohl es sich bei dieser Erscheinung nicht im eigentlichen Sinne um eine Welle als Energieträger ohne Materietransport, sondern eher um einen Schwall oder ein Soliton handelt, die sich gerade durch ihren Massentransport auszeichnen.

Als Ursache für das Auftreten von Fernwellen sind im Wesentlichen temporäre Luftdruckänderungen bedingt durch Zonen mit großen Druckgradienten im Nordost Atlantik anzuführen. Für die Höhe der erzwungenen Auslenkung sind vor allem der Druckgradient sowie die Fortschrittsgeschwindigkeit und Zugrichtung der Zyklone (zumeist Island-Orkan) zum Schelfrand aber insbesondere die Wassertiefenänderung entscheidend. „Ohne Tiefenänderung und Küsten wäre der Effekt des Luftdruckgefälles auf die Änderung der Wasserspiegellage gering, obgleich er über tiefem Meer große Massentransporte auslöst“ (SCHMITZ, 1978).

Den maßgeblichen Anteil des Luftdruckgradienten über tiefem Wasser an der Entstehung von ‚external surges‘ hat (TIMMERMANN, 1975, 1977) in Modellrechnungen mit und ohne Luftdruckgefälle nachgewiesen. Über die physikalischen Details der Entstehung dieser ‚Fernwellen‘ gibt es nur einige wenige Mutmaßungen, wie z. Bsp. das „Branden interner Wellen des tiefen Wassers am Schelfrand“. Es wird dabei von einer durch den Druckgradienten und Windschub induzierten „internen“ Trägheitswelle ausgegangen, die in der in Ozeanen vorhandenen Dichtesprungschicht in etwa 200 – 300 m Tiefe eine interne Welle mit weit größerer Amplitude (bedingt durch die Dichteunterschiede) induziert. Die interne ozeanische Trägheitswelle wird durch die Reflektion beim Auftreffen auf das flache Schelf zu einer frei fortschreitenden Welle. Es ist aber bisher unklar, wie sich der Übergang von einer internen Welle zu einer Oberflächenwelle physikalisch gestaltet.

Die synoptische Beobachtung von Fernwellen erweist sich als schwierig, da sie von Windeinflüssen und Phasenverschiebungen des Gezeitensignals überlagert werden kann und beim Eintritt in die Straße von Dover an Höhe verliert. Bei (GÖNNERT, G., 2003) werden neben eigenen Auswertungen des ‚Reststaus‘ in Cuxhaven auch die Untersuchungen von (KOOPMANN, 1962) wiedergegeben, der zwischen 1956 und 1960 sämtliche zu einem ‚Reststau‘ in Cuxhaven führenden Erscheinungen analysierte, für die ein Windeinfluss auszuschließen war.

Von besonderer Bedeutung sind die externen Einflüsse bei gegebener Überlagerung mit dem lokal generierten Windstau während einer Sturmflut, so war offenbar die Sturmflut vom 16. Februar 1962 mit einer Fernwelle von etwa 45 cm Höhe belastet wie (TIMMERMANN, H., 1977) durch frühe numerische Modelluntersuchungen unter Berücksichtigung des lokalen barometrischen Effektes nachwies. Deutliche Signale für das Mitwirken einer Fernwelle an Sturmfluten in der Deutschen Bucht hat (GÖNNERT, G., 2003) für den Zeitraum von 1971 bis 1995 bei 9 von insgesamt 73 am Pegel Cuxhaven identifizierten Fernwellen ausgemacht. Die angewendete ‚Reststau‘-Methode zur Separierung der Fernwellen vom Stau lässt jedoch begründeten Zweifel an der zugeordneten Scheitelhöhe offen.

2.1.3 Oberwasserzufluss

Die Elbe ist mit einer Länge von 1.094 km von der Quelle im Riesengebirge bis zur Mündung in die Nordsee bei Cuxhaven und einem Einzugsgebiet von 148.268 km² nach Donau, Weichsel und Rhein das viertgrößte Flussgebiet Mitteleuropas. Der fluviale Oberwasserabfluss der Elbe über das Wehr bei Geesthacht am oberen Rand der tidebeeinflussten ‚Unteren Elbe‘ unterliegt großen saisonalen Schwankungen und muss daher in die Betrachtung der Tidedynamik im Ästuar einbezogen werden.

Im langjährigen Mittel beträgt der Abfluss, gemessen am Pegel Neu Darchau (bei Elbe-km 536,4) rd. 700 m³/s. Der statistisch gesehen häufigste Abfluss liegt allerdings bei ca. 350 m³/s, während Hochwasserwellen nach Starkregenereignissen im Flusseinzugsgebiet insbesondere in Kombination mit der Frühjahrsschneesmelze bis zum 10-fachen dieser Menge spenden können. Minimalabflüsse in sehr trockenen Sommern liegen bei ca. 200 m³/s.

Der Oberwasserzufluss hat vornehmlich für den oberen Teil der Tideelbe zwischen Geesthacht und der Bunthäuser Spitze, dem Verzweigungspunkt des Hamburger Stromspaltungsgebietes, eine beträchtliche Wirkung auf die Ausprägung der Tidekennwerte, da der hier zur Verfügung stehende Abflussquerschnitt des Gewässerbettes der Tideelbe bzw. die hydraulische Leistungsfähigkeit noch vergleichsweise gering ist und eine Änderung der Abflussmenge so zu einer entsprechenden Reaktion des Ruhewasserspiegels führt.

Phänomenologisch kann die Wirkung des Oberwassers auf die Tidedynamik im Wesentlichen auf die Ausbildung eines hydrostatischen Druckgradienten zurück geführt 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 durch die Asymmetrie der Tidewelle bedingten Massentransport von Seeseite in das Ästuar hinein, bildet sich ein hydrostatischer Druckgradient aus, welcher durch die vorhandene Inkliniation des Tidemittelwasserspiegels zwischen der Mündung und der Sohlrampe beim Übergang vom seeschiffstiefen zum binnenschiffstiefen Fahrwasser (vgl. Abbildung 3) zum Ausdruck kommt.

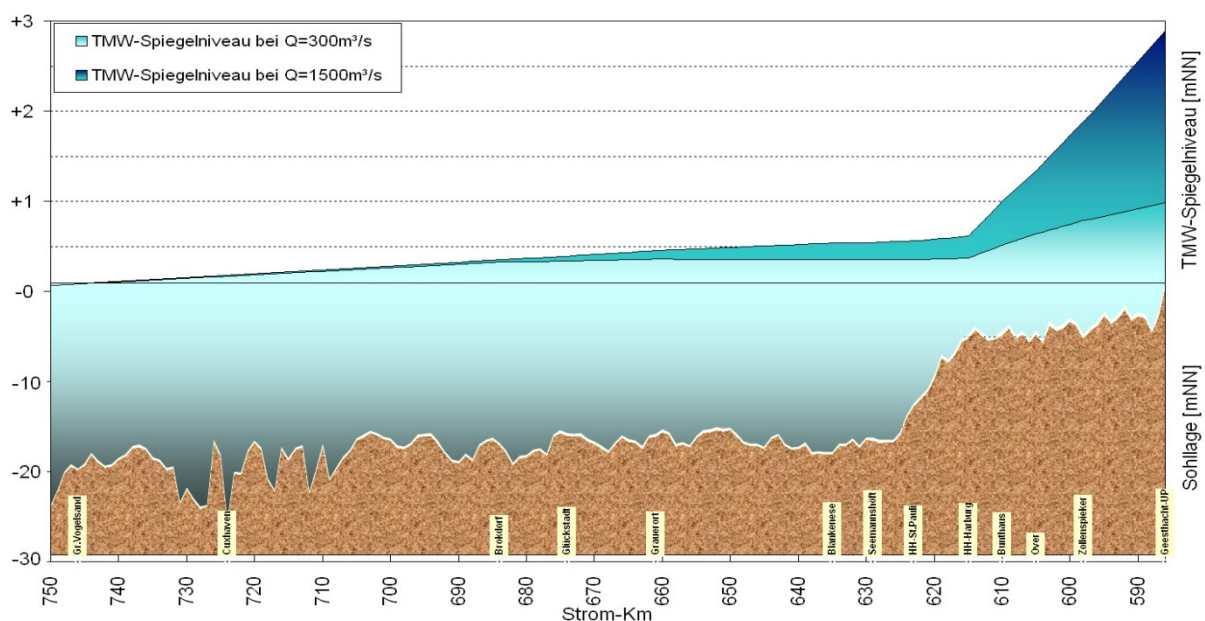


Abbildung 3: Unterschiede im Spiegelgefälle des Tidemittelwassers im Elbeästuar für mittleres Sommer- und Winteroberwasser; ohne Windstau einwirkung (FICKERT, M.; STROTMANN, T., 2009)

Die Gradienten des Tidemittelwasserspiegels im Ästuar bzw. das über die M_2 -Periode zeitlich gemittelte Energieliniengefälle wird von der Oberwassermenge und dem verfügbaren Abflussquerschnitt gesteuert, das Grundniveau, dem sich diese Ruhewasserspiegelneigung aufprägt, durch das mittlere Meeresspiegelniveau vor der Elbemündung. Letzteres wird wiederum durch die zuvor beschriebenen meteorologischen und barometrischen Einflussgrößen bestimmt.

Der dem Energieeintrag aus der Nordsee entgegengerichtete hydrostatische Druckgradient übt dabei auch einen gewissen Einfluss auf die Transformation des Gezeitensignals aus. Die bei höheren Oberwasserabflüssen zu beobachtende Verminderung des Tidehubs im inneren Ästuar ist dabei das Ergebnis verschiedener Faktoren. Einerseits 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.

Hier kann ein deutlicher Sprung in der Abnahme der Amplitude beobachtet werden, wenn der Oberwasserabfluss einen Wert von rd. $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ überschreitet. Bei dieser Größenordnung erreicht das Niveau des Tidemittelwassers direkt unterhalb des Wehres in etwa die Höhe des eigentlichen Stauziels von $\text{NN} + 4,00 \text{ m}$, so dass die Energie der ankommenden Tidewelle ohne die hier bei niedrigeren Wasserspiegeln wirkende Totalreflektion über das gelegte Wehr hinweg in die Mittelelbe transmittiert werden kann. Unmittelbar unterhalb des Wehres führt dies zu einer weiteren Halbierung des während der Oberwasserzunahme bereits deutlich reduzierten Tidehubs auf nur noch 20-30 cm.

Weniger spektakulär sind die messbaren Auswirkungen höherer Oberwasserabflüsse auf die Wasserstände im Hamburger Hafen und weiter stromab Richtung Nordsee. Die in Hamburg eher moderate Anhebung des Tidemittelwassers von ca. $15 \text{ cm}/1.000 \text{ m}^3$ in Kombination mit einer vergleichsweise nur noch geringfügigen Dämpfung des Tidehubs führt im Ergebnis zu einem größeren Effekt auf die Anhebung des Niedrigwasserscheitels als beim Hochwasserscheitel.

Für die oberwasserbedingte Dämpfung des Tidehubs auf der unteren Tideelbe von der Mündung bis Hamburg gibt es verschiedene Erklärungsversuche. Neben der bereits vorgestellten Theorie des Potenzialverlustes durch die Inklination des Ruhewasserspiegels, können auch Anteile auf die reduzierte Teilreflektion der Sohlschwelle in Hamburg zurückgeführt werden, die eher von theoretischer Natur sind. Auch der zuvor beschriebene Wegfall der Totalreflektion am Wehr in Geesthacht bei extrem hohen Oberwassern wirkt theoretisch zurück auf die Amplitudenhöhe in der Unterelbe.

Pegelauswertungen zeigen aber auch eine Erhöhung des mittleren Tidehubs in Cuxhaven während der wenigen Perioden mit extrem hohem Oberwasser. Diese Beobachtung deutet daraufhin, dass es in der Tideelbe eine wandernde Reflektionszone gibt, deren Lage durch das Oberwasser bestimmt wird und die bei extremen Oberwassermengen bis in die Mündung hinausgeschoben werden kann. Dadurch könnte bereits ein Teil der in der Nordsee anstehenden Tideenergie durch die Reflektion im Mündungstrichter erst gar nicht in das Ästuar transmittiert werden und so zu der beobachteten Abnahme des Tidehubs an den weiter stromauf gelegenen Pegeln führen.

Welcher der genannten Faktoren den größeren Anteil zu der de facto vorhandenen Dämpfung des Tidehubs bei höheren Oberwassern beiträgt, ist aufgrund der nichtlinearen Überlagerung der einzelnen Effekte und der geringen Ausprägung des Resultats nur schwer aus den Beobachtungsdaten zu analysieren.

2.1.4 Hydromorphologie der Tideelbe

Die Tideelbe ist wie die meisten Ästuare ein einseitig offener Schwingungsraum, dessen Wassermasse durch die periodische Schwingung des Meeresspiegels 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 Unterelbe zwischen ihrer Mündung und dem Wehr in Geesthacht ist die hydromorphologische Beschaffenheit des Gewässerbettes von besonderer Bedeutung. In diesem Kontext sind darunter neben der Oberflächenbeschaffenheit der Gewässersohle auch geometrische Eigenschaften wie Länge, Breite, Tiefe sowie deren Änderungen zu verstehen. Sie charakterisieren 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 (Trichterform) führt dagegen nach dem Gesetz der Energieerhaltung zwangsläufig zu einer Vergrößerung der Amplitude des seeseitigen Eingangssignals. Reflexionen unterschiedlichen Grades an Krümmungen, Strominseln und Sohlsträngen überlagern diese Prozesse.

Die wohl prägnanteste Reflexion erfährt die Tidewelle in der Elbe am Sohlstrang bei den Hamburger Elbbrücken, der durch den Übergang von seeschiffstiefen zu binnenschiffstiefen Fahrwasser gekennzeichnet ist. An dieser Stelle wird durch die abrupte 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 Mittel- und Unterelbe fortschreiten.

Am Ort der Reflexion und unterhalb vergrößert sich die Amplitude, oberhalb wird sie reduziert. Die Wirkung der reflektierenden Sohlrampe bei den Hamburger Elbbrücken ist an der Entwicklung des Tidehubs im Längsschnitt der Elbe über die vergangenen 100 Jahre besonders deutlich erkennbar.

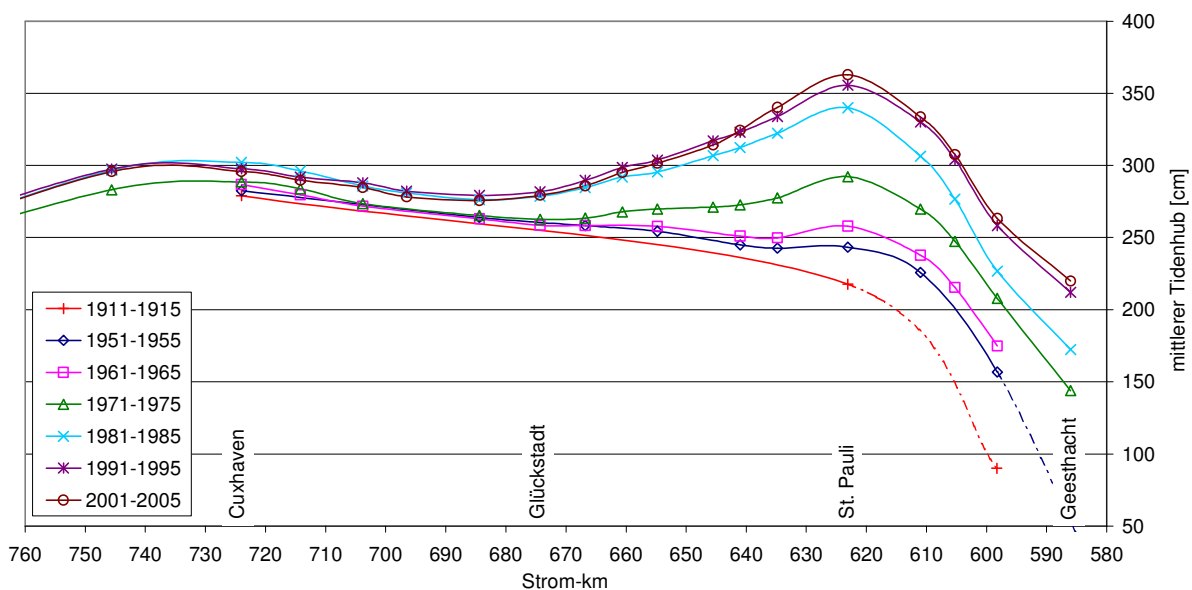


Abbildung 4: Entwicklung des Tidehubs im Elbe – Ästuar, Quelle (Projektgruppe Strombau, 2007)

2.2 Definition von Sturmfluten

Allgemein gesagt, resultiert die Entstehung einer Sturmflut aus dem zeitlichen Zusammentreffen von astronomischen, meteorologischen und hydrologischen Einflüssen. Allgemein wird eine Sturmflut als „Zeitspanne mit hohen Wasserständen an den Küsten oder in Flussmündungen, die vorwiegend durch starken Wind hervorgerufen sind“ (PETERSEN, M. & ROHDE, H., 1991) bezeichnet. Eine allgemein gültige und für die ganze Küste zutreffende Definition einer Sturmflut gibt es nicht. Die auf der DIN 4049 basierende Definition des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) unterscheidet hinsichtlich der Scheitelwasserstände folgende Sturmflutklassen:

- Sturmflut: 1,5 bis 2,5 m über MThw
- Schwere Sturmflut: 2,5 bis 3,5 m über MThw
- Sehr schwere Sturmflut: ab 3,5 m über MThw

Die Betrachtung einer Sturmflut allein über die Scheitelhöhe hat allerdings den Nachteil, dass dabei deren zeitlicher Verlauf außer Acht gelassen wird. (SIEFERT, W., 1968) entwickelte daher den Ansatz, die Staukurve einer Sturmflut heranzuziehen, um die Sturmflut als Ganzes erfassen zu können. Als Staukurve wird die Auslenkung des Wasserstandsverlaufs an einem Pegel gegenüber dem mittleren Tideverlauf bezeichnet. In der Staukurve sind die Einflüsse des Impulseintrages aus den Sturmfeldern über der Nordsee, der Luftdruckverteilung, der Temperatur- und Dichteeffekte, ggf. von Fernwellen und Eigenschwingungen in der Nordsee sowie astronomische Anteile zusammengefasst (vgl. Abbildung 5). Die Staukurve gibt den „physikalischen Wert der Sturmflut“ wieder, da die Energieeinwirkung während jeder Tidephase, also auch bei Tideniedrigwasser, abgebildet wird.

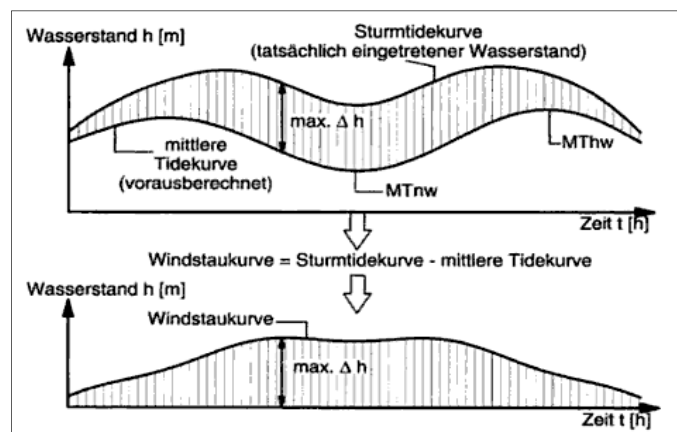


Abbildung 5: Definition Staukurve, (LECHER, K.; ZANKE, U.; LÜHR, H.P., 2001)

Nach der dem sog. „Hamburger Sturmflutkollektiv“ (Strom- und Hafenbau, 1985) zu Grunde liegenden Definition einer Sturmflut muss der Stau am Pegel Cuxhaven mindestens 200 cm erreicht haben, und zwar zu irgendeiner Tidephase. Auch Ereignisse, bei denen der Stau lediglich zur Zeit des astronomischen Tideniedrigwassers mindestens die 200 cm-Marke erreichte, gehen somit in das Sturmflutkollektiv ein. Das Hamburger Sturmflutkollektiv bildet die Grundlage für die im Rahmen von OPTTEL-D analysierten Sturmfluten. Allerdings wurde das Kollektiv für diese Untersuchung um diejenigen Sturmfluten ergänzt, die am Pegel Hamburg-St. Pauli einen Scheitelwasserstand von mindestens NN + 4,00 m aufwiesen. Dies hat den Hintergrund, dass aufgrund der durch anthropogene Eingriffe in das Elberegime bedingten Wasserstandsveränderungen (vgl. Kap.2.4.3) vereinzelt auch solche Ereignisse in Hamburg Wasserstände von NN + 4,00 m und mehr erreichen, die in Cuxhaven weniger als 200 cm Stau aufweisen.

2.3 Sturmfluten in der Deutschen Bucht

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 und dem zeitlichen Ablauf und der Intensität der Sturmfelder auf. Der an der Küste durch einen Sturm entstehende Stau wird ganz wesentlich durch die Phasenlage zu den Gezeiten mitgeprägt.

Als Ergebnis ergibt sich eine außerordentlich hohe Variabilität der einzelnen Ereignisse. Jede Sturmflut hat ihre eigene Charakteristik. Dennoch kann man anhand der Windstauverhältnisse an einem Ort Gruppen ähnlicher Sturmfluten definieren. (PETERSEN, M. & ROHDE, H., 1991) ordneten beispielsweise den Zugbahnen von Sturmtiefs über Europa typische Ausprägungen von Windstaukurven an der deutschen Nordseeküste zu (vgl. Abbildung 6). Wesentlich weitgehender befasste sich (GÖNNERT, 1999) mit der Analyse und Kategorisierung von Windstaukurven im Nordseeküstengebiet.

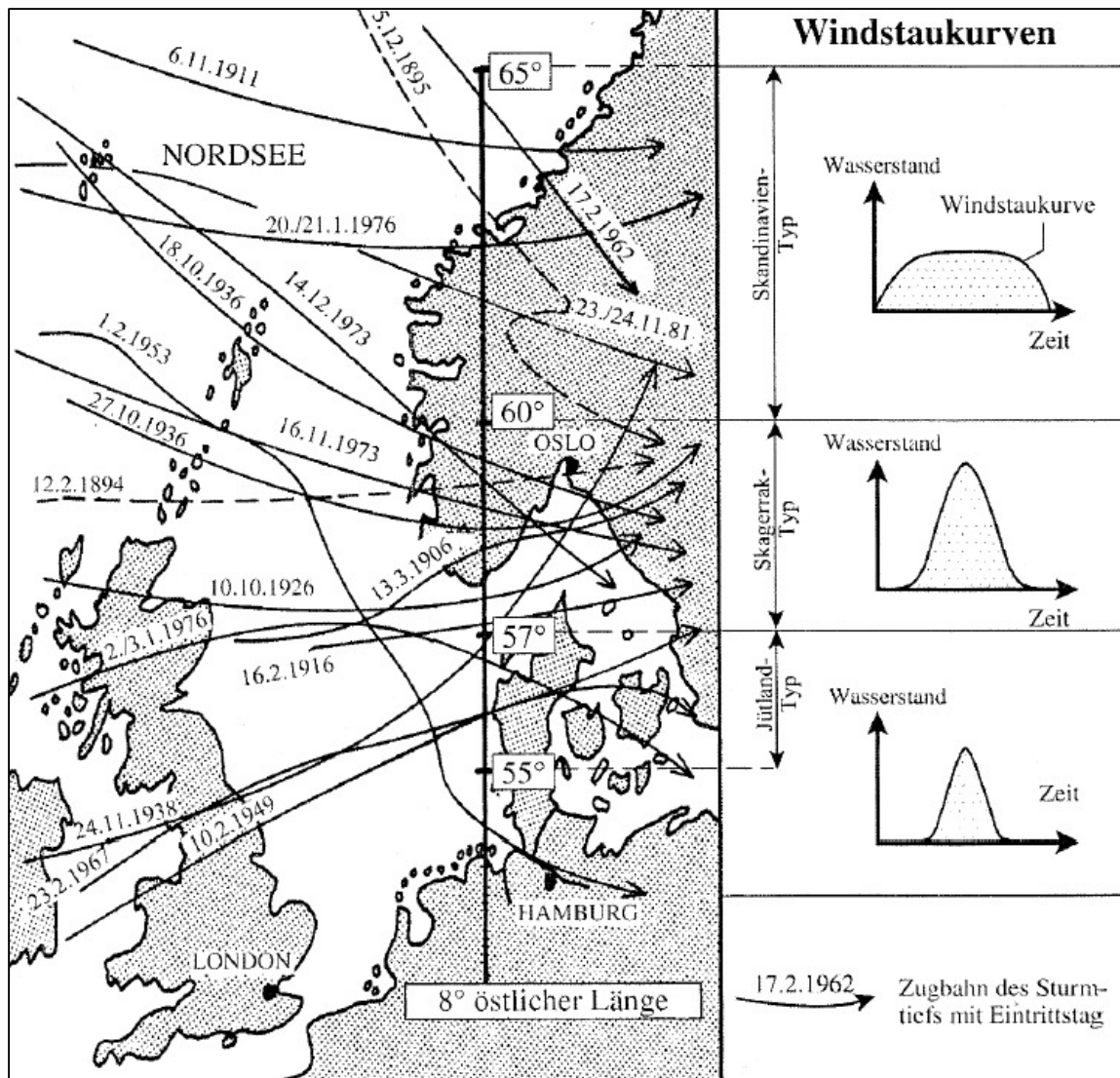


Abbildung 6: Sturmfluttypen an der deutschen Nordseeküste, (LECHER, K.; ZANKE, U.; LÜHR, H.P., 2001)

2.4 Sturmflutgeschehen in einem Tideästuar

2.4.1 Charakteristische Rand- und Eigenwerte des Systems

Im Vergleich zur offenen Küste ist das Sturmflutgeschehen in einem Tideästuar noch deutlich komplexer. Es kann betrachtet werden als Ergebnis des Zusammenwirkens verschiedener Rand- und Eigenwerte eines Systems, wobei die Randwerte analog zum normalen Tidegeschehen (vgl. Kap. 2.1) auch bei Sturmfluten sowohl von unter- wie auch von oberhalb des Ästuars auf das System wirken. Nach (SIEFERT, W., 1978) sind hierbei im Wesentlichen die seeseitigen Einflussgrößen

- Tide,
- Windstau,
- Fernwellen und
- säkularer Meeresspiegelanstieg

sowie der oberstromige Randwert

- Oberwasserzufluss

zu nennen.

Wie in Kap. 2.1 dargestellt, hat der Oberwasserzufluss der Mittelelbe vorwiegend im Flussabschnitt zwischen Geesthacht und Schulau einen spürbaren Einfluss auf die Sturmflutwasserstände. Am Pegel St. Pauli führt eine Erhöhung des Oberwasserzuflusses um $100 \text{ m}^3/\text{s}$ lediglich zur Erhöhung eines Sturmflutscheitels um etwa einen Zentimeter. Eine Verdopplung des mittleren Oberwasserzuflusses von $700 \text{ m}^3/\text{s}$ auf rund $1400 \text{ m}^3/\text{s}$ führt also zu einer Erhöhung eines auftretenden Sturmflutscheitels in Hamburg um rund 7 cm. Oberhalb des Hamburger Stromspaltungsgebietes sind die Einflüsse des Oberwassers auf die Wasserstände deutlich größer.

Darüber hinaus sind nach (SIEFERT, W., 1978) für den Sturmflutablauf in einem Tidefluss in erster Linie die folgenden Eigenwerte des Flussgebietes maßgeblich:

- Geometrie und Rauigkeit des Flusses (Länge, Tiefe, Breite, Querschnitte)
- Ausbauten, Hafengebäude, Vordeichungen, Absperrungen von Nebenflüssen
- Betrieb von Sperrwerken, Wehren
- Höhe und Haltbarkeit der HWS-Anlagen
- Boden-Eigenschaften
- Coriolis-Effekte
- Örtliche Windeffekte

Die Einflüsse der Rand- und Eigenwerte auf den Ablauf einer Sturmflut sind unterschiedlich groß und im Einzelnen nur sehr schwer zu identifizieren. Die bestimmende Einflussgröße für die Hochwasserhöhe in einem Tidefluss ist zweifellos der Windstau, dessen Bedeutung für die Tideelbe von (SIEFERT, W.; 1968, 1978, 1991) untersucht wurde. SIEFERT ermittelte u.a., dass der Stauverlauf in Cuxhaven von rd. 2 Stunden vor dem astronomischen Tnw bis rd. 1 Stunde nach dem astronomischen Thw in Cuxhaven von entscheidender Bedeutung für die Höhe des Hochwassers in Hamburg ist.

2.4.2 Lokaler Windeinfluss über dem Flussgebiet

Der Wind über der inneren Deutschen Bucht ist maßgeblich für die Ausprägung der Staukurve in Cuxhaven und den Sturmflutablauf in der Elbe. Die Rolle des lokalen Winds über der Elbe wird in der Literatur hingegen durchaus kontrovers diskutiert. (SIEFERT, W., 1978) hat sich ausführlicher mit dem Einfluss des örtlichen Windes auf die Wasserstände im Ästuar auseinandergesetzt.

Auf Grundlage einer Auswertung älterer Untersuchungen von (TOMCZAK, G., 1952) kommt er für die Tidehochwasser in Brunsbüttel zu dem Ergebnis, dass sich bei allen auflandigen Windrichtungen (außer für NW) ein deutlicher Anstieg der Erhöhungen in Brunsbüttel gegenüber Cuxhaven mit zunehmender Windstärke zeigt. So weist (SIEFERT, W., 1978) – S. 131 auch ausdrücklich auf einen „lokalen Windstau bei S-Wind in Brunsbüttel bei lokalem Sunk in Cuxhaven“ hin.

Da die Auswertungen von TOMCZAK jedoch vor allem auch zeigten, dass sich bei allen Windrichtungen aus SSW bis WNW, also einem Sektor von rund 110° , praktisch gleiche Erhöhungen der HThw-Differenz zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel ergeben, kommt SIEFERT zur Schlussfolgerung, dass „von einem messbaren Einfluss des örtlich über der Elbe vorhandenen Windes auf die Wasserstände nicht gesprochen werden kann“ (SIEFERT, W., 1978) - S. 133. Diese Aussage ist jedoch schon deshalb als fragwürdig anzusehen, da TOMCZAK für seine Auswertungen lediglich die Windverhältnisse über der Deutschen Bucht heranzog, und zwar als Mittelwert der Daten von den deutschen Feuerschiffen und von Helgoland.

Insofern wird ersichtlich, dass mögliche lokale und kleinräumige Windfelder über der Tideelbe in den Untersuchungen von TOMCZAK gar keine Berücksichtigung fanden. In einer späteren Arbeit räumt SIEFERT allerdings ein, dass der lokale Wind über der Elbe sehr wohl einen Einfluss auf die Wasserstände haben kann, ohne diesen Effekt jedoch quantifizieren zu können. Als generell stauwirksam bezeichnet (SIEFERT, 1991) „den Wind über der Elbe bis rd. 2 h vor $HThw_{HBG}$.“

Mit dem möglichen Einfluss des Windes über der Elbe auf Sturmfluten befasst sich auch (BREMER, 2008) in seiner Analyse der Windstaukurvenentwicklung in der Elbe und unterscheidet dabei die folgenden Flussabschnitte:

- Wedel bis Hamburg (potenziell wirksame Windrichtung ca. 280°)
- Brokdorf bis Stadersand (potenziell wirksame Windrichtung ca. 330°)
- Cuxhaven bis Brokdorf (potenziell wirksame Windrichtung ca. 260° bis 270°)

Aufgrund der Ausrichtung und der Gewässerbreite spricht (BREMER, 2008) dem Abschnitt zwischen Cuxhaven und Brokdorf noch am Ehesten eine Wirkung zu, kommt in seinen Untersuchungen, die allerdings auch nur die 10 höchsten bislang aufgetretenen Sturmfluten umfassen, jedoch zu keinem eindeutigen Ergebnis. Die während der zehn untersuchten Sturmfluten vorherrschenden Windrichtungen lagen zwischen 210° bis 300° und damit zu breit gestreut, als dass sich ein Trend in Bezug auf die Bildung signifikanter Windstauscheidendifferenzen erkennen ließe. Der Einfluss nennenswerten lokalen Windstaus über der Tideelbe kann (BREMER, 2008) weder bei der Ausbildung großer Scheiteldifferenzen noch beim Auftreten großer Windstaudifferenzen zwischen Hamburg und Cuxhaven verifizieren. BREMER weist vor diesem Hintergrund ausdrücklich auf weiteren Forschungsbedarf hin, um die genauen Mechanismen zu verstehen.

Zu konkreten Ergebnissen bezüglich der Windeinwirkung über der Elbe für die Hochwasserscheitel von Sturmfluten kommt die (Bundesanstalt für Wasserbau, 2000) auf der Grundlage von Systemuntersuchungen mit hydronumerischen Modellen und der naturnahen Simulation regionaler Windfelder. Für die Sturmflut vom 28. Januar 1994 ergeben sich durch eine Modifikation der lokalen Windfelder über der Elbe um + 10 % bzw. -10 % folgende Veränderung der Hochwasserscheitel:

Δ Thw	Wind +10 %	Wind -10 %	Ohne lokalen Wind
Cuxhaven	+ 6 cm	- 5 cm	- 21 cm
Brunsbüttel	+ 11 cm	- 10 cm	- 43 cm
Schulau	+ 19 cm	- 16 cm	- 72 cm
St. Pauli	+ 19 cm	- 15 cm	- 72 cm
Bunthaus	+ 19 cm	- 17 cm	- 71 cm
Geesthacht	+ 19 cm	- 17 cm	- 71 cm

Tabelle 1: Ergebnisse der Systemuntersuchungen der BAW zur Windwirkung entlang der Elbe (Bezug: HThw der Sturmflut vom 28.1.1994), (Bundesanstalt für Wasserbau, 2000)

Anhand dieses Beispiels wird deutlich, dass der Wind über dem Elbästuar insgesamt eine beträchtliche Wirkung auf die Wasserstände haben kann, lokal aber deutliche Unterschiede in der Windwirkung bestehen: Zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel sowie auf der (langen) Strecke zwischen Brunsbüttel und Schulau sind jeweils signifikante windbedingte Scheitelveränderungen zu verzeichnen, während sich die Wasserstände oberhalb von Schulau durch lokalen Windeinfluss praktisch nicht mehr verändern. Ähnliche Ergebnisse wurden von der BAW auch für die Sturmflut vom 3.1.1976 errechnet.

2.4.3 Einfluss baulicher Veränderungen auf das Sturmflutgeschehen

Wie für normale Tiden (vgl. Kap. 2.1), sind auch für Sturmfluten die Geometrie und Rauigkeit des Gewässerbettes von wesentlicher Bedeutung für den Ablauf von Sturmfluten in einem Ästuar. Eine von der offenen See in das Ästuar eindringende Sturmflut wird bei ihrem stromaufwärtigen Lauf bis zur Tidegrenze durch Reibung, Reflexion und Oberwasserzufluss fortwährend verformt, so dass sich an jedem Ort des Flusses unterschiedliche Tideverhältnisse einstellen.

Vor diesem Hintergrund können bauliche Veränderungen von Tideflüssen den Sturmflutablauf in Tideästuaren erheblich und dauerhaft beeinflussen.

(SIEFERT, W. & LASSEN, H., 1986) kamen bei einer vergleichenden Untersuchung des Sturmflutablaufs in Elbe, Weser und Ems zum Ergebnis, dass sich die Sturmflutscheitel in den Tideflüssen zwischen 1940 und 1980 deutlich stärker erhöht haben als an der Nordseeküste und durch eine Verkürzung der Laufzeiten die Sturmfluten in den Tideflüssen „schneller“ geworden sind. Diese Erkenntnis deckt sich mit der Erwartung, die sich unter Anwendung der linearen Wellentheorie auf die Folge von Fahrwasservertiefungen ableiten lässt, wonach sich die Geschwindigkeit einer Flachwasserwelle proportional zur Quadratwurzel der Wassertiefe verhält.

Vom Grundsatz her lassen sich die hydraulischen Wirkungen verschiedener Typen von Baumaßnahmen in einem Tidefluss wie folgt klassifizieren:

- Ausbauten der Fahrrinne vermindern die Rauigkeit der Gewässersohle, wodurch die Energie dissipierende Reibung herabgesetzt wird. Dies hat zur Folge, dass die Amplitude der Tidewelle an den stromauf gelegenen Stationen ausbaubedingt ansteigt. Da gleichzeitig das Tidemittelwasser absinkt, werden die Thw und damit auch die Sturmflutscheitelhöhen weniger stark ansteigen als die Tnw abfallen. Darüber hinaus hat die Vertiefung des seeschiffstiefen Fahrwassers eine Vergrößerung des Sohlprungs beim Übergang zum binnenschiffstiefen Fahrwasser in Höhe der Hamburger Elbbrücken zur Folge und erhöht damit die Reflexion an dieser Stelle.
- Veränderungen von Hafengebäckflächen, etwa im Hamburger Hafen, verändern den Schwingungsraum der Tide und bewirken auf diese Weise eine Beeinflussung der Tideparameter. Die Verkleinerung von Hafengebäckflächen (durch Verfüllung) führt wegen der Verkleinerung des Tidevolumens grundsätzlich zu einer – erfahrungsgemäß allerdings kleinen und lokal begrenzten - Erhöhung der Thw sowie der Sturmflutscheitel und einem Absink der Tnw.
- Durch Vordeichungen und den Bau von Sturmflutsperrwerken an Nebenflüssen ist infolge der Verringerung des Flutraums und evtl. auch durch veränderte Teilreflexionen ebenfalls tendenziell eine Erhöhung der Sturmflutscheitelhöhen verbunden.
- Auch der Bau von Wehren führt durch die Schaffung einer künstlichen Tidegrenze und der damit verbundenen Reflexion im Grundsatz zu einer Erhöhung von Sturmfluten.

Aufgrund der besonderen Bedeutung der Wehrsteuerung im Hochwasser- und Sturmflutfall für den Betrieb eines Operationellen hydronumerischen Vorhersagemodells wird auf das Wehr Geesthacht in Kap. 2.4.4 noch gesondert eingegangen.

Eine umfassende Analyse der Wasserstands- bzw. Sturmflutentwicklung im Elbeästuar wurde von (SIEFERT, W. & HAVNØ, K., 1989) veröffentlicht. In dieser Arbeit werden die Ergebnisse einer wasserbaulichen Systemanalyse auf Grundlage hydronumerischer Modelluntersuchungen dargestellt, bei denen der Einfluss einzelner baulicher Veränderungen an der Elbe im Fokus steht (Bau des Wehres Geesthacht, Absperrung von Nebenflüssen, Eindeichungen, Fahrwasservertiefungen). Die Ergebnisse zeigen, dass sich der Bau von Sperrwerken und Eindeichungen generell in deutlich erhöhten Scheitelwerten der Sturmfluten widerspiegeln¹. Die verschiedenen Fahrwasservertiefungen in diesem Zeitraum (von 10 auf 13,5 m unter KN) bewirkten im Vergleich dazu eine eher unbedeutende Erhöhung der Sturmflutscheitel. Für die gemeinsame Wirkung aller untersuchten anthropogenen Maßnahmen zwischen 1950 und 1980 geben die Autoren die folgenden Veränderungen bei hohen Sturmfluten an:

- Brokdorf: + 2 bis + 4 dm
- Stadersand: + 3 bis + 5 dm
- HH-St. Pauli: + 5 bis + 6 dm
- Zollenspieker: + 6,5 bis + 9 dm

Diese Zahlen verdeutlichen den bedeutenden Einfluss der großen baulichen Veränderungen an und in der Elbe auf die Sturmflutscheitelhöhen, vor allem im oberen Teil des Ästuars.

¹ Für die Eindeichung Nordkehdingen (rd. 55 km²) wird bei SIEFERT & HAVNØ 1989 allerdings eine scheidelabsenkende Wirkung ermittelt, die mit der durch die Vordeichung verbundene Reduzierung des Mündungsquerschnitts erklärt wird.

Auch (GÖNNERT, G. & FERK, U., 1996) befassten sich mit der anthropogen beeinflussten Entwicklung von Sturmfluten in der Unterelbe. Die Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Sturmflutscheiteldifferenzen (ΔH_{Thw}) zwischen Hamburg-St. Pauli und Cuxhaven (Abbildung 7) gibt durch die große Streuung der Scheiteldifferenzen (zwischen -25 und +166 cm) einen deutlichen Hinweis auf die große Variabilität des Sturmflutgeschehens in der Elbe. Darüber hinaus zeigt sich eine starke Veränderung der Sturmflutscheiteldifferenzen zwischen dem äußeren und dem inneren Ästuar:

Waren Sturmfluten in Hamburg während der ersten Jahrzehnte des letzten Jahrhunderts in Hamburg im Mittel nur etwa 40 cm höher als an der Elbmündung, setzt ab etwa Mitte der 1950er Jahre eine bemerkenswerte Erhöhung dieser (mittleren) Differenzen um 50 bis 60 cm ein, die bis in die 1980er Jahre hinein anhält. Eine „durchschnittliche“ Sturmflut läuft heute in Hamburg also rund 100 cm höher auf als in Cuxhaven.

(GÖNNERT, G. & FERK, U., 1996) zeigten zudem auf, dass insbesondere hohe Sturmfluten in der Unterelbe eine überdurchschnittliche Erhöhung erfahren, während sich eher niedrige Fluten im Laufe des vergangenen Jahrhunderts geringer erhöht haben. Heute stellt sich die Situation so dar, dass hohe Sturmfluten (mit einer Höhe von mindestens NN + 3,50 m am Pegel Cuxhaven) im Mittel eine Scheitelhöhendifferenz von 120 bis 130 cm am Pegel St. Pauli aufweisen, während eher niedrige Fluten (mit einer Höhe von unter NN + 3,00 m in Cuxhaven) bis Hamburg durchschnittlich um lediglich 80 bis 90 cm erhöht werden.

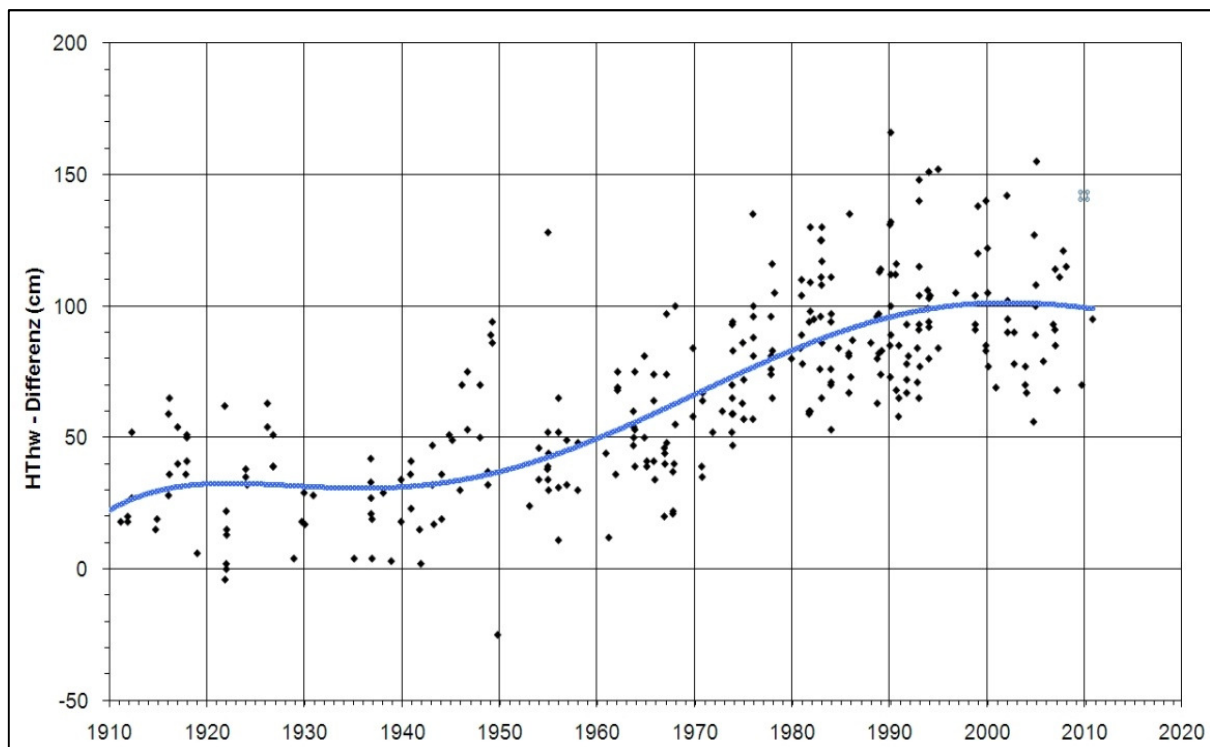


Abbildung 7: HThw - Höhendifferenzen St. Pauli – Cuxhaven, (GÖNNERT, G. & FERK, U., 1996) aktualisiert

Der Abbildung 7 ist zudem zu entnehmen, dass die starke Erhöhung der Sturmfluten in der Unterelbe in erster Linie in den 1960er und 1970er Jahren stattgefunden hat. Seit den 1980er Jahren ist bei der Scheiteldifferenzen Cuxhaven – St. Pauli kein signifikanter Trend im Hinblick auf eine weitere Erhöhung erkennbar.

Das ist insoweit plausibel, als dass die meisten der bedeutenden Wasserbaumaßnahmen in und an der Elbe in der Tat in den 1960er und 1970er Jahren durchgeführt wurden, z.B.:

- Absperrung Alte Süderelbe, neue Deichlinie Harburg bis Este (1962 – 1967)
- Absperrung Billwerder Bucht mit Kanälen (1963 – 1969)
- Vordeichungen Geesthacht bis Billwerder Bucht (1963 – 1973)
- Fahrwasservertiefung auf 12 m unter KN (1964 – 1969)
- Absperrung der Lühe (1967)
- Absperrung der Oste (1968)
- Absperrung Pinnau und Krückau, Eindeichung des Vorlandes (1969)
- Eindeichung Hahnhöfer Sand sowie Schwinge-, Pinnau-, Krückaumündungen (1969 – 1974)
- Absperrung Schwinge, Eindeichung Bützflether Sand (1971)
- Eindeichung Nordkehdingen (1971 – 1976)
- Eindeichung Hahnöfer Sand, Absperrung Borsteler Binnenelbe (1973 – 1974)
- Fahrwasservertiefung auf 13,5 m unter KN (1974 – 1978)
- Absperrung der Stör (1975)
- Eindeichung Haseldorfer Marsch (1975 – 1977)
- Eindeichung Krautsand (1977)

Demgegenüber sind, wenn von großen Wasserbaumaßnahmen an der Unterelbe die Rede ist, neben der Verfüllung von Hafengebäcken² im Hamburger Hafen, seit den 1980er Jahren die abermalige Fahrwasservertiefung von Unter- und Außenelbe (1998 – 2000) sowie die Teilverfüllung des Mühlenberger Lochs (2001 – 2002) zu nennen. Abbildung 7 legt jedoch die Vermutung nahe, dass diese Baumaßnahmen die Sturmfluthöhen in der Elbe nicht gravierend beeinflusst haben. Nach den entsprechenden Fachgutachten, die auf den Ergebnissen hydronumerischer Modelluntersuchungen der Bundesanstalt für Wasserbau beruhen, wurden von den jeweiligen Maßnahmen jeweils Scheitelhöhen bei hohen Fluten im unteren Zentimeterbereich erwartet. Das seit der vorherigen Fahrrinnenanpassung laufende Beweissicherungsverfahren bestätigt die damaligen Prognosen insoweit, als dass keine signifikanten Sturmflutscheitelhöhen in der Unterelbe nachgewiesen werden konnten. Auch (FICKERT, M. & STROTMANN, T., 2007) zeigen, dass sich die Wasserstandsverhältnisse in der Elbe seit ca. 1980 auf einem erhöhten Niveau wieder annähernd stabil eingestellt haben.

Ergänzend sei darauf hingewiesen, dass neben den Scheitelhöhen auch die Laufzeiten von Sturmfluten durch bauliche Veränderungen in der Tideelbe maßgeblich beeinflusst wurden. In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts betrug die durchschnittliche Laufzeit einer Sturmflut in der Unterelbe von der Mündung bis nach Hamburg etwa 4½ Stunden. Ebenfalls ab etwa Anfang der 1950er Jahre setzt dann eine markante Verkürzung der Eintrittszeitdifferenzen ein, die ebenfalls erst in den 1980er Jahren ihr Ende findet. Heute beträgt die mittlere Laufzeit einer Sturmtide zwischen Cuxhaven und Hamburg nur noch 3½ Stunden. Das heißt, dass Sturmfluten heute etwa eine Stunde schneller in Hamburg sind als vor rund 60 Jahren. Die Durchschnittsgeschwindigkeit einer „mittleren“ Sturmflut hat sich also von gut 22 km/h auf knapp 29 km/h erhöht.

² Nach (SIEFERT, W., 1995) war zwischen 1984 und 1994 im Hamburger Hafen ein Rückgang von Hafengebäcken von 41 ha zu verzeichnen. Nach 1994 wurden im Wesentlichen die Hafengebäcken Indiahafen (ca. 8 ha), Griesenwerder Hafen (28,4 ha), Vulkanhafen (ca. 16,5 ha) und Kohlenschiffhafen (Teilverfüllung, ca. 17 ha) zu Landflächen umgewandelt. Insgesamt wurden seit Beginn der 1980er Jahre in Hamburg somit etwa 110 ha Hafengebäcken verfüllt.

2.4.4 Wirkung und Steuerung des Wehres Geesthacht

An dieser Stelle soll gesondert auf die hydraulische Wirkung des Wehres Geesthacht bei Sturmfluten eingegangen werden, da dieses Bauwerk und seine Steuerung insbesondere auch für die hydronumerischen Modelle eine wichtige Zustandsgröße darstellt.

Das Wehr Geesthacht wurde zwischen 1957 und 1960 bei Elbe-km 585,9 mit fester Wehrschwelle errichtet. Es besitzt vier Durchflussöffnungen, die jeweils eine lichte Weite von 50 m aufweisen und mit Verschlusskörper in Form von Stahlsektoren ausgerüstet sind. Nördlich der Durchflussöffnungen schließt eine Überlaufschwelle an, die eine Überlaufhöhe von NN +4,30 m besitzt und somit nur bei extremen Oberwasserabflüssen überspült wird.

Je nach Wasserführung der Elbe kann die Höhenlage der Verschlusssektoren hydraulisch eingestellt werden. In den Kammern der Stahlsektoren wird dazu nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren eine Veränderung des Wasserdrucks herbeigeführt. Um einen Sektorverschluss zu steuern, wird den Sektorkammern über ein regelbares Rohrschütz genau so viel Wasser von Oberstrom zugeführt, dass der Druck in der Kammer im Gleichgewicht zur Auflast aus dem Eigengewicht der Stahlsektoren und der darüber anstehenden Wassersäule steht. Das Stauziel für den Wasserspiegel oberhalb des Wehres beträgt NN +4,00 m. Damit wird der Betrieb des Pumpspeicherwerks Geesthacht sowie die Schiffbarkeit des Elbe-Seitenkanals und Elbe-Lübeck-Kanals sichergestellt.

Bei Hochwasser oberhalb der Staustufe werden die Sektoren vollständig in die Sektorengruben abgesenkt, um einen ungehinderten Abfluss des Oberwassers zu gewährleisten. Bei einer vorhergesagten Sturmflut (Wasserstand in Cuxhaven > PN +7,00 m) werden die Sektoren mit Pumpenhilfe bis zur maximalen Stellung von NN +5,85 m hochgefahren und das Wasser von Oberstrom somit eingestaut. Beim Auftreffen der Sturmflut auf das Wehr bewirkt die Auflast der zunehmenden Wassersäule dann eine selbstständige Absenkung der Sektoren in die Sektorengruben. Dadurch können die Sturmflutwassermassen nahezu ungehindert die Staustufe passieren und so eine Entlastung des unterstrom auflaufenden Wasserstands begünstigt werden. Da das anschließende Wiederhochpumpen der Sektoren auf das eigentliche Stauziel während der einsetzenden Ebbe viel Zeit in Anspruch nimmt, ist das Aufstauen des Wassers von Oberstrom notwendig, da sonst zu viel Wasser ablaufen würde und die Schifffahrt Oberstrom sowie der Betrieb des Pumpwerkes nicht mehr sichergestellt werden können.

Aus dem eben beschriebenen Vorgang lässt sich erkennen, dass das Wehr Geesthacht offensichtlich keine Ursache für besonders hohe Wasserstände bei Sturmfluten ist. (SIEFERT, W. & HAVNØ, K., 1989) haben sich in Modelluntersuchungen mit dem Einfluss des Wehres auf die Wasserstände bei Sturmfluten beschäftigt. Mit verschiedenen Sturmfluten wurden HThw-Differenzen bei geöffnetem Wehr für Modellergebnisse und Naturdaten verglichen. Entlang der Pegel Stadersand, Hamburg – St. Pauli, Bunthaus, Zollenspieker und Geesthacht wurden Abweichungen zwischen -0,5 und 1 dm festgestellt. Zusätzlich wurde die Bemessungssturmflut 2085A (HThw Cuxhaven = NN +5,65 m, HThw St. Pauli = NN +7,30 m) im Modell untersucht. Auch hier wurden an den genannten Pegeln nur Abweichungen von $\pm 0,5$ dm ermittelt. Bleibt das Wehr bei denselben Sturmfluten hingegen geschlossen (ausgenommen Bemessungssturmflut 2085A), zeigen sich Erhöhungen von bis zu 4 dm im Bereich Zollenspieker. In Hamburg hingegen werden Abweichungen des HThw von bis zu -1,5 dm ermittelt. Auf Basis dieser Modelluntersuchungen sind (SIEFERT, W. & HAVNØ, K., 1989) zu dem Schluss gekommen, dass das Wehr Geesthacht keine erhöhten HThw bei Sturmfluten verursacht.

2.5 Sturmflutvorhersageverfahren für die deutsche Nordseeküste

Für die an der Nordseeküste gelegenen Ästuar von Ems, Weser und Elbe ist die Vorhersage von Sturmflutwasserständen von existenzieller Bedeutung. Nach dem Grundgesetz liegt die Hochwasservorsorge in der Regelungs-, Vollzugs- und Finanzierungskompetenz der einzelnen Bundesländer. Demgegenüber obliegen dem Bund nach §1 des Seeaufgabengesetzes „auf dem Gebiet der Seeschifffahrt die nautischen und hydrographischen Dienste, insbesondere der Gezeiten-, Wasserstands und Sturmflutdienst“. Diese Dienste werden durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) wahrgenommen (MÜLLER-NAVARRA S. , 2008). Für die Sturmflutvorhersage sind auf Bundes- und Länderebene vor diesem Hintergrund verschiedene Verfahren und Warnsysteme eingeführt worden.

2.5.1 Sturmflutvorhersagen des BSH

Zur Wahrnehmung seiner Aufgaben betreibt das BSH eine Modellkette, die das Nord- und Ostseemodell sowie ein Küstenmodell (BSHcmod) enthält und durch das globale Atmosphärenmodell GME und das Lokalmmodell COSMO-EU des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zusätzlich mit Wetterinformationen gespeist wird. Viermal täglich können damit Modellvorhersagen zu den Wasserständen entlang der deutschen Küste für die nächsten 24h herausgegeben werden.

Aus diesem Wasserstandsvorhersagedienst wird bei erwarteten Wasserständen von mehr als 1,5 m über dem mittleren Hochwasser der Sturmflutwarndienst. Auf Basis von mindestens 25 Pegeln in der Nordsee und den Ästuaren sowie meteorologischen Messungen über der Deutschen Bucht und dem errechneten Windstau an der Küste werden unter Berücksichtigung des Gesamteindrucks die Prognosen für die Sturmflutwasserstände entwickelt. Ozeanographen (BSH) und Seemetereologen (DWD) diskutieren die Sturmweatherlage, die zeitliche Sturmflutentwicklung sowie die numerischen Wettervorhersagen unterschiedlichster internationaler Wetterdienste. Auf Basis dieser Betrachtungen werden empirische Vorhersagen zu den Sturmflutscheitelwasserständen möglich.

Mehr als 300 Warnungsempfänger entlang der Nordseeküste werden im Sturmflutfall informiert, u.a. Katastrophenstäbe, Deichverbände, Terminalbetreiber, Feuerwehr, Polizei, u.v.m. Auch örtliche Warndienste, wie der Hamburger Sturmflutwarndienst (WADI) werden in Kenntnis gesetzt. Denn zusätzlich zum BSH auf Bundesebene gibt es auf Länderebene ebenfalls Warndienste, die eigene Vorhersageverfahren entwickelt haben und verwenden.

2.5.2 Sturmflutwarndienst des NLWK für die niedersächsische Küste

Der Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWK) verfügt über solch ein eigenes Sturmflutvorhersageverfahren. Auch dieses Verfahren beruht auf der Beobachtung der Wind- und Stauentwicklung in der Deutschen Bucht (COLDEWEY, 2008).

Für die niedersächsische Nordseeküste sowie die Elbemündung werden Stauganglinien auf Basis eines windrichtungsabhängigen empirischen Ansatzes ausgegeben. Die Winddaten für dieses Verfahren werden aus dem Programm „Küste“ des DWD entnommen. Aus der Überlagerung der ermittelten Stauganglinien und der mittleren Tidekurven werden die Sturmflutwasserstände ermittelt.

Der verwendete Ansatz zur Berechnung des Staus berücksichtigt die Veränderung der Windgeschwindigkeiten. Nimmt das Windfeld bereits vor Thw ab, nimmt auch der Stau ohne Verzögerung ab. Nimmt der Wind hingegen zu, wird der Stau mit einem gewissen Nachlauf zunehmen. Die Vorher-

sage wird daher mit abnehmender Vorlaufzeit genauer (bis zu 5 Tage sind möglich), da die Entwicklung des Windes langfristig und großräumig beobachtet wird. In einer Mitteilung des Sturmflutwarndienstes werden die Ergebnisse zusammengefasst und publiziert.

(s. <http://www.nlwkn-pegelonline.de/sturmflutwarndienst/tide.pdf>)

2.5.3 Hamburger Sturmflutwarndienst (WADI)

Hamburg hat zahlreiche Sturmfluten erlebt; die folgenreichste ereignete sich 1962 mit mehr als 300 Todesopfern. Auch die Sturmflut vom 3. Januar 1976, die mit einem Scheitelwasserstand von NN +6,45 m eintrat, hatte vor allem den Hamburger Hafen schwer getroffen. Als Reaktion auf dieses Ereignis wurde im Hafen der Bau von privaten Hochwasserschutzanlagen (sog. Poldern) umgesetzt. Da diese Hafenspolder aus betrieblichen Gründen über 1000 Tore und Öffnungen mit niedrigen Drempelhöhen ab NN + 5,00 m verfügen, wurde schon früh erkannt, dass mit Blick auf die besonderen Verhältnisse im Hafen ein eigener Sturmflutwarndienst für Hamburg eingerichtet werden muss. Im September 1976 hat der Hamburger Sturmflutwarndienst (WADI) seine Arbeiten im damaligen Amt Strom- und Hafenbau (heute Hamburg Port Authority) aufgenommen (LEHMANN; H.-A., 2007).

Das im WADI zur Anwendung kommende empirisch-statistische Vorhersageverfahren beruht auf den Überlegungen von (SIEFERT, W., 1968) und beinhaltet in erster Linie die Vorhersage der Windstaukurve am Pegel Cuxhaven. Auf dieser Grundlage zielt das Verfahren auf eine Prognose von Höhe und Eintrittszeit des Sturmflutscheitels in Hamburg ab. Das Prinzip des Vorsageverfahrens des Hamburger Sturmflutwarndienstes wurde bereits 1973 erprobt und schließlich 1976 offiziell eingeführt. Bis 1983/84 wurde das Verfahren mehrmals verfeinert, (SIEFERT, W. & CHRISTIANSEN, H., 1983). Das als „WADI III“ bezeichnete Verfahren wird seit den 1980er Jahren betrieben; es wurde seitdem punktuell angepasst und präzisiert.

Die Vorhersagen des WADI sind Grundlage der Arbeit des Hafenstabes und der einzelnen Einsatzgruppen in den Hafenspoldern. Die Warnungen des WADI erfolgen über Funk für spezielle Meldeempfänger und über eine öffentliche Telefonansage. Die Sturmflutvorhersage beginnt in der Regel bis zu zwei Stunden vor Eintritt des Tnw in Cuxhaven, das bedeutet circa 11½ Stunden vor dem astronomischen Eintrittszeitpunkt des Thw in Hamburg. Dann wird geprüft, ob die Wasserstände auf eine sehr schwere Sturmflut mit NN +6,50 m schließen lassen und somit die notwendige Vorlaufzeit für Evakuierungen und Sicherung von sturmflutgefährdeten Gebieten eingehalten werden kann. Die Vorhersage basiert auf empirisch-statistischen Auswertungen der Wasserstände von Terschelling, Borkum, und Cuxhaven. Des Weiteren werden Winddaten von Terschelling und Scharhörn ausgewertet. Die ersten Berechnungen mit dem WADI III – Verfahren beginnen nach dem astronomischen Tnw in Cuxhaven - frühestens 9 Stunden vor dem astronomischen Thw in Hamburg. Danach werden halbstündig die Berechnungen wiederholt. Die WADI - Sturmflutvorhersagen haben sich in Hamburg sehr bewährt. Insbesondere bei Wetterlagen mit stabilen Verhältnissen liefert das empirisch-statistische WADI III –Verfahren sehr präzise Vorhersagergebnisse. Gleichwohl kommt insbesondere bei veränderlichen Wetterlagen auch heute noch dem Erfahrungswissen der Einsatzleiter bei der abschließenden Bewertung der Vorhersageergebnisse eine wichtige Rolle zu.

2.5.4 Sturmflutwarnungen für Schleswig-Holstein

Das Land Schleswig-Holstein betreibt kein eigenes Vorhersageverfahren. Im Sturmflutfall orientiert sich ein Warndienst an den Prognosen des BSH, ergänzt und präzisiert diese auf der Grundlage ortsspezifischen Erfahrungswissens und stellt die Vorhersagen auf www.hsi.schleswig-holstein.de/ der Öffentlichkeit zur Verfügung.

3 Auswahl und Aufbereitung der Datengrundlagen

3.1 OPTEL-D

Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, haben in den 1960er und 1970er Jahren eine Vielzahl verschiedener baulicher Maßnahmen die Entwicklung der Wasserstände und der Sturmflutscheitelhöhen in der Elbe deutlich beeinflusst. Seit den 1980er Jahren besteht hingegen kein Trend im Hinblick auf eine Veränderung von Sturmfluten in der Elbe (vgl. Abbildung 7). Vor diesem Hintergrund wurde für die empirischen Untersuchungen in OPTEL-D ein Untersuchungszeitraum von 1980 bis 2008 festgelegt; dieser kann als weitgehend homogen eingestuft werden.

Das Sturmflutkollektiv umfasst, wie in Kap. 2.2 beschrieben, alle Ereignisse aus diesem Zeitraum, bei denen der Stau am Pegel Cuxhaven zu irgendeiner Tidephase mindestens 200 cm erreicht hat, sowie zusätzlich solche Fluten, die am Pegel Hamburg-St. Pauli einen Scheitelwasserstand von mindestens NN +400 cm aufwiesen. Mit dieser Definition ergeben sich für OPTEL-D 153 Ereignisse. Eine Auflistung aller herangezogenen Sturmfluten mit den wichtigsten Kenndaten findet sich in Kapitel 8.1 im Anhang.

Gemäß Projektantrag sind für Windstauanalysen vornehmlich die Pegel Cuxhaven, Brunsbüttel, Glückstadt, Stadersand sowie Hamburg-St. Pauli vorgesehen. Ergänzend wurde auch der Pegel Brokdorf mit betrachtet; dieser war vor einigen Jahren bereits testweise im empirischen Sturmflutvorhersageverfahren des WADI integriert. Eine erneute Prüfung seiner grundsätzlichen Eignung zur Verbesserung der Vorhersage war insofern naheliegend. Darüber hinaus wurden für die Untersuchungen auch Wasserstandsdaten der Pegel Terschelling (Niederlande) und Borkum herangezogen, da es sich hierbei um grundlegende Pegel für das WADI-Verfahren handelt. Abbildung 8 gibt einen Überblick über die in den Untersuchungen betrachteten Pegel an der Tideelbe.

Pegel	Elbe-km
Cuxhaven	724,0
Brunsbüttel	696,5
Brokdorf	684,2
Glückstadt	674,0
Grauerort	660,6
Stadersand	654,8
Schulau	641,0
St. Pauli	623,1
Bunthaus	609,8
Zollenspieker	598,2
Geesthacht	585,9

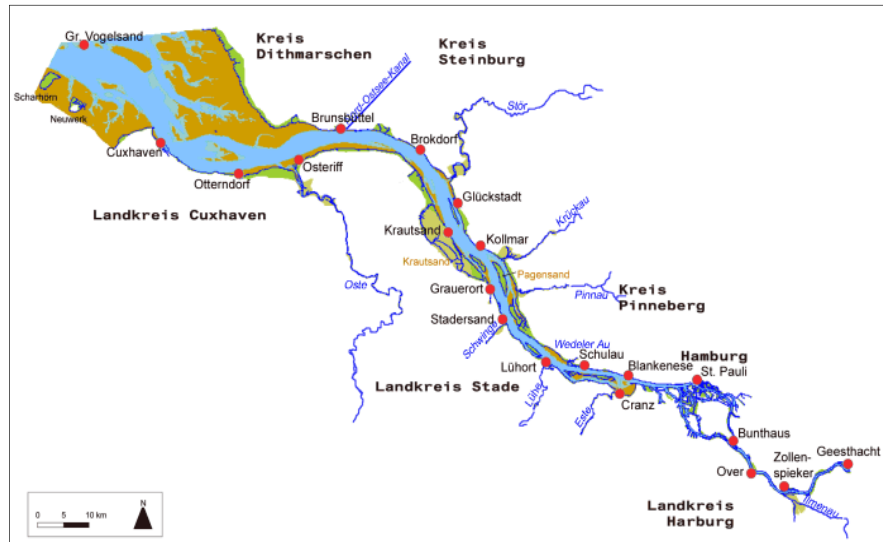


Abbildung 8: Lage und Strom-km der ausgewählten Pegel entlang der Elbe (WSA Hamburg)

Zentrale Grundlage für die Untersuchungen sind zum einen die Wasserstandsganglinien für die einzelnen Sturmfluten. Von den zuständigen Ämtern werden i.d.R. erst seit 1997/98 digitale Wasserstandsdaten erhoben. Die entsprechenden Daten für die in OPTEL-D verwendeten Pegel an der Tideelbe wurden der Online-Datenbank des Zentralen Datenmanagements der WSD Nord (ZDM) (www.portal-tideelbe.de) entnommen. Dort sind Daten der Zeitreihen in 10-Minuten-Werten seit

1997/98 bis heute hinterlegt. Für die Analyse von Sturmfluten aus dem Zeitraum von 1980 bis 1997/1998 war eine Digitalisierung von Pegelbögen notwendig. Wasserstandsganglinien für Sturmfluten der Pegel Hamburg-St. Pauli (seit 1901), Cuxhaven (seit 1901), Borkum (seit 1930) und Terschelling (seit 1965) lagen bereits vor. Die Pegelbögen mit den Sturmfluten für die restlichen Pegel wurden dankenswerterweise von den zuständigen Wasser- und Schifffahrtsämtern zur Verfügung gestellt und bei der HPA digitalisiert.

Zweiter zentraler Parameter für die Analysen ist der Wind. Hier wurden Daten der HPA-eigenen Messstationen auf den 25 bzw. 13 km seewärts von Cuxhaven in der Elbmündung gelegenen Inseln Scharhörn (seit 1976) sowie Neuwerk (seit 1992) herangezogen. Weiterhin hat der DWD Messdaten für die Windmessstationen Cuxhaven und Brunsbüttel zur Verfügung gestellt. Einen Überblick über alle für OPTEL-D verwendeten Messdaten gibt Kap. 8.2 im Anhang.

Für die Berechnung des Staus werden neben den Wasserständen die astronomischen Gezeiten (alternativ: die mittleren Tidekurven) benötigt. Die astronomischen Tiden für die Nordsee und die Elbe wurden speziell für OPTEL-D beim BSH reproduziert (siehe Kap. 8.2.). Hierbei ist zu beachten, dass diese Reproduktion auf Grundlage heutiger hydrologischer und morphologischer Verhältnisse erfolgte. Da dem Projekt OPTEL ein Untersuchungszeitraum von 1980 bis heute zu Grunde liegt, ist es möglich, dass diese astronomischen Kennwerte für den ersten Teil des Untersuchungszeitraums nicht genau den seinerzeit vom BSH ermittelten astronomischen Werten entsprechen.

3.2 Szenarienwahl für Hindcast-Rechnungen mit den HN-Modellen in OPTEL-A und -C

Die Aufgabe der Teilprojekte OPTEL-A und OPTEL-C besteht in der Entwicklung der numerischen operationellen Vorhersagemodelle sowie deren Kopplung an das Nordseemodell des BSH. Der DWD (OPTEL-B) liefert die Windfelder für die operationellen Modelle auf Grundlage der vorhandenen Windmodelle COSMO-DE und COSMO-EU.

Die Kalibrierung und Validierung der in OPTEL A und OPTEL C entwickelten operationellen Modelle soll anhand sechs verschiedener hydrologischer Szenarien erfolgen. Die Auswahl dieser Szenarien sowie die Zusammenstellung der erforderlichen Naturdaten ist Aufgabe des Teilprojekts OPTEL-D.

Prämisse bei der Auswahl der Szenarien war die Heranziehung einer möglichst großen Bandbreite bei den grundlegenden Parametern

- Stau in Cuxhaven,
- Windverhältnisse über der Elbe,
- Oberwasserabfluss sowie
- Salinität im Mündungstrichter.

Als geeigneter Zeitraum für die sechs Szenarien wurde in Abstimmung mit den Teilprojekten OPTEL-A und OPTEL-C April 2006 bis September 2008 festgelegt. Dies war insofern angezeigt, als dass von vor 2006 keine Windfelder aus COSMO-EU existieren, die in die operationellen Modelle eingesteuert werden können. Weiterhin liegt beiden Modellen eine Bathymetrie aus dem Jahr 2006 zu Grunde. In Tabelle 2 sind die sechs Szenarien und die Ausprägung der maßgeblichen Parameter kurz skizziert. Eine ausführliche Beschreibung folgt in den anschließenden Abschnitten.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5	Szenario 6
	Mittlere Verhältnisse	Oberwasserwelle	Langsam abnehmendes Oberwasser	Extreme Ost- / Südost- Windlage	Sturmflut mit fülliger Windstaukurve	Sturmflut mit steiler Windstaukurve
Zeitraum	15.07.2006 – 01.08.2006	24.03.2006 – 13.04.2006	13.04.2006 – 27.04.2006	01.01.2008 – 08.01.2008	28.10.2006 – 03.11.2006	14.01.2007 – 21.01.2007
Stau Cuxhaven	möglichst niedrig	konstant	konstant	niedrig	konstant hoch	rasch ansteigend, Max. um Thw Cux
Q₀	konstant, möglichst mittlere Verhältnisse	schnell ansteigend → hoch	hoch → abnehmend	konstant niedrig	offen; möglichst anders als bei Szenario 6	offen; möglichst anders als bei Szenario 5
Wind Elbe	möglichst gering	konstant	konstant	konstant Ost	NW, konstant	auf NW drehend, stark ansteigend
Salz zonierung im Mündungstrichter	(„normale“ Verhältnisse)	(in Abh. vom Q ₀)	(in Abh. vom Q ₀)	(„normale“ Verhältnisse)	(„normale“ Verhältnisse)	(„normale“ Verhältnisse)

Tabelle 2: Szenarien zur Kalibrierung und Validierung der operationellen Modelle

Die Daten für alle sechs Szenarien wurden von der HPA zusammengestellt und der BAW sowie dem BSH zur Verfügung gestellt. Die Daten umfassen die Wasserstände von Cuxhaven und St. Pauli, den Oberwasserabfluss sowie Salz- und Strömungsdaten der Dauer- und Langzeitmessstationen der Wasser- und Schifffahrtsämter (siehe Abbildung 9 sowie Tabelle 3 und Tabelle 4).

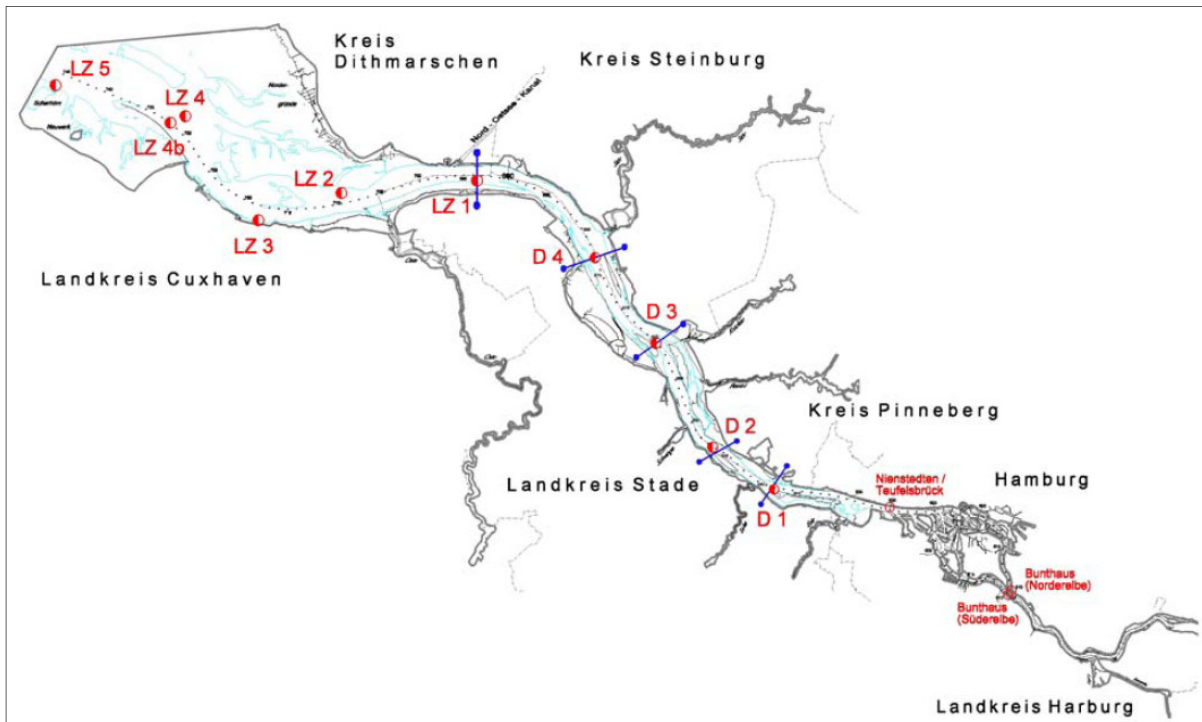


Abbildung 9: Positionen der Dauer- und Langzeitmessstationen der WSÄ, (WSV & HPA, 2007)

Datenübersicht zur BS-Elbe-Datenbank zu <u>Strömungsgeschwindigkeit, Strömungsrichtung und Temperatur</u>			Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5	Szenario 6	Messung
			Mittlere Verhältnisse	Oberwasser- welle	Lagsam abnehmen- des Oberwasser	Extreme Ost- / Südost- Windlage	Sturmflut mit fülliger Windstau- kurve	Sturmflut mit steiler Windstau- kurve	
Pegel	Intervall	Elbe-km	15.07.2006 - 01.08.2006	24.03.2006 - 13.04.2006	13.04.2006 - 27.04.2006	01.01.2008 - 08.01.2008	28.10.2006 - 03.11.2006	14.01.2007 - 21.01.2007	
D1 Hanskalsand	5min	643,0	x / x	x / x	x / x	x / x	x / x	x / x	Oberfläche/ Sohle
D2 Juellssand	5min	653,0	x / x	x / x	x / x	x / x	x / x	x / x	Oberfläche/ Sohle
D3 Pagensand	5min	666,0	x / x	x / x	x / x	x / x	x / x	x / x	Oberfläche/ Sohle
D4 Rhinplatte	5min	677,0	x / x	x / x	x / x	x / x	x / x	x / x	Oberfläche/ Sohle
LZ 1_Krummedeich	5min	693,6	x	x	x	x	x	x	Sohle
LZ2_Tonne	5min	704,0	x	x	x	x	x	x	Sohle
LZ2_Neuenfelder Sand	5min	708,9	x	x	x				Sohle
LZ3_Altenbruch	5min	718,2	x	x	x				Sohle
LZ3a_Altenbruch	5min	718,2				x	x	x	Sohle
LZ4_Spitzsand West	5min	731,1	x	x	x	x	x	x	Sohle
LZ4b_Steinriff2	5min	731,4	x	x	x				Sohle
LZ4b_Tonne_Steinriff2	5min	731,4				x	x	x	Sohle
LZ5_Scharhörn	5min	745,1							Sohle
LZ5_Tonne Scharhörn	5min	745,1	x	x	x	x	x	x	Sohle

D - Messungen: 1,10 m über Sohle / 0,80 m unter dem aktuellen Wasserspiegel (Oberfläche)
 LZ - Messungen: 2,50 m über Sohle

Tabelle 3: Strömungs- und Temperaturdaten für die ausgewählten Szenarien

Datenübersicht zur BS-Elbe-Datenbank zum <u>Salzgehalt</u>				Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5	Szenario 6
				Mittlere Verhältnisse	Oberwasser- welle	Lagsam abnehmen- des Oberwasser	Extreme Ost- / Südost- Windlage	Sturmflut mit fülliger Windstau- kurve	Sturmflut mit steiler Windstau- kurve
Pegel	Zeitraum	Intervall	Elbe-km	15.07.2006 - 01.08.2006	24.03.2006 - 13.04.2006	13.04.2006 - 27.04.2006	01.01.2008 - 08.01.2008	28.10.2006 - 03.11.2006	14.01.2007 - 21.01.2007
LZ 1_Krummedeich	20060101-20071231	5min	693,6	x	x	x	x	x	x
Brunsbüttel Mole 4	20060101-20070717	5min	696,5	x	x	x	x	x	x
LZ2_Tonne	20060101-20071231	5min	704,0	x	x	x	x	x	x
LZ2_Neuenfelder Sand	20060101-20060830	5min	708,9	x	x	x		x	
LZ3_Altenbruch	20060101-20060828	5min	718,2	x	x	x			
LZ3a_Altenbruch	20060921-20071231	5min	718,2				x	x	x
Cuxhaven Alte Liebe	20060101-20070711	5min	724,5	x	x	x	x	x	x
LZ4_Spitzsand West	20060101-20071231	5min	731,1	x	x	x	x	x	x
LZ4b_Steinriff2	20060104-20060802	5min	731,4	x	x	x			
LZ4b_Tonne_Steinriff2	20060802-20071231	5min	731,4				x	x	x
LZ5_Scharhörn	20060101-20071231	5min	745,1	x	x	x	x	x	x

Tabelle 4: Salzgehaltsdaten für die ausgewählten Szenarien

3.2.1 Szenario 1: Mittlere hydrologische Verhältnisse

Das Szenario 1 (15.7. bis 01.08.2006) charakterisiert die „mittleren“ Tideverhältnisse im Elbeästuar. Während des ausgewählten Zeitraums herrschen über der Deutschen Bucht und der Elbmündung nur geringe Windgeschwindigkeiten von zumeist weniger als 3 Bft bis maximal 4 Bft aus überwiegend nordwestlichen bis nordöstlichen Richtungen. An den Küstenpegeln ist dem entsprechend kaum Stau zu verzeichnen. Der Oberwasserabfluss liegt im Mittel bei relativ konstanten $380 \text{ m}^3/\text{s}$ und entspricht damit in etwa dem statistisch häufigsten Abfluss von $350 \text{ m}^3/\text{s}$, der auch typisch für niederschlagsarme Sommermonate ist³. Damit dürften auch das Niveau und die Inklination des Tidemittelwassers (Ruhewasserspiegel) im Ästuar relativ konstant sein und sich die Lage der in Abhängigkeit vom Oberwasserzufluss verschiebenden Brackwasserzone im zentralen Abschnitt der Unterelbe etwa in Höhe von Glückstadt befinden.

Gesteuert durch die „mittleren“ weitestgehend konstanten Randbedingungen liegen auch die Scheitelwasserstände im gesamten Bereich der Tideelbe in der Größenordnung der langjährigen Mittelwerte (zum Vergleich: MThw St. Pauli 2006: PN +7,06 m, MTnw St. Pauli 2006: PN +3,43 m). Lediglich die Periodizität des Spring-Nipp-Zyklus und - in Abbildung 10 besser zu sehen - die halbtägige Ungleichheit variieren das Tidesignal in moderater Weise.

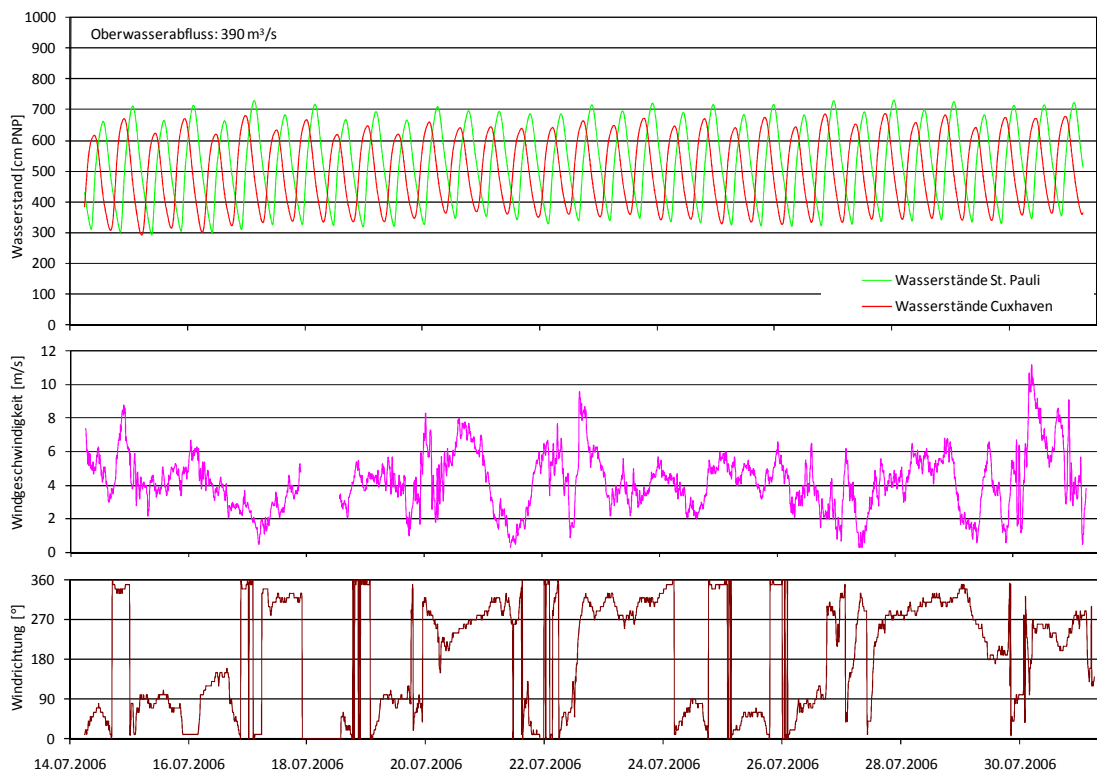


Abbildung 10: Szenario 1 - Wasserstände in Cuxhaven und St. Pauli sowie Windgeschwindigkeit und Windrichtung von Scharhörn

Dieses „Basis“-Szenario zielt in erster Linie auf eine Überprüfung der grundlegenden Eigenschaften der numerischen Modelle ab. Unter anderem sollen die Ergebnisse der Rechenläufe Aufschluss über die Güte der verwendeten Rauigkeitsansätze sowie der eingebauten Modelltopographie geben.

³ Der mittlere Abfluss der Elbe am Pegel Neu Darchau (Jahre 1926 – 2010) liegt bei $708 \text{ m}^3/\text{s}$

3.2.2 Szenario 2: Extremes Oberwasser (ansteigender Ast)

Szenario 2 (24.03. bis 13.04.2006) und Szenario 3 (13.4. bis 27.04.2006) beinhalten die sehr hohe Oberwasserwelle vom März/April 2006. Seinerzeit waren extrem hohe Oberwasserabflüsse von bis zu $3.600 \text{ m}^3/\text{s}$ (14.4.2006, Pegel Neu Darchau) zu verzeichnen, die sehr nah am bisherigen HQ der Elbe ($3.620 \text{ m}^3/\text{s}$ am 31.03.1940) lagen. Szenario 2 beschränkt sich auf den Zeitraum, in dem der Oberwasserzufluss stark zunimmt.

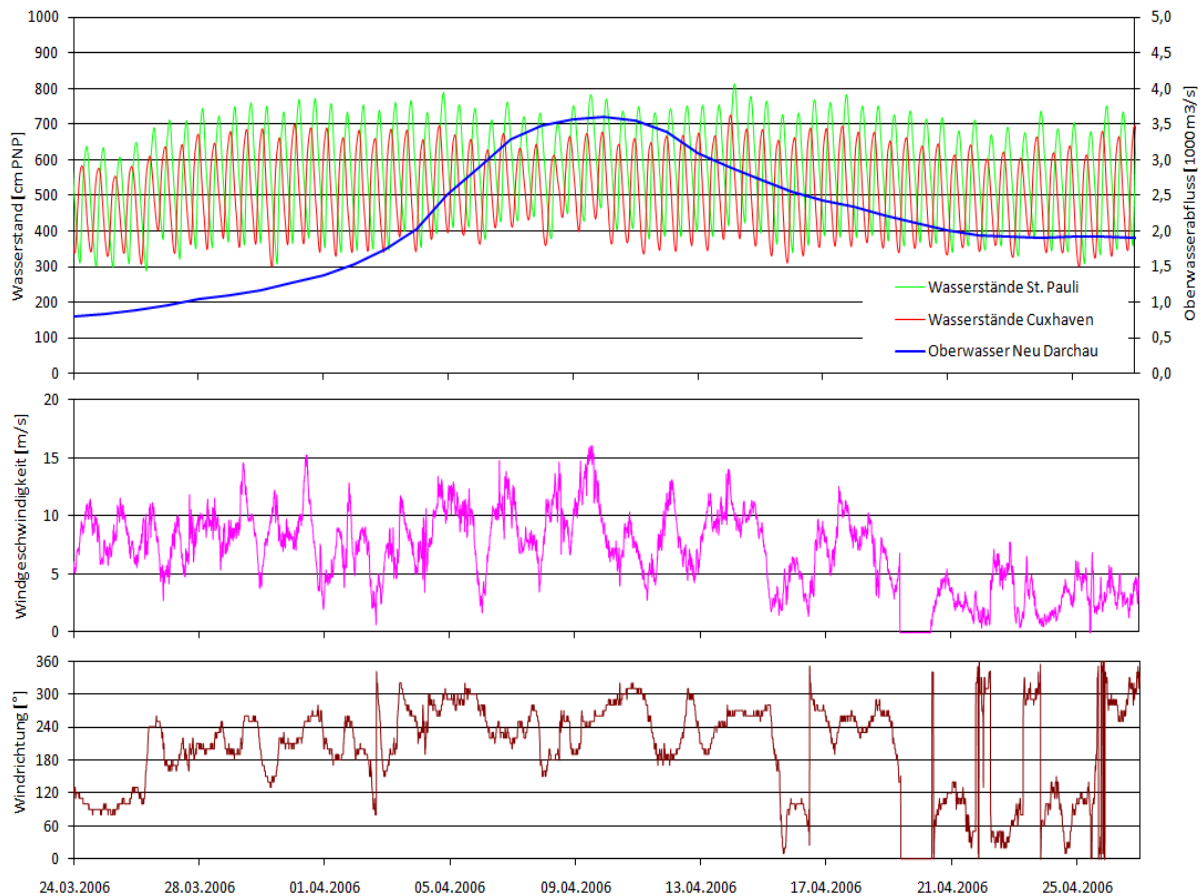


Abbildung 11: Szenario 2 & 3 - Wasserstände in Cuxhaven und St. Pauli, Oberwasserabfluss Neu Darchau sowie Windgeschwindigkeit und Windrichtung von Scharhörn

Durch den zunehmenden Oberwasserzufluss (24.03. bis 13.04.2006) ergibt sich zum einen ein starker Einfluss auf die Lage der Brackwasserzone in der Unterelbe, die während des Anstiegs rasch und – bedingt durch die große Menge des Oberwassers – sehr deutlich nach Unterstrom verschoben wird. Zum anderen ist in der oberen Tideelbe (zwischen Hamburg und dem Wehr Geesthacht), die im Gegensatz zur seeschiffstiefen Unter- und Außenelbe nur vergleichsweise geringe Wassertiefen aufweist (vgl. Abbildung 3), eine deutliche Wirkung des hohen Oberwasserabflusses auf die Tidewasserstände zu verzeichnen.

Unmittelbar unterhalb des Wehres werden die Wasserstände stark vom Oberwasser dominiert, so dass nur ein sehr schwacher Tidehub von wenigen Dezimetern zu verzeichnen ist. Außergewöhnliche Verhältnisse ergeben sich bei Szenario 2 auch in Bezug auf die Strömungsverhältnisse und der Sedimenttransport in der Tideelbe, da die Dynamik des Materialtransportes und des Sedimentationsgeschehens in den Hafenbecken maßgeblich von der Oberwasserführung der Elbe beeinflusst werden.

Bei sehr hohen Abflüssen verstärken sich im Hamburger Elbabschnitt die ebbstromorientierten, d.h. stromab gerichteten Transportvorgänge. Generell ergeben sich somit im inneren Teil der Tideelbe (vom Wehr Geesthacht bis etwa Glückstadt) durch die oberwasserbedingt veränderten Strömungsverhältnisse (z.B. Abnahme der Flut- sowie Zunahme der Ebbestromdauer) deutliche Auswirkungen auf den advektiven Transport gelöster bzw. suspendierter Stoffe sowie auf die Temperatur- und Sauerstoffverhältnisse.

Während des gesamten Zeitraumes von Szenario 2 und 3, der sich über vier Wochen erstreckt, ist der Wind über der Deutschen Bucht konstant und nimmt keinen starken Einfluss auf die Wasserständen unterhalb von Hamburg.

Insofern stehen bei diesen Szenarien im Hinblick auf die Validierung der numerischen Modelle die naturnahe Wiedergabe der außergewöhnlichen Salzgehaltszonierung in der Unterelbe sowie die korrekte Simulation der oberwasserbedingt stark erhöhten Wasserstände in der oberen Tideelbe (sowie in der Mittelbe oberhalb des Wehrs Geesthacht) im Mittelpunkt. Von besonderem Interesse sind dabei die Wiedergabe des sich durch den hohen Oberwasserabfluss einstellenden Wasserspiegelgefälles im oberen Abschnitt des Ästuars und damit die naturgetreue Simulation des Transports der in die Tideelbe eingeflossenen Oberwassermenge nach Unterstrom. Insofern kommt einer möglichst exakten Modellsimulation der in Kap. 2.4.4 skizzierten komplexen Mechanismen der Durchflusssteuerung des Wehres Geesthacht eine besondere Bedeutung zu.

3.2.3 Szenario 3: Extremes Oberwasser (abfallender Ast)

Die langsame Abnahme der großen Oberwassermenge ist in Szenario 3 (13.4. bis 27.04.2006) enthalten. Hinsichtlich der außergewöhnlichen Ausprägung maßgeblicher hydrodynamischer Parameter gilt im Wesentlichen das bereits oben zu Szenario 2 Ausgeführte, allerdings mit dem Unterschied, dass die in Szenario 2 nach Unterstrom verschobene Brackwasserzone langsamer wieder nach Oberstrom vorrückt, als sie beim Anstieg der Oberwasserwelle nach Unterstrom verschoben wurde. Die advektiven Transportvorgänge in der Tideelbe nähern sich also nur allmählich wieder einem „mittleren“ Zustand an.

Auch hinsichtlich der oberwasserbedingt deutlich erhöhten Wasserstände in der oberen Tideelbe gelten grundsätzlich die Ausführungen zu Szenario 2. Es soll an dieser Stelle aber darauf hingewiesen werden, dass es durch detaillierte Auswertungen der Wasserstandsverhältnisse in der oberen Tideelbe durch die HPA Hinweise darauf gibt, dass bei abnehmendem Oberwasserzufluss die Wasserstände zwischen Bunthaus und Geesthacht schneller wieder fallen, als sie bei dem Anstieg – bei ansonsten gleichen Oberwassermengen und sonstigen externen Randbedingungen gestiegen sind. Insofern unterliegen die oberwassergeprägten Wasserstandsverhältnisse in der oberen Tideelbe einem hysteretischen Systemverhalten, für das es bisher aber noch keine phänomenologische Erklärung gibt.

Vor diesem Hintergrund stehen bei diesen Szenarien im Hinblick auf die Validierung der numerischen Modelle die naturnahe Wiedergabe der außergewöhnlichen Salzgehaltszonierung in der Unterelbe sowie die korrekte Simulation der oberwasserbedingt stark erhöhten Wasserstände in der oberen Tideelbe (sowie in der Mittelbe oberhalb des Wehrs Geesthacht) im Mittelpunkt des Interesses.

3.2.4 Szenario 4: „Sturmebbe“

Bei Szenario 4 (01.01. bis 08.01.2008) weht der Wind beständig und teilweise kräftig aus östlicher bis südöstlicher Richtung. Diese Bedingungen, die insbesondere während der Wintersaison bei stabilen Hochdrucklagen über Osteuropa und abgeschwächter Westdrift anzutreffen sind (vgl. Abb. 12), führen zu einer Absenkung des mittleren Meeresspiegels in der Deutschen Bucht um mehrere Dezimeter. Diese Absenkung des Tmw setzt sich auch ins Tideelbeästuar fort, so dass sowohl das Tidehoch als auch das Tideniedrigwasser um mehrere Dezimeter niedriger eintreten als normalerweise üblich.

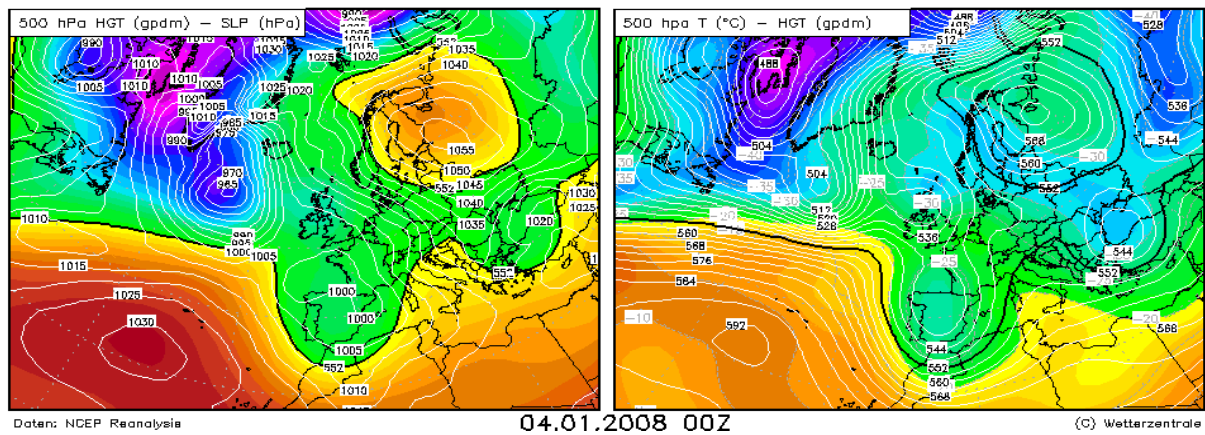


Abbildung 12: Großwetterlage mit ausgeprägtem Hoch über Osteuropa während des Szenarios 4

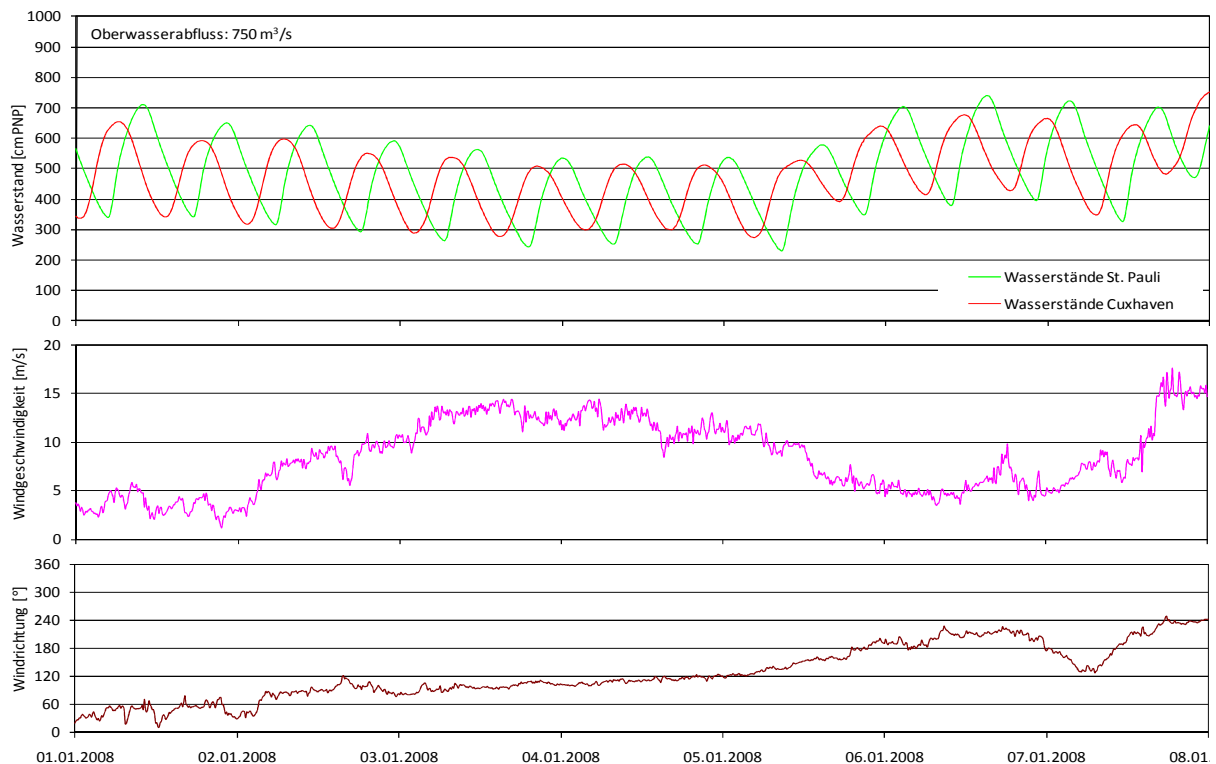


Abbildung 13: Szenario 4 - Wasserstände in Cuxhaven und St. Pauli sowie Wind in Scharhörn

Diese Mindertidenverhältnisse führen zu Einschränkungen bei der wassertiefenabhängigen Seeschiffahrt vom und zum Hamburger Hafen. Eine möglichst präzise und langfristige Vorhersage solcher Ereignisse und die daraus resultierenden Tideniedrigwasserwerte im Elberegion sind vor diesem Hintergrund eine essentielle Herausforderung für den operationellen Betrieb der numerischen Modelle.

3.2.5 Szenario 5: Sturmflut mit fülliger Staukurve

Die beiden gewählten Sturmflutszenarien unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich der Scheitelhöhe, sondern vor allem im Hinblick auf die Form der Staukurve in Cuxhaven. Das Szenario 5 wird durch die Sturmflut vom 01.11.2006 (sog. „Allerheiligenflut“) abgebildet. Bereits in den Tagen vor der Sturmflut weht der Wind kräftig aus west- bis nordwestlichen Richtungen und erzeugt so ein deutlich erhöhtes Wasserspiegelniveau in der Deutschen Bucht wie auch in der Tideelbe (vgl. Abbildung 14).

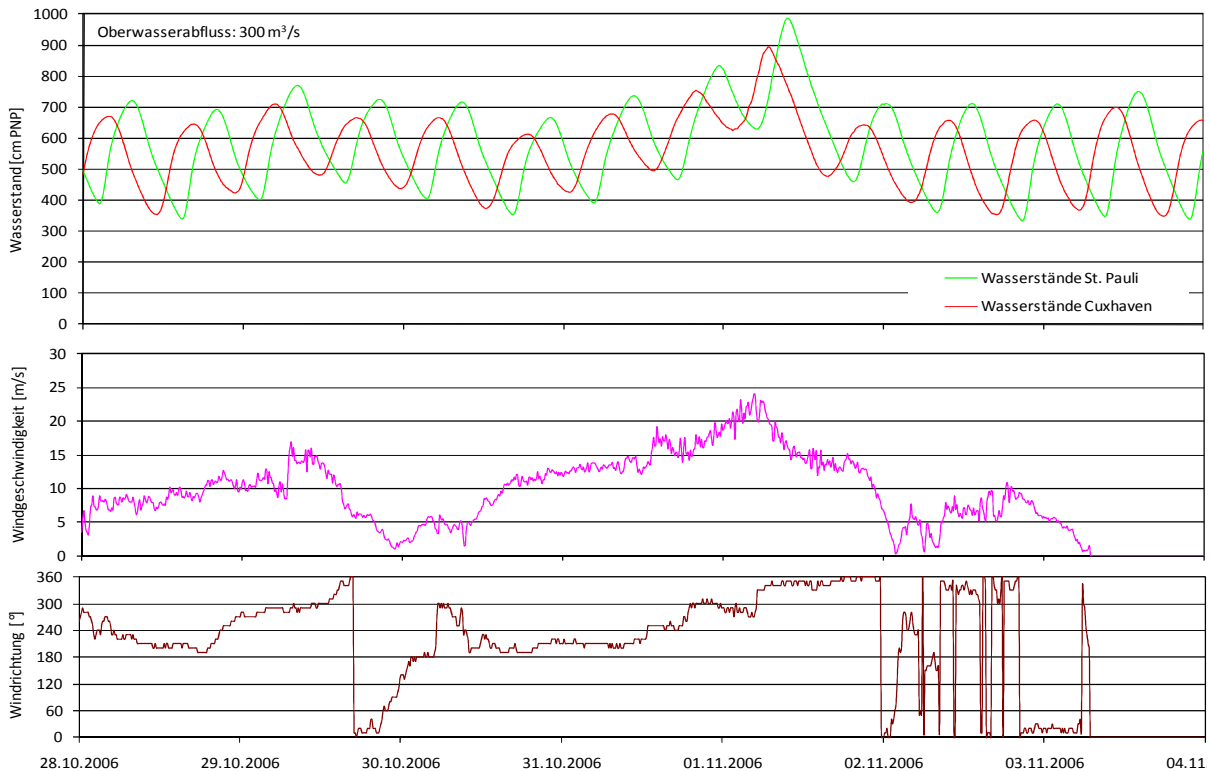
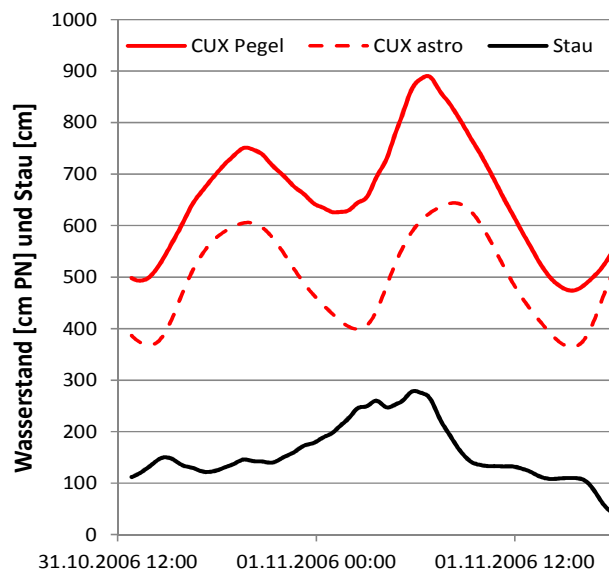


Abbildung 14: Szenario 5 - Wasserstände der Sturmflut Nr. 252 in Cuxhaven und St. Pauli; Wind in Scharhörn

In Cuxhaven bildet sich zum astronomischen Tnw ein erster Stau-Peak aus („Niedrigwassereffekt“), ein weiterer wird etwa drei Stunden nach astr. Tnw erreicht und bildet mit rd. 300 cm Höhe den insgesamt „fülligen“ Stau-Scheitel. Der Sturmflutscheitel am Pegel Cuxhaven tritt mit PN + 8,92 m etwa zwei Stunden früher ein als das vorausberechnete astronomische Thw (vgl. Abbildung 15).

Der so deutlich verfrühte Eintritt kann nicht nur durch die Phasenverschiebung erklärt werden, die aus der Geschwindigkeitszunahme der Tidewelle ggü. der für mittlere Wassertiefenverhältnisse vorausberechneten astronomischen Tide resultiert. Hinzu kommt auch, dass der Wind noch vor Erreichen des astronomischen Scheitels schlagartig auf die weniger stauwirksame Richtung Nord abdreht und kurz danach auch stark abschwächt, so dass der windgenerierte Stau ohne den benötigten Antrieb zwangsläufig „kollabieren“ muss.

Abbildung 15: Füllige Staukurve bei der Sturmflut-Nr.252 vom 01.11.2006



3.2.6 Szenario 6: Sturmflut mit steiler Staukurve

Das Szenario 6 beinhaltet die Sturmflut vom 18.01.2007 (Nr. 255 „Hamburger Sturmflutverzeichnis“). Sie wurde ausgelöst durch den Orkan „Kyrill“ und ist gekennzeichnet durch eine sehr plötzliche und starke Windentwicklung über der Deutschen Bucht, die eine steile und spitzgipflige Staukurve ausbildet. Der Wind weht im Vorfeld der Flut kontinuierlich aus südwestlicher Richtung bis er dann abrupt auf eine nordwestliche Richtung dreht und innerhalb kürzester Zeit um 10 m/s auf bis zu 25 m/s ansteigt und dabei zwei aufeinanderfolgende Windspitzen ausbildet (siehe Abbildung 16). Die plötzliche starke Windzunahme und -drehung führt zu einem rapiden und steilen Anstieg des Staus, der ungefähr zum Zeitpunkt des astronomischen Tnw in Cuxhaven einen Scheitel von rund 350 cm aufweist.

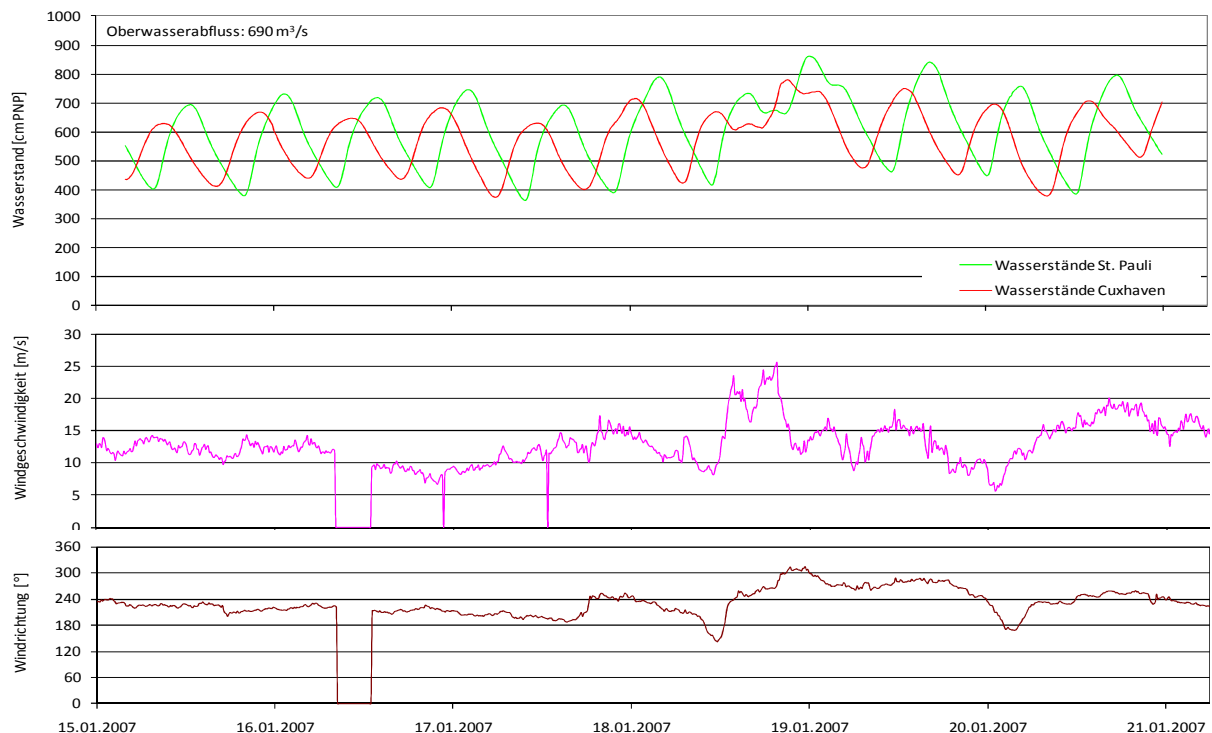


Abbildung 16: Szenario 6 - Wasserstände der Sturmflut Nr. 255 in Cuxhaven und St. Pauli, Wind in Scharhörn

Unmittelbar nach astr. Tnw nimmt der Wind schlagartig wieder ab, der Windstau kollabiert infolgedessen; zum Zeitpunkt des astr. Thw in Cuxhaven liegt er unter 100 cm (Abbildung 17). Im Ergebnis ergibt sich am Pegel Cuxhaven eine stark verformte Tidekurve mit einem sehr hohen „doppelten“ Tideniedrigwasser. Die Sturmflutsscheitel selbst erreichen allerdings weder in Cuxhaven noch in Hamburg besonders hohe Werte (PN +8,60 m am Pegel St. Pauli).

Beide Sturmfluten weisen also deutlich unterschiedliche Charakteristiken der Stauentwicklung auf und stellen damit die Herausforderung an die numerischen Modelle dar, den lokalen Windeinfluss auf die Entwicklung der Wasserstände bei Sturmfluten möglichst naturnah wiederzugeben.

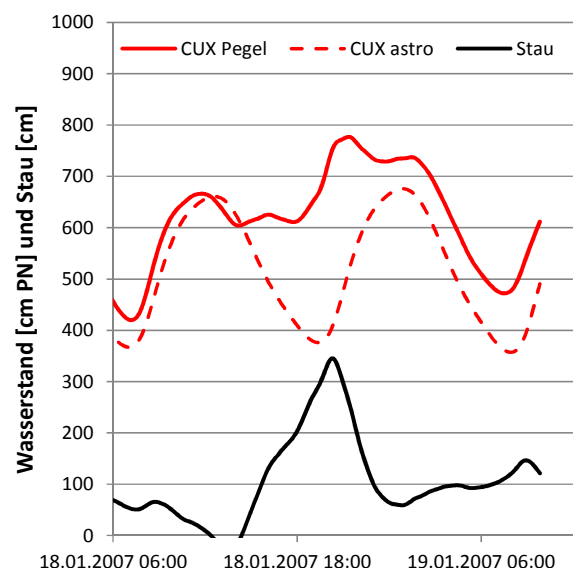


Abbildung 17: Steile Staukurve bei der Sturmflut-Nr.255 vom 18.01.2007

4 Empirische Untersuchungen im Teilprojekt OPTEL-D

4.1 Zielsetzung

Ziel des Teilprojekts OPTEL-D ist die empirische Untersuchung der Stauentwicklung in der Tideelbe von Cuxhaven nach Hamburg bei Sturmfluten sowie die Identifizierung und Quantifizierung der diese maßgeblich beeinflussenden Parameter. Zuletzt wurde von (BREMER, 2008) auf die große Streuung der Stau-Übertragung von Cuxhaven nach Hamburg hingewiesen, die zu einer beträchtlichen Unsicherheit bei der empirischen Sturmflutvorhersage für Hamburg führt.

Die Untersuchungen in OPTEL-D zielen daher letztlich auf eine konkrete Verbesserung der Güte der Sturmflutvorhersagen ab. Der Fokus richtet sich insofern primär auf die Betrachtung des Hochwasserscheitels, zumal sich nur aus ihm unmittelbar der Grad der Gefährdung von Hochwasserschutzanlagen und damit gegebenenfalls von Menschenleben ableitet. Hinzu kommt, dass die umfassenden Auswertungen von (BREMER, 2008) zur Übertragung des gesamten Verlaufs der Staukurve von Cuxhaven nach Hamburg zeigten, dass sich die Verhältnisse zwar qualitativ beschreiben lassen, sich ein statistisch gesicherter mathematisch darstellbarer Zusammenhang zwischen den betrachteten Parametern allerdings nicht ermitteln lässt.

Im Hinblick auf die in OPTEL angestrebte statistisch gesicherte Verbesserung der empirischen Sturmflutvorhersage für Hamburg, ist eine vorweglaufende 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 Problemlösungen abzuleiten.

4.2 Empirische Ansätze zur Übertragung von Sturmflutscheiteln ins Ästuar

4.2.1 Methodik

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(III)-Verfahren verwendeten Ansatz zwei weitere empirische Verfahren zur Übertragung von Sturmflutscheiteln 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 (III)-Verfahren des Hamburger Sturmflutwarndienstes zu gewährleisten wurden in diesen Verfahren zunächst nur die Hochwasser-Scheitelwerte einer Sturmflut berücksichtigt und eine direkte Übertragung vom Küstenpegel Cuxhaven auf den Pegel St. Pauli betrachtet.

Auf Basis der Ergebnisse werden die Verfahren miteinander verglichen, ihre Stärken und Schwächen analysiert und Überlegungen angestellt, wie sich ihre Güte unter Berücksichtigung vorhandener zusätzlicher Einflussgrößen verbessern lässt. Diese Vorgehensweise wurde auch deshalb gewählt, um den Kenntnisszuwachs aus den folgenden Untersuchungen mit einer möglichst effektiven Verwertbarkeit in das Vorhersageverfahren des Hamburger Sturmflutwarndienstes einfließen zu lassen. Für die Einsatzleiter im Sturmflutwarndienst ist es wichtig zu wissen, mit welchen möglichen Abweichungen in den Ergebnissen gerechnet werden muss und welche Randbedingungen möglicherweise zu größeren Streuungen führen können. Deshalb wird neben dem Vergleich der Standardfehler auch die maximale Abweichung zwischen Prognose und Beobachtung betrachtet.

4.2.2 Grundzüge empirisch-statistischer Verfahren

Ein empirisch-statistisches Verfahren basiert auf der Adaption einer empirischen Formel an realistische Verhältnisse auf der Basis einer großen Datengrundlage von gemessenen Ereignissen. Daraus werden Annahmen zur physikalischen Beziehung zwischen unterschiedlichen, z.B. meteorologischen und hydrologischen Parametern abgeleitet. Die Zielgröße hier der Stau kann schließlich mittels einer einfachen linearen oder auch multiplen Regression (siehe (MÜLLER-NAVARRA & GIESE, 1999)) in Beziehung zu verschiedenen Eingangsparameter gesetzt werden, so dass ein lineares Modell berechnet werden kann.

Über den Grad des linearen Zusammenhangs der verwendeten Parameter gibt der Korrelationskoeffizient Auskunft. Er ist allerdings kein Indiz für einen kausalen Zusammenhang zwischen den beiden Merkmalen und kann schon gar kein Indiz über die Richtung eines Zusammenhanges sein. Er kann Werte zwischen -1 und $+1$ annehmen. Bei einem Wert von $+1$ (bzw. -1) besteht ein vollständig positiver (bzw. negativer) linearer statistischer Zusammenhang zwischen den betrachteten Merkmalen.

Das Quadrat des Korrelationskoeffizienten r^2 nennt man Bestimmtheitsmaß. Es gibt in erster Näherung an, wie viel Prozent der Varianz, d. h. Streuung, der einen Variable durch die Streuung der anderen Variable erklärt werden können und wird häufig mit dem Korrelationskoeffizienten verwechselt.

Um Aussagen über die Güte des statistischen Zusammenhangs auf Basis der Korrelationswerte treffen zu können, muss die Voraussetzung erfüllt sein, dass beide Variablen normalverteilt sind. Wenn der Korrelationskoeffizient den Wert 0 aufweist, hängen die beiden Merkmale überhaupt nicht linear voneinander ab. Allerdings können diese ungeachtet dessen in nicht-linearer Weise voneinander abhängen. Damit ist der Korrelationskoeffizient kein geeignetes Maß für die rein stochastische Abhängigkeit von Merkmalen.

Für einen besseren qualitativen Vergleich der verschiedenen Verfahren und zur Bewertung des vorhandenen Verbesserungspotentials durch die Berücksichtigung weiterer Einflussgrößen, wird als Maßstab der Standardfehler angegeben. Er ist gleichbedeutend mit der Standardabweichung der Parameter von der Regressionsfunktion und wird gebildet aus der Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung des geschätzten Parameterwertes vom wahren Parameterwert. Der Standardfehler liefert damit eine Aussage über die Güte des geschätzten Parameters und macht die gemessene Streuung (Standardabweichung) zweier Datensätze mit unterschiedlichem Stichprobenumfang vergleichbar, indem er die Standardabweichung auf den Stichprobenumfang normiert.

Vorteilhaft an dieser Art Verfahren ist, dass für die Modellerstellung im Prinzip keine physikalischen Gesetzmäßigkeiten zur Beschreibung einer Abhängigkeit zwischen zwei physikalischen Größen berücksichtigt werden müssen. Gleichwohl sollten die Zusammenhänge zumindest qualitativ soweit bekannt sein und bei der Konzeption des Modells Berücksichtigung finden, dass auch eine sinnvolle Korrelation durchgeführt werden kann.

Der Nachteil empirisch statistischer Verfahren besteht allerdings grundsätzlich darin, dass die berechneten Ergebnisse nicht auf Extrembedingungen, die außerhalb der Grenzen des für die Modellerstellung verwendeten Datenumfanges liegen, extrapoliert werden dürfen. Insbesondere, wenn in dem Modell nicht-lineare Funktionen Anwendung finden, ist nicht sicher wie sich diese außerhalb der Grenzen der zugrundeliegenden Datenbasis verhalten.

4.2.3 Ansatz im WADI(3)-Verfahren

Als Maßstab für alle weiteren untersuchten Ansätze wurde das bereits erwähnte WADI (III)-Verfahren des Hamburger Sturmflutwarndienstes auf das erweiterte Hamburger Sturmflutkollektiv (rd. 150 Datensätze seit 1980; vgl. Kap. 3.1) angewendet. Die Güte der WADI-Vorhersagen wird seit Einführung des Verfahrens durch Bildung der Differenz zwischen den für Hamburg-St. Pauli berechneten und gemessenen Hochwasserscheiteln evaluiert. Eine maximale Abweichung von ± 20 cm hat sich der WADI selbst als Zielvorgabe verordnet. Dieser Toleranzbereich wird somit auch in den Untersuchungen mit alternativen Ansätzen als Maßstab angelegt.

Der im Wadi-Verfahren zur Übertragung der Scheitelhöhen von Cuxhaven nach St. Pauli verwendete Ansatz besteht in einer linearen Superpositionierung verschiedener Variablen, die aus der aktuellen Windentwicklung in Scharhörn, dem Windstauanstieg am Pegel Borkum, dem Oberwasserabfluss am Pegel Neu Darchau und dem (für diese Nachrechnung eingetretenen) Tidehochwasser am Pegel Cuxhaven resultieren (vgl. Schema in Abbildung 18).

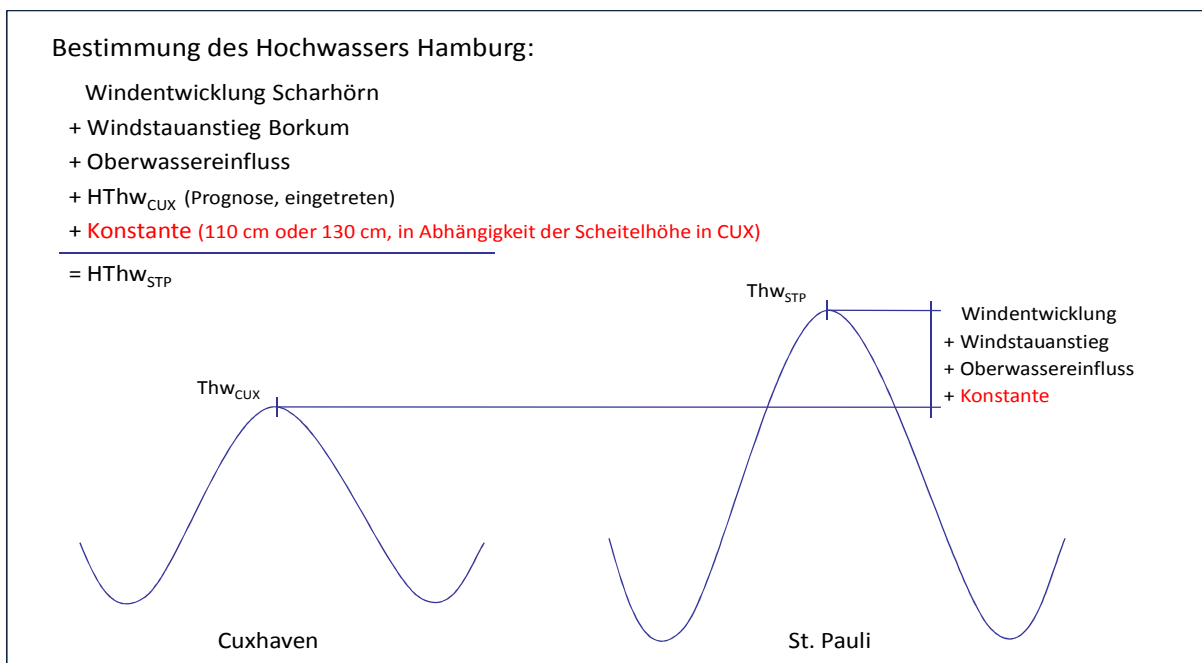


Abbildung 18: Schematische Darstellung zur Berechnung des Tidehochwassers bei Sturmflut in Hamburg nach dem WADI-Verfahren

Die dabei berücksichtigten Terme Windstauanstieg in Borkum und Windentwicklung in Scharhörn werden von (SIEFERT, W. & CHRISTIANSEN, H., 1983) S. 63) als „Impulsgröße“ beschrieben, die die „Wechselwirkungen zwischen Tide- und Windstauwellen auf dem Weg von Borkum nach Hamburg“ repräsentieren sollen. Diese Formulierung umschreibt die Vorstellung, dass durch einen (weiteren) Stauanstieg in Borkum und/oder eine Windzunahme in der inneren Deutschen Bucht im Rechenverfahren indiziert wird, dass es zu einer zusätzlichen Verformung der Staukurve in Cuxhaven kommen kann, die aus einer zweiten Stauwelle (u.U. nach Eintritt des Hochwasserscheitels in Cuxhaven) oder möglicherweise auch aus einer Fernwelle resultieren kann.

Der Oberwasserabfluss wird im WADI-Vorhersageverfahren nach (SIEFERT, W., 1968) als Mittelwert der letzten 6 Tage angesetzt. Eine Veränderung des Abflusses am Pegel Neu Darchau von $100 \text{ m}^3/\text{s}$ führt dabei zu einer Veränderung des Hochwasserscheitels in Hamburg-St. Pauli um 1 cm.

Die zur Berechnung des Hochwasserscheitels in Hamburg herangezogene „Konstante“ beschreibt die mittlere Erhöhung einer Sturmflut zwischen Cuxhaven und Hamburg. Bis Ende 1993 lag diese Konstante im WADI-Vorhersageverfahren bei 110 cm. Durch eine Überprüfung der zeitlichen Entwicklung der Scheitelhöhendifferenzen zwischen Cuxhaven und Hamburg wurde jedoch gezeigt, dass neben einer generellen Erhöhung auch eine Veränderung dahingehend zu verzeichnen war, dass höhere Sturmfluten auch mit einer überdurchschnittlich hohen Scheiteldifferenz Cuxhaven – St. Pauli eintreten. Diese Erkenntnis führte Anfang 1994 zur seither bestehenden Aufteilung der „Konstante“: Für Sturmfluten mit einer (prognostizierten oder eingetretenen) Scheitelhöhe von > 850 cm über PN in Cuxhaven beträgt die Konstante 130 cm, für alle anderen 110 cm.

Abbildung 19 veranschaulicht den grundsätzlich vorhandenen Zusammenhang zwischen dem HThw einer Sturmflut in Cuxhaven und der zunehmenden Differenz zwischen den Hochwasserscheiteln in Hamburg und Cuxhaven und bildet darin auch den Gültigkeitsbereich der beiden „Konstanten“ ab.

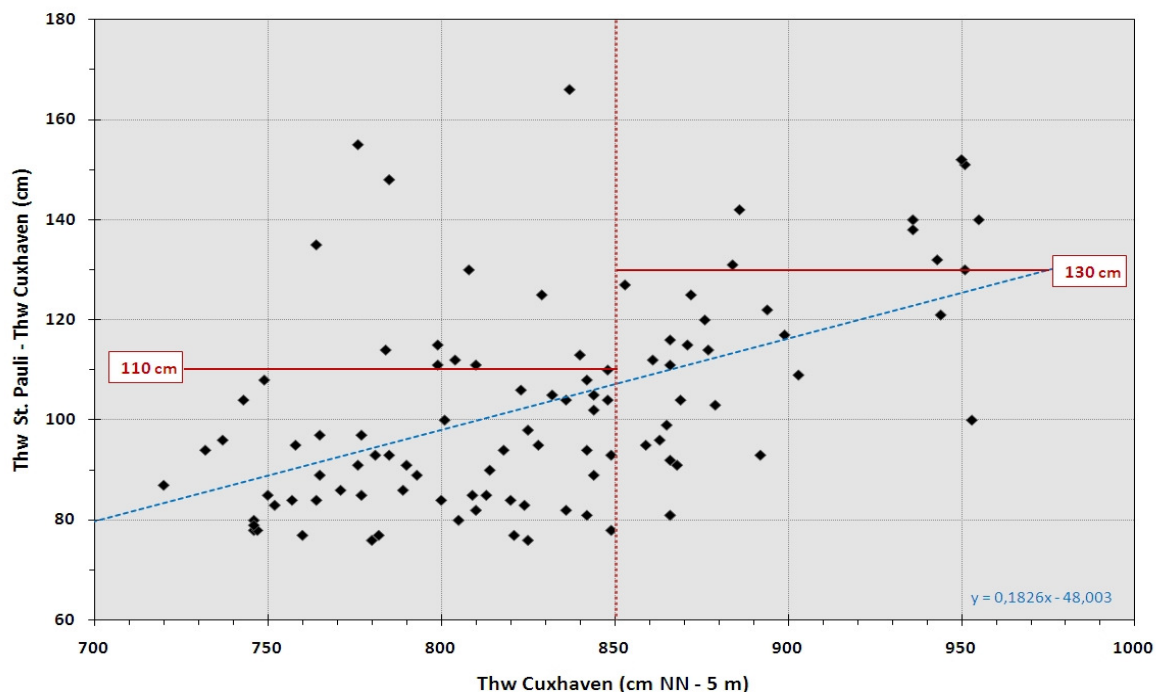


Abbildung 19: Abhängigkeit der Scheitelhöhendifferenz St. Pauli – Cuxhaven von der Scheitelhöhe in Cuxhaven für Sturmfluten ab 1980 (einschl. pauschalisierte Ansätze im WADI-Verfahren)

Augenfällig ist in dieser Auftragung vor allem auch die sehr große Streuung der Scheiteldifferenzen, wobei dies noch kein Qualitätsmerkmal für das WADI-Verfahren darstellen kann, da die übrigen Anteile (vgl. Abbildung 18), die im WADI-Verfahren ihren Beitrag zum Vorhersagewert für St. Pauli liefern, bei dieser Gegenüberstellung nicht enthalten sind.

Die größte Scheiteldifferenz zwischen Hamburg und Cuxhaven beträgt 166 cm; sie trat aber bei einer nicht besonders hohen Sturmflut (< 8,40 m PN in Cuxhaven) auf. Andererseits war z.B. bei der sehr hohen Sturmflut vom 27.2.1990 (PN +9,53 m PN am Pegel Cuxhaven) gerade einmal eine Höhendifferenz von 100 cm zu verzeichnen. Die große Streuung der Scheitelhöhendifferenzen verdeutlichen, dass der derzeitige, vereinfachte Ansatz im WADI-Verfahren zur Sturmflutentwicklung in der Elbe den komplexen Verhältnissen in der Natur offenbar nur unzureichend gerecht wird. Die Notwendigkeit einer eingehenden Analyse des Sturmflutverlaufs in der Untereibe wird insofern offensichtlich.

4.2.4 Konzept und Modellbildung mit dem Stieg-Ansatz

Die Modellbildung für den Stieg-Ansatz wurde von der Vorstellung geleitet, dass die resultierende Scheitelhöhe der Sturmflutwelle in Hamburg weniger durch das absolute Hochwasser in Cuxhaven (vgl. WADI-Ansatz), als vielmehr durch den Impuls gesteuert wird, der Energie auf die im Ästuar mit-schwingenden Wassermassen überträgt, die wiederum durch die Eigenwerte des Ästuars stromauf transformiert wird. Der Impuls -gemeinhin auch als Momentum bezeichnet- wird physikalisch als Produkt aus Masse und Geschwindigkeit definiert. Der Impulseintrag soll bei diesem Gedankenmodell in Ermangelung der Parameter Masse und Geschwindigkeit vereinfacht durch die am Mündungstrichter auflaufende potentielle Energie der Tidewelle abgebildet werden, die sich theoretisch proportional zum Quadrat des Tidehubs ergibt. Da der konkrete Tidehub einer Sturmflutwelle aufgrund des zum Vorhersagezeitpunkt nicht absehbaren nachfolgenden Tideniedrigwassers noch nicht bekannt ist, wird der Tidehub für diesen Zweck vereinfachend durch den Tidenstieg parametrisiert.

Als Tidenstieg wird die Differenz zwischen der lokalen Sturmflutscheitelhöhe und dem vorausgegangenen Tideniedrigwasser definiert (s. Abbildung 20). In dem zugrundegelegten linearen Modellansatz wird davon ausgegangen, dass sich der Tidenstieg in St. Pauli proportional zum Tidenstieg in Cuxhaven darstellen lässt. Die resultierende absolute Sturmflutscheitelhöhe am Pegel St. Pauli ergibt sich durch einfache Addition mit dem vorausgegangenen lokalen Tideniedrigwasser. Weitere Einflussgrößen auf die Veränderung des Tidenstiegs zwischen Cuxhaven und St. Pauli, wie das Oberwasser, können diese einfache Beziehung überlagern.

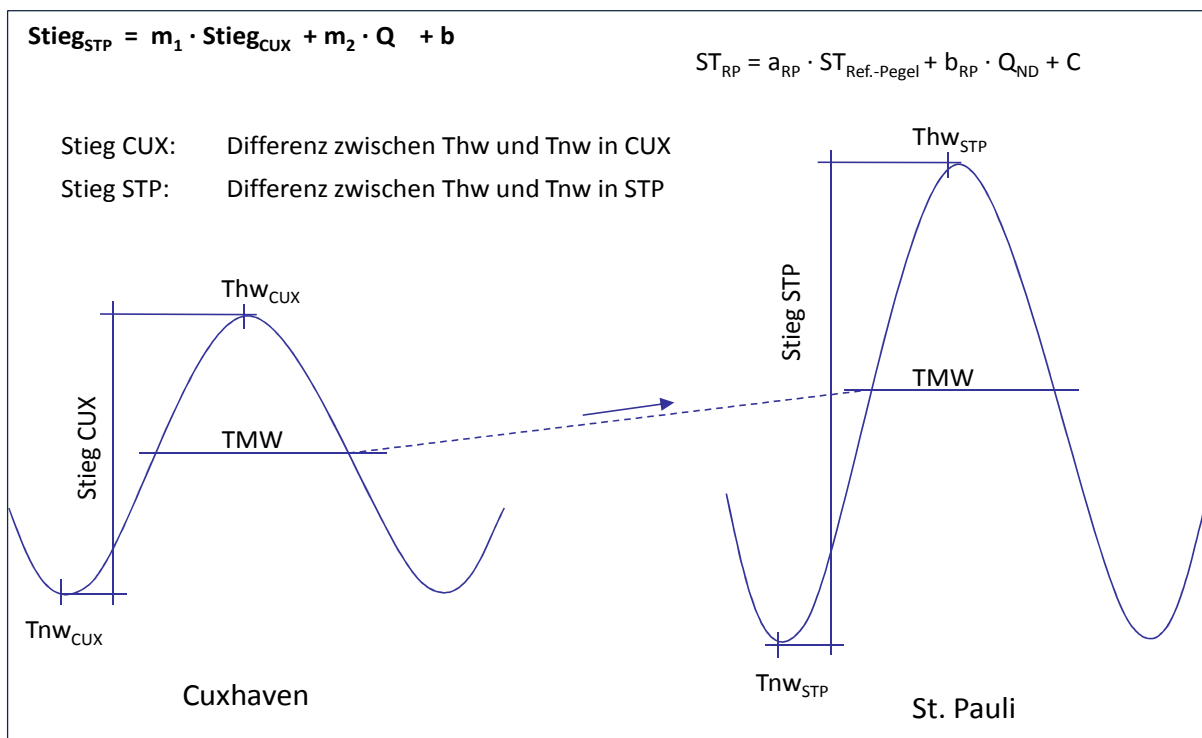


Abbildung 20: Definition des Stiegs als Differenz zwischen HThw und vorausgegangenen Tnw

Zur Lösung des vollständigen in Abbildung 20 angegeben linearen Modells und Bestimmung seiner Koeffizienten m_1 , m_2 und b ist die Anwendung einer multiplen Regressionsanalyse notwendig. Hier wird zunächst nur der Einfluss des Stiegs in Cuxhaven berücksichtigt, der durch eine einfache lineare Korrelation charakterisiert werden kann. Auch ein nicht-linearer Zusammenhang unter Verwendung der Potenzfunktion wurde untersucht, lieferte aber keine bessere Korrelation.

In Abbildung 21 (links) sind zunächst die gemäß der zuvor getroffenen Definition ermittelten Stieg-Parameter der Stationen Cuxhaven und St. Pauli gegeneinander aufgetragen. Die Regressionskoeffizienten und Standardfehler der Modelle sind sowohl für die lineare als auch die nicht-lineare Korrelation angegeben.

Im rechten Teil von Abbildung 21 ist als Test des linearen Modells zur Beschreibung des statistischen Zusammenhangs zwischen dem Stieg in Cuxhaven und St. Pauli das beobachtete Hochwasser in St. Pauli dem aus der Modellprognose für den Stieg abgeleiteten $HThw_{StP}^{(CALC)} = Tnw_{StP} + Stieg_{StP}^{(CALC)}$ gegenübergestellt. Der ermittelte Standardfehler von 25,79 cm ist durch die obere und untere rote Linie gekennzeichnet und erlaubt so eine objektivere Einordnung des Rechenwertes zur visuell wahrgenommenen Streuung. Das eingebettete Histogramm gibt einen Eindruck über die Verteilung der Fehler und deckt hier einen Bereich von ± 90 cm in 10 cm breiten Klassen ab.

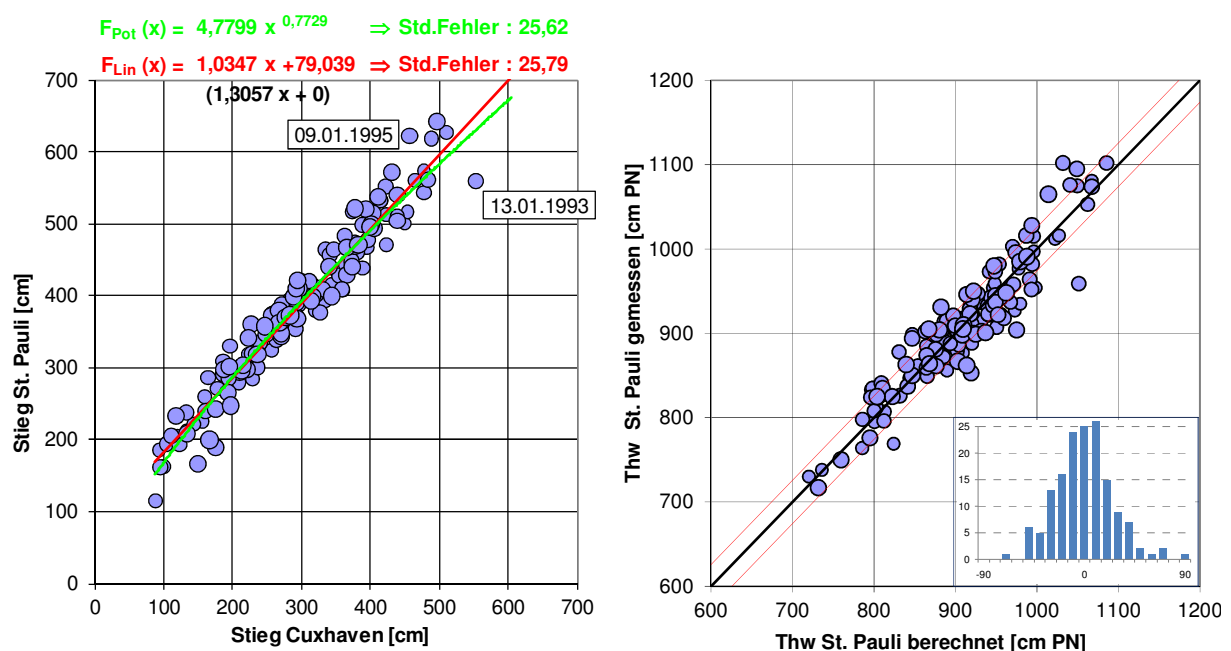


Abbildung 21: Korrelation des Stiegs in St. Pauli mit dem Stieg in Cuxhaven (links) und qualitativer Vergleich von berechneten und eingetreten HThw-Scheiteln in St. Pauli (rechts)

Das Ergebnis zeigt den vorhandenen linearen Zusammenhang zwischen dem Stieg in Cuxhaven und Hamburg-St. Pauli mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,9433 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 ($m_1=1,035$). Stattdessen ist der mittlere Zuwachs des Stiegs in St. Pauli mit 83 bis maximal 99 cm bezogen auf die Unter- und Obergrenze der Datengrundlage quasi unabhängig von der Größe des Stiegs in Cuxhaven eher als konstant zu bezeichnen.

Der ermittelte Standardfehler liegt mit knapp 26 cm deutlich jenseits der zum Ziel gesetzten 20 cm. Die maximale Abweichung beträgt 92 cm bei der Flut vom 13./14.01.1993 und hätte mit der Prognose eines Hochwasserscheitels von PN +1051 cm zu einer deutlichen Überschätzung des tatsächlich eingetreten Hochwassers von ÜN + 959 cm geführt. Die maximale Unterschätzung hätte bei der Sturmflut vom 09./10.01.1995 immerhin noch 70 cm betragen. Statt der eingetretenen PN +1102 cm hätte das Modell nur einen Wert von PN +1032 cm prognostiziert.

Dabei ist es nur bedingt tröstlich, dass aus dem Stichprobenumfang von insgesamt 153 Wertepaaren diese beiden Ereignisse die einzigen extremen Ausreißer sind und ansonsten immerhin für 70 % aller Ereignisse Abweichungen resultieren, die kleiner als der Standardfehler von 26 cm ausfallen (vgl. Histogramm im rechten Teil von Abbildung 21). Für eine Sturmflutvorhersage sind diese Ausreißer in keiner der beiden Richtungen akzeptabel, wenn man die Folgen bedenkt, die einerseits durch eine nicht ausgelöste Warnung, andererseits aber auch nach einer Fehlalarmierung in den vermeidbaren Kosten bestehen, die von den eingeleiteten Katastrophenschutzmaßnahmen und den erforderlichen Unterbrechungen des Umschlags im Hafen verursacht werden. Den möglichen Ursachen für solche Ausreißer wird daher in Kap.4.4 durch eine differenziertere Einzelbetrachtung der bei diesen Sturmfluten gegebenenfalls vorhandenen besonderen Randbedingungen nachgegangen, mit dem Ziel diese so zu parametrisieren, dass sie in die Modelle integriert werden können.

4.2.5 Konzept und Modellbildung mit dem Stau-Ansatz

Die Modellbildung für den Stau-Ansatz wird von der Vorstellung geleitet, dass der am Pegel Cuxhaven produzierte Stau sich auch ins Ästuar fortpflanzt und dabei in funktionaler Beziehung zum Ausgangswert steht. Auch hinter diesem Modell steckt somit die Annahme, dass der Stau als eine hydrodynamische Größe, d.h. eine mit der Zeit veränderliche Größe, durch die Eigenwerte des Ästuars ähnlich wie die Tidewelle eine Transformation erfährt. Auf die limitierenden Aspekte in diesem Modellkonzept, die unter bestimmten Randbedingungen zu einer Nicht-Kausalität zwischen der unabhängigen und abhängigen Variablen führen, wird in Kapitel 4.6 noch ausführlich eingegangen.

Dieser Ansatz wurde von (NIEMEYER, H.-D., 1995) zur Ermittlung der ausbaubedingten Änderungen auf die Sturmflutschichtelhöhen in der Ems entwickelt. Die Einbeziehung dieses Modells in die Untersuchungen ist insofern naheliegend, als es seine grundsätzliche Anwendbarkeit auf die Übertragung eines Sturmflutschichtels vom Küstenpegel hinein ins Ästuar, anschließend auch im Rahmen von Beweissicherungsuntersuchungen für die Weser und die Elbe bereits nachgewiesen hat.

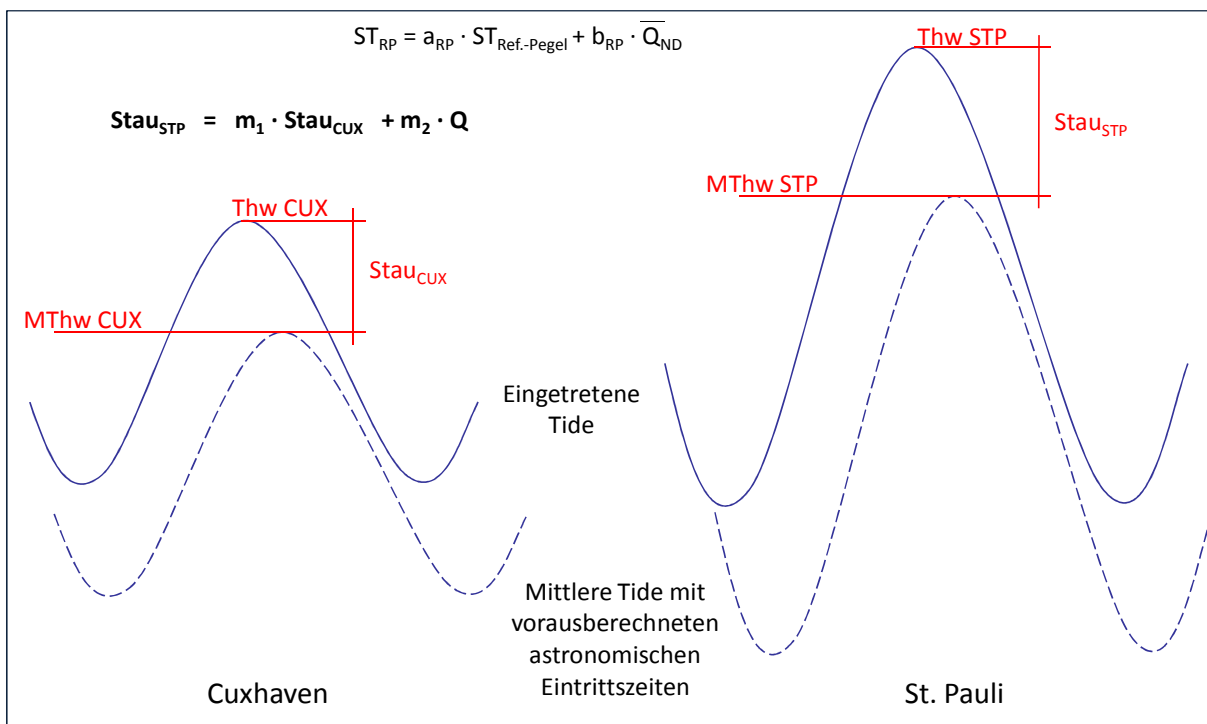


Abbildung 22: Definition des Staus als Differenz des eingetretenen Tidehochwassers zum MThw

Der Stau an jedem der betrachteten Pegel wird für diese Untersuchungen als Differenz zwischen dem beobachteten Sturmfluthochwasserscheitel und dem mittleren Tidehochwasser (MThw) gebildet. Damit beinhaltet er neben dem windgenerierten Stau auch all diejenigen Komponenten, die bereits in Kap. 2.1 ausführlich vorgestellt wurden: thermische Ausdehnung des Wasserkörpers, Atmosphärendruck, Fernwellen und vor allem die komplette Bandbreite der Variation des Gezeitensignals.

Parallel zu dieser Vorgehensweise wurde deshalb auch untersucht, ob sich durch die alternativ mögliche Definition des Staus als Differenz zwischen dem beobachteten Sturmfluthochwasserscheitel und dem vorausgerechneten astronomischen Tidehochwasser eine bessere Modellgüte erzielen lässt. Da dies nicht gegeben war und die Berechnung der astronomischen Scheitelhöhen insbesondere für die Ästuarpegel selbst auf statistischen Modellen basiert, die sich an hydrologischen Zuständen der Vergangenheit kalibrieren, wurde von einer weiteren Verfolgung dieser Methode Abstand genommen.

Als Basis für die Stauermittlung wurde das 5-Jahres-MThw für jedes gewässerkundliche Jahr (beginnend mit dem 1. Nov.) berechnet und zwar aus allen Tidehochwassern der dem 1. Nov. eines Jahres vorausgegangenen fünf Jahre. Basis für eine Sturmflut im Febr.1992 ist somit das über den Zeitraum vom 01.11.1986 - 31.10.1991 gebildete $MThw_{(5J)}$. Die Glättung von Tidekennzahlen durch eine Mittelwertbildung über mehrere Jahre ist in der Gewässerkunde gebräuchlich, um jährliche Schwankungen durch meteorologische Einflüsse oder weiter oberstrom auch durch hohe Oberwasserspenden zu dämpfen.

Die zeitliche Entwicklung des $MThw_{(5J)}$ während des Untersuchungszeitraumes ist in Abbildung 23 exemplarisch für die Pegel Cuxhaven, Grauerort, Schulau und Hamburg-St. Pauli dargestellt. Es zeigt sich, dass die geringfügigen Schwankungen im $MThw_{(5J)}$ über den gesamten Untersuchungszeitraum von knapp 30 Jahren in einer Bandbreite von rd. 10 cm bleiben und maßgeblich durch äußere überwiegend seeseitige Einflüsse geprägt werden, die sich stromauf Richtung Hamburg leicht verstärken. Klammert man die höheren Werte in der Mitte der 1980er Jahre aus, kann man über den Gesamtzeitraum am Pegel St. Pauli einen Anstieg des $MThw_{(5J)}$ von rd. 10 cm oder 3,5 mm/a ausmachen, was in etwa dem Tempo des derzeitigen Meeresspiegelanstiegs entspricht.

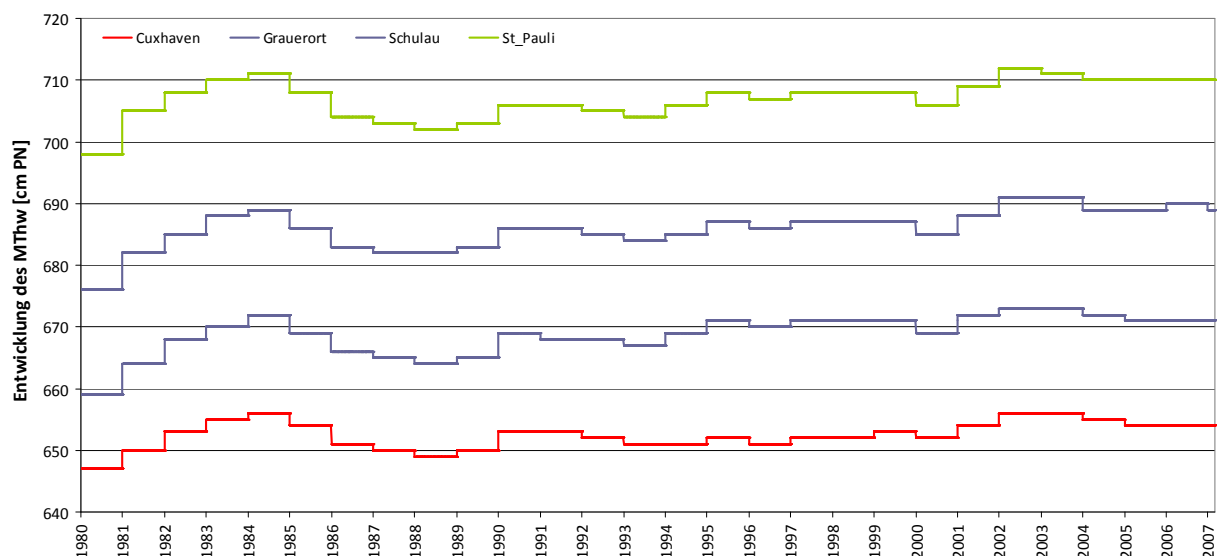


Abbildung 23: Zeitliche Entwicklung des $MThw_{(5J)}$ zwischen 1980 und 2008 an verschiedenen Pegeln der Elbe

Die eingehende Betrachtung der zeitlichen Entwicklung des MThw ist insofern von besonderem Interesse, als in der Verwendung dieser datenbasierten Bezugsgröße für den Stau einen Vorteil dieses Modelansatzes gegenüber den beiden anderen darstellt: Natürliche, aber auch anthropogene Veränderungen der internen oder auch externen Randbedingungen, die Einfluss auf das mittlere Tidehochwasser eines oder auch beider im Modell ausgewerteten Pegel ausüben, werden durch die Verwendung des vom MThw bereinigten Staus größtenteils aus den Modellparametern eliminiert. Damit kann die Datenbasis auf deutlich größere Zeiträume ausgedehnt werden, auch wenn sich die Eigenwerte des Ästuars zwischenzeitlich verändert haben sollten.

Zur Einführung des Staumodells soll auch hier zunächst nur der Einfluss des Staus in Cuxhaven auf die Sturmflutscheitelhöhe in St. Pauli untersucht werden, der wie beim Stieg-Ansatz durch eine einfache lineare funktionale Beziehung charakterisiert werden kann. Auch hier hat der untersuchte nicht-lineare Zusammenhang unter Verwendung der Potenzfunktion keine bessere Korrelation geliefert.

In der Abbildung 24 (links) sind zunächst die gemäß der zuvor getroffenen Definition ermittelten Stau-Parameter der Stationen Cuxhaven und St. Pauli gegeneinander aufgetragen. Die Regressionskoeffizienten und Standardfehler der Modelle sind sowohl für die lineare als auch die nicht-lineare Korrelation angegeben.

Im rechten Teil der Abbildung 24 ist als Test des linearen Modells zur Beschreibung des statistischen Zusammenhangs zwischen dem Stau in Cuxhaven und St. Pauli das beobachtete Hochwasser in St. Pauli dem aus der Modellprognose für den Stau abgeleiteten $HThw_{StP}^{(CALC)} = MThw_{StP} + Stau_{StP}^{(CALC)}$ gegenübergestellt. Der ermittelte Standardfehler von 19,88 cm ist durch die obere und untere rote Linie gekennzeichnet und erlaubt so eine objektivere Einordnung des Rechenwertes zur visuell wahrgenommenen Streuung. Das eingebettete Histogramm gibt einen Eindruck über die Verteilung der Fehler und deckt hier einen Bereich von ± 80 cm in 10 cm breiten Klassen ab.

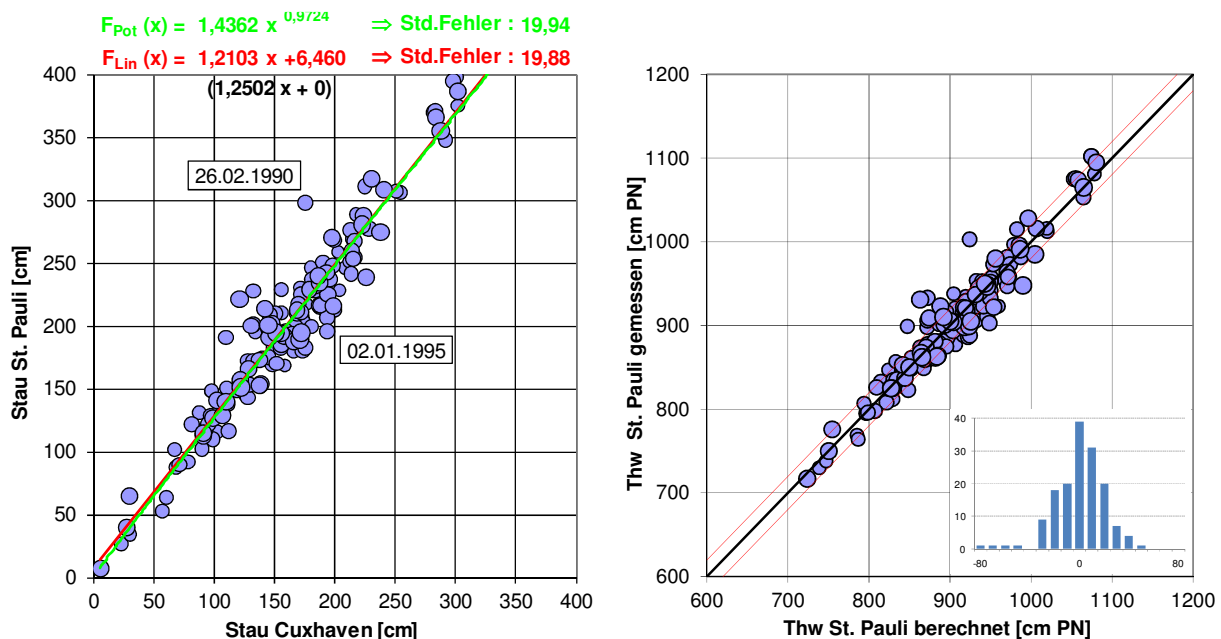


Abbildung 24: Korrelation des Staus in St. Pauli mit dem Stau in Cuxhaven (links) und qualitativer Vergleich von berechneten und eingetretenen HThw-Scheiteln in St. Pauli (rechts)

Das Ergebnis zeigt den vorhandenen linearen Zusammenhang zwischen dem Stau in Cuxhaven und Hamburg-St. Pauli mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,9260 an. Entsprechend den Erwartungen, die zur Modellbildung geführt haben, ist ein proportionaler Zuwachs des Staus in St. Pauli mit wachsendem Stau in Cuxhaven zu beobachten ($m_1=1,21$). Anders ausgedrückt, nimmt der Stau bis St. Pauli im Mittel um 21% gegenüber dem in Cuxhaven vorhandenen Stau zu.

Der ermittelte Standardfehler liegt mit knapp 20 cm exakt auf der Zielvorgabe. Für 72% der Ereignisse resultieren Fehler deren Betrag kleiner ist als 20 cm. Die maximale Abweichung beträgt 79 cm bei der Flut vom 26.02.1990 und hätte mit der Prognose eines Hochwasserscheitels von PN +924 cm zu einer deutlichen Unterschätzung des tatsächlich eingetreten Hochwassers von PN +1003 PN geführt. Die maximale Überschätzung hätte bei der Sturmflut vom 02.01.1995 immerhin noch 45 cm betragen. Statt der tatsächlich eingetretenen PN +903 cm hätte das Modell einen Wert von PN +948 cm prognostiziert. Da diese großen Abweichungen erfahrungsgemäß nicht aus dem bislang unberücksichtigten Oberwassereinfluss resultieren können, ist hier die dringende Erfordernis gegeben, den Ursachen für diese Ausreißer durch eine differenziertere Einzelbetrachtung (vgl. Kap. 4.4) nachzugehen.

4.2.6 Berücksichtigung des Oberwassereinflusses in den empirischen Modellansätzen

Die beiden vorgestellten statistischen Modelle zur Übertragung der Sturmflutscheitelwasserstände von Cuxhaven nach Hamburg zeigen für die bisher verwendeten Eingangsparameter Stau bzw. Stieg des Pegels Cuxhaven noch deutliche Abweichungen zwischen den prognostizierten und beobachteten Werten, was durch die große Streuung und teilweise inakzeptablen Abstände der Beobachtungsdaten von der Regressionsgeraden (bzw. den Funktionswerten des Modells) zum Ausdruck kommt.

In diesem Abschnitt sollen die beiden zuvor betrachteten einfach linearen Modelle daher um einen Term zur Berücksichtigung des Oberwasserabflusses in Neu Darchau erweitert werden, der bekanntermaßen einen - wenn auch geringen - Einfluss auf die Sturmflutscheitelwasserstände insbesondere im oberen Ästuargebiet hat.

Im WADI(III)-Verfahren wird dabei der mittlere Oberwasserabfluss der vergangenen sechs Tage betrachtet, der durch Auf- bzw. Abschlag von 1 cm pro 100 m³/s Differenz zum mittleren Oberwasserabfluss von 700 m³/s in die Berechnung der Sturmflutscheitelhöhe in St. Pauli eingeht.

Aus der bisher betrachteten eindeutigen Beziehung zwischen der abhängigen und einer unabhängigen Variablen wird durch die Erweiterung des Ansatzes um den Oberwasserterm „Lineares Modell“ (ALM) von der Form:

$$Y = m_1 \cdot X_1 + m_2 \cdot X_2 + C$$

Voraussetzung für die Anwendung solcher Modelle ist, dass die Einflussgrößen (Prädiktoren) X_i voneinander unabhängige Variablen darstellen müssen. Die Steigung bzw. Gewichtung der Einflussgrößen m_i und die Konstante C lassen sich mit Hilfe der multiplen Regressionsanalyse durch Minimierung der Quadratsumme der Residuen oder nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmen.

Hier werden die Linearen Modelle mit den zweifellos voneinander unabhängigen Einflussgrößen des Staus bzw. Stiegs in Cuxhaven und dem Oberwasserabfluss Neu Darchau beschriftet:

$$Stieg_{STP} = m_1 \cdot Stieg_{CUX} + m_2 \cdot \Delta Q + C \quad \text{bzw.} \quad Stau_{STP} = m_1 \cdot Stau_{CUX} + m_2 \cdot \Delta Q + C$$

mit:

- STP: St. Pauli ist der oberwasserbeeinflusste Pegel,
- ΔQ : Differenz zum mittleren Oberwasser von 700 m³/s,
- CUX: Cuxhaven ist der oberwasserunbeeinflusste Pegel und
- m_1 Steigung der Variablen X_1 (Stieg_{CUX} bzw. Stau_{CUX})
- m_2 Steigung der Variablen X_2 (ΔQ)
- C : Konstante.

In den nachfolgenden Darstellungen (Abbildung 25 und 26) sind die Differenzen der Modellergebnisse zu den beobachteten Sturmflutscheiteln mit und ohne Oberwassereinfluss über die chronologische Abfolge der 153 Ereignisse aufgetragen. Dabei ist darauf hinzuweisen dass die Abszisse nicht zeitlich skaliert ist und die Beschriftung aufgrund der großen Anzahl von Ereignissen nur das Datum jeder fünften Sturmflut ausweisen kann. Da die theoretisch erzielten Verbesserungen, die in einer nur mäßigen Verringerung des Standardfehlers von 1,1 cm beim Stieg und 0,3 cm beim Stau zum Ausdruck kommen, dabei visuell kaum wahrnehmbar sind, zeigt das jeweils rechts daneben aufgetragene Histogramm die Veränderung der Fehlerverteilung für eine Klassenbreite von 10 cm an.

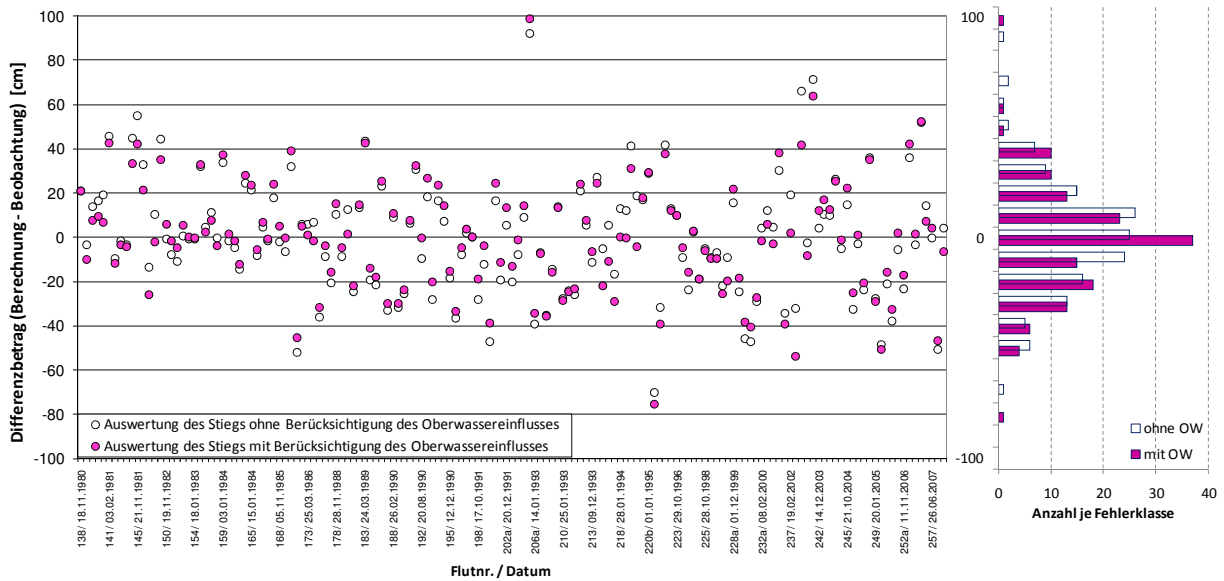


Abbildung 25: Veränderung der Fehlerstatistik durch die Berücksichtigung des Oberwassers im Stieg-Modell

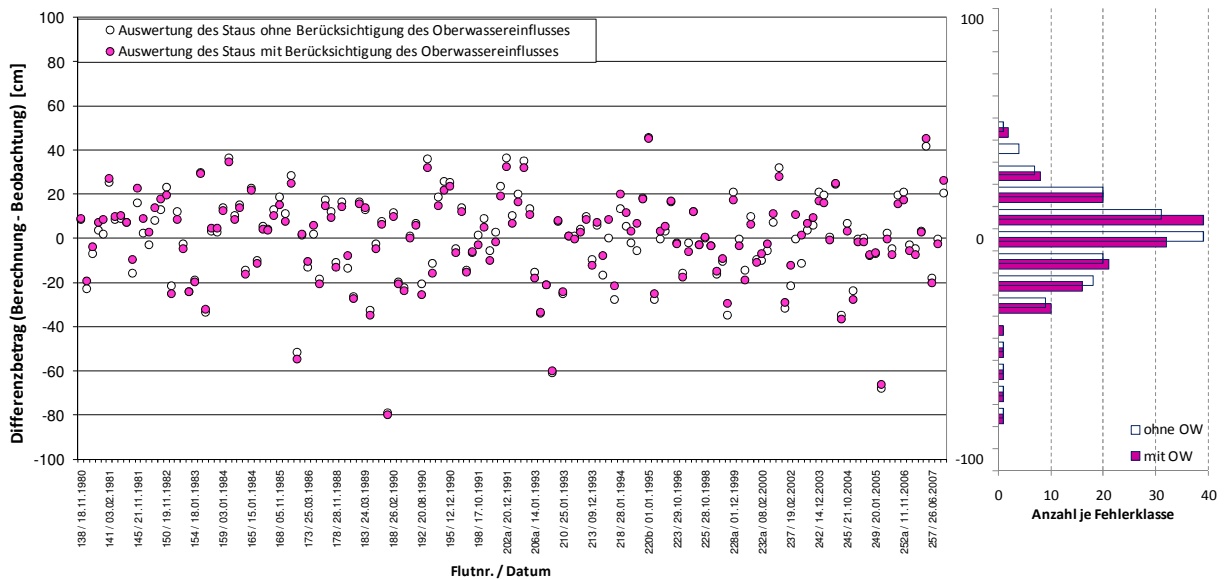


Abbildung 26: Veränderung der Fehlerstatistik durch die Berücksichtigung des Oberwassers im Stau-Modell

Aus den Regressionsanalysen resultieren für den Einfluss des Oberwassers in Hamburg-St. Pauli beim Stieg-Ansatz im Mittel ca. -19 cm pro 1000 m³/s ΔQ und beim Stau-Ansatz wie auch im WADI(3)-Verfahren ca. +10 cm pro 1000 m³/s ΔQ. Die Betrachtung der unterschiedlichen Vorzeichen des Regressionskoeffizienten m₂ zeigt allerdings an, dass ein höheres Oberwasser im Stau-Ansatz zu einer Anhebung des Hochwasserscheitels führt, während es beim Stieg-Ansatz zu einer Dämpfung des Stiegs führt und damit den Hochwasserscheitel absenkt. Insgesamt sind die Faktoren m₂ aber viel zu klein und in Relation zum Faktor m₁ zu gering gewichtet, als dass sie die extremen Ausreißer von bis zu 90 cm in den Vorhersagen des Sturmflutscheitels St. Pauli erklären könnten. Vielmehr muss entgegen dem eigentlichen Ziel, die Streuung durch die Berücksichtigung des Oberwassers zu verringern, für die schon angesprochenen extremen Ausreißer bei beiden Modellen eine geringfügige Zunahme des Fehlers in Kauf genommen werden.

4.2.7 Fehlerstatistik und vergleichende Bewertung der empirischen Modelle

Für einen Vergleich der Modellgüte aller drei Untersuchungsansätze wurden die Ergebnisse des WADI(3)-Verfahrens in folgender Abbildung in gleicher Weise wie zuvor die Stieg- und Stauergebnisse als Differenz zwischen den prognostizierten und eingetretenen Hochwasserscheiteln aufbereitet und in die zuvor vorgestellte Fehlerdarstellung integriert. In der Auftragung über die chronologische Abfolge der Sturmfluten ist der zum Ziel gesteckte Toleranzbereich von ± 20 cm schattiert hinterlegt.

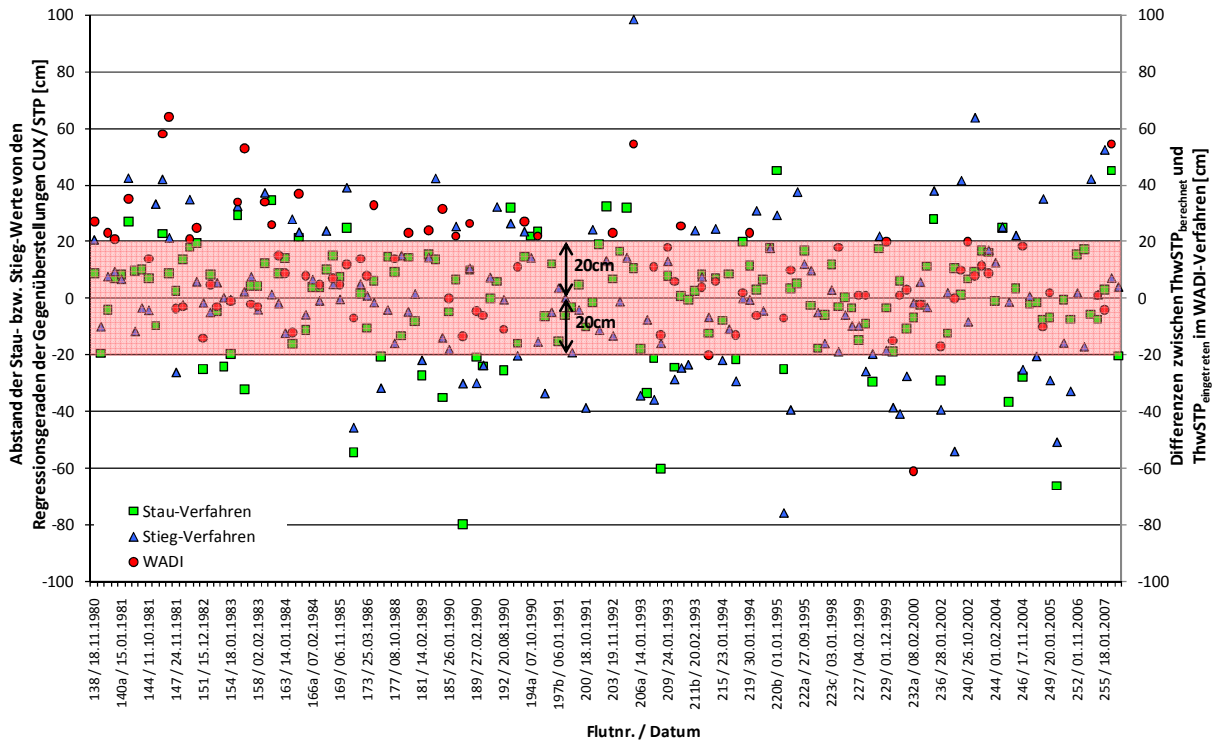


Abbildung 27: Vergleichende Gegenüberstellung der Abweichungen aus den drei Untersuchungsverfahren

Durch die chronologische Auftragung ist erkennbar, wie sich jede einzelne Sturmflut unter Anwendung des jeweiligen Verfahrens verhält (siehe Abbildung 27) und ob hinter der Verteilung der Fehler ggf. ein zeitbedingter Trend liegt, der aus einer langsamen oder auch anthropogen bedingten Veränderung der Eigenwerte des Systems resultieren könnte. Der größte Teil der Ergebnisse befindet sich in dem vorgegebenen Toleranzbereich von ± 20 cm. Die Fehler einzelner Sturmflutereignisse liegen allerdings weit außerhalb dieses Toleranzbereiches. Die besonders hohen Abweichungen (80 - 100 cm), die bereits in den Kapiteln 4.2.4 und 4.2.5 angesprochen wurden, heben sich deutlich hervor.

In Tabelle 5 sind die Standardfehler aller Verfahren gelistet. Es ist allerdings zu erwähnen, dass in die Statistik der mit dem WADI-Verfahren produzierten Fehler nur ca. 60% des mit dem Stau- und Stieg-Ansatz untersuchten erweiterten Sturmflutkollektivs eingegangen ist. Durch die Erweiterung des Kollektivs um Fluten, die zu keinem WADI-Einsatz geführt hatten, gibt es hier keine Vorhersagen des Hochwasserscheitels für Hamburg-St. Pauli.

Verfahren	Standardfehler [cm]
Stau	19,56
Stieg	24,68
WADI	24,53

Tabelle 5: Standardfehler der drei untersuchten Modelle

Die Nachberechnung dieser Sturmfluten mit dem WADI(3)-Verfahren war geplant, die Reproduktion aller benötigten Eingangsdaten für das WADI-Verfahren überdauerte jedoch die Projektlaufzeit.

Tabelle 6 gibt einen Überblick über den prozentualen Anteil der Sturmfluten, die außerhalb des Toleranzbereiches von ± 20 cm liegen, sowie die maximalen Abweichungen und deren Sturmflut-Nr. bzw. -Datum im jeweiligen Verfahren. Das Fehlervorzeichen gibt Auskunft über die Richtung der Abweichung: Prognose-Beobachtung; eine negative Abweichung bedeutet somit, dass die Prognose im Vergleich zur Beobachtung zu niedrig war, positiv entsprechend zu hoch.

Anzahl der Sturmfluten für die Stau- und Stieg-Untersuchungen	153
Anzahl der Sturmfluten für das WADI-Verfahren	85

Verfahren	Anzahl der Sturmfluten außerhalb des ± 20 cm Toleranzbereiches	prozentualer Anteil [%]
Stau	38	25
Stieg	63	41
WADI	28	33

Verfahren	max. Abweichungen [cm]		Sturmflut Nr. / Datum	
	negativ	positiv	negativ	Positiv
Stau	-80	45	187 / 26.02.1990	256 / 18.03.2007
Stieg	-76	99	221 / 09.01.1995	206 / 13.01.1993
WADI	-61	64	232a / 08.02.2000	146 / 23.11.1981

Tabelle 6: Auswertungen zu den Sturmfluten, die außerhalb des Toleranzbereiches liegen (in [%]) sowie den maximalen Abweichungen je Untersuchungsverfahren

Den kleinsten Standardfehler (vgl. Tabelle 5) weist das Stau-Modell auf, welches sich somit zunächst auch als das Verfahren anbietet, mit dem im Folgenden noch weiterführende Untersuchungen durchgeführt werden. Die nur minimale Verbesserung des mittleren Fehlers von 0,3 cm durch die Einbeziehung des Oberwassereinflusses fällt aber, wie schon zuvor dargestellt (vgl. Kap.4.2.6), insbesondere beim Stau-Verfahren eher enttäuschend aus. Im Modell mit dem Stieg-Ansatz konnte unter Berücksichtigung des Oberwassers zwar eine Verbesserung des Standardfehlers von immerhin 1,1 cm erzielt werden, insgesamt sind aber sowohl die Streuung als auch die Ausreißer in diesem Modell deutlich größer als im Staumodell.

Bemerkenswert ist jedoch, dass jedes Verfahren mit ganz unterschiedlichen Sturmfluten in der Vorhersage der Scheitelhöhen am Pegel St. Pauli seine Probleme hat. So ist die Sturmflut-Nr. 187, 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 Nr. 206, 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 Nr. 221, die im Stieg-Modell um 76 cm zu niedrig berechnet wird, aber im Stau-Modell nur um 25 cm unterschätzt wird. Bei der Sturmflut Nr. 256, die im Stau-Modell zur größten positiven Abweichung von 45 cm führte, landet das Stieg-Modell mit +7 cm fast einen „Volltreffer“.

Besonders diese Sturmfluten mit den extrem hohen Abweichungen können Hinweise auf mögliche weitere Parameter geben, die neben den bereits berücksichtigten Einflussgrößen ebenfalls noch einen entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung der Sturmflutscheitelwasserstände zwischen Cuxhaven und Hamburg haben. Daher wurden für diese Sturmfluten Einzelbetrachtungen durchgeführt, die in (Kapitel 4.4.) vorgestellt werden.

4.3 Untersuchung der lokalen Stauentwicklung in der Tideelbe

4.3.1 Vorstudien zur Stauentwicklung im Rahmen der Diplomarbeit J. BREMER

Die Entwicklung bzw. Propagation der Sturmflutwelle aus dem Mündungsgebiet durch das Ästuar bis nach Hamburg ist ein weiterer wichtiger Untersuchungspunkt des Teilprojektes OPTEL-D. Im Rahmen seiner von der HPA betreuten Diplomarbeit beschreibt (BREMER, 2008) in einer empirischen Analyse (62 Sturmfluten zwischen 1989 und 2006) die Propagation verschiedener Sturmfluten in der Tideelbe und versucht, diese anhand des Windstaus (z.B. Lage des Scheitels zur Tidephase, Dauer des Windstauscheitels) sowie der Windgeschwindigkeit zu kategorisieren.

Vor dem Hintergrund, dass sich am Pegel Cuxhaven bei gleichem Wind über Niedrigwasser ein höherer Windstau ausbildet als über Hochwasser (vgl. (TOMCZAK, 1960) und (SIEFERT, W., 1978)) unterscheidet (BREMER, 2008) zwischen „aktivem“ und „passivem“ Windstau. Bei dem durch den „Niedrigwasser-Effekt“ gebildeten Windstau um T_{hw} in Cuxhaven handelt es sich um „passiven Windstau“. Eine „passive“ Stauwelle setzt sich zwar bis Hamburg fort, die Stauhöhen nehmen stromauf aber nur wenig oder gar nicht zu; mitunter liegen die Maxima in Hamburg sogar unter denen von Cuxhaven. Zudem sind die Laufzeiten der passiven Staumaxima von Cuxhaven bis Hamburg überdurchschnittlich lang. Sie entsprechen etwa der mittleren Laufzeit des Gezeitensignals.

Demgegenüber bezeichnet (BREMER, 2008) einen Windstau als „aktiv“, wenn der Verlauf der Staukurve unabhängig von der Lage zur Tidephase ist. Für die Bildung „aktiven“ Staus muss also starker Wind vorherrschen, der den Einfluss der Lage zur Tidephase überlagert. Für aktiven Stau ist charakteristisch, dass das Staumaximum in Hamburg deutlich höher ist als in Cuxhaven. „Aktiv“ dominierte Staukurven erzeugen also neben höheren Scheiteln auch höhere Scheiteldifferenzen. Zudem beträgt die Laufzeit des „aktiven“ Scheitels von Cuxhaven nach Hamburg nur etwa 2 Stunden.

Je geringer der Wind ist, desto größer ist der Einfluss der Tidephase auf den Verlauf der Staukurve. (BREMER, 2008) lokalisiert die Grenze der Windgeschwindigkeit zur Ausbildung von „aktivem“ oder „passivem“ Stau bei etwa 19 bis 20 m/s (im Stundenmittel). Staudifferenzen zwischen Hamburg und Cuxhaven von mehr als 50 cm bilden sich grundsätzlich nur bei „aktivem“ Windstau aus, negative Staudifferenzen hingegen nur bei „passivem“.

Nach (BREMER, 2008) nehmen die Scheiteldifferenzen zwar tendenziell proportional zur Scheitelhöhe in Cuxhaven zu, gleichwohl kann er in seinen Untersuchungen keinen besonders engen Zusammenhang zwischen der Höhe des Windstaumaximums in Cuxhaven und der Staudifferenz zwischen Hamburg und Cuxhaven feststellen; die diesbezüglichen Aussagen von SIEFERT werden insofern untermauert.

Zur Aufstellung und Verifizierung eines empirisch-statistischen Modells zur Beschreibung der Entwicklung des Staus während der Propagation der Sturmflutwelle durch das Ästuar, konnte diese Arbeit allerdings keinen Beitrag liefern.

4.3.2 Stromauf-Entwicklung des Staus im Scheitelpunkt der Sturmflut

Für diese Untersuchung werden die Stau-Werte in Hamburg-St. Pauli der Reihe nach mit dem Stau aller im Antrag festgelegten Revierpegel in Beziehung gesetzt. Durch diese sukzessive Betrachtung der Stau-Entwicklung entlang der Tideelbe sollten die möglichen lokalen Ursachen auf die bereits angesprochenen starken Abweichungen besser nachvollzogen werden, d.h. ab wo entstehen sie eigentlich, ab welchem Pegel sind sie nicht mehr erkennbar und welche unterschiedlichen Charakteristika liegen möglicherweise in den morphologischen Gegebenheiten der Teilabschnitte zwischen zwei benachbarten Pegelstationen vor.

In Abbildung 28 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 (CUX), Brunsbüttel (BRU), Brokdorf (BRO), Glückstadt (GLÜ), Grauerort (GRA) und Schulau (SCH); auf der y-Achse ist stets der resultierende Stau am Pegel St. Pauli (STP) aufgetragen. Auf eine Bereinigung des Staus an den Pegeln um den nach Unterstrom abnehmenden Einfluss des Oberwasserzuflusses wird bei dieser Darstellung verzichtet, da sie aufgrund des zuvor bereits festgestellten geringen Verbesserungspotenzials eher akademischen Charakter hätte.

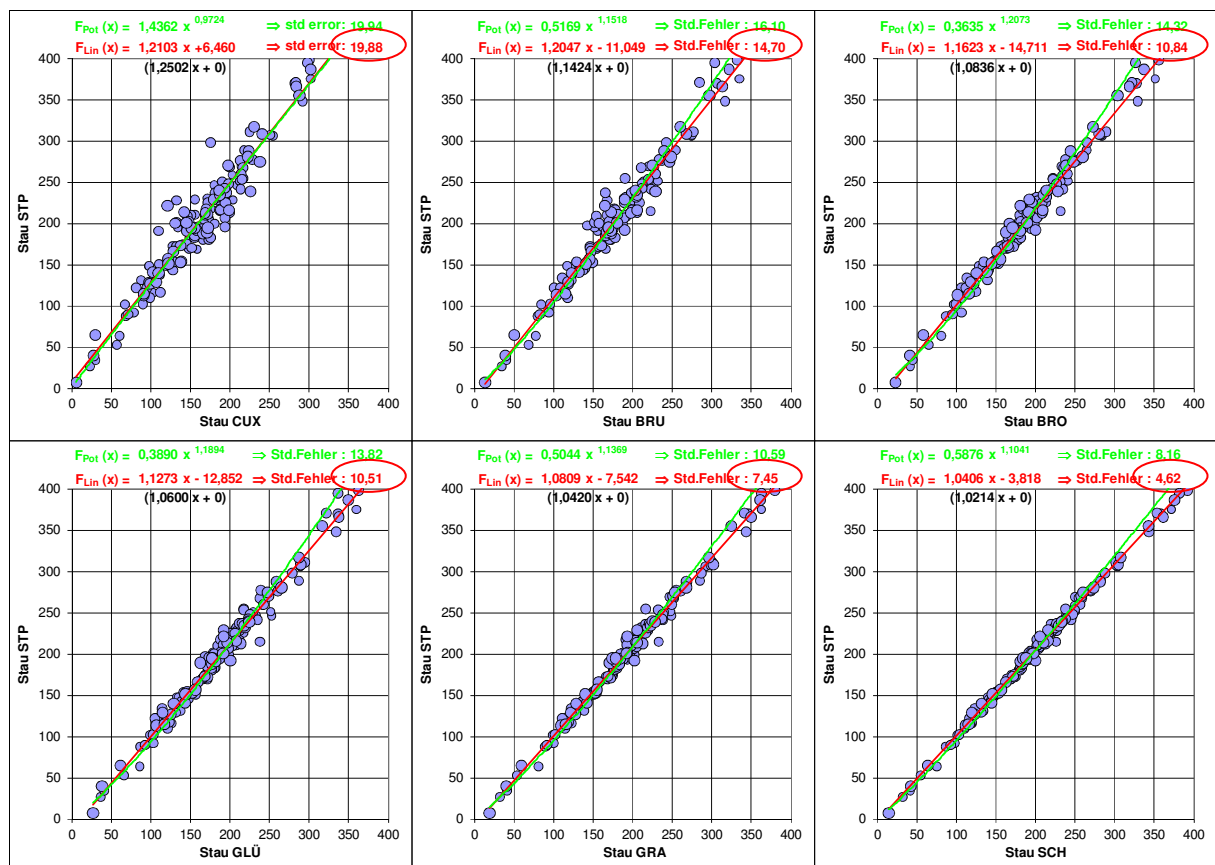


Abbildung 28: Übertragung des Staus vom Küstenpegel Cuxhaven über die Revierpegel bis nach Hamburg

Es ist erkennbar, dass die Korrelation der Stauwerte immer besser wird, je näher der Bezugspegel geographisch zu Hamburg liegt. Während Cuxhaven in einer Entfernung von rd. 100 km zu Hamburg am unteren Rand des weitläufigen Mündungstrichters liegt, ist Brokdorf rd. 40 km näher zu Hamburg gelegen und befindet sich bereits im Inneren des Ästuars, mit einer deutlich schmaleren Gewässerebreite und stromauf hinter einem fast 90°-Richtungswechsel des Gewässerlaufes (vgl. Abbildung 8).

Wird für die Abschätzung des Staus in Hamburg-St. Pauli ein Bezugspegel gewählt, der oberhalb von Brunsbüttel liegt, so sinkt der Standardfehler 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 viel zu kurz, um noch rechtzeitig ggf. erforderliche Katastrophenschutzvorkehrungen treffen zu können.

Die genauere in Augenscheinnahme der Veränderungen des Streubildes gibt aber neben der lokalen Eingrenzung des Entstehungsgebietes 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 (Streupunkte oberhalb der Regressionsgeraden), sind bei einer Übertragung ab Brokdorf nach Hamburg optisch nicht mehr auszumachen (vgl. Abbildung 29 rechts).

Ereignisse wie z.B. die Sturmflut Nr.187 vom 26.02.1990, die in der Abbildung 29 markiert ist und mit dem Stau-Modell in der direkten Relation Cuxhaven - Hamburg um 80 cm zu niedrig vorausberechnet wurde, setzen sich auch schon bei der Übertragung von Cuxhaven nach Brokdorf deutlich von der Regressionsgeraden ab. Im Fall der Sturmflut vom Sturmflut Nr.187 vom 26.02.1990 waren es in Brokdorf sogar 90 cm (Messung am Übertragungsort auf Y-Achse > Schätzwert=Regressionsgerade).

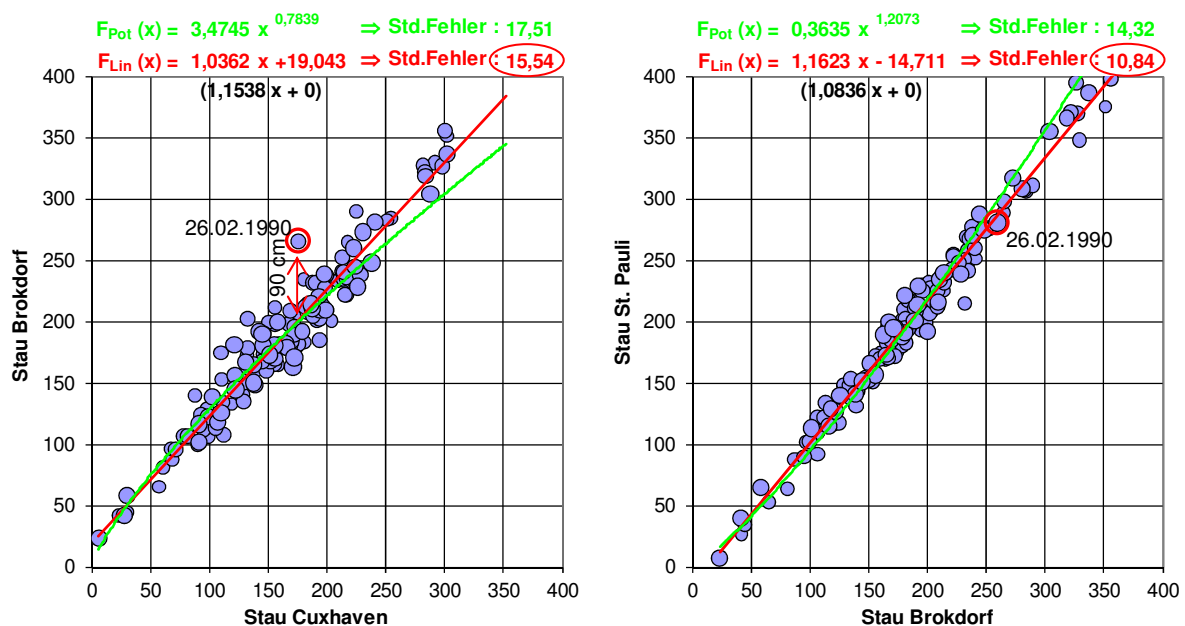


Abbildung 29: Übertragung des Staus vom Küstenpegel Cuxhaven zum Revierpegel Brokdorf (links) und vom Revierpegel Brokdorf nach Hamburg (rechts)

Diese Beobachtung deutet darauf hin, dass es im Mündungsgebiet zwischen Cuxhaven und Brokdorf offenbar nur unter ganz bestimmten Randbedingungen zu einer nichtlinearen Stauerhöhung kommt, während dieser dann in Brokdorf anstehende Stau im weiteren Verlauf der Tideelbe bis Hamburg mit zufriedenstellender Genauigkeit und ohne größere Ausreißer linear übertragbar ist. Ausmaß, Vorzeichen und Ort der Ergebnisbeeinflussung lassen die Schlussfolgerung zu, dass die größeren Unterschätzungen mit dem Stau-Modell auf die Vernachlässigung lokal wirksamer, staugenerierender Einflüsse zurück zu führen sind, nämlich den lokalen Windbedingungen im Mündungstrichter zwischen Cuxhaven und Brokdorf.

4.3.3 Vergleichende Betrachtung der lokalen Entwicklung von Stau, Stieg und MThb

Die Entwicklung der Sturmflutscitelwasserstände entlang der Tideelbe wird zusätzlich auch für die Ergebnisse des Stieg-Modells betrachtet. Hier werden die selben Pegel wie in Kapitel 4.3.2 berücksichtigt, allerdings werden die Übertragungen immer vom Bezugspegel Cuxhaven aus durchgeführt, um die Entwicklung des Tidestiegs im Ästuar anhand der resultierenden Regressionskoeffizienten (Steigung und Achsenabschnitt) zu analysieren.

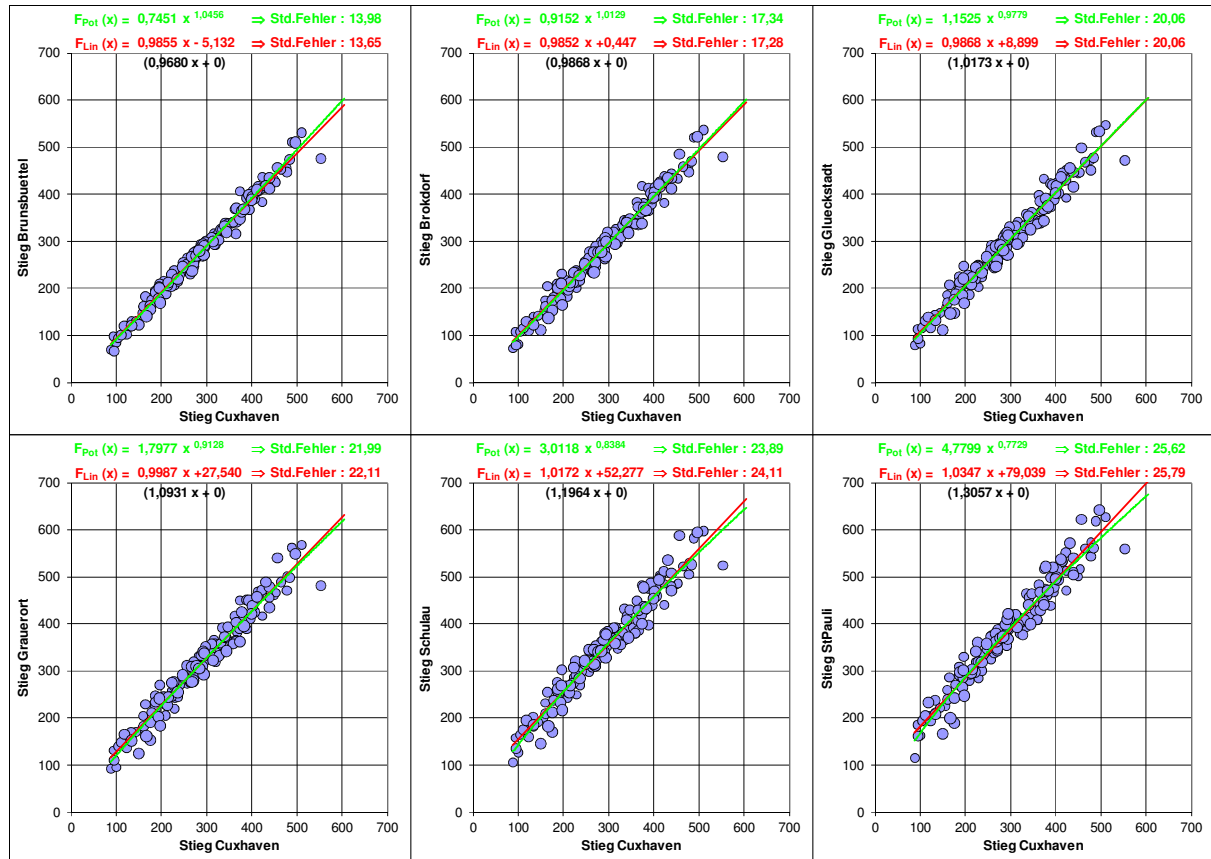


Abbildung 30: Übertragung des Stiegs vom Küstenpegel Cuxhaven auf die Revierpegel bis nach Hamburg

Die Abbildung 30 zeigt die jeweilige Streuung für die Übertragung des Stiegs vom Küstenpegel Cuxhaven auf die Pegel Brunsbüttel, Brokdorf, Glückstadt, Grauerort, Schulau und St. Pauli. Wie nicht anders zu erwarten war, nehmen die als Maß für die Streuung ausgewiesenen Standardfehler auch hier stromauf zu. Das eigentliche Augenmerk soll mit dieser Ergebnisübersicht auch auf die Steigung gerichtet werden, die für alle Zielstationen nur minimal (-1,5% bis +3,5%) von „1“ abweicht, d.h. dass der Zuwachs des Stiegs am Zielort unabhängig von der Größe des Prädiktors (= Stieg am Küstenpegel) ist.

Im Gegensatz dazu, wächst die Konstante (=Achsenabschnitt) in Richtung Hamburg deutlich an und spielt damit die dominierende Rolle im Transferprozess. Das ganze Paket der Datenpunkte wird also von Station zu Station mehr oder weniger parallel nach oben verschoben. Eine Auftragung der Differenzen des Stiegs zwischen den Revierpegeln und dem Küstenpegel über den Stieg des Küstenpegels erfährt somit eine quasi horizontale Schichtung. Schließlich muss man vor dem Hintergrund dieser Erkenntnisse einräumen, dass der Modellansatz zwar gut gedacht, aber der Einsatz der unabhängigen variablen Einflussgrößen nur suboptimal gewählt war, da die Zunahme des Stiegs offenbar weniger von der Größe des eingetragenen Impulses, als vielmehr von der Lokation im Ästuar abhängt.

Diese zunächst etwas überraschende Feststellung erinnert an eine frühere bei der HPA durchgeführte Studie zur Entwicklung des mittleren Tidehubs im Ästuar (vgl. Abbildung 4), die als Nebenprodukt das seinerzeit genauso unerwartete Ergebnis bereit hielt, dass der Tidehub von Nipp-Tiden relativ zum Ausgangswert in Cuxhaven im Mittel eine größere Zunahme erfährt als der MThb und der Zuwachs bei Spring-Tiden am geringsten ausfällt, bei ansonsten gleichen Randbedingungen.

Die Abbildung 31 zeigt die Entwicklung des aus den 153 Ereignissen gemittelten lokalen Stiegs in Relation zum Randwert in Cuxhaven über 16 Pegelstationen der Tideelbe von Cuxhaven bis Geesthacht. Zum Vergleich ist auch die Entwicklung des für den betrachteten Zeitraum von 1980-2008 repräsentativen mittleren Tidehubs und des lokalen Staus jeweils in Relation zu ihren Randwerten dargestellt.

Die lokale Entwicklung des Stiegs zeigt zumindest qualitativ einen ähnlichen Verlauf wie die Entwicklung des mittleren Tidehubs, wenngleich die Zunahme des Stiegs von Cuxhaven bis Hamburg mit im Mittel etwa 30%, etwas höher ausfällt als bei den mittleren Tiden (+20%). Auch die für die Elbe charakteristische Abnahme des Tidehubs auf ein Minimum von rd. 95% des Ausgangswertes in Höhe Brokdorf/Glückstadt wird von der lokalen relativen Stieg-Entwicklung angedeutet, aber nicht ganz so deutlich erreicht. Die Ähnlichkeit im Verlauf zeigt aber dennoch die grundsätzlich berechtigte Intention hinter dem Stieg-Modell, die lokale Entwicklung des Hochwasserscheitels durch die Transformation des Tidestiegs als stellvertretende Größe für die Wellenhöhe bzw. den Impulseintrag in das Ästuar beschreiben zu wollen.

Der mittlere relative Stauzuwachs zeigt dagegen einen völlig unterschiedlichen Verlauf zum mittleren relativen Tidehub- oder auch Stiegszuwachs. Hier ist von der Mündung an eine Zunahme des relativen Staus (im Mittel aller Ereignisse) zu beobachten, dessen Verlauf bis Brokdorf besonders steil ansteigt, um anschließend bis Hamburg leicht abzufachen und bei einer mittleren Stauzunahme von 25% das Maximum zu erreichen. Weiter stromauf von Hamburg ist die relative Stauzunahme wieder leicht rückläufig und erreicht bei Geesthacht einen Betrag von rd. 10%.

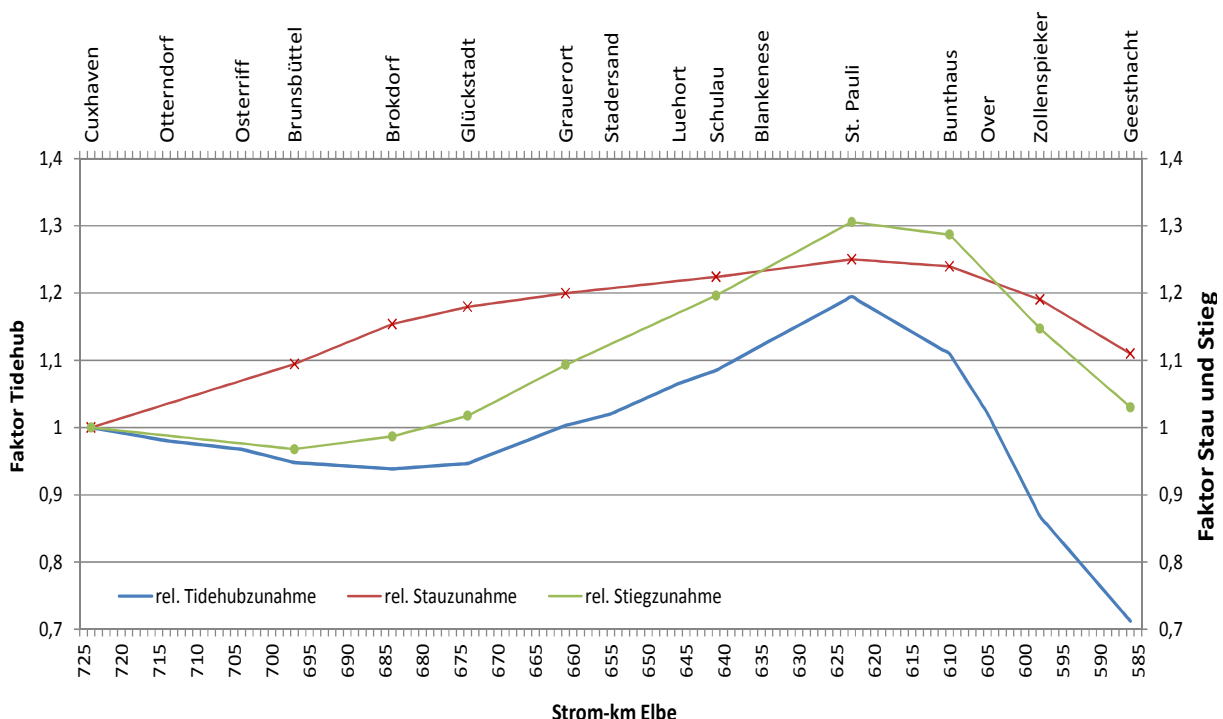


Abbildung 31: Lokale Entwicklung des relativen mittleren Stiegs, Staus und MThb in der Tideelbe.

4.4 Detailanalyse von Sturmflutereignissen mit größeren Prognosefehlern

Die detaillierte Analyse einzelner Sturmfluten soll Hinweise zu möglichen weiteren Einflussgrößen auf die Entwicklung der Sturmflutscheitelhöhen im Ästuar liefern, die durch die bisher in den statistischen Modellen berücksichtigten parametrisierten Kenngrößen nicht abgebildet werden können. Die Untersuchungen werden exemplarisch für die Sturmfluten dargestellt, die von den Modellprognosen in besonderem Maße über- oder unterschätzt wurden (vgl. Tabelle 6 in Kapitel 4.2.7) und damit geeignet scheinen, unterschiedliche charakteristische Randbedingungen für diese Sturmfluten aufzuzeigen. Die daraus gezogenen Schlussfolgerungen wurden aber an weiteren im Detail analysierten Sturmfluten verifiziert, die hier nicht alle dargestellt werden können.

Bereits in den zuvor dargestellten Untersuchungen zur lokalen Entwicklung des Staus im Ästuar konnte aufgezeigt werden, dass eine Ursache für die großen Abweichungen der Modellprognosen von den Beobachtungen am Pegel St. Pauli im Mündungstrichter zwischen Cuxhaven und Brokdorf zu suchen ist. Eine detailliertere Betrachtung der Wasserstands-Ganglinien an den vorhandenen Pegeln im Mündungstrichter und der verfügbaren Windinformationen in diesem Gebiet sollten daher geeignet sein, verwertbare Hinweise auf mögliche Ursachen zu erhalten.

Auf der Insel Scharhörn wird von der HPA seit mehr als 40 Jahren eine Windmessstation betrieben, die sehr gute Datensätze in Bezug auf Qualität und Konsistenz liefert, während die Verwendbarkeit der Daten von den Stationen Cuxhaven und Brunsbüttel unter einigen Vorbehalten steht: Der Mast der Windmessstation Cuxhaven liegt je nach Windrichtung im Leebereich eines Hochhauses und die Winddaten in Brunsbüttel werden nicht wie üblich 10 m über Grund, sondern bis 1992 in 23 m Höhe und aktuell 27 m über Grund gemessen. In Ermangelung alternativer Windinformationen werden die Daten von Brunsbüttel zur Repräsentation der Windbedingungen im inneren Mündungstrichter der Elbe für die weiterführenden Untersuchungen gleichwohl herangezogen.

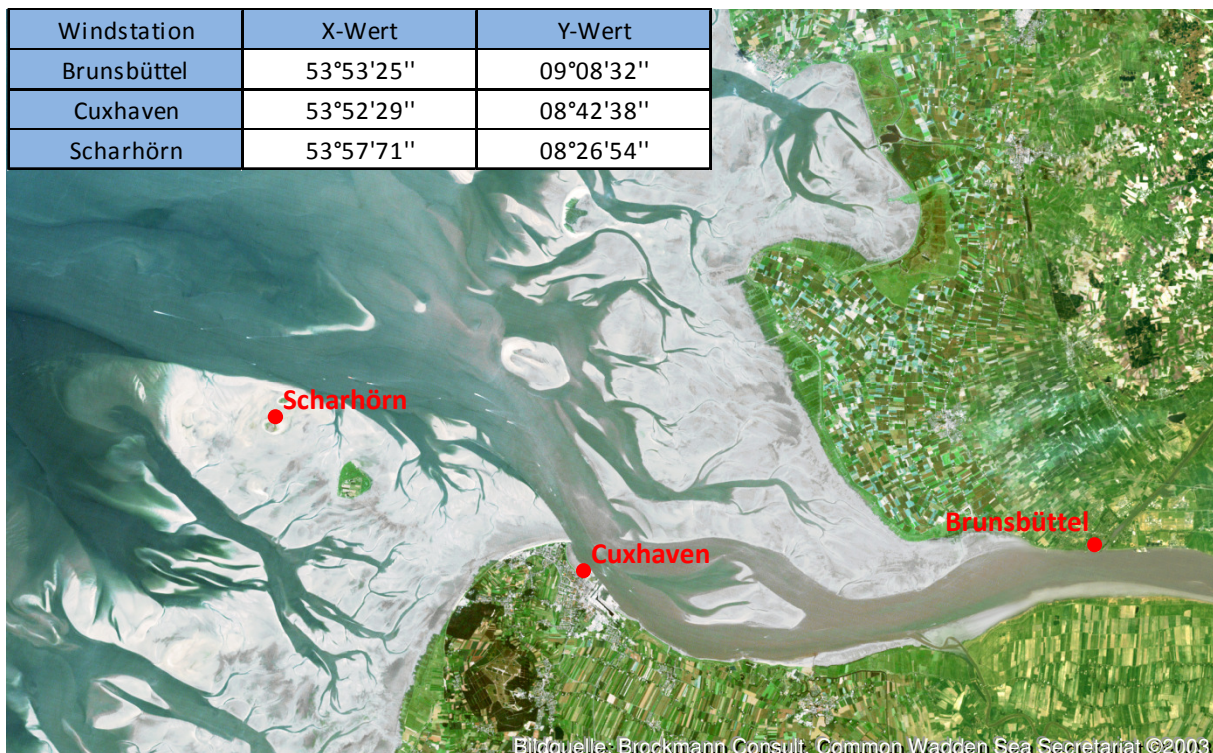


Abbildung 32: Übersicht zur Lage der in OPTEL berücksichtigten Windmessstationen

4.4.1 Sturmflut Nr. 187 (Stau-Modell-Prognose unterschätzt HThw St. Pauli)

Bei der Sturmflut Nr. 187 vom 26.02.1990 liefert die Prognose auf Basis des Stau-Ansatzes eine Sturmflutscheitelhöhe für den Pegel Hamburg-St. Pauli, welche die eingetretene Höhe um 80 cm deutlich unterschätzt. In Abbildung 33 sind im oberen Diagramm die Zeitreihen der Wasserstände von Cuxhaven (CUX), Brunsbüttel (BRU) und Hamburg-St. Pauli (STP) aufgetragen sowie die astronomische Gezeit von Cuxhaven. Die beiden unteren Diagramme zeigen die Windverhältnisse der Stationen Scharhörn, Cuxhaven und Brunsbüttel getrennt nach Richtung (WR) und Geschwindigkeit (WV).

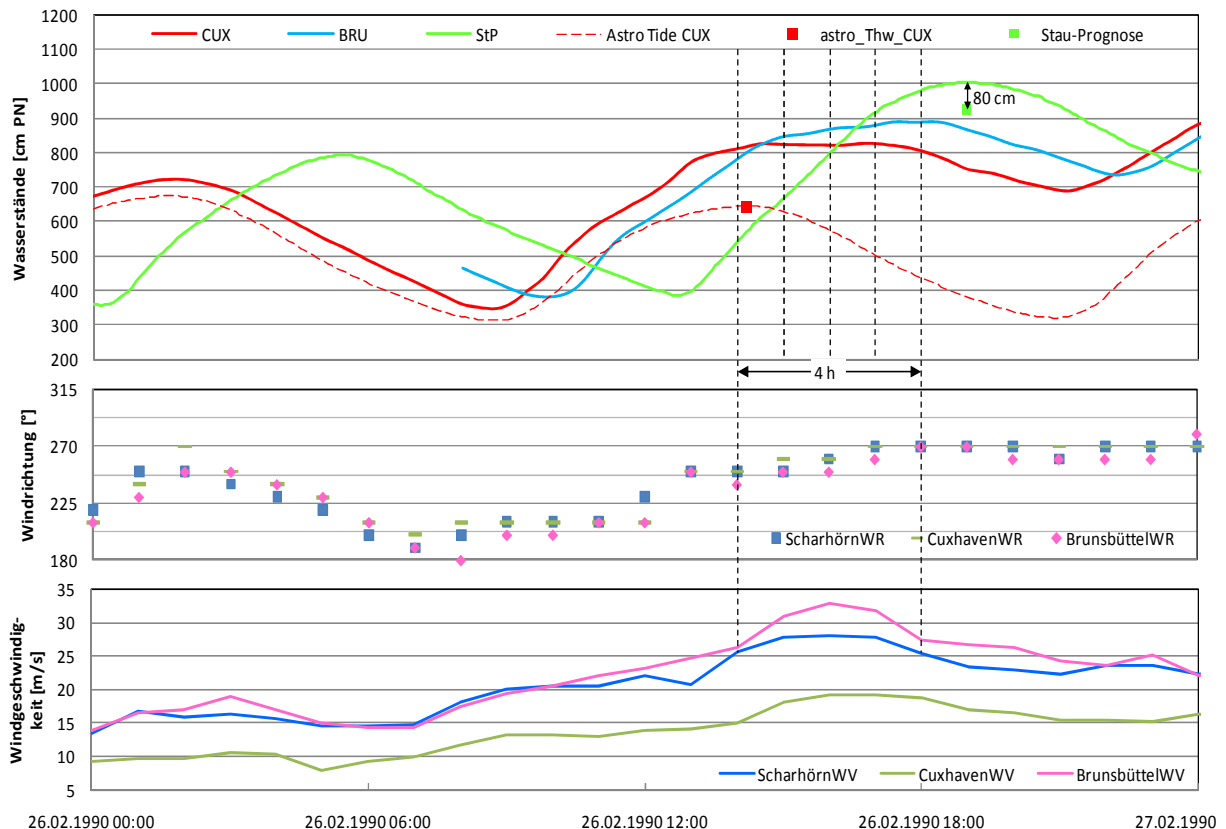


Abbildung 33: Zeitlicher Verlauf der Wasserstände und des Windes bei der Sturmflut Nr. 187 am 26.02.1990

Generell ist zur Entwicklung der durch den Orkan „Vivian“ ausgelösten Sturmflut vom 26.02.1990 festzuhalten, dass eine bedeutende Stauentwicklung in Cuxhaven erst mehrere Stunden nach Eintritt des astronomischen Tideniedrigwassers zu verzeichnen ist: Der Wind auf Scharhörn nimmt erst eine knappe Stunde vor Erreichen des astronomischen Hochwasserscheitels deutlich zu und dreht gleichzeitig von Süd-West auf Nord-West. Nach dem Eintritt des astronomischen Tidehochwassers in Cuxhaven nimmt die Windgeschwindigkeit auf Scharhörn noch einmal kräftig zu und erreicht dort Werte von 29 m/s.

Grundsätzlich begünstigt diese Windentwicklung die Ausbildung eines breiten Sturmflutscheitels am Pegel Cuxhaven. Abbildung 33 zeigt, dass die Breite dieses Scheitels (rote Kurve) sogar extrem ausgeprägt ist: Genau genommen, verharrt das Hochwasser fast vier Stunden lang auf einem mehr oder weniger konstanten Niveau (von etwa PN +820 cm). In Brunsbüttel (blaue Kurve) steigt das Hochwasser dagegen weiter an und erreicht seinen Scheitelwert erst knapp vier Stunden nach dem astronomischen Hochwasser in Cuxhaven. Normalerweise benötigt die Tidewelle rd. 1 Stunde von Cuxhaven nach Brunsbüttel.

Eine Erklärung für diesen ungewöhnlichen Sturmflutverlauf bei der Flut vom 26.2.1990 besteht darin, dass ein starker lokaler Windeinfluss die Ursache für die Verlängerung des Scheitels in Cuxhaven und die zusätzliche Erhöhung der Wasserstände in Brunsbüttel ist. Tatsächlich waren bei diesem Ereignis extrem hohe Windgeschwindigkeiten an der Station Brunsbüttel zu verzeichnen (rosa Kurve im unteren Diagramm), die mit zeitweise über 30 m/s sogar noch höher waren als auf Scharhörn. Auch die Windrichtung liegt mit 260° in Brunsbüttel einen Strich weiter südlich als auf Scharhörn und damit genau in der Ausrichtung des Stroms in diesem Abschnitt.

Interessant ist, dass die Sturmflut vom 26.02.1990 auch bei den Untersuchungen von (NIEMEYER, H.-D., 1997) zum Sturmflutgeschehen im Ems-Ästuar durch überdurchschnittlich hohe Stauwerte im Mündungsbereich auffällt und vom statistischen Modell genauso deutlich unterschätzt wird wie hier. Aufgrund der in beiden Revieren vergleichbaren Beobachtung, dass sich diese überdurchschnittlich hohe Stauzunahme jeweils nur in den Mündungsbereichen der Ästuar wiederfindet und im weiteren Verlauf keine weitere Stauzunahme zu verzeichnen ist, ergibt sich auch keine Veranlassung, die Ursache in einer möglichen Überlagerung des Stauereignisses mit einer Fernwelle zu suchen. Ergänzend sei darauf hingewiesen, dass auch in der Untersuchung von (GÖNNERT, 1999) für dieses Ereignis kein Fernwellen-Einfluss festgestellt wurde.

Damit sind hinreichend Anhaltspunkte gegeben, die außergewöhnliche zusätzliche Stauerhöhung im Elbmündungsgebiet zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel bei der Flut Nr. 187 auf ein lokales Starkwindfeld zurück zu führen. Im Ergebnis führt dies - bei Anwendung des statistischen Stau-Modells zur linearen Übertragung des vorhandenen Staus von Cuxhaven nach Hamburg - zu einer Unterschätzung der Sturmflutscheitelhöhe am Pegel St. Pauli von 80 cm.

Wie eine Parametrisierung der diesen Stauwuchs generierenden lokalen Windbedingungen im Mündungstrichter möglich ist und dass eine Erweiterung des Staumodells um diese Einflussgröße zu einer Verbesserung der Ergebnisse führt, zeigen die weitergehenden Untersuchungen in Kapitel 4.5.

4.4.2 Sturmflut Nr. 256 (Stau-Modell-Prognose überschätzt HThw St. Pauli)

Die Sturmflut Nr. 256 vom 18.3.2007 repräsentiert ein Ereignis, bei dem die Prognose aus dem Staumodell das eingetretene Hochwasser am Pegel St. Pauli deutlich überschätzt. Mit 45 cm ist der absolute Fehler zwar nur etwa halb so groß wie bei der zuvor betrachteten unterschätzten Flut Nr. 187, aber das Wesen der Regressionsanalyse deutet schon an, dass dementsprechend mehr Ereignisse auf der Seite der Überschätzung sein müssen und die Ursachenforschung umso wichtiger ist.

Im Gegensatz zur ausgesprochen dynamischen Wind- und Windstauentwicklung bei der Sturmflut vom 26.02.1990 liegt hier, bedingt durch die relativ konstanten und über längere Zeit anhaltenden Windverhältnisse über der Nordsee, bereits im Vorfeld der Flut ein erhöhtes mittleres Wasserspiegelniveau vor (vgl. Tmw-Linien in Abbildung 34). Die damit verbundene größere Wassertiefe in der südlichen Nordsee erlaubt ein schnelleres Fortschreiten der Sturmflutwelle, was sich in einer Phasenverschiebung zur astronomisch vorausberechneten Gezeit niederschlägt. Sowohl in Cuxhaven (rd. 2 Stunden) als auch in St. Pauli (rd. 1 Stunde) tritt der Scheitel früher ein als astronomisch vorausberechnet. Zum Zeitpunkt des astr. Tnw in Cuxhaven beträgt der Stau dort rund 250 cm. Nach astr. Tnw nimmt die Windgeschwindigkeit in Scharhörn deutlich ab, wobei die Windrichtung vorübergehend von 260° auf 280° dreht. Der Stau zur Eintrittszeit des Thw in Cuxhaven beträgt noch 226 cm.

Die Staufortpflanzung von der Mündung bis nach Hamburg ist bei der Sturmflut vom 18.3.2007 in erster Linie durch eine über mehrere Tiden andauernde, allmähliche und gleichmäßige Anhebung des Tidemittelwasserspiegels im gesamten Ästuar geprägt, d.h. die „adynamische“ Stauentwicklung in Verbindung mit deutlich nachlassender stauwirksamer Windeinwirkung (kollabierender Windstau) reduzieren die übliche Stauerhöhung im Ästuar erheblich. Am Pegel St. Pauli ist daher zum Zeitpunkt des Tidehochwassers lediglich eine Stauzunahme um 12 cm ausgehend vom vorhandenen Stau in Cuxhaven (= 226 cm) zu registrieren (Modellwert: 57 cm).

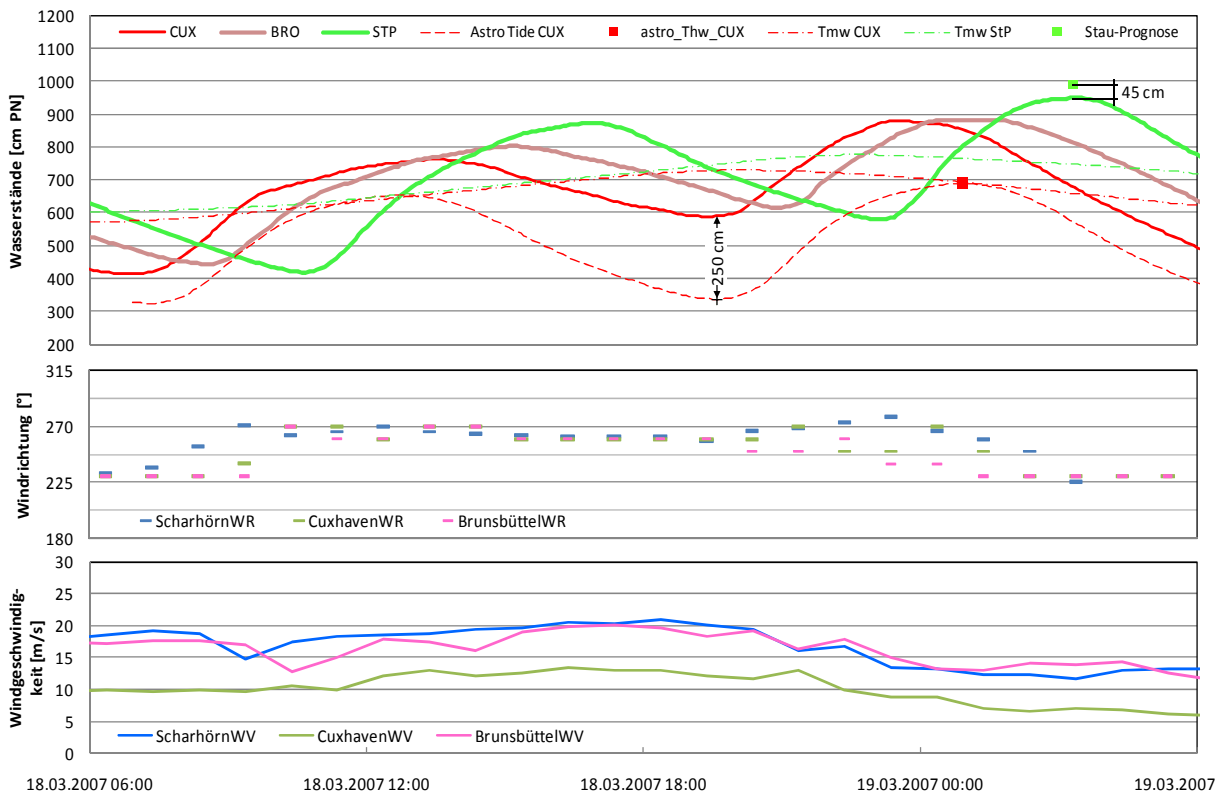


Abbildung 34: Zeitlicher Verlauf der Wasserstände und des Windes bei der Sturmflut Nr. 256 am 18.03.2007

4.4.3 Sturmflut Nr. 206 (Stieg-Modell-Prognose überschätzt HThw St. Pauli)

Die Sturmflut Nr. 206 vom 13./14. Januar 1993 ist – ähnlich wie die im Kapitel 4.4.1 beschriebene Flut Nr. 187 – dadurch gekennzeichnet, dass eine Wind- und Windstauentwicklung erst nach dem astr. Tideniedrigwasser in Cuxhaven eintritt. Aufgrund der überaus raschen Zunahme des Windes (innerhalb von knapp 2 Stunden von 18 m/s auf über 30 m/s auf Scharhörn), der nach kurzer Zeit wieder zusammenbricht, bildet sich bei Flut in Cuxhaven eine für Sturmfluten vom „Jütland-Typ“ charakteristische sehr steile und kurze Staukurve aus, die ihren Scheitel noch deutlich vor Eintritt des astr. Thw erreicht.

Auffallend ist, dass das Tnw in Cuxhaven deutlich niedriger liegt als das astr. Tnw. Zu diesem Zeitpunkt bewirkt ein über der Nordsee aus SSW bis SW wehender Wind am Pegel Cuxhaven noch einen Windsunk von mehreren Dezimetern; das Tnw am Pegel St. Pauli fällt dagegen 85 cm höher aus. In Folge der „explosionsartigen“ Windzunahme bei gleichzeitiger rascher Drehung auf NW bildet sich in Cuxhaven ein sehr steiler Verlauf der Flut aus; die Steigung des Flutastes beträgt 3,5 cm/Minute. Das Tidehochwasser tritt in Cuxhaven über 2 Stunden früher ein als astronomisch vorausberechnet. Der Tidedstieg erreicht dabei einen extrem hohen Wert von 5,40 m. Nach Erreichen der kurzen, hohen Windspitze nimmt der Wind auf Scharhörn ebenso schnell wieder ab. Bedingt durch den schnellen Durchzug des kleinen, aber sehr kräftigen Windfeldes und die beschriebene Stauentwicklung wird der Scheitel der Sturmflutkurve in Cuxhaven zudem stark verformt (siehe Ganglinie in Abbildung 35).

Vor allem aber bewirkt das plötzliche Zusammenbrechen des Windes, dass weder der Tidedstieg noch seine Steigung in Hamburg ähnlich extreme Werte erreichen wie in Cuxhaven; letztlich ergibt sich bei diesem Ereignis eine Überschätzung des Sturmflutscheitels in Hamburg durch das Stieg-Verfahren um fast 1 m. Während die Modellprognose mit dem Stieg-Ansatz in dieser Situation völlig versagt, wird der eingetretene Sturmflutscheitel mit dem Stau-Ansatz (Fehler = +11 cm) deutlich besser getroffen.

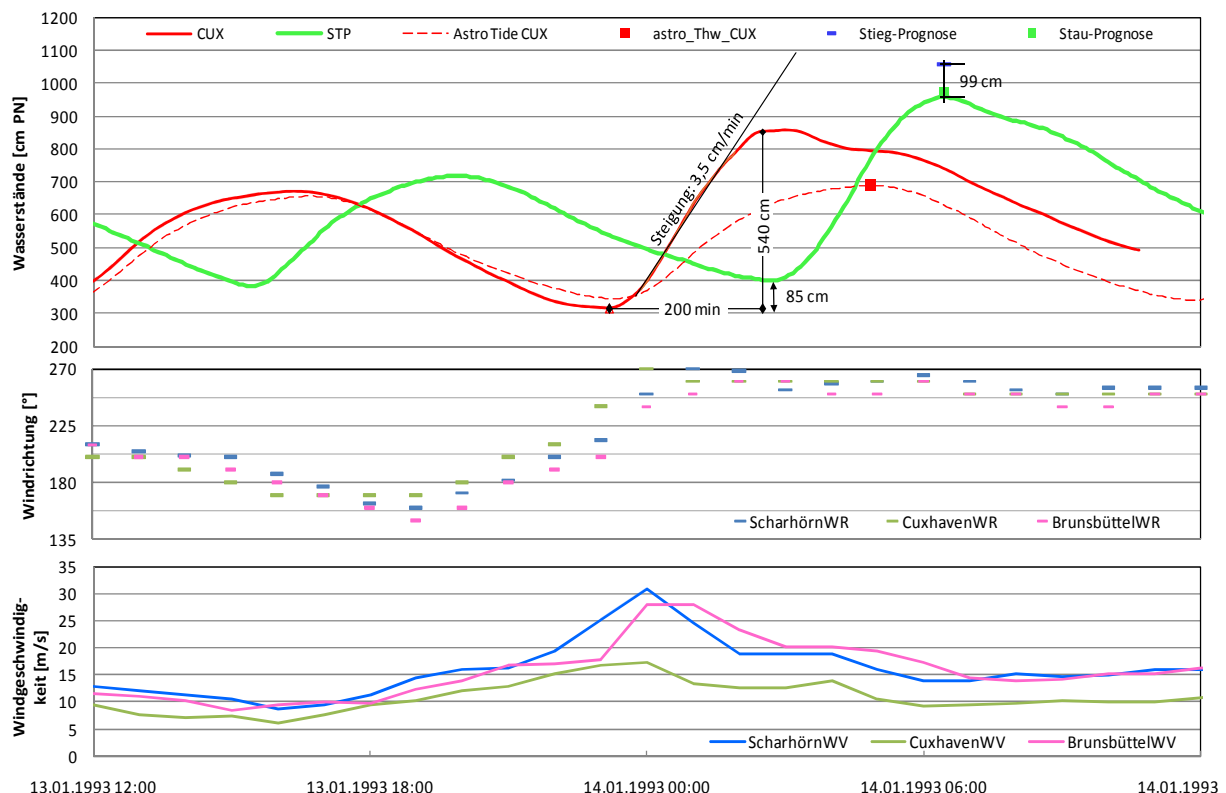


Abbildung 35: Zeitlicher Verlauf der Wasserstände und des Windes bei der Sturmflut Nr. 206 am 13.01.1993

4.4.4 Sturmflut Nr. 221 (Stieg-Modell-Prognose unterschätzt HThw St. Pauli)

Bei der Sturmflut Nr. 221 vom 10.1.1995, die am Pegel St. Pauli eine Höhe von NN + 6,02 m erreichte und damit (zusammen mit der Flut vom 28.1.1994) in Hamburg bislang die zweihöchste Sturmflut überhaupt ist, wird der Scheitelwert in Hamburg durch das Stieg-Verfahren deutlich unterschätzt: Der eingetretene Wert liegt am Pegel St. Pauli einen $\frac{3}{4}$ Meter über der mit dem Stieg-Ansatz prognostizierten Scheitelhöhe.

Während bei der Vortide kein nennenswerter Wind zu verzeichnen ist, bildet sich zum Zeitpunkt des Tideniedrigwassers in Cuxhaven, in Folge einer vorherigen moderaten Zunahme des Windes in Scharhörn auf Werte um 15 m/s bei gleichzeitiger Drehung auf nordwestliche Richtung, ein Stau von zunächst rund 1,5 m Höhe aus. Begünstigt durch das anschließende kurzzeitige Abflauen des Windes entsteht in Cuxhaven ein sehr lang gestreckter Verlauf des Tnw-Scheitels: rund drei Stunden lang verharrt der Wasserspiegel auf ungefähr einem Niveau. Mit einsetzender Flut in Cuxhaven nimmt der Wind über der Deutschen Bucht dann beständig zu und verbleibt über mehrere Stunden auf einem hohen Geschwindigkeitsniveau von knapp 25 m/s. Es bildet sich in Cuxhaven eine vergleichsweise moderat ansteigende Flut mit einer Anstiegsgeschwindigkeit des Wasserspiegels von 1,8 cm/Minute aus.

Kennzeichnend für die Flut Nr. 221 ist, dass die windbedingte Stauerhöhung zeitlich parallel mit der Flut erfolgt. Dazu passt auch, dass der Sturmflutscheitel in Cuxhaven recht genau zum Zeitpunkt des astronomischen Hochwassers eintritt. Dadurch, dass die Wassermassen durch die deutliche Windzunahme seit Tnw sozusagen „huckepack“ ins Ästuar gedrückt werden, bildet sich in der Tideelbe ein steiler Flutast aus, der in Hamburg letztlich ein wesentlich höheres Niveau erreicht als am Pegel Cuxhaven. Auch in dieser Situation muss man dem Stau-Ansatz mit einer Unterschätzung von „nur“ 25 cm eine deutlich bessere Prognosegüte attestieren.

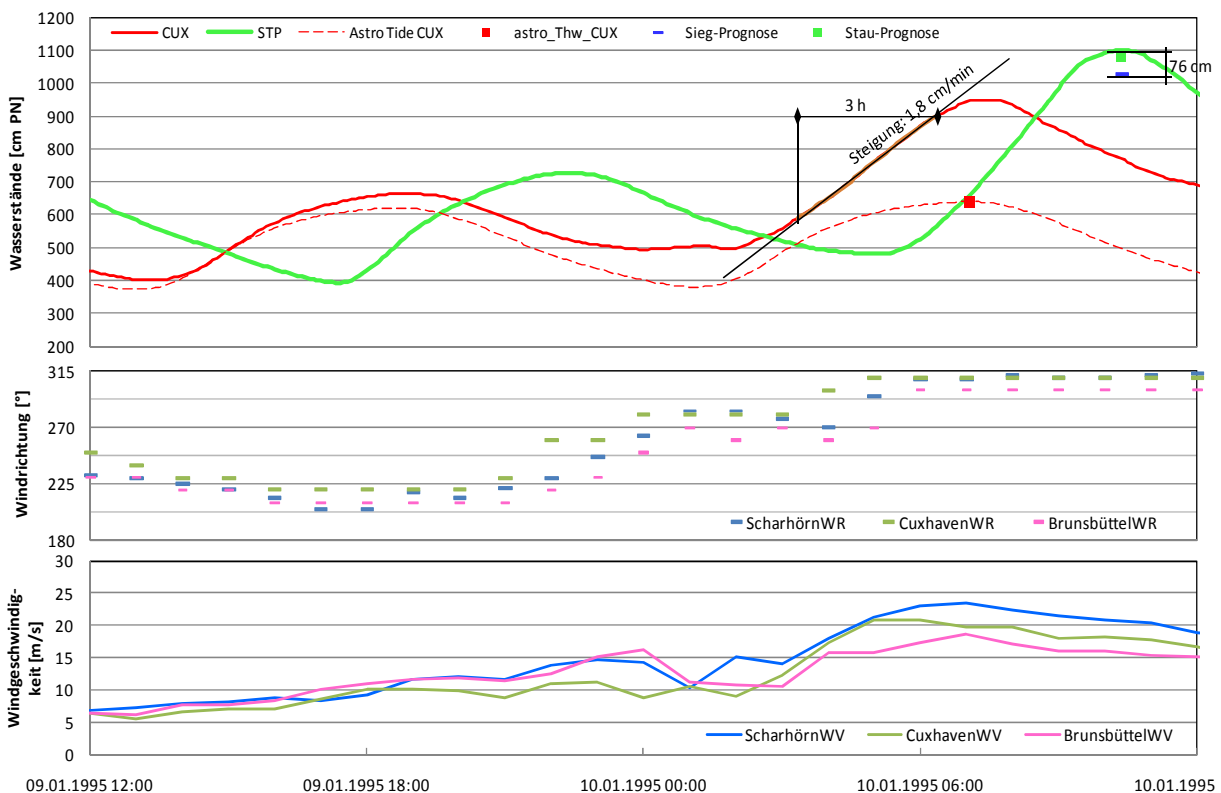


Abbildung 36: Zeitlicher Verlauf der Wasserstände und des Windes bei der Sturmflut Nr. 221 vom 09.01.1995

4.4.5 Folgerungen aus den Einzelanalysen für die weiteren Untersuchungen

Die Detailanalysen der vorangegangenen Kapitel geben deutliche Hinweise auf weitere Einflussgrößen, die die Stauentwicklung im Ästuar signifikant prägen und durch die einfache Parametrisierung von Stau oder Stieg am Pegel Cuxhaven nicht ausreichend abgedeckt sind.

Insbesondere die Analyse der Sturmflut Nr. 187 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.

Darüber hinaus zeigen auch die bei den Einzelbetrachtungen festgestellten unterschiedlichen Charakteristika der Sturmfluten bezüglich der zeitlichen Entwicklung des Staus die Notwendigkeit vertiefter Untersuchungen. Das Beispiel der Sturmflut Nr. 221 belegt, dass ein außergewöhnlich hoher Stauzuwachs auf dem Weg von Cuxhaven nach Hamburg auch ohne einen nennenswerten zusätzlichen Windstau im Mündungsgebiet auftreten kann. Dagegen erfahren andere Sturmfluten, wie am Beispiel der Flut Nr. 256 gezeigt wurde, kaum einen Stauzuwachs.

Generell beeinflussen die Geschwindigkeit des Stauanstiegs und die Phasenlage des Staus zum Tidesignal den Ablauf einer Sturmflut. Die Einzelanalysen zeigen, dass das Maß dieser „Dynamik“ der Stauentwicklung aber noch einer genaueren Betrachtung bedarf. Des Weiteren gibt die Flut Nr. 256 Hinweise darauf, dass auch die Höhe des Tmw (bzw. der mittleren Wassertiefe) im Ästuar im zeitlichen Vorfeld der Sturmflut eine nicht zu vernachlässigende Rolle für deren spätere Ausprägung hat. Und schließlich ist offenbar auch das vorhandene Wasserspiegelgefälle (Gradient) im Ästuar, das zu Beginn der Flut Nr. 206 mit 85 cm im ΔT_{nw} ein ausgesprochen hohes Maß hat, ein maßgeblicher Parameter für die Entwicklung der Flut in der Tideelbe.

Die genannten Einflussgrößen sollen im Folgenden vertieft untersucht werden.

4.5 Einfluss des lokalen Windes im Mündungstrichter auf den Stauzuwachs

4.5.1 Ermittlung der für den Mündungstrichter stauwirksamsten Windrichtung

Die lokalen Windbedingungen im Mündungstrichter sind sowohl in der Detailanalyse einzelner Sturmfluten (vgl. Kapitel 4.4.1) als auch bei den Untersuchungen zur Entwicklung des Staus stromaufwärts Richtung Hamburg (vgl. Kapitel 4.3.2) als die wahrscheinlichste Ursache für den bei einigen Sturmflutereignissen beobachteten überdurchschnittlichen großen Stauzuwachs von bis zu 90 cm (bei der Sturmflut Nr. 187 vom 26.02.1990) zwischen Cuxhaven und Brokdorf identifiziert worden.

Bereits in früheren Studien wurden Untersuchungen zur stauwirksamen Windrichtung durchgeführt, allerdings für die Deutsche Bucht und nicht für den Mündungstrichter zwischen Cuxhaven und Brokdorf. Für die Deutsche Bucht finden sich Angaben von 295°-300° (ANNUTSCH, R., 1977), bezogen auf die Staukurve am Pegel Cuxhaven wurden von (SIEFERT, W. & CHRISTIANSEN, H., 1983) wie auch von (GÖNNERT, G., 2003) 280° als stauwirksamste Windrichtungen über der Deutschen Bucht ermittelt.

Ein Blick auf die geografische Lage des Mündungsgebiets der Elbe in Abbildung 37 verdeutlicht, dass der Lauf des Stroms im Altenbrucher Bogen von See kommend in östliche Richtung verschwenkt, bevor er in Höhe Brokdorf für die Flutströmung wieder auf eine süd-süd-östliche Richtung zurückschwingt. Während ein Wind aus etwa 280-285° 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. Der aus dem hydrostatischen Druckgradient resultierende Volumenstrom fließt nach Süden ins Ästuar ab.

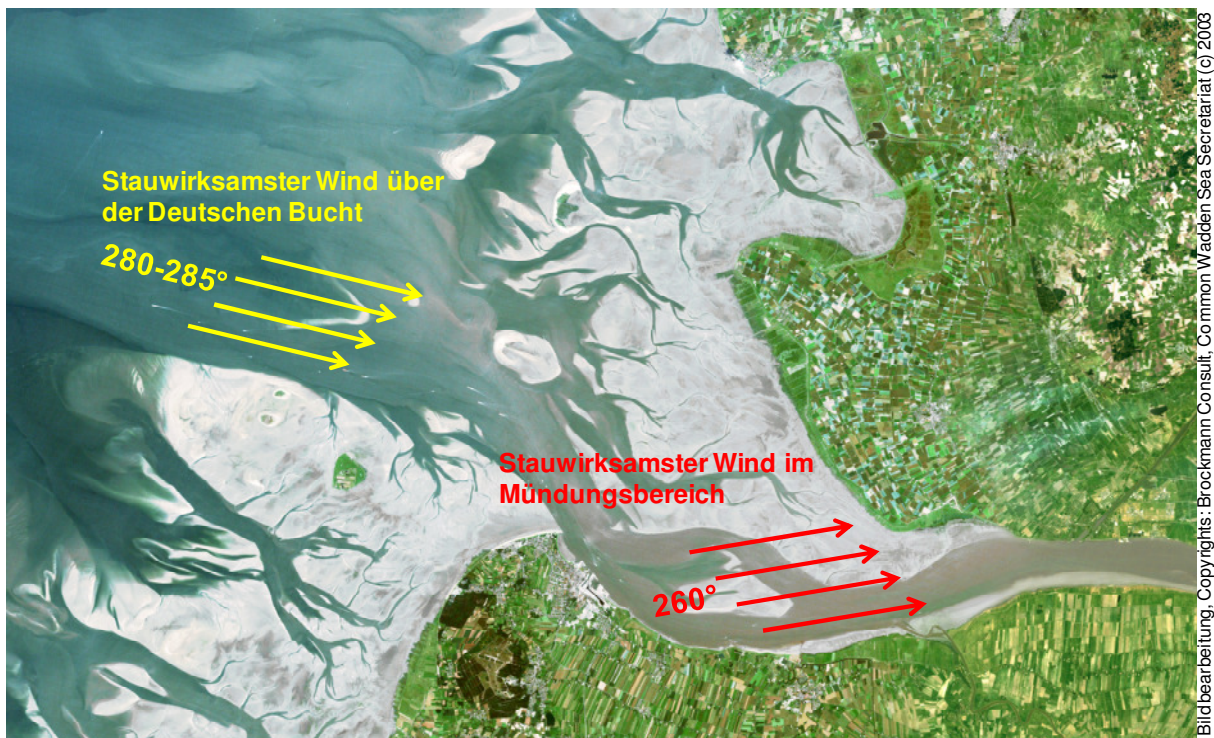


Abbildung 37: Stauwirksamste Windrichtungen für die Deutsche Bucht und das Mündungsgebiet

Inwieweit diese auf der Basis geografischer Gegebenheiten angegebene theoretisch stauwirksamste Windrichtung auch den größten Stauzuwachs auf der Strecke Cuxhaven-Brokdorf produziert, soll durch die im Folgenden dargestellte Regressionsanalyse verifiziert werden. Analysiert wird dabei die funktionale Beziehung zwischen dem Übertragungsfehler des für die Station Brokdorf aufgestellten linearen Modells (vgl. Kapitel 4.3.2) und der Staueffizienz des Windes im Mündungstrichter, als die den Fehler mutmaßlich verursachende Kenngröße.

Die Staueffizienz wird dabei in Anlehnung an die mathematische Formulierung für die windinduzierte Schubspannung auf die Wasseroberfläche (vgl. Kapitel 2.1.2) proportional zum Quadrat der Windgeschwindigkeit angenommen:

$$\tau^{\text{eff}} = \beta \cdot WV^2 \cdot \text{Cos}^2(WR - WR_0)$$

wobei WV die Windgeschwindigkeit, WR die Windrichtung und β einen empirischen Faktor in Anlehnung an den Windsogkoeffizienten darstellt. Die Konstante WR_0 , auf die der Windvektor projiziert wird, gibt die stauwirksamste Richtung an und muss iterativ ermittelt werden, da sie als Bestandteil des COS-Arguments im Zuge der Lösung dieser Extremalwertaufgabe nicht partiell differenzierbar ist. Die Lösung der Aufgabe besteht darin, die Summe der Fehlerquadrate zwischen dem Modellergebnis und der Zielgröße zu minimieren, hier also zwischen der Staueffizienz τ^{eff} und dem Stauzuwachs von Cuxhaven nach Brokdorf $\Delta\text{Stau}_{\text{BRO}}$:

$$\sum_n [\Delta\text{Stau}_{\text{BRO}} - (\tau^{\text{eff}} + C)]^2 = \text{Min} !$$

Da direkt aus dem Mündungsgebiet zwischen Cuxhaven und Brokdorf 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 (vgl. Abbildung 38). Leider sind von der Windmessstation Brunsbüttel nicht für alle Sturmfluten des Kollektivs Daten vorhanden, so dass sich die Anzahl der auswertbaren Ereignisse auf 130 reduziert.

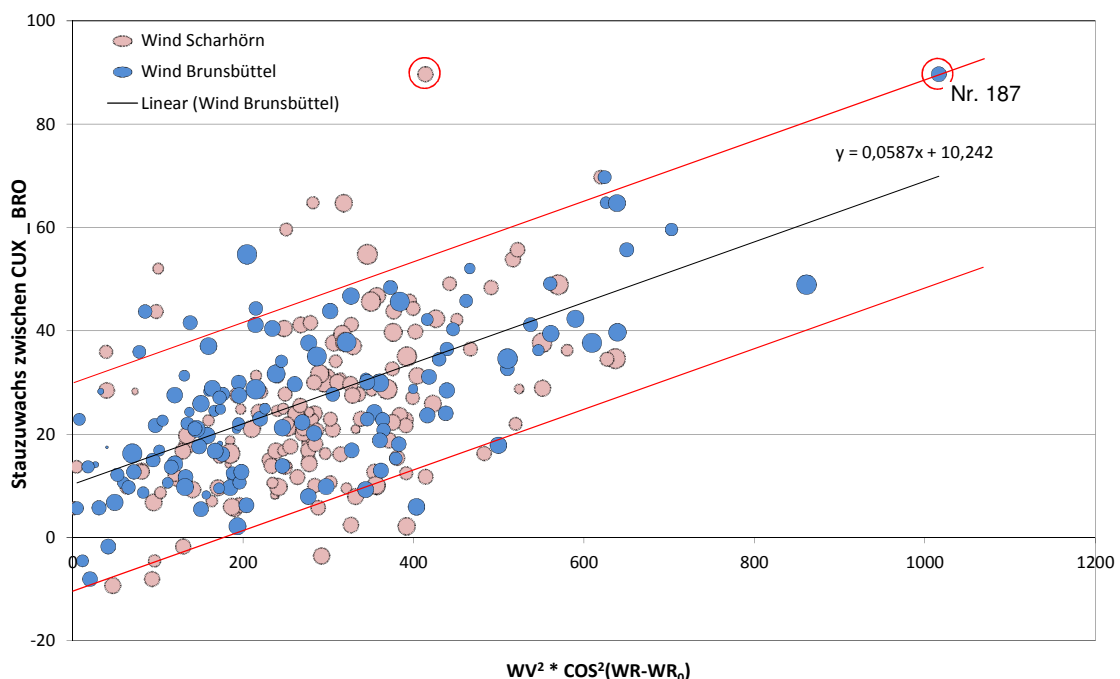


Abbildung 38: Einfluss des lokalen Windes auf den Stauzuwachs im Mündungsgebiet

Die Abbildung 38 zeigt, dass grundsätzlich eine Korrelation zwischen dem Stauzuwachs und der proportional zur quadrierten Windgeschwindigkeit definierten Staueffizienz vorhanden ist, die mit dem Modellansatz mathematisch beschreibbar wird. Unter Verwendung der Winddaten Brunsbüttel liefert das Modell insgesamt, aber insbesondere bei dem rot eingekreisten Sturmflutereignis Nr.187 eindeutig die besseren Ergebnisse als bei Verwendung der Winddaten Scharhörn. Den geringsten Standardfehler erzielt man unter Ansatz einer windstauwirksamsten Richtung WR_0 von 262° , womit die auf Basis der geografischen Gegebenheiten naheliegende theoretische Erwartung bestätigt wird.

Die Sturmflut-Nr. 187 vom 26.02.1990 ist noch einmal besonders hervorgehoben, da sie aufgrund des großen Prognosefehlers von 80 cm Unterschätzung des Hochwasserscheitels in St. Pauli 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°) nunmehr knapp innerhalb des durch die beiden roten Linien markierten Toleranzbereiches von ± 20 cm. Gerade bei diesem Ereignis ist die offenbar deutlich höhere lokale Windgeschwindigkeit im Mündungstrichter für den außergewöhnlich großen Stauzuwachs bis Brokdorf verantwortlich.

Auch die Rolle des Zeitpunktes in dem der Wind den Stauzuwachs auf der Relation Cuxhaven – Brokdorf produziert wurde eingehend untersucht. Dabei konnte herausgearbeitet werden, dass die lokalen Windbedingungen um den Eintritt des Tidehochwasserscheitels in Cuxhaven den größten Einfluss auf den Stauzuwachs ausüben und in dem Modell die geringsten Standardfehler produzieren.

Der Standardfehler dieses Ansatzes zur Übertragung des Staus von Cuxhaven nach Brokdorf auf Basis der Staueffizienz zur Zeit des Thw-Eintritts am Pegel Cuxhaven liegt bei knapp 11 cm und ist damit deutlich geringer als in dem linearen Modell, dass den Stau in Brokdorf nur auf Basis des Staus in Cuxhaven abschätzt und dabei einen Standardfehler von 15,5 cm produziert (vgl. Abbildung 29).

Inwieweit der Stauzuwachs bis Brokdorf außer vom Wind auch von der absoluten Höhe des Staus abhängt, wurde durch eine multiple Regressionsrechnung unter Einschluss der Ausgangs-Staugröße in Cuxhaven als weitere unabhängige Variable überprüft:

$$\sum_n [\Delta Stau_{BRO} - (m_1 \cdot Stau_{CUX} + m_2 \cdot \tau^{eff} + C)]^2 = \text{Min} !$$

Da der aus der Regressionsrechnung resultierende Faktor m_1 nur um wenige tausendstel von eins abweicht, kann davon ausgegangen werden, dass die Höhe des Staus in Cuxhaven ohne Einfluss auf den Stauzuwachs nach Brokdorf bleibt, sondern die Staudifferenz im Wesentlichen allein durch den Wind produziert wird. Damit erübrigt sich auch die Frage nach der datenbasierten Identifizierbarkeit des theoretisch vorhandenen Einflusses der staubedingt variierenden Wassertiefe auf das Maß der Staudifferenz, weshalb diese Untersuchungen hier auch nicht weiter dargestellt werden.

Damit wird die dominierende 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 Nr. 187 wirkenden Einflussgröße auch zu einer deutlichen Verbesserung des Modells zur Übertragung des Staus von Cuxhaven nach Hamburg führen sollte.

4.5.2 Erweiterung des Staumodells St. Pauli um den Windeinfluss im Mündungstrichter

Wie in Kapitel 4.3.2 schon dargestellt, kann die weitere lokale Entwicklung des Staus in der Tideelbe stromaufwärts von Brokdorf durch die lineare Übertragung in Abhängigkeit vom vorhandenen Stau im Scheitelpunkt der Sturmflutwelle an der Station Brokdorf und unter Berücksichtigung des Oberwassereinflusses in zufriedenstellender Güte beschrieben werden. Ein weiterer Einfluss des Windes auf den Stauzuwachs in diesem Teilstreckenabschnitt 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, 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 gestaut werden könnte.

Um nun auch für Hamburg zu einer verbesserten Stauprognose zu gelangen, soll aber der Zwischenschritt über die Stauprognose für Brokdorf eingespart werden. Dazu wird der Einfluss des Windes im Mündungstrichter direkt in das Stau-Modell für Hamburg implementiert. Aus statistischer Sicht lassen sich durch eine solche geschlossene Lösung Fehler minimieren.

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 zum mittleren Oberwasserabfluss NeuDrachau: ΔQ_{ND}
- sowie die Stau-effizienz auf der Relation Cuxhaven-Brokdorf: $\tau^{eff} = \beta \cdot WV^2 \cdot \cos^2(WR - WR_0)$ mit den Windwerten WV , WR der Station Brunsbüttel zur Eintrittszeit des Thw in Cuxhaven und einer windstauwirksamsten Richtung $WR_0 = 262^\circ$

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

$$Stau_{STP} = m_1 \cdot Stau_{CUX} + m_2 \cdot \Delta Q_{ND} + m_3 \cdot \tau^{eff} + C \quad (Gl. 3)$$

Mit Hilfe der multiplen Regressionsrechnung können die Koeffizienten m_i und die Konstante C ermittelt werden. Da sich letztere mit 1,2 cm sehr nahe Null ergibt, wurde dieser Freiheitsgrad im Modell unterbunden, ohne dass sich dadurch für die Koeffizienten oder den Standardfehler ($\Delta F=0,0002$) eine größere Änderung ergäbe. Für die zu Null fixierte Konstante ergibt sich somit:

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

Mit dieser Gleichung ist es möglich, den Stau von Cuxhaven nach Hamburg-St. Pauli unter Berücksichtigung des Windes in Brunsbüttel zu übertragen. Die bessere Korrelation der Stauübertragung zwischen Cuxhaven und St. Pauli zeigt sich in der nachfolgenden Abbildung 39 sehr deutlich. Dort sind die Modellergebnisse ohne (links) und mit (rechts) Berücksichtigung des lokalen Windes im Elbmündungsgebiet den Beobachtungen am Pegel Hamburg St. Pauli gegenüber gestellt.

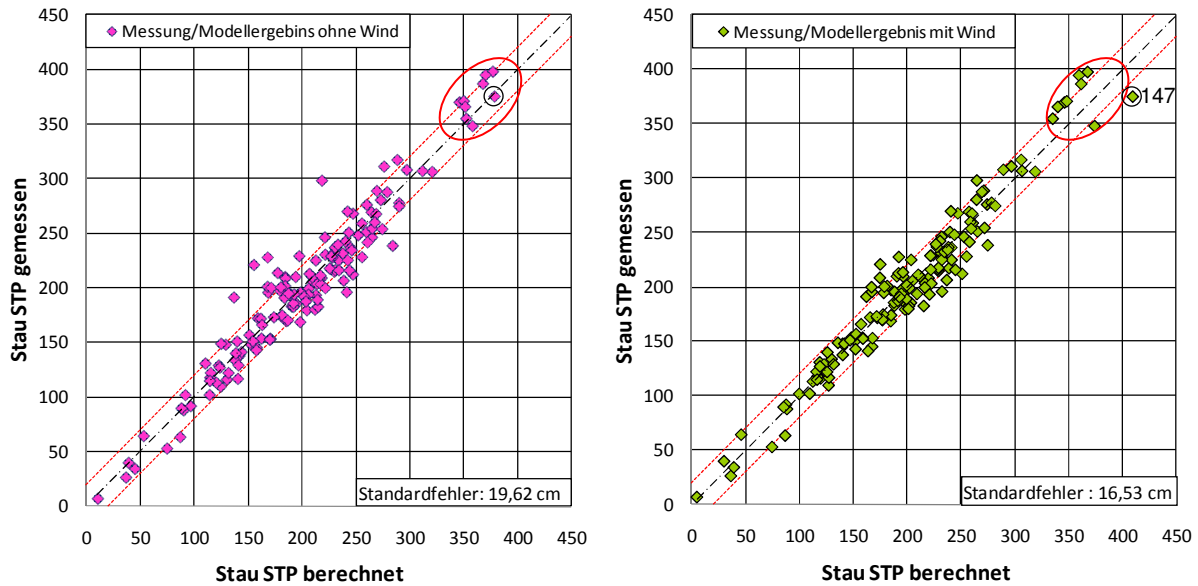


Abbildung 39: Vergleichende Betrachtung der Modellergebnisse zur Übertragung des Staus von CUX nach STP ohne (links) und mit (rechts) Berücksichtigung des Windes im Mündungsgebiet

Durch die Berücksichtigung des Windes im Mündungstrichter der Elbe (Abbildung 39; rechts) 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 dem um $3,1 \text{ cm} \approx 16\%$ kleineren Standardfehler von nunmehr $16,53 \text{ cm}$ 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, wie in Abbildung 40 besser ersichtlich wird.

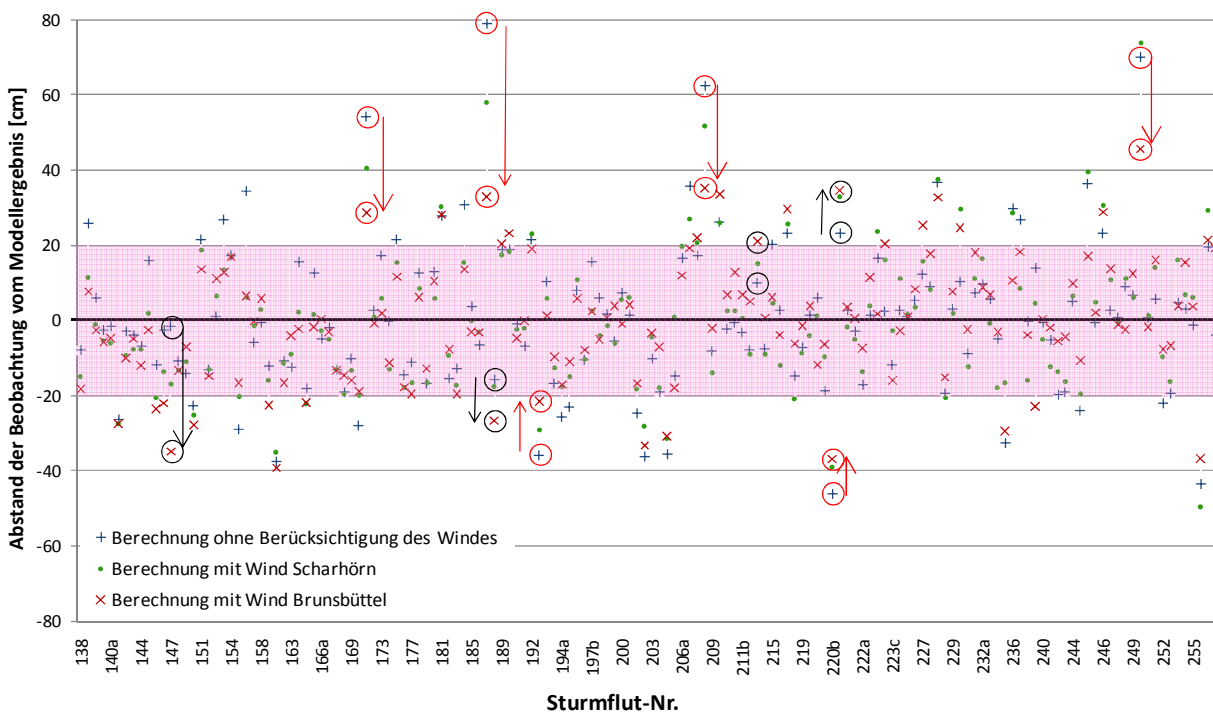


Abbildung 40: Chronologische Auftragung der Differenzen zwischen Beobachtung und Modellprognose für den Pegel St. Pauli unter Berücksichtigung des lokalen Windes in Brunsbüttel bzw. Scharhörn

In der chronologischen Darstellung der Differenzen zwischen den beobachteten und prognostizierten Staubeträgen für den Pegel St. Pauli ist die Verbesserung der Übertragungsfunktion besonders gut zu erkennen. Um den gedanklichen Transfer von den Streudiagrammen in Abbildung 39 zu erleichtern, sind die Differenzen in Abbildung 40 entgegen der üblichen Konvention ausnahmsweise invers aufgetragen, so dass die Abstände der Streupunkte, die oberhalb der Diagonalen liegen auch in dieser Darstellung auf der positiven Ordinatenachse ausgewiesen werden.

Neben den Differenzen zu den Modellergebnissen unter Verwendung des Windes der Station Brokdorf sind ergänzend auch noch einmal die Ergebnisse, die sich unter Verwendung der Station Scharhörn ergäben, aufgenommen worden. Die bereits in Kapitel 4.5.1 getroffenen Aussagen zur schlechteren Darstellbarkeit des Windstaueffektes im Mündungstrichter durch den auf der Insel Scharhörn registrierten Wind werden durch diese Darstellung bestätigt.

Bei den gekennzeichneten Sturmfluten (roter Kreis/Pfeil) sind bei der Übertragung Verbesserungen zwischen 20 – 50 cm erkennbar, deren Ursache auf die Windentwicklung zwischen Cuxhaven und Brokdorf zurückzuführen ist. Allerdings hat die Berücksichtigung des lokalen Windes bei einigen Sturmfluten auch zu einer Verschlechterung der Übertragung geführt (schwarzer Kreis/Pfeil). Für beide Fälle sind in der folgenden Tabelle 7 Beispiele dargestellt.

Verbesserung der Stau-Werte		Verschlechterung der Stau-Werte [cm]	
Sturmflut Nr.	Wert [cm]	Sturmflut Nr.	Wert
62	14,36	147	33,35
171	25,5	188	10,93
187	45,99	213	10,98
208	27,38	221	11,27
220b	9,19		
250	24,41		

Tabelle 7: Verbesserung/ Verschlechterung der Stauprognose durch die Berücksichtigung des lokalen Windes bei der Übertragung des Staus von Cuxhaven nach Hamburg

Die Verschlechterungen konzentrieren sich unglücklicherweise auf den Bereich der Sturmfluten mit sehr hohen Stauwerten (vgl. Markierung in (Abbildung 39)), was insbesondere bei der Sturmflut Nr. 147 vom 24.11.1981, die mit einem Hochwasserscheitel von PN +1081 cm am Pegel St. Pauli zu den Top 5 Sturmfluten in Hamburg zählt, negativ zu Buche schlägt. Die Sturmflut Nr. 147 trat am Pegel Cuxhaven mit einer Scheitelhöhe von PN +951 cm ein, womit sich also eine - für die Höhe des Sturmflutscheitels in Cuxhaven – nicht ungewöhnliche Scheiteldifferenz $\Delta Th_{W_{HBG-CUX}}$ von 130 cm ergibt. Das Stau-Maximum in Cuxhaven von rund 350 cm tritt bei der Sturmflut Nr. 147 zum Zeitpunkt des astr. Tnw Cuxhaven ein; anschließend verbleibt der Stau für mehrere Stunden auf einem hohem Niveau von rd. 330 cm. Der Eintritt des Hochwasserscheitels erfolgt in Cuxhaven rund 1,5 Stunden früher als das astronomisch vorausberechnete Thw, erst danach erfolgt ein langsamer Rückgang des Staus.

Die auf Scharhörn gemessene Windgeschwindigkeit liegt während des gesamten Sturmflutverlaufs bemerkenswert gleich bleibend bei etwa 25 m/s, und dies bei einer ebenfalls recht konstanten Windrichtung von 270 bis 280 Grad. Allerdings weht auch hier ähnlich wie bei der Sturmflut-Nr. 206 während des Durchgangs des Hochwasserscheitels ein orkanartiger Wind über dem Mündungstrichter, der an der Station Brunsbüttel mit einer Windgeschwindigkeit von 30 m/s aus 250° registriert wurde.

Während die für den Pegel St. Pauli prognostizierte Scheitelhöhe bei dieser Sturmflut von dem Modellansatz ohne Berücksichtigung des Windes im Mündungsgebiet lediglich um 3 cm überschätzt wurde, beträgt der Fehler unter Einbeziehung der Windkomponente 36 cm. Eine genauere Betrachtung der einzelnen Modellkomponenten, aus denen sich der Stauzuwachs bis Hamburg zusammensetzt, zeigt jedoch, dass damit nicht die grundsätzliche Berechtigung der Windberücksichtigung in Frage zu stellen ist. Ganz im Gegenteil, denn die Komponente 'Stauzuwachs im Mündungstrichter infolge Windwirkung' liefert einen Staubeitrag, der sich im Modell mit 53,7 cm nur um 4,7 cm höher ergibt, als er sich am Pegel Brokdorf mit 49 cm tatsächlich eingestellt hat.

Der Proportionalitätsfaktor von 1,1587, der bei dem in Cuxhaven vorhandenen Stau von 302 cm im Sturmflutscheitel einen Beitrag von 48 cm zur Summe des Stauzuwachs bis Hamburg liefert, wird hingegen dem tatsächlich eingetretenen Stauzuwachs zwischen Brokdorf und Hamburg von nur 24 cm bei dieser Sturmflut nicht gerecht. Diese Feststellung bestätigt einerseits die Notwendigkeit, den möglichen Windstau effekt im Mündungstrichter zu berücksichtigen, zeigt aber andererseits auch auf, dass die weitere Transformation des Staus von Brokdorf nach Hamburg nicht nur linear von der Höhe des Staus in Cuxhaven, sondern von weiteren Faktoren abhängig ist.

Eine Besonderheit bei der Sturmflut Nr. 147 besteht darin, dass bereits die vorangegangene Tide mit einem Hochwasserscheitel von PN +923 cm am Pegel St. Pauli aufgelaufen war und als Sturmflut-Nr. 146 Eingang ins Kollektiv gefunden hat. Das eigentlich bemerkenswerte ist aber der außergewöhnlich hohe Stau von über 3 m im gesamten Ästuar während der Tideniedrigwasserphase zwischen den beiden Sturmfluten (vgl. Abbildung 41). Welche generelle Rolle diese Besonderheit für die Transformation des windinduzierten Staus haben könnte, wird in den weiteren Untersuchungen unter besonderer Beobachtung stehen.

GÖNNERT (1999, S. 35, Tab. 5.2) stellt zwar für die Sturmflut Nr. 147 in Cuxhaven einen Fernwelleneinfluss von 64 cm fest, allerdings ist hier darauf hinzuweisen, dass diese Fernwelle in der gleichen Tabelle erst mit dem Zeitstempel 25.11.81 4:00h gelistet ist und sich somit auf die Folgetide, der (niedrigeren) Sturmflut Nr. 148 bezieht. Eine erneute Betrachtung der Wasserstands- und Stauganglinien gibt jedoch auch für diese Zeit keinen Hinweis auf das Vorhandensein einer Fernwelle.

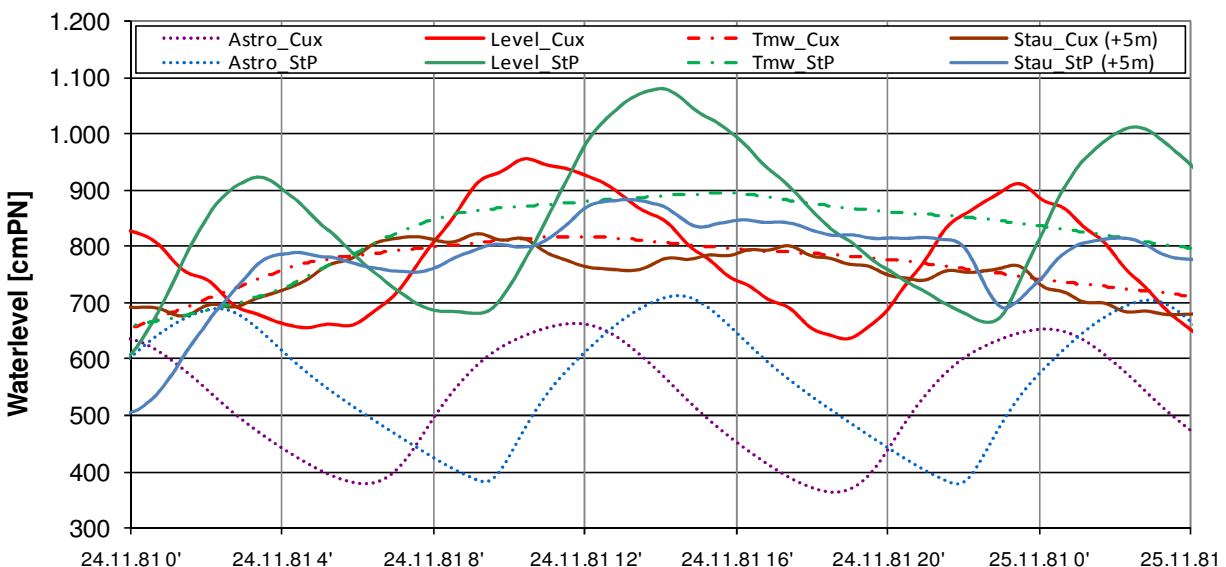


Abbildung 41: Ganglinien der Wasserstände und des Staus Sturmflut-Nr. 147 vom und 148 vom 24.11.1981

4.5.3 Größenordnung der an der Stauübertragung teilhabenden Modellkomponenten

Die nachstehende Tabelle 8 zeigt die Anteile der Komponenten Wellenkinematik/Hydrodynamik, Oberwasserabfluss sowie Wind, exemplarisch für typische Windgeschwindigkeiten im Mündungstrichter während einer sehr schweren Sturmflut und der windstauwirksamsten Windrichtung von 260° in Brunsbüttel. Es ist deutlich erkennbar, dass besonders der lokale Wind einen hohen Anteil an der Stauzunahme haben kann.

Einflussgröße	Anteil an der Stauzunahme bis Hamburg		
	20 m/s	25 m/s	30 m/s
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
Oberwasserzufluss:	$\pm 1,06 \text{ cm} / 100\text{m}^3/\text{s}$ (als Δ zu $Q_m=700\text{m}^3/\text{s}$)		

Tabelle 8: Anteil der Komponenten des erweiterten statistischen Modells an der Übertragung des Staus von Cuxhaven nach Hamburg

Aus Tabelle 8 wird deutlich, dass durch die Komponente der Wellenkinematik bzw. Hydrodynamik d.h. durch die Morphologie und die physikalische Einflüsse, wie z.B. Trichtereffekt und Reflexion, die im Ästuar eine Zunahme von im Mittel etwa 16% bezogen auf den Stau in Cuxhaven generieren, in der Regel der größte Anteil am Stauzuwachs in Hamburg beigetragen wird.

Der Einfluss des Oberwassers ist dagegen mit 10,6 cm je $1000\text{m}^3/\text{s}$ verhältnismäßig gering. Diese Zahl entspricht im Übrigen den Ergebnissen von früheren Studien zum Oberwassereinfluss auf Sturmflut-scheitelwasserstände in Hamburg, die bereits in Kapitel 2.4. vorgestellt wurden. Der Windstauwirkung 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 Stauwirkung am Gesamtstauzuwachs mit mehr als einen halben Meter sogar größer werden, als der Anteil der hydrodynamischen Komponente.

4.5.4 Verwendung von Windvorhersagen zur Stauübertragung im Mündungstrichter

Eine ganz wesentliche Erkenntnis aus den Analysen zur Stauübertragung von Cuxhaven nach Hamburg ist somit, dass der lokale Wind im Elbmündungsgebiet bei vielen Ereignissen einen beträchtlichen Einfluss auf die Erhöhung der Sturmflut haben kann und seine Berücksichtigung bei der Vorhersage von Sturmfluten somit notwendig ist. Für die Verwendung des oben beschriebenen Staumodells im Rahmen des empirisch-statistischen Sturmflutvorhersageverfahrens, das beim Hamburger Sturmflutwarndienst WADI zum Einsatz kommt, ergibt sich hierdurch allerdings das Problem, dass eine windbedingte Stauerhöhung durch Wind- oder Wasserstandsmessungen während des Ereignisses erst sehr spät erfasst werden kann: Mittels Pegeln kann eine in der Elbmündung durch lokalen Wind erhöhte Sturmflut 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 etwa zwei Stunden.

Im Hinblick auf eine eventuell notwendig werdende Veranlassung von Sperrungen und Räumungen im Hamburger Hafen wäre eine Modifikation der Sturmflutvorhersagen in einem derart kurzen Zeitraum vor dem Eintritt des Hochwasserscheitels problematisch (vgl. Kap. 4.3.2). Das dem WADI-Vorhersageverfahren zu Grunde liegende Prinzip, Sturmflutprognosen auf Basis von aktuell gemessenen Werten zu ermitteln, kann vor diesem Hintergrund zu unbefriedigenden Prognosen führen. Es ist deshalb nahe liegend, angesichts der gewonnenen Kenntnisse über die Bedeutung des lokalen Windes im Mündungstrichter, die Güte von vorhergesagten Winddaten für dieses Gebiet zu prüfen.

Im Folgenden werden entsprechende Untersuchungen für die Windvorhersagen aus dem LM-Modell bzw. dem COSMO-EU-Modell des Deutschen Wetterdienstes vorgestellt. Bis 2006 wurde beim DWD das LM-Modell verwendet, das einen Vorhersagezeitraum von 48 Stunden hatte. Seit 2006 werden die Vorhersagen mit COSMO-EU durchgeführt. Der Vorhersagezeitraum beträgt hier 72 Stunden. Die Vorhersagen werden um 00 Uhr und um 12 Uhr durchgeführt. Veröffentlicht werden die Daten ca. 6 Stunden später. Ein Teil der Gitterpunkte aus dem COSMO-EU-Modell sind auch Bestandteil des Seewetterinformationssystems „KÜSTE“ des DWD, das auch dem WADI zur Verfügung steht.

„Historische“ Vorhersagedaten aus dem LM- bzw. dem COSMO-EU-Windprognosemodell werden beim BSH ab 2002 archiviert. Für diese Analyse werden daher 13 Sturmfluten ab 2002 ausgewählt, die sich durch eine ausgeprägte Staudynamik im Ästuar auszeichnen (vgl. Kap.4.6.4). Dabei handelt es sich um die folgenden Sturmfluten:

Für Prognose-Test ausgewählte Sturmfluten		
236 / 28.01.2002	250 / 12.02.2005	257 / 26.06.2007
239 / 26.02.2002	252 / 01.11.2005	258 / 09.11.2007
241 / 27.10.2002	253 / 31.12.2006	259 / 01.03.2008
244b / 20.03.2004	254 / 11.01.2007	
248 / 08.01.2005	255 / 18.01.2007	

Tabelle 9: Ausgewählte Sturmfluten für den Test der COSMO-EU- Windprognosen

Der Vergleich der Vorhersagen mit gemessenen Winddaten erfolgte für die drei Messstationen Scharhörn (SCH), Cuxhaven (CUX) und Brunsbüttel (BRU); diesen wurden Prognosewerte naheliegender Gitterpunkte aus dem COSMO-EU-Modell zugeordnet (Abbildung 42):

- Scharhörn [SCH]: Punkt E760
- Cuxhaven [CUX]: Punkt E728
- Brunsbüttel [BRU]: Punkt E694.

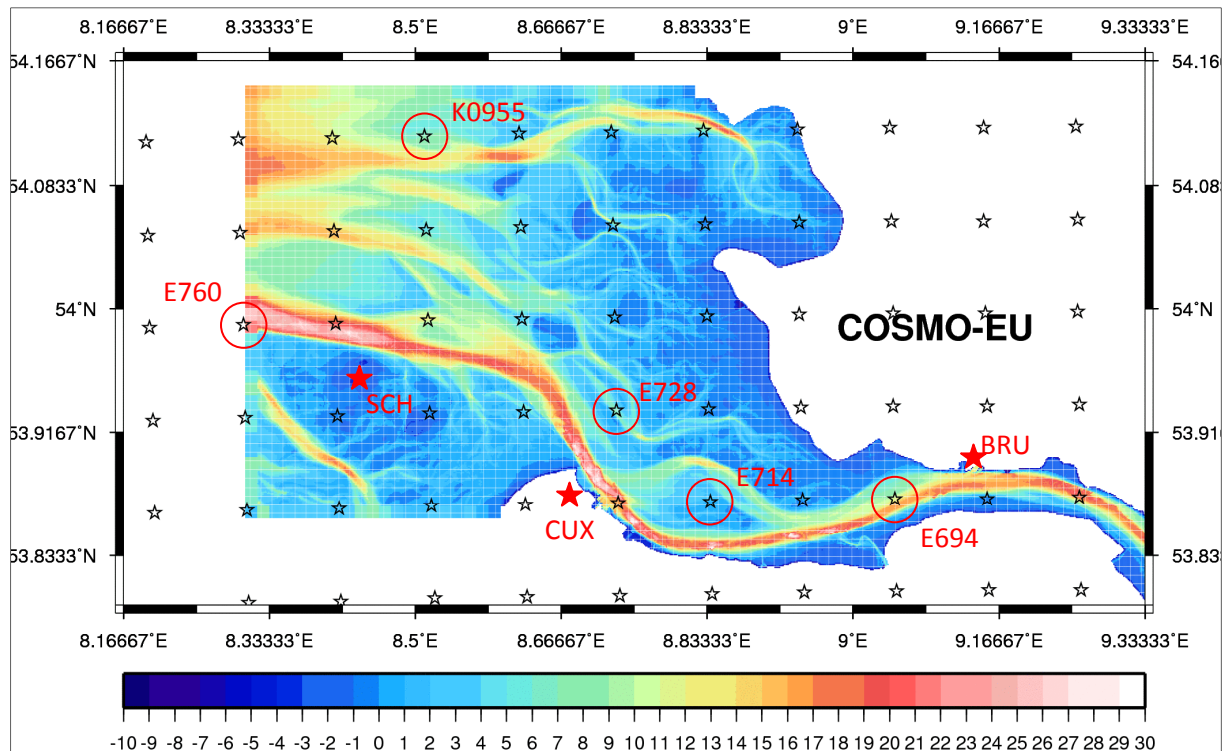


Abbildung 42: Auszug aus dem COSMO-EU-Gitter für die Windvorhersage beim DWD mit den Messstationen (Scharhörn, Cuxhaven, Brunsbüttel) sowie ausgewählten Gitterpunkten

Gitterpunkt	LM-Modell		COSMO-EU	
	R-Wert	H-Wert	R-Wert	H-Wert
K0955	850.900	5.411.500	851.070	5.411.600
E694	904.700	5.387.100	904.780	5.387.180
E714	883.600	5.386.900	883.690	5.386.990
E728	872.800	5.393.000	872.950	5.393.140
E760	830.200	5.398.700	830.370	5.398.900

Tabelle 10: Gauß-Krüger-Koordinaten der Gitternetzpunkte für die Windvorhersage

Für die Untersuchung wird nur die Windgeschwindigkeit betrachtet. Hierbei wird das Verhältnis zwischen eingetretener und vorhergesagter Windgeschwindigkeit – jeweils zum Quadrat – gebildet, da die quadrierte Windgeschwindigkeit direkt proportional zur Schubspannung an der Wasseroberfläche wirkt und über den Vorhersagezeitraum aufgetragen (vgl. Abbildung 43)

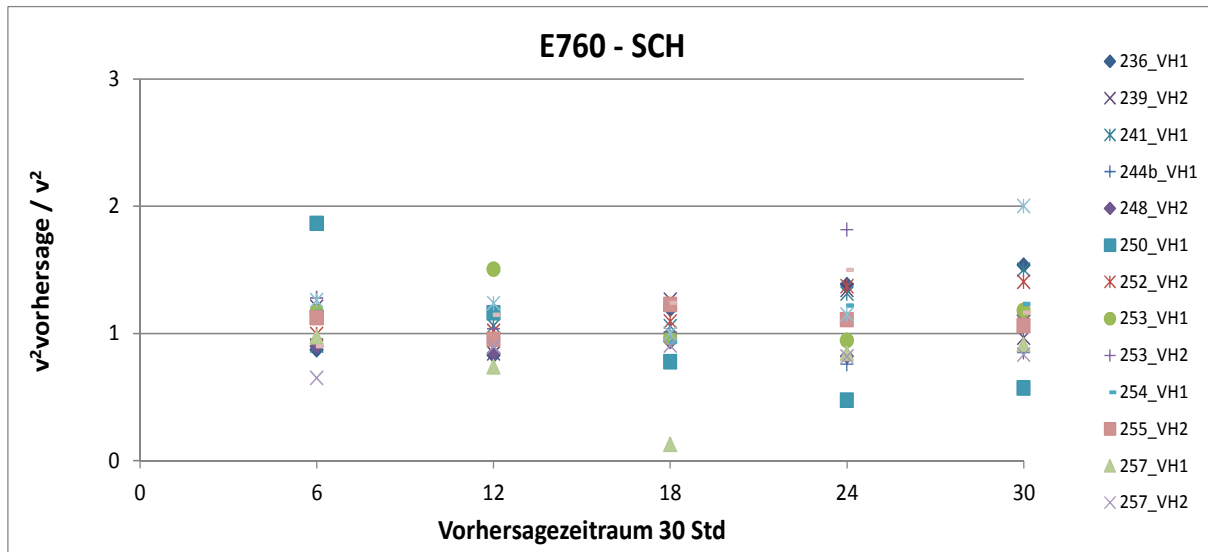


Abbildung 43: Verhältnis der quadrierten Windgeschwindigkeiten der vorhergesagten und eingetretenen Windgeschwindigkeiten für E760 und Scharhörn für 13 ausgewählte Sturmfluten

Die beste Übereinstimmung zwischen vorhergesagten und gemessenen Windgeschwindigkeiten ergibt sich dabei für den Vorhersagepunkt „E760“ mit Bezug zur (etwa 10 km südöstlich gelegenen) Messstation Scharhörn, während die Vorhersagen für die Punkte „E728“ (Bezug: Station Cuxhaven) und „E694“ (Bezug: Station Brunsbüttel) weniger gut sind. vgl. Abbildung 43 zeigt das Ergebnis des Vergleichs exemplarisch für die Station Scharhörn mit Punkt „E760“. Für eine bessere Übersichtlichkeit sind die Werte über 6 Stunden gemittelt und der Vorhersagezeitraum auf 30 Stunden begrenzt.

Da eine Untersuchung von nur 13 Sturmfluten eher einen stichprobenartigen Charakter aufweist, sind die dargestellten Ergebnisse mit einiger Vorsicht zu beachten. Gleichwohl ist zunächst festzuhalten, dass allgemein gültige Aussagen zur Verwendbarkeit der Windprognosen des DWD nicht möglich sind, da die Abweichungen zu den „gemessenen“ Werten von Ereignis zu Ereignis deutlich differieren. Für den größten Teil der untersuchten Sturmfluten weisen die Prognose-Winddaten eine recht gute Übereinstimmung mit den gemessenen Geschwindigkeiten auf. Andererseits zeigt die Abbildung auch, dass die DWD-Vorhersagen nicht in allen Fällen hinreichend genau sind: In Einzelfällen sind beträchtliche Unterschätzungen (Faktor 0,5) sowie deutliche Überschätzungen (Faktor 2,0) der Windgeschwindigkeiten zu verzeichnen.

Im Hinblick auf die Fragestellung, inwieweit die Möglichkeit einer Bereitstellung verlässlicher Windinformationen für das Elbmündungsgebiet zur frühzeitigen Erkennung lokaler Stauerhöhungen besteht, ist das Ergebnis der Untersuchung also nicht vollkommen befriedigend, da die DWD-Prognosemodelle offenbar 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. Insoweit zeigen die Ergebnisse, dass das grundsätzliche Prinzip des WADI, für die Vorhersagen auf gemessene Winddaten zurückzugreifen, auch in Zukunft unverzichtbar ist.

Auf der anderen Seite sind die Ergebnisse für einen Teil der Sturmfluten immerhin so gut, dass eine frühzeitige Betrachtung der DWD-Windprognosen in vielen Fällen sehr hilfreich im Sinne einer Vorabschätzung des Sturmflutverlaufs sein kann.

4.6 Vertiefende Untersuchungen zur Kinematik des Staus

4.6.1 Motivation zur Analyse der 'Staukinematik'

Eine wichtige Erkenntnis aus den bisherigen Untersuchungen zur Transformation des Staus im Ästuar ist der Einfluss des lokalen Windes im Mündungsgebiet. Er spielt eine wichtige Rolle bei der Entwicklung des Staus zwischen Cuxhaven und Brokdorf, der sich dann auch auf die Scheitelhöhe in Hamburg niederschlägt. Doch nicht jede Sturmflut wird so maßgeblich vom Windstau im Mündungsgebiet beeinflusst wie die Sturmflut Nr. 187 und kann trotzdem einen außergewöhnlich hohen Stauzuwachs auf dem Weg von Cuxhaven nach Hamburg erfahren, wie beispielsweise die Sturmflut Nr. 221. Dagegen erfahren andere Sturmfluten, wie am Beispiel der Flut Nr. 256 schon gezeigt wurde, kaum einen Stauzuwachs. Bei der Sturmflut-Nr. 220b wird der geringe Stauzuwachs von Brokdorf nach Hamburg trotz des relativ großen Staus von knapp 2 m in Cuxhaven durch den zuvor vorhandenen Stauabbau bis Brokdorf sogar neutralisiert.

Die nach ihrem Stauzuwachs zwischen Cuxhaven und Hamburg absteigend sortierte Rangfolge der im Rahmen dieser Untersuchungen ausgewerteten Sturmfluten seit 1980 macht deutlich, dass der Stau in Cuxhaven allein nur ein schwacher und gelegentlich auch ein trügerischer Prädiktor für die vorherzusagende Sturmflutscheitelhöhe in Hamburg ist. Die Tatsache, dass der zweithöchste beobachtete Stauzuwachs (nach der Sturmflut Nr. 187 mit 122 cm) mit exakt 100 cm bei einer Sturmflut auftrat (Nr. 250 am 12.02.2005), die in Cuxhaven einen undramatischen Stau von mageren 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.

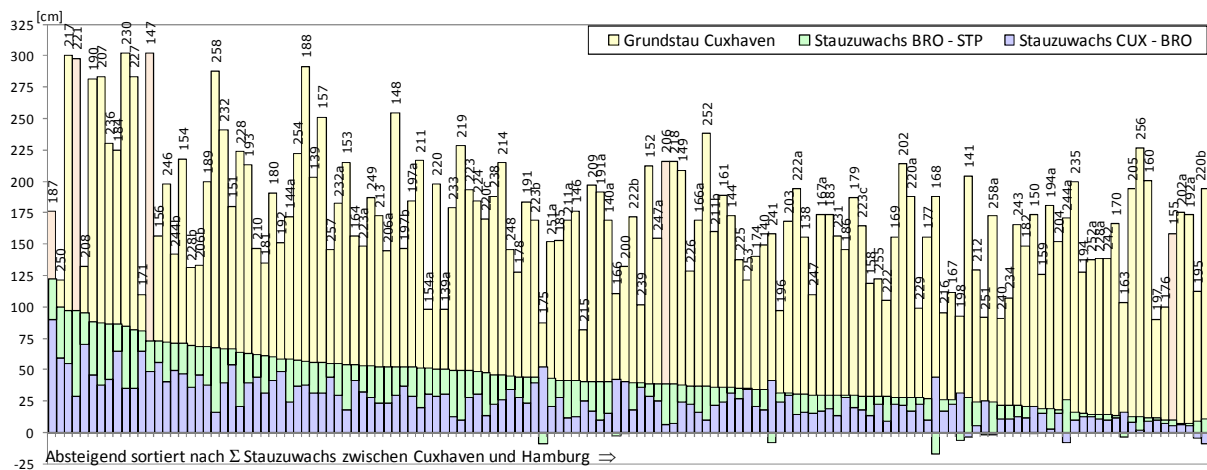


Abbildung 44: Stauzuwachs Cuxhaven-Brokdorf und Brokdorf-St. Pauli vor dem Grundstau in Cuxhaven

Die bei den durchgeführten Einzelbetrachtungen festgestellten unterschiedlichen Charakteristika in der zeitlichen Entwicklung des Staus in Cuxhaven hinsichtlich Geschwindigkeit des Stauanstiegs und der Phasenlage zum Tidesignal sind Veranlassung, diese sehr vielschichtige Kinematik des Staus zumindest qualitativ ein wenig näher zu beleuchten. Die Methodik zur Analyse der Staukinematik folgt der aus den Beobachtungen abgeleiteten Vorstellung, dass sich das aus der Nordsee einschwingende periodische Gezeitsignal und die solitäre "Stauwelle" im Ästuar überlagern und sich gegenseitig in Abhängigkeit von der Dynamik der Staugenerierung nicht-linear beeinflussen. Der erste Schritt zur Analyse dieser Wechselwirkung besteht somit in einer Trennung der beiden Anteile an der beobachteten lokal veränderlichen Wasserspiegelauslenkung.

4.6.2 Zur Eignung des Tidemittelwassers einer Sturmtide als Stauäquivalent

Im Allgemeinen wird der Stau als Differenz der gelaufenen Sturmtide zum astronomisch vorausberechneten Gezeitengang oder der an die astronomisch vorausberechneten Eintrittszeiten angepassten mittleren Tidekurve angegeben (vgl. Abbildung 5 in Kapitel 2.2). Diese Methode beinhaltet jedoch einige Unschärfen, die zum einen aus dem Verfahren der Gezeitenvorausberechnung auf Basis statistischer Analysen vergangener Zustandsgrößen resultieren und zum anderen durch die für Tidewellen geltenden hydrodynamischen Gesetze erklärbar sind; sie bereiten häufig Schwierigkeiten bei der Interpretation des Resultats.

Zur Gezeitenvorhersage an den Küsten der Nordsee müssen die Konstanten und Korrekturfaktoren für die Amplituden und Phasen der Partialtiden aus einer Reanalyse gelaufener Tiden gewonnen werden. Der diesen Analysen zu Grunde liegende Beobachtungszeitraum reicht mindestens 10 Jahre in die Vergangenheit zurück, um die stochastischen Einflussgrößen die in Naturbeobachtungen enthalten sind, durch Mittelung zu reduzieren. Aktuell basiert die Gezeitenvorausberechnung beim BSH auf einen Beobachtungszeitraum von 19 Jahren, um auch die Periode der Nodal-Tide (18,6 Jahre) zu berücksichtigen.

In diesen Zeitspannen können sich aber insbesondere in den Ästuaren signifikante Änderungen in den hydrologischen Zustandsgrößen vollziehen. Seien die Ursachen nun anthropogen oder natürlichen Ursprungs (Häufung von extremen Oberwassern, Meeresspiegelanstieg), sprunghaft, trendbehaftet oder von stochastischer Natur: Reanalysen über derartig lange Zeitspannen werden als Ergebnis einen Mittelwert ausweisen, der bei trendbehafteten Änderungen möglicherweise einen Zustand widerspiegelt, wie er in der Mitte des Beobachtungszeitraumes einmal vorhanden war.

Die Änderungen der Tidekennwerte an einem Küstenpegel wie Cuxhaven sind sicherlich nicht so groß wie im inneren Ästuar, so dass eine durchaus brauchbare Grundlage für eine realistische Stauermittlung gegeben wäre, aber die Tidewelle läuft bei Sturmfluten nicht immer synchron zu dem für mittlere Verhältnisse vorausberechneten Gezeitensignal. Die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit der Tidewelle wird maßgeblich von der Wassertiefe bestimmt. Als Näherung wird häufig die von (RUSSEL, 1840) für eine solitäre Welle im Kanal um die Größe der Amplitude erweiterte Gleichung von LAGRANGE zur Berechnung der Geschwindigkeit einer linearen Flachwasserwelle verwendet:

$$c = \sqrt{g(d + \eta)}$$

mit d : mittlere Wassertiefe unter dem Ruhewasserspiegel (RWS)
 η Wasserspiegelauslenkung bezogen auf den Ruhewasserspiegel

Auch wenn die Vernachlässigung der Terme höherer Ordnung die Anwendung dieser linearen Gleichung eigentlich auf Wellen kleiner Amplituden in Relation zur Länge (gegeben) und Wassertiefe (nicht gegeben) beschränkt, wird der grundsätzliche Einfluss der Wassertiefe und Wellenhöhe auf die Fortschrittsgeschwindigkeit der nicht-linearen Flachwasserwelle hiermit tendenziell richtig wiedergegeben. Aus der Praxis der Sturmflutvorhersage bekannter sind die mittleren Laufzeitunterschiede der Hoch- und Niedrigwasserscheitel vom Pegel Borkum nach Cuxhaven, die für die senkrecht zur Küstenlinie propagierende Tidewelle etwa 130 km auseinander liegen. Während die Eintrittszeiten der Tideniedrigwasser im Mittel um rd. 148 Minuten differieren und damit eine Geschwindigkeit im Wellental von 14,6 m/s ergeben, verkürzt sich die Laufzeitdifferenz im Tidehochwasser auf 124 Minuten, was einer Geschwindigkeit von 17,5 m/s im Wellenberg gleichkommt.

Eine größere Wassertiefe hat also in der Theorie eine Beschleunigung der Welle zur Folge. Unter Staubedingungen während einer Sturmflut, die für tieferes Wasser in größeren Teilen der südlichen Nordsee führen, erreicht das reale Gezeitensignal somit den Pegel Cuxhaven früher als astronomisch für mittlere Verhältnisse vorausberechnet. In der Staukurve sorgt diese Phasenverschiebung, ohne Einfluss von Wind, für die typischen ‚Artefakte‘ (HORSBURGH & WILSON, 2007) insbesondere um die Niedrigwasserzeit, wenn die beschleunigte Tidewelle das Tal bereits durchschritten hat und der Pegel schon wieder steigt, während der Gang der astronomischen Gezeitenkurve noch fällt.

Abbildung 45 zeigt diesen Effekt am Beispiel einer um 15 Minuten verfrüht eingetretenen Kopie der astronomischen Tidekurve. Bei einer mittleren Laufzeit des astronomischen Tideniedrigwassers von 275 Minuten für die Strecke Terschelling - Cuxhaven entspräche die hier gewählte Laufzeitverkürzung einer Erhöhung der Wellenfortschrittsgeschwindigkeit um 5,7%, was theoretisch erst bei einer staubedingt um 2,5 m vergrößerten Wassertiefe im Wellental erreichbar wäre, in der Praxis aber durchaus häufiger anzutreffen ist.

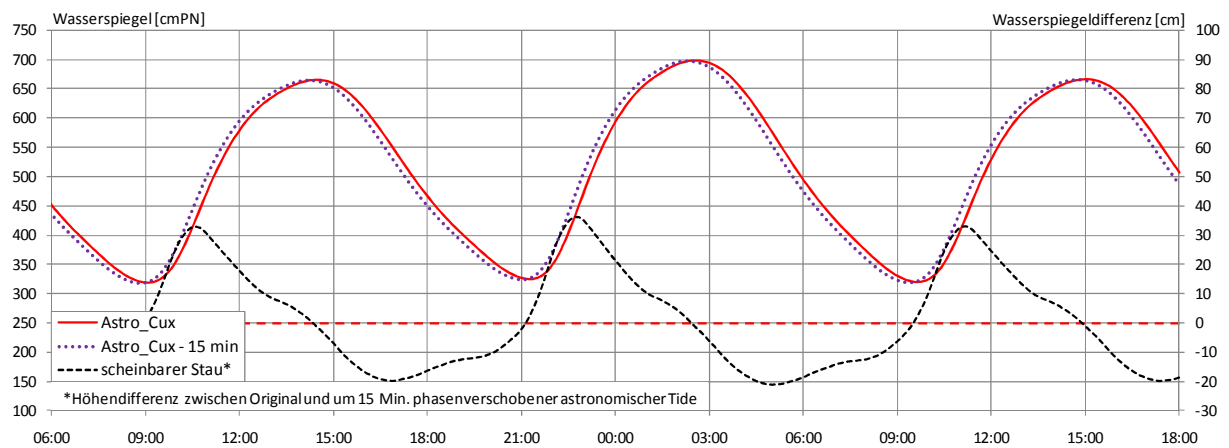


Abbildung 45: Scheinbarer Stau durch Phasenverschiebung der astronomischen Ganglinie um 15 Minuten

Ein weiterer theoretischer Effekt, den man bei einer Stauanalyse besonders hoher Sturmflutereignisse berücksichtigen sollte, liegt in der mit der beschleunigten Wellenfortschrittsgeschwindigkeit einhergehenden Umlagerung von kinetischer in potenzielle Energie, die der Grundsatz der Energieerhaltung verlangt. Das Quadrat des Verhältnisses der unter Staubedingungen gemessenen Amplitude ($\eta = Thw - Tmw$) zur astronomisch vorhergesagten Amplitude verhält sich also invers proportional zur kinetischen Energie. Da letztere sich mit der in tieferem Wasser beschleunigten Wellenfortschrittsgeschwindigkeit erhöht, wird sich die Amplitude folglich verringern.

$$\frac{\eta_{Stau}}{\eta_{Astro}} = \sqrt{\frac{c_{Astro}}{c_{Stau}}}$$

Im obigen Beispiel wäre das - bezogen auf die mittlere astronomische Amplitude in Cuxhaven - allerdings nur eine Reduzierung von 4 cm, was in den Beobachtungen kaum vom Stau zu differenzieren sein dürfte. Anders sieht es dagegen in einem vergleichsweise flachen Ästuar wie der Tideelbe aus. Hier ergeben sich aus der Tidelaufzeit von Cuxhaven nach St. Pauli ($Tnw=238'$; $Thw=211'$) viel langsamere Wellengeschwindigkeiten von 7,0 m/s im Wellental resp. 7,9 m/s im Wellenberg, weshalb hier eine staubedingte Erhöhung des RWS-Niveaus um 2,5 m eine deutlich größere Änderung in der Geschwindigkeit (+20%) und damit in der Amplitudenhöhe von i.M. rd. -16 cm bedingen kann.

Im Ästuar wirken neben der windangetriebenen Niveauerhöhung des Ruhewasserspiegels noch weitere Einflussgrößen wie die abgeführte Oberwassermenge oder das durch den Massentransport aufgebaute mittlere Potenzialgefälle auf die Transformation der Amplitude und Phase des an der Mündung anstehenden Gezeitensignals ein. Eine Analyse der lokalen Stauentwicklung auf Basis der Differenz zur vorausberechneten astronomischen Gezeit führt aus den vorgenannten Unwägbarkeiten zu einer kaum interpretierbaren Verfälschung des Bildes (Artefakte).

Im Rahmen der folgenden Untersuchungen wurden daher die an den Pegeln Cuxhaven und St. Pauli gemessenen Wasserstandganglinien jeweils in ihr Tidemittelwasser und das um das Tidemittelwasser periodisch schwingende Residuum zerlegt. Geleitet von der Vorstellung, dass der Einfluss des Windes über der Nordsee sich im Mittel in einer Anhebung des Tidemittelwassers widerspiegelt, sollte selbiges als qualitatives Stauäquivalent geeignet sein, die Transformation des reinen Stauanteils im Ästuar besser zu beschreiben. Als qualitatives Abbild des in der Wasserstandsganglinie enthaltenen Gezeitensignals kann das Residuum des Tidemittelwassers (kurz: Tmw-Residuum) dann als Grundlage für die Analyse der Veränderung von Amplitude und Phase dieser periodischen Schwingung dienen.

Durch die Trennung dieser beiden Anteile soll insbesondere der bereits in den Einzelanalysen (vgl. Kap. 4.4) als mögliche Ursache für die großen Abweichungen benannte Einfluss der zeitlichen Stauentwicklung (Staudynamik) auf die Transformation der summarisch gemessenen Wasserspiegelauslenkung detaillierter beleuchtet werden. Der Umfang der untersuchten Sturmfluten musste dafür allerdings auf die Ereignisse nach 1992 reduziert werden, für die auf digital aufgezeichnete Wasserstands- und Winddaten zurückgegriffen werden konnte. Der verbleibende Datensatz von 78 Sturmfluten kann aber als durchaus repräsentativ angesehen werden und die getroffenen Aussagen lassen sich grundsätzlich verallgemeinern.

4.6.3 Methodik zur Analyse der 'Staukinematik'

Das hier verwendete Tidemittelwasser wird durch Bildung des Mittels der 5-minütigen Wasserstandsaufzeichnungen über ein gleitendes Fenster von 745 Minuten Breite gewonnen. Die Methode der gleitenden Mittelwertbildung hat den gleichen Effekt wie ein Tiefpassfilter, der aus dem Signal alle Perioden mit Wellenlängen ≤ 745 Min entfernt, die folglich im Residuum enthalten sein müssen. Das Tmw-Residuum beinhaltet somit auch die maßgeblichen Partialtiden der Gezeit M_2 , S_2 bis M_6 und damit ein brauchbares Signal zur Beurteilung der Phasenlage der Grundschwingung der Pegelaufzeichnung im Vergleich zur astronomisch vorausberechneten Gezeit.

Das Tidemittelwasser bildet die Schwerelinie des Kurvenverlaufs, so dass - über eine Wellenlänge gesehen - die von der Tidekurve und dem Tidemittelwasser umschlossenen Flächen oberhalb und unterhalb der Schwerelinie gleich groß sein sollten. Da die Wellenperiode der aus vielen Partialtiden zusammengesetzten Gezeit aber nicht konstant ist wie die Breite des Filterfensters, wird das hier allerdings nicht ganz der Fall sein. Für den Zweck dieser Untersuchungen ist das aber belanglos.

In Abbildung 46 sind am Beispiel der Sturmflut-Nr. 247a vom 02.01.2005 das in dieser Weise extrahierte Tidemittelwasser und das Tmw-Residuum im Vergleich zum herkömmlich ermittelten Stau und dem für Cuxhaven und St. Pauli vorausberechneten astronomischen Gezeitengang dargestellt. Während in der oberen Darstellung (a) die Originalwerte der Pegelaufzeichnungen und astronomischen Gezeitenvorausberechnung bezogen auf Pegelnull abgebildet sind, wurde in der unteren Abbildung (c) für eine bessere Vergleichbarkeit der Tmw-Residuen mit den Phasen und Amplituden des astronomischen Gezeitensignals auch von letzterem das eigene Tidemittelwasser (ATmw) abgezogen.

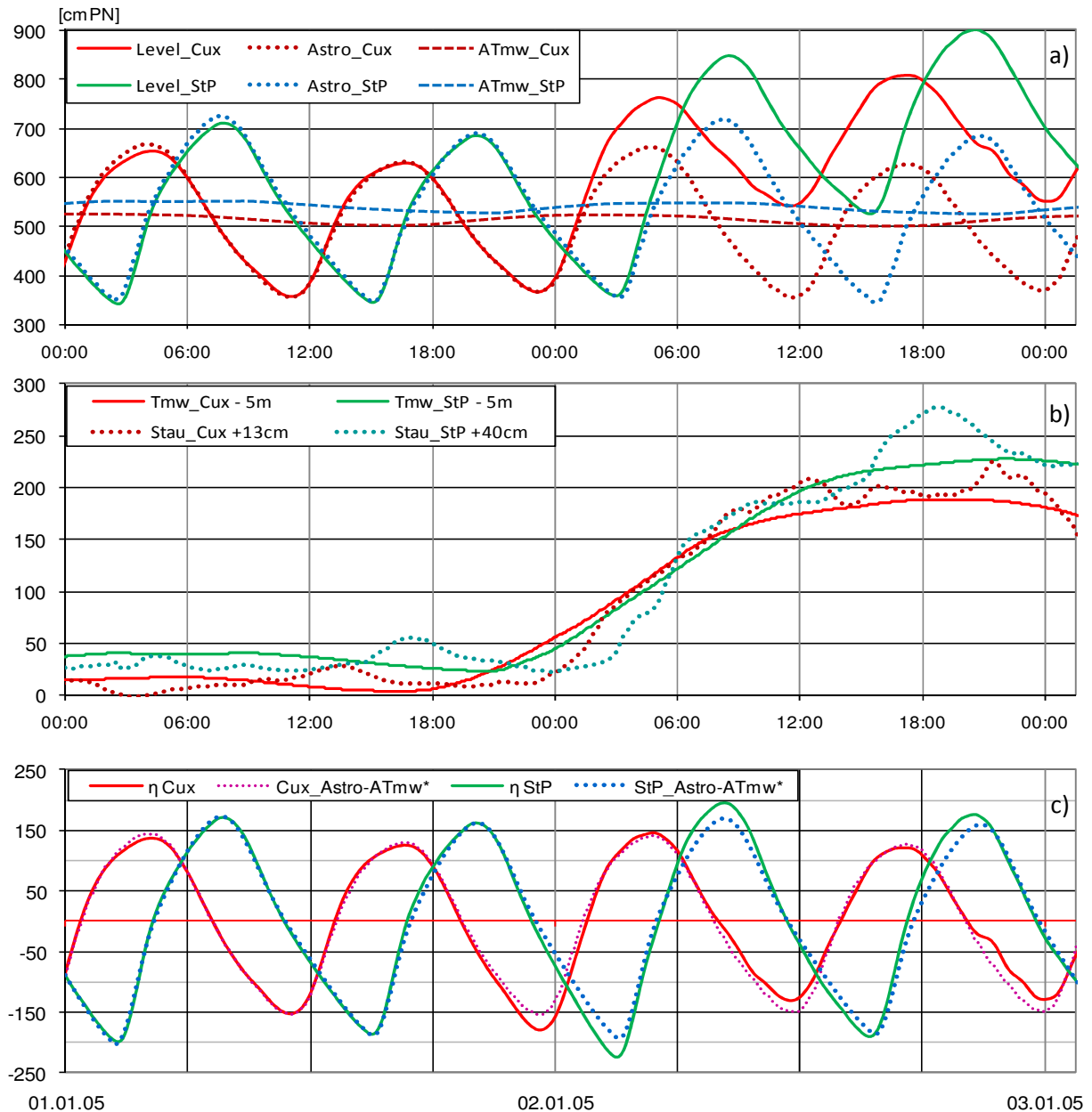


Abbildung 46: Tidemittelwasser und Tmw-Residuum (η) der Sturmflut-Nr. 247a vom 02.01.2005 im Vergleich zum Stau und der für Cuxhaven und St. Pauli vorausberechneten astronomischen Gezeit

Zum einen ist es erforderlich, vom astronomischen Gezeitensignal zumindest den Mittelwert des betrachteten Zeitraums abzuziehen, um auf ein mit dem Tmw-Residuum vergleichbares Niveau zu gelangen, zum Anderen weist der Gang des astron. Gezeitensignals aber auch eine periodische Schwingung mit beachtlicher Amplitude (hier: ca. 12,5 cm; vgl. ATmw-Kurven in Teil (a) der Abbildung) aus den eintägigen lunaren und solaren Gezeiten auf, die im Tmw-Residuum verfahrensbedingt herausgefiltert sind.

Das mittlere Niveau des astronomischen Gezeitensignals muss auch auf den mit der herkömmlichen Methode ermittelten Stau (Differenz zwischen Pegelaufzeichnung und astronomischer Gezeitenvorausberechnung) addiert werden, um zur besseren Vergleichbarkeit das Niveau der Staukurve im mittleren Diagrammteil (b) auf das Tmw-Niveau anzuheben. Von der Alternative das Tmw herabzusetzen, wurde hier Abstand genommen, um die Informationen über den Füllungsgrad und die phasengemittelte Spiegeldifferenz zwischen der Mündung und Hamburg nicht zu verfälschen.

Der optische Vergleich des so korrigierten Staus mit den Tidemittelwassern der Pegelaufzeichnung im mittleren Diagramm (b) belegt die prinzipielle Eignung des Tidemittelwassers als qualitatives Stauäquivalent. Gleichzeitig werden die in diesem ausgesuchten Beispiel noch vergleichsweise gemäßigten Artefakte besonders in den Gipfeln der Staukurven deutlich, die aus der Phasenverschiebung zwischen der astronomischen Tide und der gelaufenen Tide resultieren (vgl. Abbildung 45).

Vergleicht man das um ihr eigenes Tidemittelwasser reduzierte Gezeitensignal (Minor- M_2) mit dem Tmw-Residuum im unteren Diagramm (c), so kann bis zum windgenerierten Anstieg des Staus bzw. Tidemittelwassers eine gute Übereinstimmung sowohl in Phase als auch Amplitude konstatiert werden. Erst im ansteigenden Ast weichen die beiden Kurven geringfügig voneinander ab. Im Scheitel der Sturmflut-Nr. 247a am 02.01.2005, der mit dem maximalen Stau zusammen trifft, sind die beiden Kurven in Cuxhaven exakt deckungsgleich, während sie in Hamburg, wie auch schon beim vorausgegangenen Tideniedrigwasser, phasenverschoben sind.

Hinsichtlich der Aussagekraft der Amplitude des Tmw-Residuums sind allerdings einige Einschränkungen zu berücksichtigen, insbesondere wenn bei einer sehr dynamischen Stauentwicklung, d.h. bei plötzlich stark auffrischenden Winden, die Lage des Wasserspiegels entsprechend kurzfristig reagiert, was in dem hier gewählten Beispiel andeutungsweise gegen 0 Uhr am 02.01.2005 zu erkennen ist. Derartig plötzliche Veränderungen werden aufgrund des erforderlichen relativ breiten Fensters bei der Filterung im Tidemittelwasser „verschmiert“ und im Tmw-Residuum kompensiert, was zu einer Überhöhung der Amplitude führt. Im umgekehrten Fall eines plötzlich kollabierenden Windantriebes und einem damit verbundenen Rückgang des Staus, überschätzt das Tidemittelwasser in dieser Phase den tatsächlichen Stau und die Amplitude des Tmw-Residuums wird sich entsprechend niedriger einstellen als tatsächlich vorhanden. Unter Berücksichtigung dieser Feststellung bleibt eine Interpretation der möglichen Ursachen für die unterschiedliche Transformation des Gezeitensignals zwischen Cuxhaven und St. Pauli auf die Fälle beschränkt, in denen der Windstau und damit das Tidemittelwasser relativ langsam ansteigen oder sich bereits auf einem erhöhten mehr oder weniger konstanten Niveau befinden. Für das hier verfolgte Ziel, die Kinematik des Staus im Ästuar zu beschreiben, ist diese Einschränkung aber belanglos.

Um die im Vergleich zum Küstenpegel Cuxhaven gegebenenfalls differenzierte oder aber auch parallel verlaufende zeitliche und höhenmäßige Entwicklung des Staus im inneren Ästuar besser analysieren zu können, wird das aus der zuvor dargestellten Zerlegung des Tidesignals gewonnene Tidemittelwasser der beiden zu vergleichenden Pegel phasensynchronisiert.

Als Marker für die Bestimmung der zeitlichen Parallelität beider Signale bietet sich sowohl die Synchronisierung der Scheitel der beiden Tmw-Residuen, als auch die Gradienten dh/dt des Tidemittelwassers an. Letzteres zeigt an, mit welcher zeitlichen Verzögerung die Reaktion des Tidemittelwassers bzw. des Staus am Pegel St. Pauli auf eine positive oder negative Beschleunigung des Eingangssignals am Küstenpegel erfolgt.

Diese Option sollte bevorzugt bei sehr dynamischer Stauentwicklung angewendet werden, um ggf. eine unterschiedliche Laufzeit der nur unter dieser Voraussetzung entstehenden Stauwelle im Vergleich zum Tmw-Residuum zu erkennen. Bei einer weniger dynamischen Stauentwicklung ist in der Gradienten des Tidemittelwassers kaum ein deutliches Signal auszumachen, welches als Marker zur Synchronisierung dienen könnte, weshalb in diesen Fällen die Scheitel der beiden Tmw-Residuen in Deckung gebracht wurden.

In Abbildung 47 ist die Methodik auf die zuvor schon dargestellte Sturmflut Nr. 247a angewendet, allerdings wurde hier zu Gunsten einer höheren zeitlichen Auflösung auf die Wiedergabe der ersten 12 Stunden des der Flut vorausgegangenen Tages verzichtet. Anstelle einer Wiederholung der Wasserstands- und Tmw-Ganglinien beider Pegel wird auf die Abbildung 46 (Teile a und b) verwiesen.

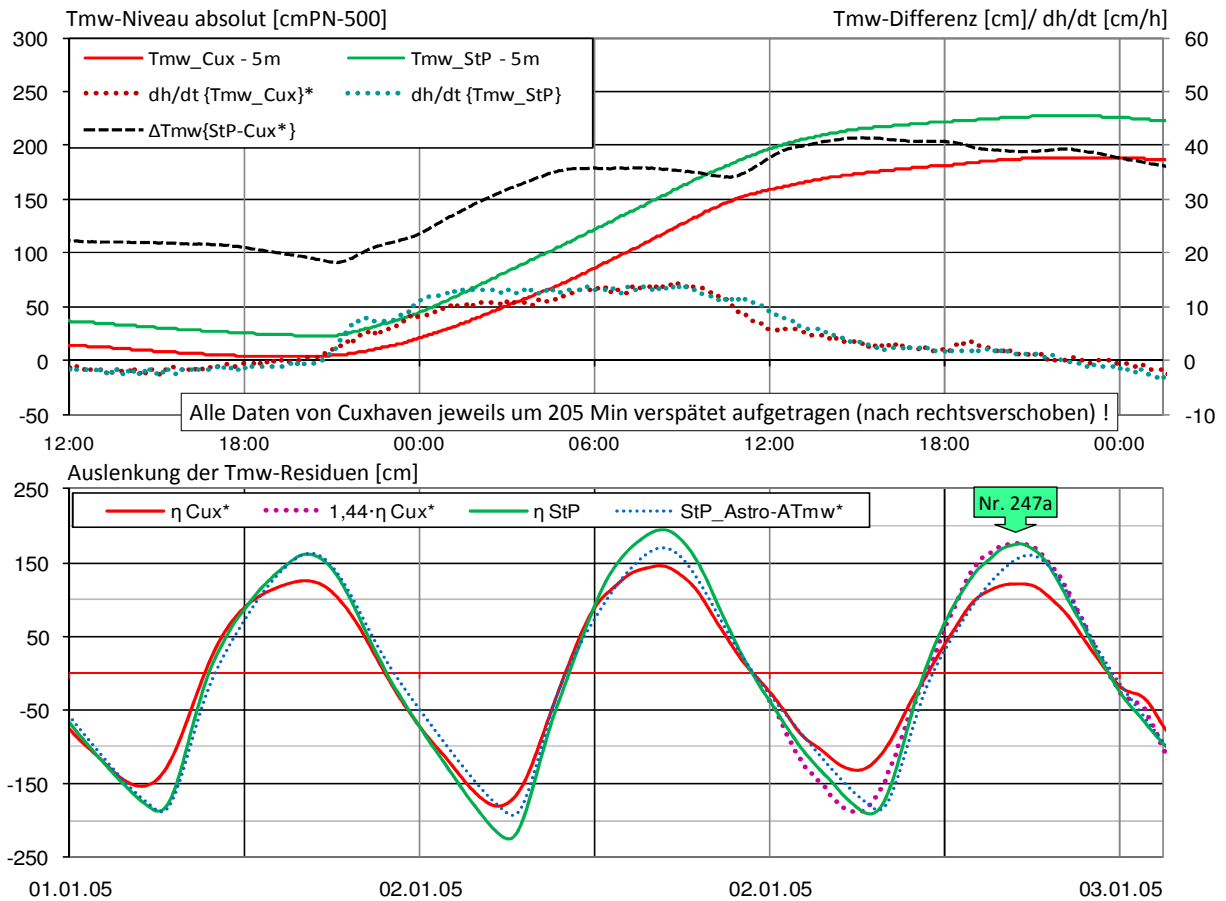


Abbildung 47: Synchronisierung der Ganglinien der Pegel Cuxhaven und St. Pauli anhand der Gradienten des Tidemittelwassers am Beispiel der Sturmflut-Nr. 247a vom 02.01.2005

In der oberen Darstellung der Abbildung 47 sind die Tidemittelwasser der Pegelzeitreihe Cuxhaven und St. Pauli sowie deren Gradienten und Differenz dargestellt, in der unteren Darstellung die TMW-Residuen und Astronomischen Minor- M_2 -Gezeiten. Alle Ganglinien der Station Cuxhaven sind dabei um 205 Minuten verspätet, also nach rechts verschoben aufgetragen um den Verlauf der beiden Tidemittelwasseränderungen zeitlich zu synchronisieren. Die Differenz der astronomischen Hochwasserereintrittszeiten war bei der Sturmflut auf 215 Minuten vorausberechnet worden.

Die Phasensynchronisation zeigt in diesem Beispiel die auf den ersten Blick scheinbar parallele Stauentwicklung an der Mündung und im inneren Ästuar auf. Das Tidemittelwasser in Cuxhaven reagiert auf die Entwicklung der Windbedingungen in der deutschen Bucht und schickt dieses Signal ins Ästuar. Bei genauerer Betrachtung der Differenz wird aber auch deutlich, dass dieses Signal zwischen Cuxhaven und St. Pauli leicht verstärkt wird. Aus der Spiegeldifferenz von 22 cm zu Beginn der Windentwicklung, die etwa 3 Zentimeter unterhalb des für die Oberwasserhältnisse von $500\text{m}^3/\text{s}$ normalen Niveaus befindet, werden in einem ersten Schub während der vorlaufenden Tide rd. 35 cm und in einem weiteren kleineren Schub während der betrachteten Sturmflut Nr. 247a rd. 39 cm. Die Dynamik in der Staugenerierung sorgt also für eine Erhöhung der ‚Stauwelle‘ im Ästuar von 17 cm.

Verantwortlich für den Grad der ‚Stauwellendynamik‘ ist die Geschwindigkeit mit der sich die stauwirksamen Windbedingungen im Küstenvorfeld ändern. Zwischen dem 01.01 und 02.01.2005 kann diese wie folgt beschrieben werden: am 01.01.2005 gegen 20 Uhr beginnt der Wind (Scharhörn) aus südlicher Richtung aufzufrischen und überschreitet die 10 m/s-Marke. In den folgenden Stunden bis zum frühen Morgen (6 Uhr) des 02.01. nimmt der Wind kontinuierlich auf etwa 18 m/s zu und dreht dabei gegen Mitternacht auf West ein. Bis zum späten Abend des 02.01. weht der Wind bei relativ konstanter Geschwindigkeit von 17-19 m/s aus West bis er gegen Mitternacht langsam abflaut.

Der Verlauf der Staukurve aus der Wasserstandzeitreihe des Pegels Cuxhaven in der Abbildung 46 (b) bildet diese Windentwicklung qualitativ sehr gut nach. Mit der Winddrehung auf West beginnt der Stau fast sprunghaft zu steigen. Gegen Mittag des 02.01. erreicht der Stau während des Niedrigwassers mit rd. 2 m sein Maximum und verharrt bis zum Abend auf diesem Niveau.

Das Tidemittelwasser verschmiert -wie bereits dargestellt- plötzliche Änderungen ein wenig, so dass die erste Änderung in der Gradienten des Tidemittelwassers Cuxhaven bereits gegen 18 Uhr und somit rd. 6 Stunden (~halbe Fensterbreite) früher als im Stau auszumachen ist. Die plötzliche Änderung der Windrichtung und die damit verbundene Beschleunigung des Tidemittelwasseranstiegs, reichen aber schon aus, um eine kleinere Stauwelle zu initiieren, die sich auf ihrem Weg durchs Ästuar bis Hamburg noch erhöht. Die Feststellung, dass sich die anfängliche Beschleunigung des Tidemittelwasseranstiegs ca. 3½ h später auch in St. Pauli zeigt, ist ein Beleg für die These, dass das Stausignal bei ausreichend dynamischer Windentwicklung als Welle durchs Ästuar geschickt wird und einen Massentransport stromauf bewirkt, der sich durch die anwachsende Spiegeldifferenz abzeichnet. Der weitere nahezu parallele Verlauf der phasensynchronisierten Stauentwicklung zwischen Küstenpegel und Ästuarpegel ist geprägt von den recht stabilen Windbedingungen, die sich ab dem frühen Morgen einstellen und die Spiegeldifferenz während der betrachteten Sturmflut Nr.247a auf einem relativ konstant erhöhten Potenzialniveau von rd. 40 cm halten.

Die Amplitude des Tmw-Residuums St. Pauli im Sturmflutscheitel erfährt in diesem Beispiel eine etwas höhere Auslenkung (15 cm), als die Amplitude des astronomisch vorausgerechneten Gezeiten-signals Minor-M₂, was auf den Einfluss der durch die größere Wassertiefe verminderten Bodenreibung hindeutet. Die ebenfalls durch das erhöhte Tidemittelwasserniveau im Ästuar (rd. +2 m) veränderten Randbedingungen wie die Trichterwirkung (relative Querschnittverjüngung) und Reflexionsgrad im Hamburger Hafen dürften sich zumindest teilweise kompensieren. Das um rd. 17 cm vergrößerte Potenzialgefälle im Tidemittelwasser zwischen den beiden Stationen ist von der Größenordnung vergleichbar mit der Wirkung, die ein um etwa 850 m³/s erhöhtes Oberwasser auf die Dämpfung der Amplitude ausübt. Insgesamt werden somit vier Eigenwerte des Systems durch die Randbedingungen während einer Sturmflut verändert, von denen -zumindest theoretisch- zwei eine Erhöhung und die anderen zwei eine Verringerung der Amplitude des Gezeitensignals bewirken.

In Summe ergeben die beiden Einzelkomponenten Amplitudenüberhöhung und Zunahme des Tmw-Spiegelgefälles im Scheitel der Sturmflut-Nr. 247a einen vergleichsweise moderaten Stauzuwachs zwischen Cuxhaven und St. Pauli von 32 cm, von denen ein wesentlicher Teil bereits während der Tide vor der betrachteten Sturmflut eingetreten ist, so dass die Sturmtide selbst auf einem zwar deutlich erhöhten aber in dieser Phase relativ gleichbleibenden Ruhewasserspiegelniveau einläuft. Für Sturmfluten dieses Typs, bei denen die stauwirksamen Windbedingungen während der Flutphase relativ konstant sind und die Tidemittelwasserdifferenz zwischen dem Mündungspegel und dem inneren Ästuar kaum noch eine Änderung erfährt, wird daher die Kategorie „Adynamisch“ eingeführt.

4.6.4 Charakteristiken einer „dynamischen“ Stauentwicklung

Dem Sturmfluttyp „Adynamisch“ können neben der zuvor beschriebenen Stauentwicklung auch die nachfolgenden Tiden einer Kettensturmflut zugeordnet werden, wie beispielsweise die drei Nachläufer der Sturmflut-Nr. 208 vom 24.01.93: Nr. 209, 210 und 211, die allesamt auf einem Tidemittelwasser- bzw. Stauniveau von knapp 2 m in Cuxhaven durchlaufen und im Ästuar auf ein über die Zeit relativ konstantes Spiegelgefälle von 50-60 cm treffen. Auch bei diesen Sturmfluten, deren Tidehochwasser mit PN +942 cm, PN +914 cm und PN +973 cm eingetreten ist, kann der Stauzuwachs im Hochwasserscheitel bis auf wenige Zentimeter (+7, -10, +7 cm) genau, allein auf die quasi-stationäre, aber deutlich überhöhte Ruhewasserspiegellage am Pegel Hamburg-St. Pauli zurückgeführt werden. Das empirische Staumodell unter Berücksichtigung des Windes Brunsbüttel lieferte für diese Sturmfluten im Übrigen vergleichbar gute Ergebnisse mit Fehlerwerten von +6, +9 und +8 cm.

Ein weiteres Kriterium für die Dynamik der Stauentwicklung kann am Beispiel der Flut Nr. 215 vom 23.01.1994 aufgezeigt werden (vgl. Abbildung 48). Bei einer Flut lag der Stau in Cuxhaven bei Tnw nur kurzzeitig geringfügig über 2 m; es entwickelte sich hieraus keine hohe Sturmflut. Dieses Ereignis fällt aber durch den nahezu parallelen Anstieg des phasensynchronisierten Tidemittelwassers während der gesamten Stauentwicklung besonders ins Auge. Hier zeigt sich, welche Rolle die Tidephase spielt, zu der die Windentwicklung einsetzt.

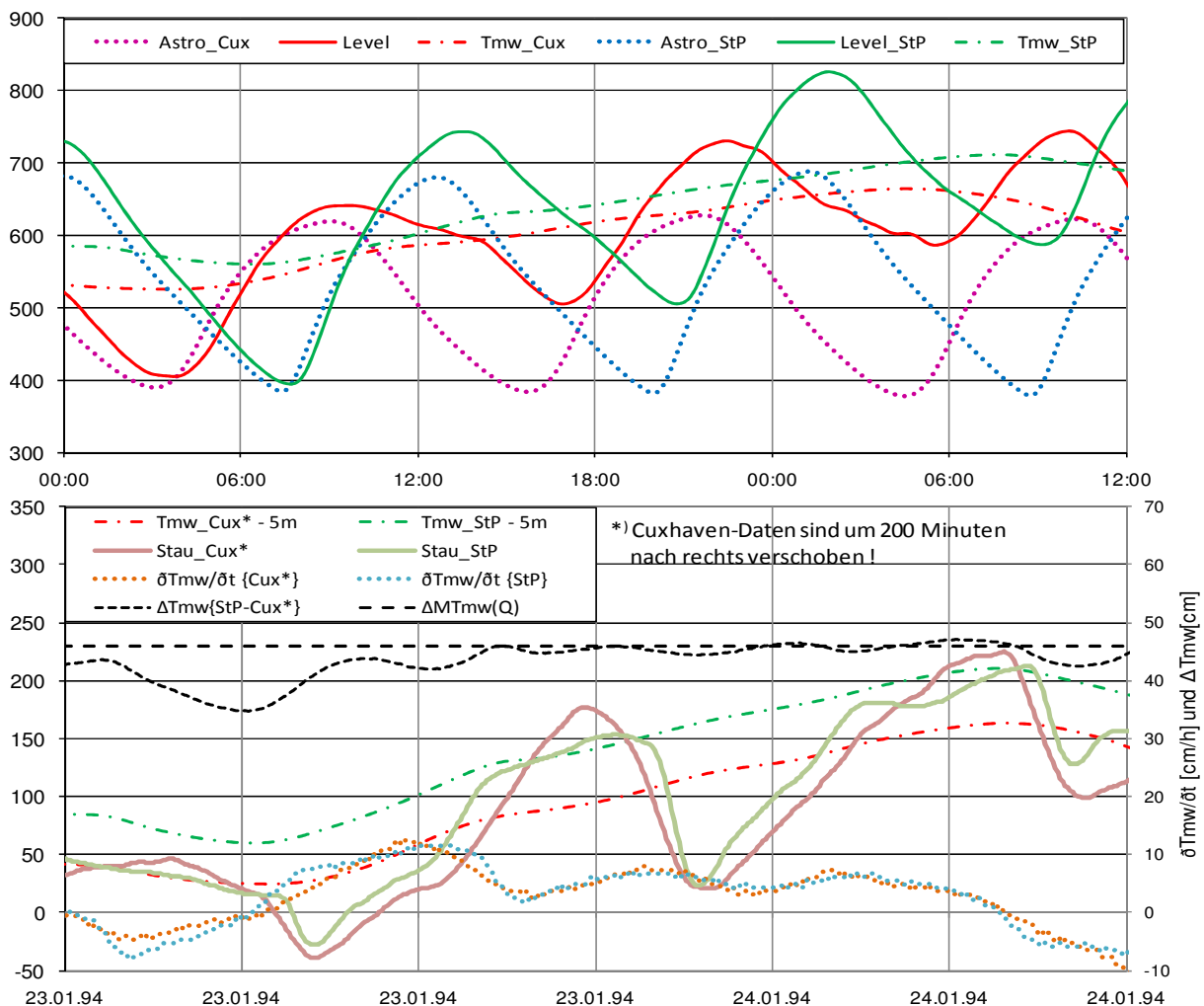


Abbildung 48: Nahezu parallele Entwicklung des phasensynchronisierten Tidemittelwassers im Vorfeld und während der Sturmflut-Nr. 215 vom 23.01.1994 im Vergleich zur Stauentwicklung

Die Windentwicklung bei dieser Flut ist hinsichtlich der Dynamik vergleichbar mit der der zuvor dargestellten Sturmflut Nr. 247a. Am 23.01.94 dreht der Wind an der Messstation Scharhörn kurz nach Eintritt des Hochwassers der Vortide in Cuxhaven innerhalb einer halben Stunde von südliche auf westliche Richtungen und frischt dabei von zuvor 11 auf 16-17 m/s auf. Diese Windgeschwindigkeit hält bei weiterhin westlicher Richtung (280°) für 4 Stunden an, bevor sie gegen 14:00 h für die Dauer von 1 ½ Stunden auf 13 m/s abflaut, um anschließend wieder auf konstante 15 m/s anzuwachsen. Infolge dessen baut sich über dem Ebbeast sukzessive ein Windstau auf, dessen Maximum gegen 14 Uhr mit 177 cm noch vor dem astronomischen Tideniedrigwasser während der kurzen „Flaute“ erreicht wird und unter den vorhandenen konstanten Windbedingungen in diese Phase hauptsächlich deshalb kontinuierlich anwächst, weil der gezeitenbedingte Wasserstand fällt und damit den seewärtigen Rückstrom bei verminderter Wassertiefe zunehmend behindert.

Die weitere Entwicklung der stauwirksamen Bedingungen in der Deutschen Bucht ist geprägt durch eine sehr stabile Windsituation, die bis zum frühen Morgen des 24.01. anhält. Dabei frischt der Wind zwischen Mitternacht und 8:00 h noch einmal leicht auf und erreicht Geschwindigkeiten von 16 bis 18 m/s aus weiterhin westlicher Richtung (280°). In Folge dieser fortwährenden Windeinwirkung steigt das Tidemittelwasser am Pegel Cuxhaven sehr langsam (ca. 6-7 cm/h) aber stetig auf einen maximalen Wert von PN +665 cm an, der um 4:30 Uhr erreicht wird.

Die in Abbildung 48 ebenfalls dargestellten herkömmlichen Staukurven, die als Residuum zur astronomisch vorausberechneten Tidekurve gebildet werden, zeigen in diesem Beispiel noch einmal die schon angesprochene mögliche Diskrepanz des resultierenden Staubetrags zur realen Entwicklung der stauwirksamen Windeinwirkung auf. Eine für dieses Residuum in der deutschsprachigen Literatur zuweilen fälschlich verwendete Bezeichnung „Windstau“ verleitet zu Fehlinterpretationen in beträchtlicher Größenordnung, wie die Abbildung 49 zeigt. Hier ist neben dem Stau die zuvor beschriebene Windentwicklung mathematisch übersetzt als windstauwirksames Schubspannungsäquivalent dargestellt. Das Schubspannungsäquivalent ($\tau_w Eq$) ist das skalierte Quadrat des auf die windwirksamste Richtung (hier: 285°) projizierten Windgeschwindigkeitsvektors. Zum Vergleich sind auch das Tidemittelwasser und ein über 12½ Stunden gleitendes Mittel des Schubspannungsäquivalents dargestellt, welches aus halbstündigen Mittelwerten des Windes Scharhörn in 10 m Höhe gebildet wird.

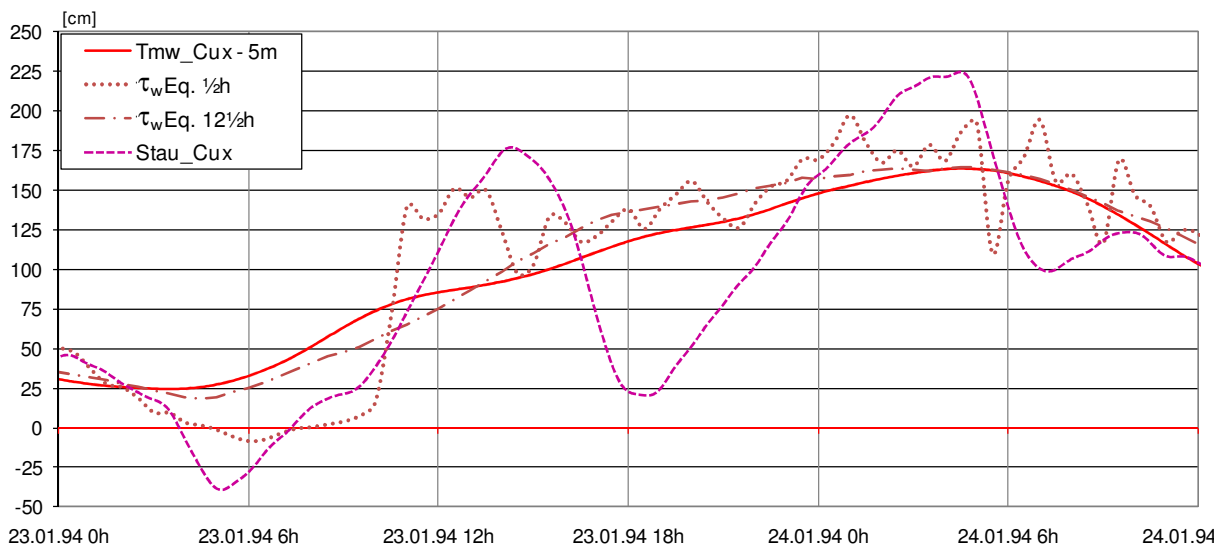


Abbildung 49: Entwicklung des Staus und Tidemittelwassers am Pegel Cuxhaven im Vergleich zum skalierten Schubspannungsäquivalent ($\tau_w Eq$) Scharhörn während der Sturmflut-Nr. 215 vom 23.01.1994

Während die Staukurve zu Beginn der Windentwicklung, also so lange wie sich die gelaufene und astronomische Gezeit noch in Phase befinden, das aus der Windeinwirkung resultierende Delta im beobachteten Wasserstand noch recht gut repräsentiert, weicht ihr Verlauf mit fortschreitender Zeit immer stärker von der stauwirksamen Windeinwirkung ab. Die Abweichungen gehen dabei je nach Tidephase wechselweise in beide Richtungen und führen gegen 19 Uhr zu einer maximalen Unterschätzung von über einem Meter des Windstaus, der in der Wasserstandsganglinie tatsächlich enthalten sein dürfte.

Wenngleich die Windinformationen von einer einzelnen Station sicher nicht repräsentativ für die windstauwirksamen Verhältnisse in der deutschen Bucht sein können, kann die resultierende Anhebung des Tidemittelwassers bei so stetigen Windbedingungen wie in diesem Beispiel, sowohl qualitativ als auch quantitativ durch das gleitende 12½-Stundenmittel des skalierten Windschubspannungsäquivalents der Station Scharhörn deutlich realistischer abgebildet werden als durch das Residuum.

Obwohl die Dynamik der anfänglichen Windentwicklung durchaus vergleichbar ist mit dem Verlauf, der während der Vortide der Sturmflut-Nr. 247a (s.o) zu beobachten ist, reicht der Impulseintrag bzw. die Beschleunigung des Tidemittelwassers offenbar nicht aus, um eine vergleichbare Stauwelle zu initiieren, die im Ästuar auch eine Höhentransformation erfährt. Die Tidemittelwasserdifferenz zwischen dem Pegel St. Pauli und Cuxhaven stellt sich hier über die gesamte Entwicklung der Sturmflut auf einem relativ konstanten Niveau von rd. 46 cm ein, das dem normalen Spiegelgefälle entspricht, welches sich bei einem Oberwassersabfluss von 1.565 m³/s auch ohne Windstau einstellen würde. Im Ergebnis kann auch hier der Stauzuwachs im Hochwasserscheitel St. Pauli bis auf wenige Zentimeter ($\Delta\text{ThwStau} = \Delta\text{Tmw} - 5 \text{ cm}$) genau, auf die quasi-stationäre aber deutlich überhöhte Differenz der Ruhewasserspiegellage zwischen Hamburg-St. Pauli und Cuxhaven zurückgeführt werden.

Der Grund für diese adynamische Fortpflanzung des Staus im Ästuar ist bei diesem Beispiel in dem Zeitpunkt der stauwirksamen Windzunahme zu suchen, die hier genau im Hochwasserscheitel der Tide einsetzt und damit auf eine um rd. 3 m größere Wassertiefe trifft als bei Niedrigwasser. Obwohl die Windgeschwindigkeit in der Anfangsphase der Staugenerierung mit 16 - 17m/s nur um 1 m/s geringer ausfällt als bei der Vortide der Sturmflut-Nr. 247a (s.o), hat die über den Wind eingetragene Energie in diesem Fall nicht ausgereicht, um bei der im Hochwasserscheitel vorgefundenen Wassertiefe eine Wasserspiegelauslenkung entgegen gerichtet zur fallenden Tendenz des Gezeitensignals zu erzeugen. Der gezeitenbedingten Fall des Wasserspiegels wurde lediglich stark verlangsamt. Die planmäßig während der Ebbe aus dem Ästuar ausströmenden Wassermengen werden dadurch quasi eingestaut. Der absolut parallel zur Entwicklung des Küstenstaus verlaufende Anstieg des Tidemittelwassers im Ästuar kann bei dieser Flut auch als „passiver Stau“ bezeichnet werden.

Das Kriterium zur Definition einer Sturmflut, dessen Staufortpflanzung im Ästuar als „adynamisch“ charakterisiert werden kann, wird somit maßgeblich durch eine relativ geringe Beschleunigung der Staukomponente und der Tidephase, zu der eine ggf. stauverstärkende Windeinwirkung einsetzt, geprägt. Als quasi-hydrostatische Größe mit dämpfender Wirkung auf ein weiteres Anwachsen der Ruhewasserspiegellinklination dürfte auch die dem Ästuar bereits durch die Oberwassermenge aufgeprägte Spiegeldifferenz eine Rolle spielen. Im Fall einer dynamischen Staugenerierung während der Vortide zu einer Sturmflut, sind zur Erzeugung eines „adynamischen“ Verlaufs der folgenden Sturmfluttiden gleichbleibende oder sich nur langsam ändernde Windbedingungen über der Deutschen Bucht erforderlich, um die ggf. anfänglich generierte überhöhte Ruhewasserspiegeldifferenz im Ästuar auf einem mehr oder weniger konstanten Spiegelgefälle auszubalancieren.

4.6.5 Charakteristiken einer „dynamischen“ Stauentwicklung

Eine dynamische Stauentwicklung zeichnet sich durch die Ausbildung einer solitären „Stauwelle“ aus, die unabhängig vom Gezeitensignal in das Ästuar einschwingt und dabei eine durch die Trichterwirkung hervorgerufene beträchtliche Höhenzunahme erfährt. Erzeugt wird diese „Stauwelle“ durch eine Beschleunigung des windgenerierten Staus in der Deutschen Bucht und ist besonders ausgeprägt, wenn diese Beschleunigung zur Zeit des Tideniedrigwassers Cuxhaven oder im daran anschließenden Flutast einsetzt. Treffen die Scheitel der Stauwelle und Gezeitenwelle etwa zeitgleich in Hamburg ein, führt die Überlagerung der beiden Komponenten zu einer überproportionalen 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-Nr. 250 vom 12.02.2005 dar (vgl. Abbildung 50).

Im Unterschied zur adynamischen Sturmflut-Nr. 215 (vgl. Abbildung 48) bei der die schwächeren Windgeschwindigkeiten im Hochwasserscheitel der Tide Cuxhaven lediglich in der Lage waren das Wasser im Ästuar einzustauen („passiver Stau“), ist die Windeinwirkung mit länger andauernden Geschwindigkeiten von 22-26 m/s bei dieser Sturmflut so stark, dass auch gegen die fallende Tendenz des Gezeitensignals eine entgegen gerichtete Wasserspiegelerhöhung produziert wird.

Die Sturmflut-Nr. 250 zählt zu den so genannten „Späentwicklern“⁴, die mit den existierenden, auf Beobachtungen basierenden empirischen Vorhersagemethoden wie dem WADI(3)-Verfahren, erst sehr spät als mögliche Bedrohung für Hamburg erkennbar werden und somit ausschließlich auf die Güte der vom DWD vorausgesagten Windentwicklung angewiesen sind. In diesem Beispiel lässt sich die beobachtete Windentwicklung an der Messstation Scharhörn wie folgt skizzieren:

- Am Vormittag des 12.02.2005 zur Zeit des Tideniedrigwassers Cuxhaven -zur der im Sturmflutfall normalerweise die ersten Vorausberechnungen für Hamburg erstellt werden- liegen die beobachteten Wasserstände an der Küste bei ablandigen Winden um 12 m/s knapp einen halben Meter unterhalb der vorausberechneten astronomischen Gezeit.
- Um die Mittagszeit dreht der Wind von südöstlichen auf südliche Richtungen bei weiterhin 12m/s und führt zu einem ersten kurzen Anstieg des Staus, der sich aber mangels ausreichender Geschwindigkeit zunächst auf einem nur leicht erhöhten Niveau von 2 Dezimetern einpegelt.
- Erst gegen 15 Uhr nimmt der Wind wieder mehr Fahrt auf und weht mit 20-22 m/s aus zunächst südwestlichen, ab 18 Uhr aus westlichen Richtungen mit inzwischen 25-26 m/s.
- Um 19:05 h, also erst 3 Stunden nach dem astronomischen Tidehochwasser (15:53 h) erreicht der Stau in Cuxhaven mit 2,5 m sein Maximum, anschließend nimmt der Wind nur langsam wieder ab und dreht weiter auf West-Nord-West, so dass der Stau bis zum Morgen auf die Hälfte abnimmt.

Das Hochwasser am Pegel Cuxhaven wird dagegen schon um 18 Uhr mit PN +776 cm registriert und tritt damit „nur“ 123 cm höher ein als astronomisch vorausberechnet. Dieser Stau im Hochwasserscheitel fand auch Eingang in die lineare Regressionsrechnung (vgl. Kap. 4.2.5) und wird durch die für alle Ereignisse am besten passende Lösung um etwa 25% auf 157 cm für den Pegel St. Pauli erhöht. Hierin ist bereits der Beitrag von 2 cm berücksichtigt, den der nur geringfügig oberhalb des Durchschnitts liegende Oberwassereinfluss zur Stauerhöhung liefert. Der mit PN +931 cm am Pegel St. Pauli beobachtete Hochwasserscheitel beinhaltet aber einen Stauanteil von 221 cm.

⁴ Als „Späentwickler“ (eigentlich: verzögerte Sturmfluten) werden im WADI-internen Sprachgebrauch solche Ereignisse bezeichnet, bei denen eine kräftige Wind- und Stauzunahme erst deutlich nach dem Tideniedrigwasser in Cuxhaven zu verzeichnen ist und insofern erst spät als Sturmflut erkennbar sind (siehe dazu THUMM, GÖNNERT, KETTLER 2006).

Damit beträgt der tatsächlich vorhandene Stauzuwachs von Cuxhaven nach Hamburg mit 98 cm etwa das 3-fache der Modellprognose ($157 - 123 = 34$ cm). Die Berücksichtigung des Windes Brunsbüttel kann den absoluten Fehler hier zwar von 64 auf 45 cm verringern, die eigentliche Ursache für diese große Fehleinschätzung wird dadurch aber nur kaschiert. Dies zeigt auch die nachfolgende detailliertere Analyse der Stautwicklung einer dynamischen Sturmflut im Ästuar.

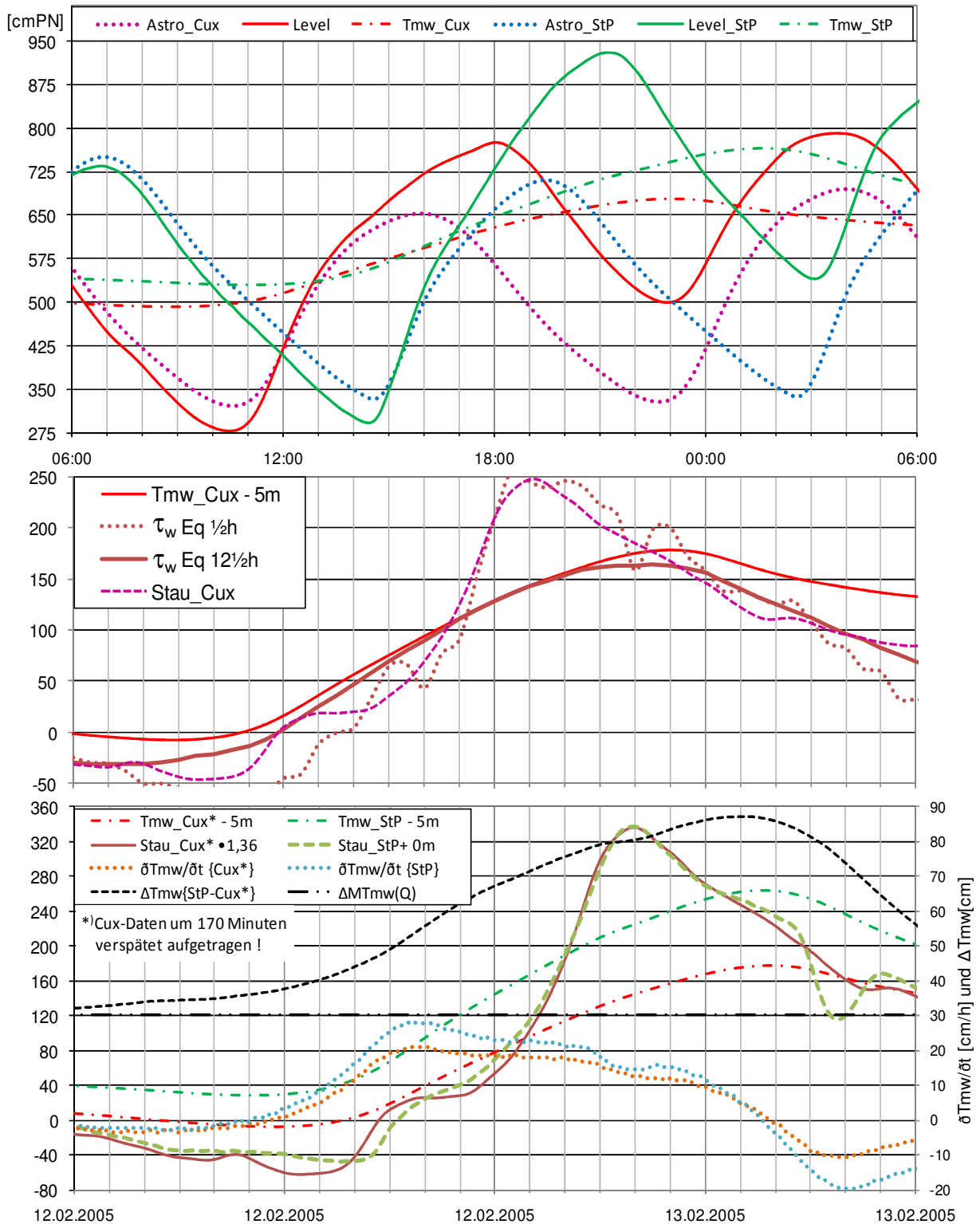


Abbildung 50: Besonders dynamische Stautwicklung während der Sturmflut-Nr. 250 vom 12.02.2005

In Abbildung 50 sind im oberen Diagramm die Ganglinien der beobachteten und astronomisch vorausberechneten Wasserstände sowie das Tidemittelwasser während der Sturmflut vom 12.02.2005 an den Pegeln Cuxhaven und St. Pauli dargestellt. Im mittleren Diagramm bildet das Schubspannungsäquivalent die zuvor skizzierte Entwicklung der stauwirksamen Windeinwirkung sehr gut ab, wie auch der Vergleich mit dem Stau Cuxhaven belegt. Auch das untere Diagramm enthält die gleichen Ganglinien, wie schon in der Erläuterungen zur Abbildung 48 vorgestellt. Hier wurden allerdings die Stauwerte Cuxhaven nicht nur zeitlich verspätet, sondern auch überhöht aufgetragen, um den Verlauf und die maximalen Höhen des Staus Cuxhaven und St. Pauli in Deckung zu bringen.

Das Beispiel der Sturmflut-Nr. 250 zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass die Windeinwirkung auf die Wasserfläche in der Deutschen Bucht hier außergewöhnlich gut durch die Staukurve Cuxhaven wiedergegeben wird. Dies wird maßgeblich dadurch begünstigt, dass die staubildende Windwirkung erst sehr spät (1 h vor astr. Thw) einsetzt und die astronomische Gezeit somit auf nahezu mittlere Ruhewasserspiegelverhältnisse an der Küste wie auch im Ästuar trifft. Die Gezeitenwelle eilt der entstehenden Stauwelle somit auf einem noch wenig erhöhten Ruhewasserspiegel voraus. Die sonst üblichen „Artefakte“ in den Staukurven infolge der Phasenverschiebung zwischen vorausberechneter und gelaufener Gezeit spielen hier kaum eine Rolle. Deshalb ist die Staukurve in diesem Fall auch besser geeignet, um die Kinematik der dynamisch generierten Stau- bzw. Schwallwelle im Ästuar zu analysieren, als das bei der hier vorhandenen Beschleunigung doch stark glättend wirkende Tidemittelwasser. Der Verlauf der beiden Tidemittelwasser sowie deren Gradienten und Differenz sind zum Vergleich mitgeplottet.

Hinzuweisen ist auf die vergleichsweise geringe Phasenverschiebung von 170 Minuten, die hier benötigt wird, um die beiden Peaks der Staukurven Cuxhaven und St. Pauli zu synchronisieren. Die vorausberechnete Laufzeit des astronomischen Thw beträgt im Vergleich dazu 215 Minuten. Während die gelaufene Gezeit also auf einem noch vergleichsweise moderat ansteigenden Ruhewasserspiegel mit normalem Tempo durch das Ästuar Richtung Hamburg propagiert, findet die Stauwelle quasi im Huckepack der Gezeitenwelle bereits deutlich vergrößerte Wassertiefen vor und kann im Scheitel ihren Rückstand zur astronomischen Gezeit bis Hamburg um immerhin 45 Minuten verkürzen, was eine relative Laufzeitreduktion bzw. Geschwindigkeitserhöhung von 26,5% bedeutet.

Gleichzeitig erfährt die Stauwelle Cuxhaven auf ihrem Weg nach Hamburg eine Erhöhung um 36% und zwar während einer relativ großen Zeitspanne von rd. ± 3 Stunden um den Peak herum, wie der nahezu in Deckung befindliche Verlauf der Staukurve St. Pauli mit der hochskalierten Staukurve Cuxhaven belegt. Selbst der kurzzeitige Anstieg und die nachfolgende Berme zur Zeit des Niedrigwassers St. Pauli ließen sich für beide Kurven mit diesem Skalierungsfaktor in Deckung bringen, wenn man diesen Abschnitt mit einer Phasenverschiebung von 205 Minuten synchronisieren würde. Die längere Laufzeit dieses Signals resultiert aus der zu dieser Zeit noch vorhandenen geringeren Wassertiefe im Wellental der Gezeitenwelle und korrespondiert mit den unterschiedlichen Laufzeiten von Hoch- und Niedrigwasserscheiteln. Allerdings ist auch dieses Signal deutlich früher in Hamburg, als das astronomisch vorausberechnete Niedrigwasser (240 Minuten).

Wie Eingangs dargestellt betrug die Verspätung des Staupeaks gegenüber der astronomischen Hochwassereintrittszeit in Cuxhaven noch rd. 3 Stunden und kann dort aufgrund der bereits wieder stark gefallen Gezeitenkurve in der Summe der beiden Komponenten Stau (+247 cm) und Gezeit (astr. Thw – 161 cm; Summe: astr. Thw +86 cm) auch nicht mehr zum Maximum führen. Das wird bereits eine Stunde vorher um 18:00 h im noch ansteigenden Ast des Staus erreicht (Stau +210 cm; astr. Thw – 87 cm; Summe: astr. Thw +123 cm).

Hieran wird schon ersichtlich, welchen Einfluss eine Stunde Phasendifferenz bei gegenläufiger Bewegungsrichtung (Gezeit fallend, Stau noch ansteigend) auf die Größe des Maximalwertes haben kann. Insofern ist es naheliegend, die beobachtete Verkürzung der Phasendifferenz zwischen Stau- und Gezeitenwelle im Ästuar und die ebenfalls vergrößerte Steigung des Staus hinsichtlich ihrer Relevanz für die summarische Stauerhöhung im Hochwasserscheitel St. Pauli näher zu beleuchten.

Der Staupeak am Pegel St. Pauli wird um 21:55 h mit 336 cm etwa $2 \frac{1}{2}$ h nach dem astr. Thw (19:27 h) erreicht (Peak in Cuxhaven um 19:05h, also 2h50min) und hat sich dabei gegenüber Cuxhaven um 36% erhöht. Auch hier befindet sich das Gezeitensignal bereits im abfallenden Ast und hat gegenüber dem Scheitelwert bereits deutlich an Höhe verloren (astr.Thw-141cm), weshalb sich auch hier kein summarisches Maximum mehr einstellen kann. Das wird bereits um 21:15h mit PN +931 cm registriert und setzt sich zusammen aus dem Gezeitenanteil astr. Thw – 90 cm = PN +620 cm und dem noch im Anstieg befindlichen Stau von 311 cm, was zum gelisteten Stauwert von 221 cm für die Sturmflut Nr.250 führt. Nachdem die Verspätung des eingetretenen Hochwasserscheitels gegenüber der astronomischen Eintrittszeit in Cuxhaven noch 2h08min betrug, sind es in Hamburg St. Pauli also „nur“ noch 1h48min und somit 20 Minuten weniger. Diese „Aufholjagd“ des Hochwasserscheitels ist dabei fast ausschließlich auf die Staukomponente zurückzuführen, die die Strecke zwischen Cuxhaven und Hamburg-St. Pauli im Peak 45 Minuten schneller als das Gezeitensignal zurücklegen konnte. In der Addition beider Komponenten dominiert aber der etwas fülligere Scheitel des Gezeitensignals die Lage des neuen Maximums, weshalb hier nur 20 Minuten in der summarischen Kurve verbleiben.

Ohne diese beschleunigte Propagation der Stauwelle hätte sich also auch das summarische Maximum wohl erst 20 Minuten später um 21:25h, also wie in Cuxhaven 2h08min nach dem astronomischen Hochwasserscheitel eingestellt. Um diese Zeit hätte das Gezeitensignal nur noch eine Höhe von astr. Thw – 104 cm ausgewiesen und der Stau sollte das 1,36-fache des Staus in Cuxhaven zur Zeit des dortigen summarischen Maximums ($1,36 \cdot 210 \text{ cm} = 286 \text{ cm}$) betragen. In der Summe ergibt das ein Maximum von $\text{PN} + 710 \text{ cm} - 104 \text{ cm} + 286 \text{ cm} = \text{PN} + 892 \text{ cm}$ oder einen resultierenden Stauwert im Hochwasserscheitel von 182 cm. Damit können allein 39 cm oder 40% des für die Sturmflut-Nr. 250 ausgewiesenen Stauzuwachses von 98 cm auf die Reduzierung der Phasendifferenz im Hochwasserscheitel der summarisch registrierten Tidekurve St. Pauli von unscheinbaren 20 Minuten zurückgeführt werden. Es bleibt darauf hinzuweisen, dass ein Effekt in dieser Größenordnung natürlich nur bei so extremen Phasendifferenzen zum astronomischen Gezeitensignal und einem signifikanten Staumaximum zu verzeichnen ist, wie sie in diesem Beispiel vorhanden waren.

Neben der verblüffenden Feststellung wie unverfälscht -wenn auch verstärkt- jedes noch so kleine in der Wasserspiegelauslenkung am Pegel Cuxhaven enthaltene Signal durch das Ästuar hindurch bis nach Hamburg weitergeleitet wird, lassen sich aus dieser Analyse der Staukinematik erste Rückschlüsse oder zumindest Hypothesen hinsichtlich der Relevanz verschiedentlich bereits genannter Eigenwerte des Ästuars ableiten. Das fast durchgehend über den Stauverlauf vorhandene konstante Verhältnis des Staus St. Pauli zum Stau Cuxhaven deutet darauf hin, dass das Wasserspiegelniveau auf dem die Sturmflut durchs Ästuar propagiert -zumindest was die Höhentransformation der solitären „Stauwelle“ angeht- kaum eine Rolle spielt. Diese Hypothese wird auch durch die nicht vorhandene Korrelation zwischen der Höhe des mittleren Ruhewasserspiegels im Ästuar und dem Stauzuwachs St. Pauli-Cuxhaven gestützt (vgl. a. Kap.4.6.7; Abbildung 55). Dabei kann jedoch nicht gesagt werden, ob die theoretisch verminderte Bodenreibung infolge vergrößerter Wassertiefe keine Auswirkung auf die Höhe einer Schwallwelle nimmt, oder ob die Verringerung der Energiedissipation durch eine abgeschwächte Trichterwirkung kompensiert wird.

4.6.6 Charakteristiken einer „kollabierenden“ Stauentwicklung

Bereits in Kap. 4.4.3 wurde die Sturmflut Nr. 206 vom 13.01.1993 als eine der Fluten analysiert, bei denen die staubildende Windeinwirkung auf die Deutsche Bucht noch vor Eintritt des astronomischen Hochwasserscheitels in Cuxhaven „kollabiert“, d.h. deutlich einbricht. In der Regel hat dieser Einbruch des Windes in der Regel geringere Hochwasserscheitel in Hamburg zur Folge als von den statistischen Modellen prognostiziert wird. Eine kollabierende Windsituation kann dabei sowohl nach einer dynamischen (wie in diesem Beispiel) als auch adynamischen Staugenerierung eintreten. In Abbildung 51 sind ergänzend zur Windentwicklung in Abbildung 35 unter dem Sturmflutverlauf auch das Schubspannungsäquivalent (Mitte) sowie die Stau- und Tmw-Ganglinien (unten) dargestellt.

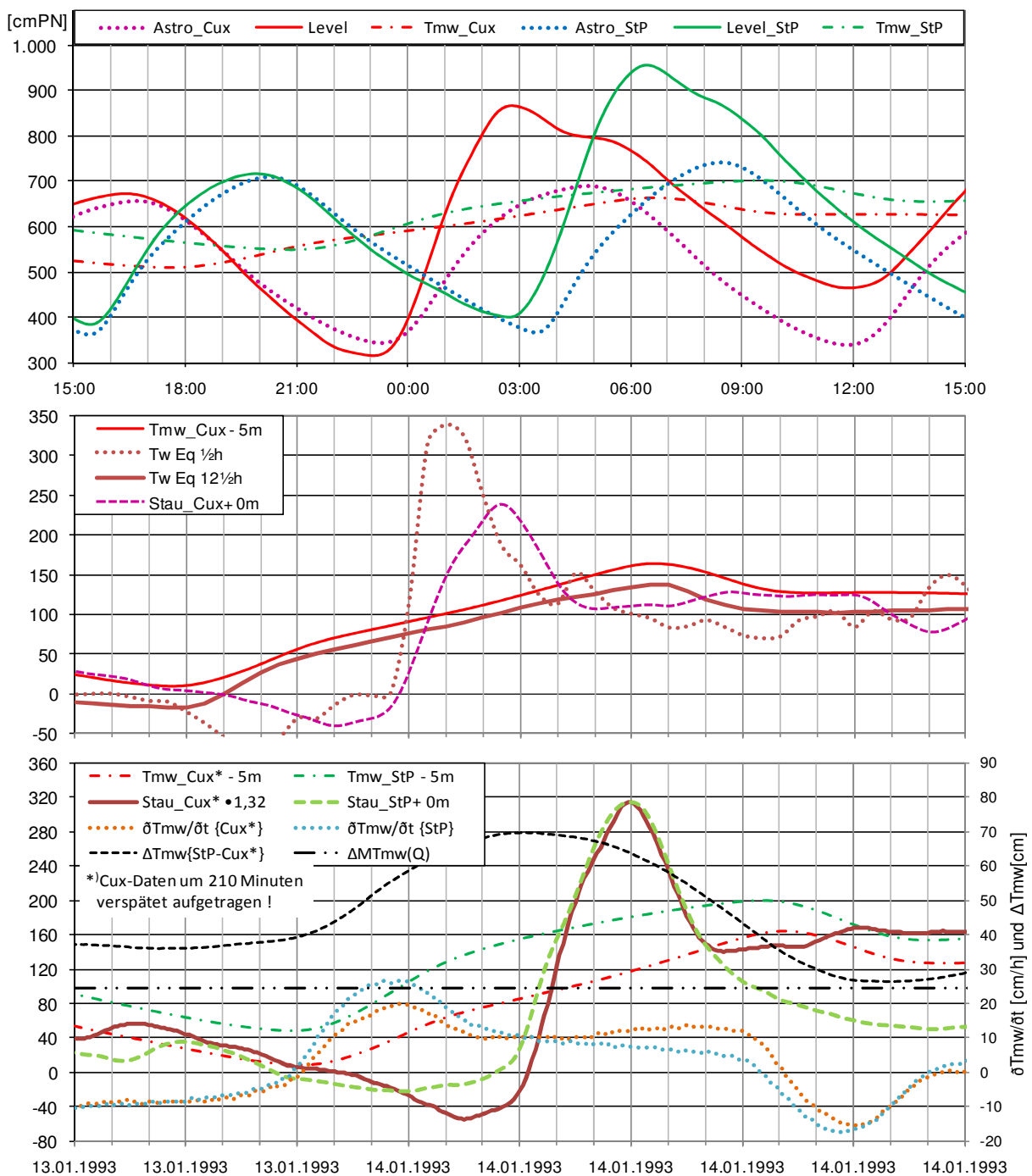


Abbildung 51: Kollabierende Stauentwicklung während der Sturmflut-Nr. 206 vom 13.01.1993

Erinnert sei hier noch mal kurz an die überaus rasche Drehung und Zunahme des Windes. Etwa zur Zeit des astronomischen Tideniedrigwassers Cuxhaven (23:17h) steigen die Windgeschwindigkeiten an der Messstation Scharhörn innerhalb von nur 2 Stunden von 18 m/s auf 31 m/s, um direkt nach Erreichen der Spitze um 0:30h genauso schnell wieder auf Geschwindigkeiten um 16m/s abzunehmen. Die Richtung dreht dabei mit etwa einer Stunde Nachlauf zur Beschleunigung des Windes von Süd-Süd-Ost auf West und verbleibt nach der Windspitze konstant bei 260°.

Mit ein Grund für die Auswahl dieses Beispiels war die Tatsache, dass die Staugenerierung bei dieser Flut ähnlich dynamisch wie bei der Sturmflut-Nr. 250 erfolgt, die zuvor als klassisches Beispiel für eine dynamische Sturmflut angeführt wurde. Deshalb haben wir es bei dieser Sturmflut genau genommen auch mit einem „Zwitter“ zu tun. Der Unterschied zur Sturmflut-Nr. 250 besteht darin, dass sich der gegenüber der Windentwicklung etwas verzögert aufgebaute Stau, dessen Peak in Cuxhaven etwa gegen 2:30h mit 240 cm ähnlich hoch eintritt, aufgrund der schnell wieder nachlassenden Winde nicht bis zum Hochwasserscheitel der astronomischen Tide halten kann.

Zur erwarteten Eintrittszeit des astr. Thw Cuxhaven um 04:50h hat sich der Stau bereits auf 107 cm reduziert. Das summarische Maximum wird bei dieser kollabierenden Stauentwicklung mit einem Tidehochwasser von PN +868 cm um 2:42h folglich auch weit vor dem astr. Thw und nur 12 Minuten nach dem Staupeak registriert. Zu diesem Zeitpunkt beträgt der Stau in dem sehr schmalen Scheitel noch 236 cm und die astronomische Tidekurve hat mit einem Niveau von PN +632 cm fast mittlere Tidehochwasserverhältnisse erreicht. (Anzumerken sei, dass für diese Tide ein Springtidehochwasser in Cuxhaven von PN +689 cm erwartet wurde und der $\text{Stau}_{\text{Astro}}$ somit 179 cm beträgt).

In diesem Beispiel läuft der Peak der Stauwelle also dem Hochwasserscheitel der Gezeitenwelle gute zwei Stunden voraus statt hinterher und benötigt für die Strecke Cuxhaven-Hamburg mit exakt $3\frac{1}{2}$ h 40 Minuten länger als die Stauwelle bei der Sturmflut-Nr. 250. Durch die Transformation im Ästuar erfährt die dynamische Stauwelle einen Höhenzuwachs von 32% auf 317 cm, in der gleicher Größenordnung wie bei der Sturmflut-Nr.250 (+36%). In Hamburg St. Pauli stellt sich der Peak der Staus um 5:57h genau $2\frac{1}{2}$ h früher ein als das erwartete astronomische Tidehochwasser (8:27h). Der Vorsprung des Staupeaks von 2h20min gegenüber dem astronomischen Hochwasser in Cuxhaven wurde somit nicht nur gehalten, sondern um weitere 10 Minuten ausgebaut. Das Summarische Maximum am Pegel St. Pauli wurde $\frac{1}{2}$ Stunde nach dem Staupeak um 6:26h mit PN +959 cm über dem astr. Thw registriert. Die bereits im Abstieg befindliche Staukurve hat zu dieser Zeit noch eine Höhe 300 cm und die ansteigende Gezeit befindet sich noch 83 cm unterhalb des astr. Thw von PN +742 cm. Der ausgewiesene $\text{Stau}_{\text{Astro}}$ am Pegel St. Pauli beträgt somit lediglich 217 cm.

Der daraus resultierende Stauzuwachs von 38 cm passt zwar recht gut zu dem Ergebnis des empirisch-statistischen Modells auf Basis des Stauansatzes (-6 cm) liegt aber weit unter den durchschnittlichen Stauentwicklungen vergleichbar dynamischer Sturmfluten, mit ähnlichen Ausgangswerten in Cuxhaven (vgl. Sturmflut-Nr. 250 mit 98 cm Stauzuwachs). Die Einsortierung der Sturmflut-Nr. 206 in die Kategorie „kollabierend“ ist insofern ein Kompromiss um nicht noch weitere Typen definieren zu müssen. Der dynamische Stauanstieg, der in der Regel zu deutlich höheren Werten im Stauzuwachs führt, wird hier zufällig durch das rechtzeitige Kollabieren des Windstauetrags kompensiert. In der Gruppe der „kollabierenden“ Sturmfluten ordnet sich diese Flut hinsichtlich ihres in Relation zum Stau stehenden Stauzuwachses daher eher am oberen Rand ein (vgl. Abbildung 52).

In der überwiegenden Zahl der kollabierenden Ereignisse kann die Ursache für die geringeren Scheitelhöhen insbesondere bei adynamischen Staubebedingungen noch am ehesten auf die sich einstellende Gradienten im Ästuar zurückgeführt werden. Während das Tidemittelwasser am Küstenpegel auf den einbrechenden Windstau unmittelbar reagiert, benötigt diese Information etwas Zeit bis es auch den Pegel St. Pauli erreicht. In der Zwischenzeit bildet sich je Größe und Geschwindigkeit des Küstenstauabsinks (Beschleunigung nach unten) im Ästuar ein Gefälle aus, das von der einlaufenden Gezeit überwunden werden muss. Die Überwindung dieser Gradienten dämpft die Amplitude der Gezeit. Je nachdem, um wie viel schneller als die Gezeit sich das Gefälle in Richtung Hamburg fortpflanzt, wird die Komponente der Wellendämpfung noch überlagert durch die Möglichkeit, dass sich das Tidemittelwasserniveau in Hamburg bis zum Eintreffen des Gezeitenhochwassers gegenüber dem Tidemittelwasserniveau in Cuxhaven zur Zeit der dortigen Scheitelpassage bereits abgesenkt hat.

4.6.7 Zusammenfassung und Empfehlungen zur Verwertung der Erkenntnisse

Die vorangegangenen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Höhenentwicklung des Stauanteils im Ästuar maßgeblich durch die Dynamik der Sturmflut geprägt wird. Ist die Beschleunigung der windgenerierten Wasserspiegelauslenkung groß genug, wird eine Stauwelle produziert, deren Auslenkung maßgeblich durch den Trichtereffekt im Ästuar auf dem Weg nach Hamburg deutlich erhöht wird.

Die maximale Erhöhung eines „dynamisch“ generierten Windstaus im Ästuar konnte bei der (Anatol)-Sturmflut Nr. 230 vom 3.12.1999 mit einem Zuwachs im Peak der Stauwelle von 43% bei einem Ausgangswert in Cuxhaven von 371 cm beobachtet werden. Der Peak des Staus ist dabei zumeist sehr engbandig, 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 astr. Thw eintritt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Peak der Stauwelle in der sich selbst geschaffenen vergrößerten Wassertiefe je nach Höhe und Phasenlage zur Gezeitenwelle deutlich (bis zu ~20%) schneller fortschreitet als der vorausberechnete Hochwasserscheitel und Hamburg-St. Pauli bereits 170 Minuten (\varnothing Thw-Laufzeit: 217 Minuten) nach seinem Durchgang am Pegel Cuxhaven erreichen kann.

Aus diesem Grund wird das Hochwasser (Maximum der summarisch beobachteten Wasserstandsganglinie) in Hamburg tendenziell höher auflaufen, wenn der Peak des Staus in Cuxhaven mehr als 2 h nach dem astronomischen Thw eintrat (vgl. Sturmflut Nr.250) und umgekehrt niedriger ausfallen, wenn der Peak des Staus deutlich vor dem astronomischen Thw lag (vgl. Sturmflut Nr.230).

Dagegen verlaufen die „adynamischen“ Sturmfluten -zumindest was die erreichte Höhe in Hamburg angeht- zumeist weniger spektakulär und bei deutlich geringeren Windgeschwindigkeiten auf, die nur selten und dann auch nur kurzzeitig die 20 m/s-Schwelle überschreiten. Dafür kann die staubildende Windsituation aber durchaus über mehrere Tage anhalten und so für eine Sturmflutkettentide sorgen. Die „adynamischen“ Sturmfluten sind gekennzeichnet durch einen vergleichsweise langsamen und parallel zu Cuxhaven verlaufenden Anstieg oder einer Konstanz des Tidemittelwassers, das bei diesem Sturmfluttyp den Stauanteil besser repräsentiert, weil es frei von „Artefakten“ (Erklärung: vgl. Abbildung 45) ist.

Eine lokale Höhenzunahme der Staukomponente im Ästuar, die über den Anstieg in Cuxhaven hinaus geht, findet während der betrachteten Sturmfluttide kaum statt. Hierfür kann die mangelnde Dynamik in der Staugenerierung verantwortlich gemacht werden. Die Beschleunigung der windgenerierten Wasserspiegelauslenkung ist offensichtlich zu gering, um dem durchaus produzierten Windstau die Charaktereigenschaften einer ins Ästuar fortschreitenden Schwallwelle zu mitzugeben. So unterliegt das adynamische Stausignal abgesehen von kleineren Schwankungen (u.a. aus der Windböigkeit) auch nicht dem Trichtereffekt des Ästuars und wird weitestgehend ohne Höhentransformation nach Hamburg durchgeleitet.

Zeichnet sich also im Laufe der Vorhersage eine weitestgehend stabile Windsituation ab, so ist das zu erwartende HThw St. Pauli durch den Stau im HThw Cuxhaven und der bereits vorhandenen Tidemittelwasserdifferenz relativ gut kalkulierbar.

Deutlich schwieriger gestaltet sich die Prognose bei „kollabierenden“ Windbedingungen, die sowohl nach einer dynamischen als auch adynamischen Staugenerierung auftreten können. Tendenziell wird das Hochwasser in St. Pauli im relativen Vergleich zu adynamischen und erst recht dynamischen

Sturmfluten eher 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.

Dass diese verschiedenen Wirkungsmechanismen auf die resultierende Sturmflutscheitelhöhe in Hamburg nicht über einen einzigen statistischen Kamm zu scheren sind, kann wohl kaum erwartet werden und wird auch durch die Abbildung 52 verdeutlicht, in der die Zunahme des Staus in St. Pauli über den Stau in Cuxhaven aufgetragen ist und die Ereignisse entsprechend ihrer Sturmflutcharakteristik durch unterschiedliche Symbole gekennzeichnet sind. Zuvor analysierte oder besonders weit streuende Ereignisse sind zudem nummeriert.

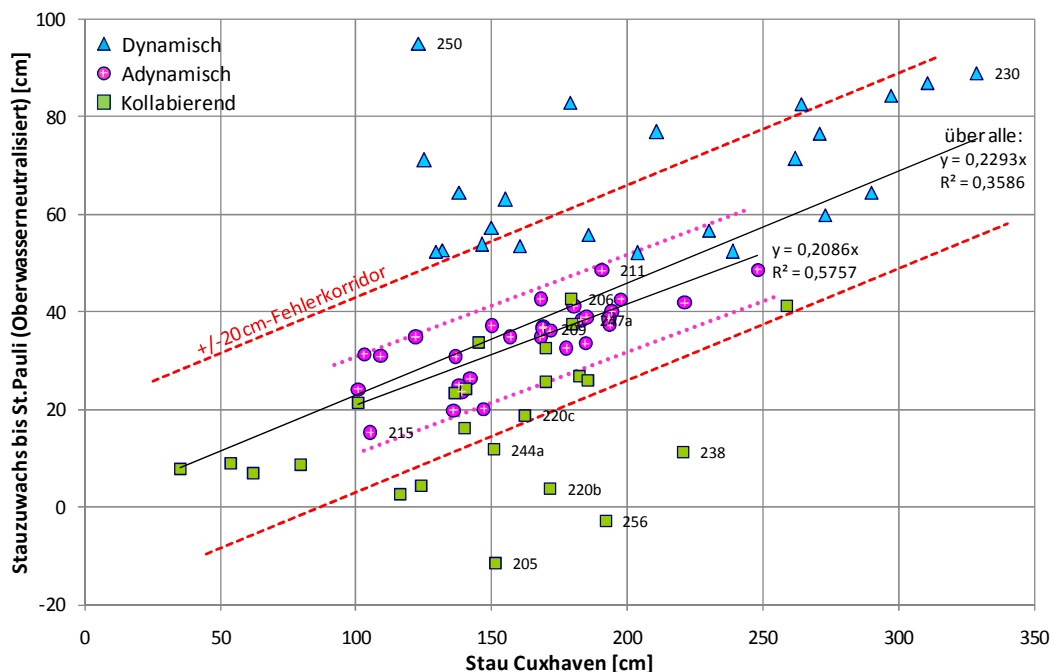


Abbildung 52: Stauzuwachs St. Pauli in Abhängigkeit vom Stau Cuxhaven differenziert nach Stautypen

Die Abbildung 52 stellt -abgesehen von dem bereits neutralisierten Oberwassereinfluss im Stauzuwachs St. Pauli- den gleichen Zusammenhang dar, wie die Abbildung 24 in Kap. 4.2.5, löst die vorhandene Streuung der Ereignisse aber aufgrund des Basiseffektes deutlich höher auf:

$$\frac{\text{Stau}_{\text{StP}} - \text{Stau}_{\text{Cux}}}{\text{Stau}_{\text{Cux}}} = \frac{\text{Stau}_{\text{StP}}}{\text{Stau}_{\text{Cux}}} - 1$$

Dadurch wird die bereits angesprochene Orientierung der Ereignisse des dynamischen Sturmfluttyps oberhalb und der kollabierenden Sturmfluten unterhalb des mittleren statistischen Zusammenhangs, der durch die lineare Regressionsgerade repräsentiert wird, besonders deutlich. Abgesehen von der besseren Möglichkeit zur Identifizierung einzelner Ereignisse, welche sich deutlich außerhalb des angestrebten Fehlerkorridors (± 20 cm) befinden, wird insbesondere bei den dynamischen und kollabierenden Sturmfluten die mangelhafte Korrelation zum Stau Cuxhaven schon visuell erkennbar. Die adynamischen Sturmfluten liegen hingegen innerhalb eines relativ engen 10 cm-Fehlerbandes, das eine etwas geringere Steigung aufweist als die Regressionsgerade durch alle 78 Ereignisse und durch eine vergleichsweise gute Korrelation zwischen Stau Cuxhaven und Stauzuwachs St. Pauli auffällt.

Eine Rückbesinnung auf die den Stauzuwachs bei dynamischen Sturmfluten produzierende Beschleunigung der windgetriebenen Wasserspiegelauslenkung legt im Grunde eine Korrelation zur Steigung der Staukurve nahe. Da die Staukurven aber nur bei wenigen dynamischen Sturmfluten so ausgeprägt sind wie bei den vorgestellten Beispielen, wurde von dieser Untersuchung Abstand genommen und stattdessen auf die schon bekannte Größe des Stiegs Cuxhaven (vgl. Kap. 4.2.4) zurückgegriffen.

Dahinter steht die Erwartung, dass bei einer dynamischen Staugenerierung auch ein vergleichsweise großer Anstieg des Wasserstandes in Cuxhaven produziert wird, insbesondere weil sich infolge ablandiger Winde zur Niedrigwasserphase eine ganze Reihe dynamischer Sturmfluten aus einer Sunksituation heraus entwickeln. Die Abbildung 53 bestätigt diese Erwartung hinsichtlich der besseren Korrelation des Stauzuwachses St. Pauli mit dem Stieg Cuxhaven, vorausgesetzt die Entwicklung des Staus kann als dynamisch charakterisiert werden.

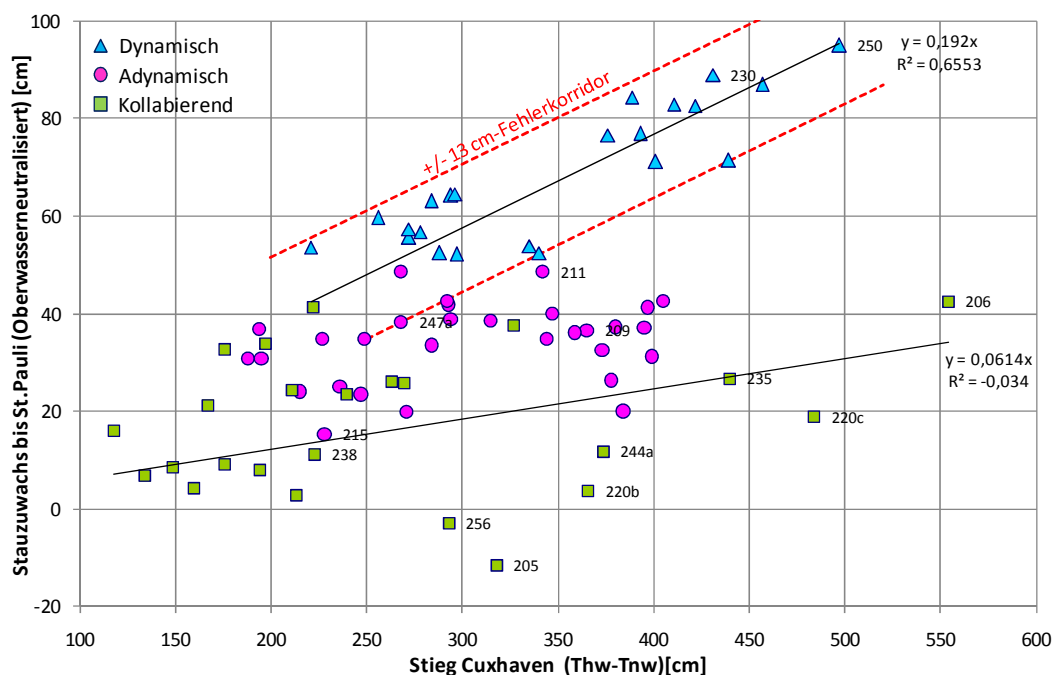


Abbildung 53: Stauzuwachs St. Pauli in Abhängigkeit vom Stieg Cuxhaven sortiert nach Stautypen

Der Stauzuwachs der dynamischen Sturmfluten kann demzufolge durch die in der Abbildung 53 angegebene lineare Beziehung zum Stieg Cuxhaven mit einer Fehlermarge von ± 13 cm sehr gut beschrieben werden. Dagegen weisen die adynamischen und kollabierenden Sturmfluten keine bzw. nur eine ganz schwache Korrelation zum Stieg auf, womit auch der deutlich schlechtere Standardfehler des empirischen Modells unter Verwendung des Stiegansatzes in Kap. 4.2.7 erklärt werden kann. Gleichwohl lassen sich für die zwar dynamisch generierten, aber dann kollabierten Sturmfluten Nr. 206, 220c und 235 der staureduzierende Effekt eines zusammenbrechenden Windantriebes gegenüber den adynamischen Fluten mit einem Stieg in vergleichbarer Größenordnung, aber beständigen Windantrieb mit 60 bis 70 cm ablesen. Die nicht vorhandene Korrelation der als adynamisch eingestuft Sturmfluten konnte erwartet werden, wenn man bedenkt, dass der Stieg schließlich die Dynamik der Staugenerierung abbilden sollte, was dieser offensichtlich auch tut und die adynamischen Fluten sich eben durch die nicht vorhandene Dynamik auszeichnen.

Dafür sind die adynamischen Sturmfluten aber aufgrund ihrer über längere Zeit nahezu konstanten Ruhewasserspiegeldifferenz zwischen dem Ästuar- und Küstenpegel dafür prädestiniert, den schon genannten theoretischen Einfluss der Gradienten auf die Dämpfung der Gezeitenwelle zu untersuchen. Dazu wird vom Stauzuwachs die um die Eintrittszeit des HThw Cuxhaven bestehende Tidemittelwasserdifferenz, reduziert um die normale mittlere Tidemittelwasserdifferenz, abgezogen. Das hier als „Amplitudenstau“ bezeichnete Ergebnis repräsentiert den Anteil, den die Erhöhung der Gezeitenamplitude am Stauzuwachs hat und ist in Abbildung 54 über die Gradienten des Tidemittelwassers aufgetragen.

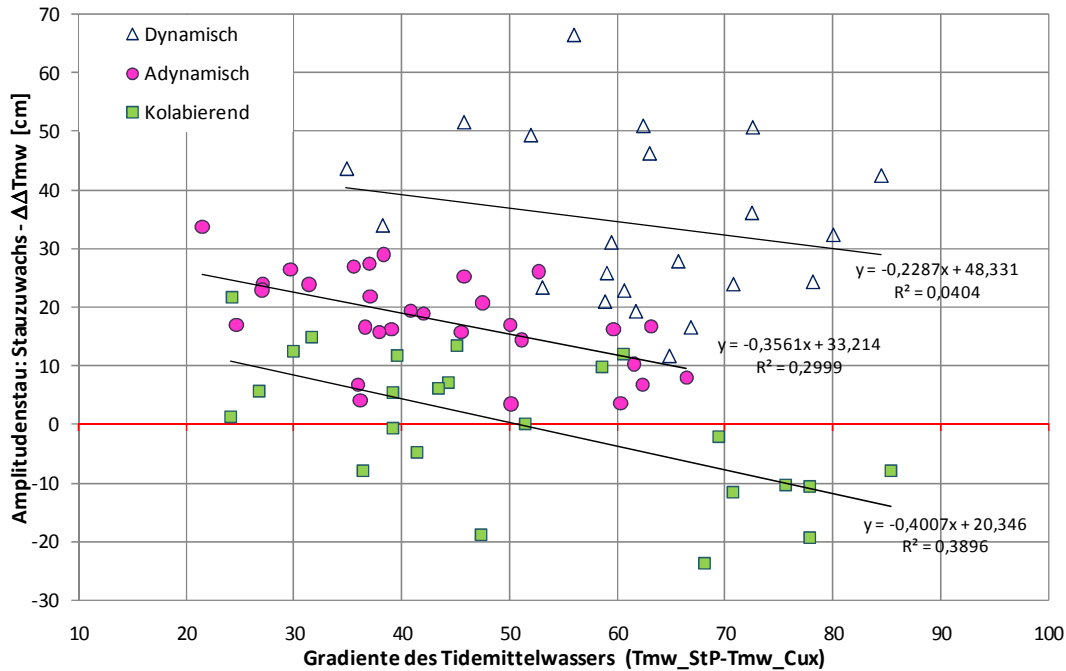


Abbildung 54: Amplitudenstau in Abhängigkeit von der RWS-Spiegeldifferenz im Ästuar

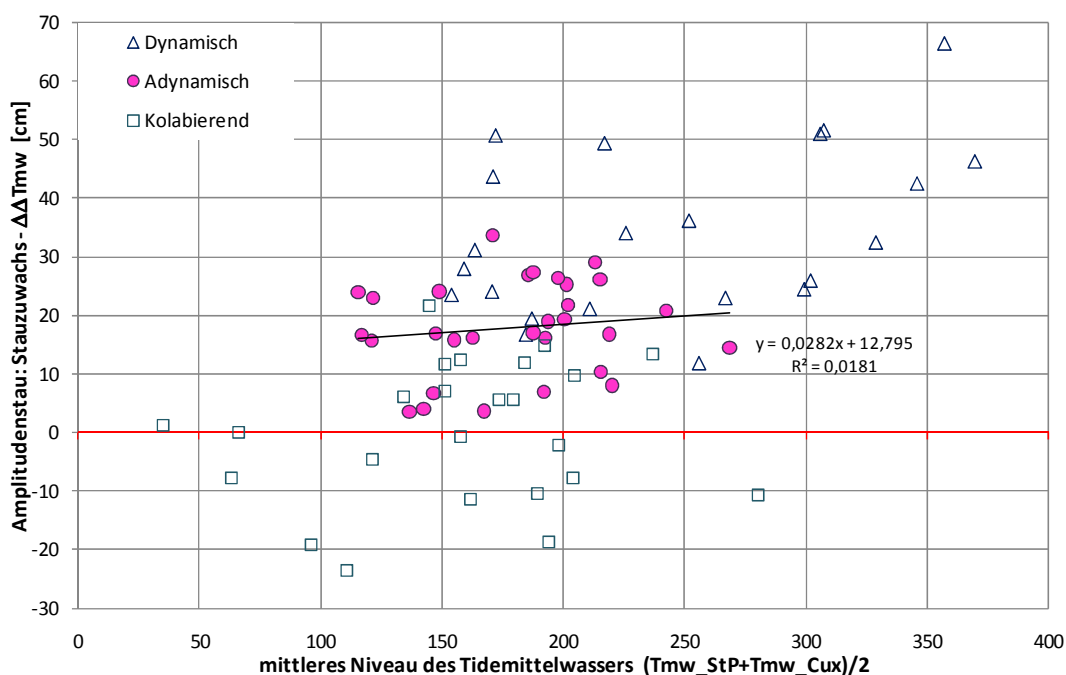


Abbildung 55: Amplitudenstau in Abhängigkeit von der RWS-Niveau im Ästuar

Während ein - wenn auch schwacher - Einfluss des Ruhewasserspiegelgefälles auf die Dämpfung des Gezeitensignals sowohl bei den adynamischen als auch bei den kollabierenden Sturmfluten durchaus nachgewiesen werden kann, ist die Korrelation bei den dynamischen Sturmfluten aufgrund der bereits erläuterten Einschränkungen zum Informationsgehalt des Tidemittelwassers bei dynamischen Wasserspiegeländerungen erwartungsgemäß sehr schwach.

Dagegen zeigt die Abbildung 55, dass die Höhenlage des Ruhewasserspiegels offensichtlich keinen Einfluss auf die Dämpfung des Amplitudensignals hat. Dies deckt sich auch mit den Erkenntnissen aus der Analyse der Staupropagation in unterschiedlichen Wassertiefen durchs Ästuar (vgl. Kap.4.6.5).

Zur Berücksichtigung des durchaus gegebenen Einflusses der Gradienten des Ruhewasserspiegels in dem empirisch-statistischen Modell müsste dieses jedoch noch viel differenzierter aufgebaut werden, um die Einzelkomponenten Tidemittelwasser und Amplitudendämpfung separat zu ermitteln. In der praktischen Anwendung des Verfahrens wird die geringe erzielbare Verbesserung, die mit einer relativ zum maximalen Effekt großen Unsicherheit/Streuung behaftet ist, dem zu betreibenden Aufwand kaum gerecht, zumal ein Teil der Gradienten ja auch durch den Oberwasserabfluss produziert wird, der im Verfahren schon berücksichtigt ist.

Zusammenfassend darf aber festgestellt werden, dass die durchgeführten Analysen einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung des phänomenologischen Prozessverständnisses der Sturmflutpropagation durch ein Ästuar geleistet hat und die verschiedenen Umstände aufgezeigt hat, die zu berücksichtigen sind, um die Entwicklung des Staus im Ästuar ursachengerechter zu beschreiben.

Die vorgenommene Differenzierung der Sturmfluttypen bietet noch ein großes Potenzial zur Verbesserung der Prognosen. Bereits heute wird der unterschiedlichen Sturmflutentwicklung durch die Klassifizierung der Sturmfluten in „Spätentwickler“ und „kollabierende Fluten“ im WADI-Verfahren durch die Vergrößerung des Vertrauensbereichs der Vorhersagegenauigkeit Rechnung getragen. Es sollte künftig in Erwägung gezogen werden, je nach Sturmfluttyp verschiedene Ansätze zum Einsatz zu bringen, die den unterschiedlichen Mechanismen der Stauentwicklung und daraus resultierender Wellenkinematik im Ästuar besser gerecht werden können.

Während die Ermittlung des Stauzuwachses bei adynamischen Sturmfluten ganz passabel über die Höhe des Staus in Cuxhaven abgebildet werden kann, empfiehlt sich für adynamische Sturmfluten eher der Stieg in Cuxhaven aufgrund seiner guten Korrelation zur Dynamik der Stauentwicklung als Basis für die Abschätzung des Stauzuwachses in Hamburg. Bei den kollabierenden Sturmfluten sollten 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. Die hier vorgenommene Einteilung hatte natürlich den Vorteil visuell unter Kenntnis des gesamten Sturmflutverlaufs einschließlich des Hochwasserscheiteleintritts in Hamburg die Zuordnung vornehmen zu können. Diese Option ist in der Vorhersage selbstredend nicht vorhanden.

Schließlich müssten für die Einsatzleiter konkrete Handlungsanweisungen und Regeln aufgestellt werden, unter welchen gegebenen Randbedingungen und Kriterien eine Sturmflut wie zu charakterisieren ist und welcher Ansatz zur Anwendung gelangt. Dieses für den Laien sicherlich sehr umfangreiche und nur schwer zu durchdringende Regel-/Kriterienwerk müsste ausgiebig in der Praxis getestet werden, um Fehler durch die Fehleinschätzung der Sturmflutcharakteristik auszuschließen.

5 Evaluation der Ergebnisse

Die empirischen Untersuchungen in OPTEL-D haben wesentliche Ergebnisse für die Sturmflutforschung im Elbeästuar geliefert. Nachfolgend werden diese Erkenntnisse kurz zusammengefasst:

- Zwischen Brokdorf und Hamburg-St. Pauli existiert eine zufriedenstellende lineare Übertragungsfunktion für den Stau mit einem Fehler von ca. 10 cm (zum Vergleich: Übertragungsfehler von Cuxhaven nach Hamburg-St. Pauli: etwa 20 cm).
- Lokale Windfelder im Mündungstrichter zwischen Cuxhaven und Brokdorf haben einen erheblichen Einfluss auf die Entwicklung des Staus.
- Die windstauwirksamste Windrichtung im Mündungsgebiet wurde zu 260° ermittelt.
- Eine in OPTEL entwickelte Formel 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 dieser Formel zeigt deutlich verbesserte Vorhersageergebnisse für Hamburg.
- Die Gradienten und der Füllungsgrad des Ästuars wurden als weitere Faktoren für die Stauentwicklung untersucht, allerdings ohne ein deutliches verwertbares Ergebnis.
- Der Einfluss der Staudynamik auf die Entwicklung des Staus im Ästuar konnte dargestellt werden, muss aber für die praxisgerechte Anwendung im empirischen Sturmflutvorhersageverfahren noch mit festen Regeln ausgestattet werden.

Natürlich herrschen noch weitere physikalische Einflüsse im Ästuar, die auf die Entwicklung von Sturmfluten wirken, die aber innerhalb dieses Projektes nicht detektiert werden konnten.

Diese Ergebnisse sind natürlich Grundlage für weitere Analysen, die allerdings nicht im Rahmen von OPTEL weitergeführt wurden. Trotzdem sollen die nachfolgenden Evaluationen zu verschiedenen Themen die Verwendbarkeit der OPTEL-Erkenntnisse zeigen.

5.1 Verwendung der Ergebnisse aus OPTEL im WADI-Verfahren

Das derzeit beim Hamburger Sturmflutwarndienst (WADI) eingesetzte Vorhersageverfahren für Sturmfluten beruht auf der empirisch-statistischen Auswertung früherer Sturmfluten, insbesondere bezüglich der Wasserstände und des Staus der Pegel Terschelling, Borkum und Cuxhaven. Zusätzlich werden die Winddaten von Terschelling und Scharhörn berücksichtigt.

Die Ergebnisse aus OPTEL-D haben für das WADI-Verfahren zusätzliche Erkenntnisse erbracht, die die Sturmflutvorhersage für Hamburg mit Hilfe der Formel, die die Entwicklung des Staus zwischen Cuxhaven und Hamburg beschreibt, für eine Vielzahl von Sturmfluten verbessern kann:

$$\text{Stau}_{\text{STP}} = 1,16 \cdot \text{Stau}_{\text{CUX}} + 0,010 \cdot f(Q) + \underbrace{0,061 \cdot (WV^2 \cdot \cos^2(WR - WR_0))}_{\text{Wind-Term}}$$

Der Wind-Term stellt den Einfluss des lokalen Windes im Mündungstrichter auf den Stau in Hamburg dar. In diesen Term gehen Windrichtung und -geschwindigkeit von Brunsbüttel ein. Für den Mündungsbereich wurde 260° als windstauwirksamste Windrichtung ermittelt, das heißt, je länger und

beständiger ein lokaler Wind aus dieser Richtung wirkt, desto höher ist der lokale Stau, der dadurch produziert wird. W_0 ist in diesem Term die windstauwirksamste Windrichtung.

Zur Vereinfachung der Anwendung dieses Terms im WADI-Vorhersageverfahren ist die Verwendung einer Tabelle möglich. Dazu werden für typische stauproduzierende Windrichtungen im Mündungsgebiet der Elbe und verschiedenen hohe Windgeschwindigkeiten die Ergebnisse des Terms ausgerechnet und tabellarisch dargestellt. In der Anwendung können die Werte dann der Tabelle 11 entnommen werden bzw. weitere Werte interpoliert werden.

WR [°] \ WV [m/s]	15	20	25	30
240	12	22	34	48
260	14	24	38	55
280	12	22	34	48
300	8	14	22	32

Tabelle 11: Stauwerttabelle für Wind Brunsbüttel (Angaben in cm)

Aus der Tabelle 11 wird deutlich, dass durch den Wind im Mündungsgebiet beachtliche Scheitelerhöhungen entstehen können. Anhand der folgenden Beispiele werden die möglichen Verbesserungen der Sturmflutvorhersage für Hamburg durch die Berücksichtigung des lokalen Windes im OPTEL-Modell deutlich (siehe Tabelle 12):

Flut Nr. / Datum	Thw STP eingetreten (cm PN)	WADI (cm PN)	OPTEL (cm PN)
156 / 01.02.1983	938	991	933
174 / 10.02.1988	876	909	888
203 / 19.11.1992	904	927	907

Tabelle 12: Vergleich der Ergebnisse von WADI und OPTEL an ausgewählten Beispielen (Werte in cmPN)

Auch ein Blick auf die Standardfehler der beiden Verfahren belegt, dass eine signifikante Verbesserung der Vorhersage durch das OPTEL-Verfahren gegeben ist (siehe Tabelle 13). Eine Integration des OPTEL-Modells in das empirische Vorhersageverfahren des WADI ist vor diesem Hintergrund grundsätzlich als sinnvoll und erforderlich anzusehen.

Verfahren	Standardfehler [cm]
WADI	24,41
OPTEL	16,52

Tabelle 13: Standardfehler der Verfahren

5.2 Modifikation der OPTEL-Formel

Obwohl die grundsätzliche Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit von Sturmfluten durch Tabelle 13 klar zum Ausdruck kommt, ist bei einer Sortierung der berechneten Sturmfluten in Kategorien (siehe Abbildung 56) allerdings zu erkennen, dass die sehr schweren Sturmfluten (Stau in St. Pauli > 3,50 m über MThw) mit dem bestehenden WADI-Verfahren besser vorhergesagt werden können als mit der entwickelten OPTEL-Formel. Die Differenzen zwischen den mit Hilfe des WADI-Verfahrens berechneten und eingetretenen Wasserständen sind innerhalb des zu Grunde gelegten Toleranzbereiches von ± 20 cm. Die Differenzen zu den mit der OPTEL-Formel berechneten Scheiteln liegen hingegen fast ausschließlich außerhalb dieses Toleranzbereiches – wenn auch nur geringfügig.

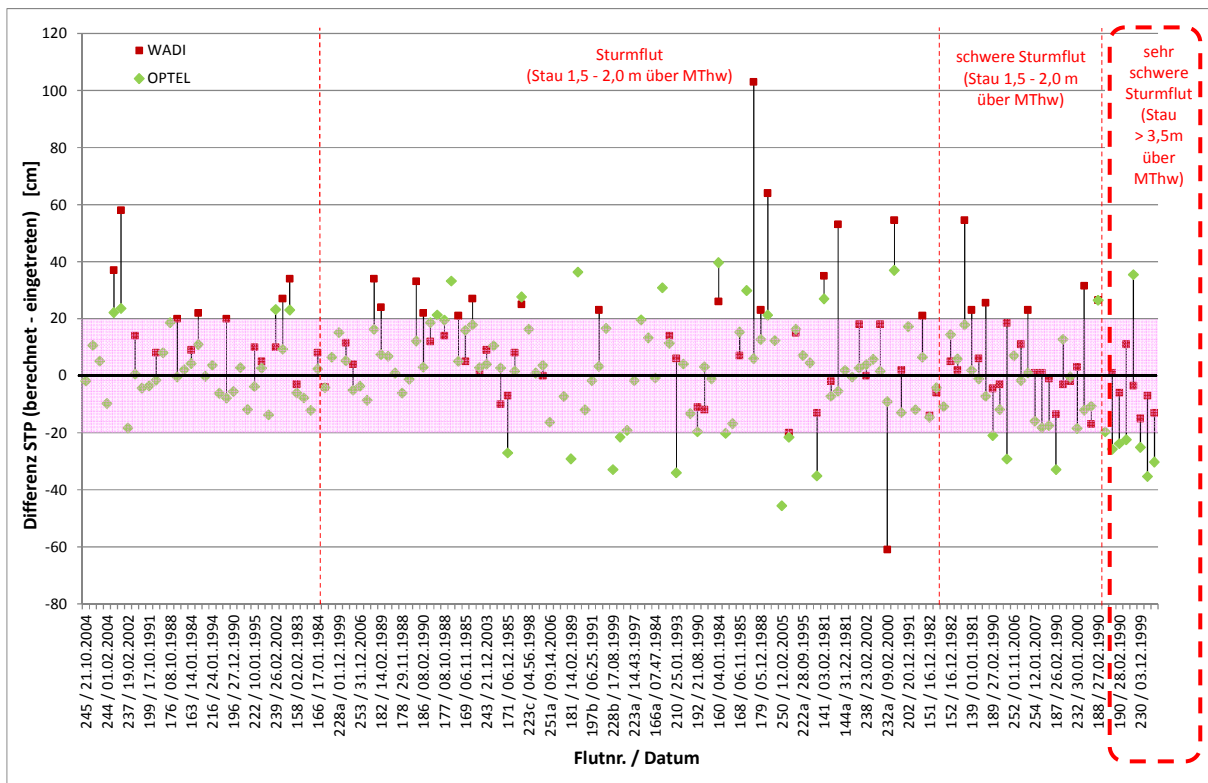


Abbildung 56: Sortierung der Sturmfluten in Sturmflutkategorien

Da es nur acht „sehr schwere“ Sturmfluten im OPTEL-Kollektiv von 153 Sturmfluten gibt, bildet die Regression, die mehrheitlich „Sturmfluten“ und „schwere Sturmfluten“ beinhaltet, die besonders hohen Ereignisse also nicht optimal ab. Da aus nahe liegenden Gründen aber gerade bei sehr schweren Sturmfluten eine möglichst präzise Vorhersage erforderlich ist, wurden testweise die acht sehr schweren in doppelter (OPTEL_mod1) und dreifacher (OPTEL_mod2) Wichtung in der OPTEL-Regression berücksichtigt. Tabelle 14 zeigt die Veränderung der Regressionsgleichung durch die mehrfache Gewichtung der sehr schweren Sturmfluten.

$$\begin{aligned} \text{Stau STP} &= \mathbf{a} \cdot \text{Stau CUX} \\ &+ \mathbf{b} \cdot f(Q) \\ &+ \mathbf{c} \cdot WV^2 \cdot \cos^2(WR - 260^\circ) \end{aligned}$$

Verfahren	Faktor Hydrodynamik a	Faktor Oberwasser b	Faktor Wind c
OPTEL	1,1587	0,0106	0,0615
OPTEL_mod1	1,1794	0,0104	0,0523
OPTEL_mod2	1,1946	0,0102	0,0452

Tabelle 14: Veränderung der OPTEL-Formelkoeffizienten bei der Modifikation der Wichtung der SF-Klassen

Es ist erkennbar, dass sich der Einfluss des Oberwassers nur minimal verändert. Der Faktor Hydrodynamik hingegen wird größer, während der Faktor Wind etwas kleiner wird, je stärker man die sehr schweren Sturmfluten gewichtet. Die nachfolgenden Abbildung 57 & Abbildung 58 zeigen die Veränderungen der Differenzen in St. Pauli zwischen berechnetem und eingetretenem Wasserstand mit dem WADI-Verfahren, der OPTEL-Formel und der modifizierten Formeln (_mod1 und _mod2).

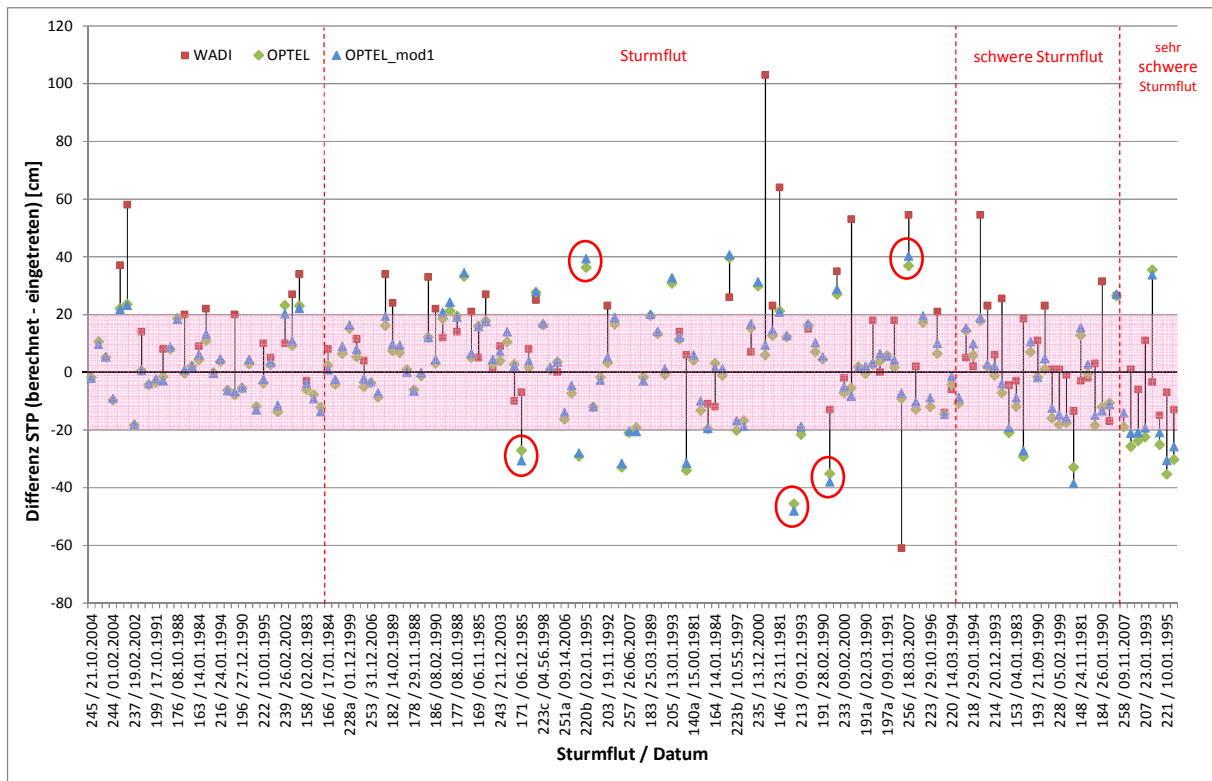


Abbildung 57: Ergebnisse mit der modifizierten OPTEL-Formel (_mod1)

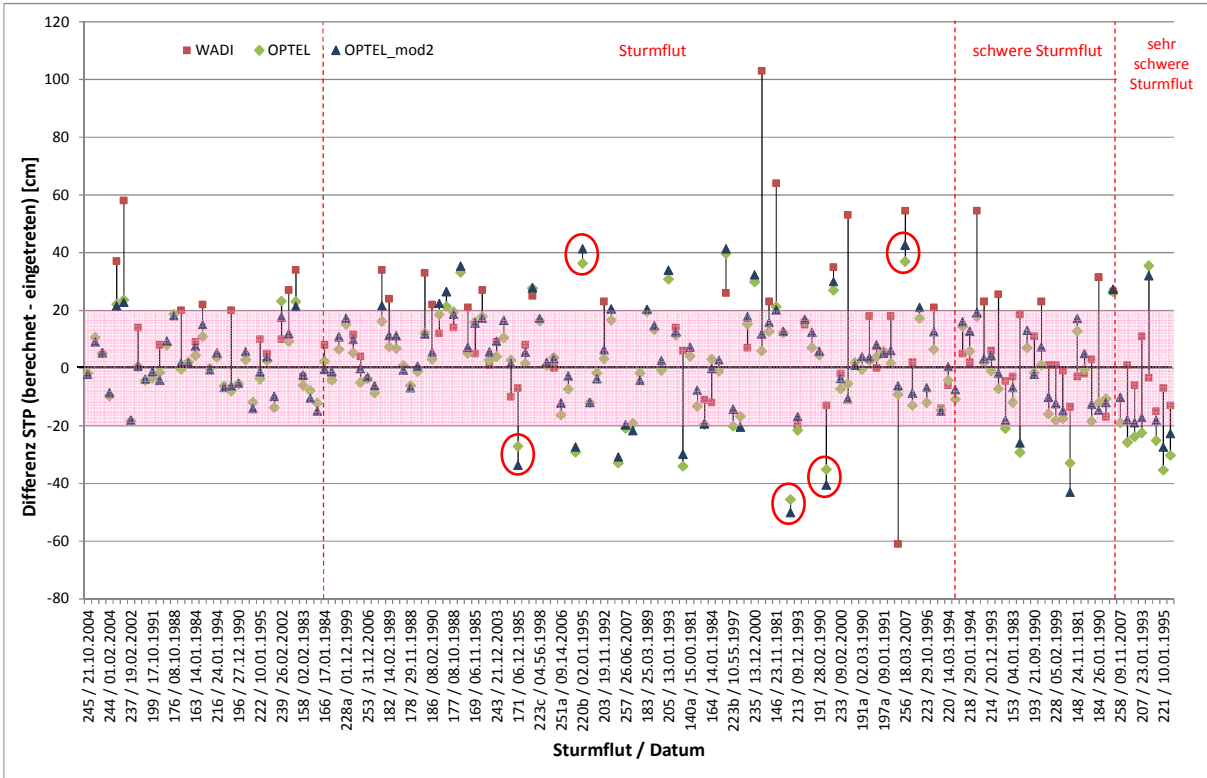


Abbildung 58: Ergebnisse mit der modifizierten OPTEL-Formel (_mod2)

Wird das Augenmerk auf die sehr schweren Sturmfluten gelegt, ist eine Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit zu erkennen. Bei dreifacher Berücksichtigung der sehr schweren Sturmfluten (Abbildung 58) liegen sechs der acht Ereignisse innerhalb des Toleranzbereiches von ± 20 cm. Allerdings ist bei einigen niedrigeren Sturmfluten, die bereits mit der OPTEL-Formel nicht optimal dargestellt werden konnten, die Tendenz einer weiteren Verschlechterung der Stauübertragung durch die Modifikation der Regressionsformel erkennbar (siehe vergleichend die rot markierten Sturmfluten in den Abbildung 57 & Abbildung 58). Zusätzlich führen die modifizierten OPTEL-Gleichungen zu einer (wenn auch geringfügigen) Verschlechterung der Standardfehler für das Gesamtkollektiv (vgl. Tabelle 15). Weitere derartige Modifikationen des Regressionsmodells sind deshalb nicht sinnvoll.

Verfahren	Standardfehler [cm]
WADI	24,41
OPTEL	16,52
OPTEL_mod1	16,61
OPTEL_mod2	16,85

Tabelle 15: Vergleich der Standardfehler von WADI, OPTEL und OPTEL_mod

Festzuhalten ist, dass mit dem einfachen OPTEL-Modell ca. 80% aller untersuchten Sturmfluten innerhalb des Toleranzbereiches von ± 20 cm berechnet werden können und damit eine deutliche Verbesserung gegeben ist . Da die acht sehr hohen Fluten weniger genau getroffen werden als im bestehenden WADI-Verfahren, bietet sich eine parallele Verwendung der Verfahren für die Sturmflutvorhersage an. Eine entsprechende Integration des OPTEL-Regressionsmodells in das Vorhersageverfahren des Hamburger Sturmflutwarndienstes zur Sturmflutsaison 2011/2012 ist in Vorbereitung.

6 Übertragbarkeit der Ergebnisse von OPTEL-D auf andere Ästuar

Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste entwickeln sich über der Nordsee und der Deutschen Bucht; sie rufen an den Küsten und in den Ästuaren erhöhte Wasserstände hervor, wobei die Höhenentwicklung einer Sturmflut von der Topographie und Bathymetrie sowie der Ausrichtung der Küste bzw. der Flussmündung abhängig ist. Die Weser und die Ems sind neben der Elbe die zwei weiteren große Ästuar an der deutschen Nordseeküste (siehe Abbildung 59), wobei die Ems seit Herbst 2002 auf der Höhe von Gandersum mit einem Sturmflutsperrwerk versehen ist. Die Unterems ist seitdem vom Sturmflutgeschehen abgeschnitten. Das Sperrwerk kehrt Sturmfluten, die höher als NN +3,70 m auflaufen.



Abbildung 59: Übersichtsgrafik zu den deutschen Ästuaren an der Nordsee

Das in OPTEL-D entwickelte empirische Modell ist auf andere Ästuar übertragbar. Auch Ems und Weser besitzen trichterförmige Mündungen, in denen grundsätzlich lokale Windeffekte, wie bei der Elbe auftreten können. Mit Hilfe eines Bezugspegels im Mündungsgebiet kann die Entwicklung des Windstaus entlang der Pegel im Ästuar nachvollzogen werden kann. Für die Ems bietet sich hier der Pegel Borkum, bei der Weser der Leuchtturm Alte Weser an. Um lokale Windeffekte ermitteln zu können, sind – als Pendant zur Station Brunsbüttel an der Elbe - Winddaten aus dem Bereich des jeweiligen Mündungstrichters notwendig.

Die Form des Mündungsbereiches der Weser ist vergleichbar mit der Elbe. Dem Trichter folgt eine Krümmung des Flussbettes, weiter stromauf wird die Weser immer schmaler bis sie in Bremen auf die künstliche Tidegrenze – das Wehr – trifft. Allerdings entspricht die NW-Ausrichtung des Mündungstrichters der Weser im Wesentlichen ohnehin der windstauwirksamsten Windrichtung der Deutschen Bucht. Ein langer, breiter Flussabschnitt mit einer vom Mündungsgebiet abweichenden

stauwirksamsten Windrichtung (wie an der Elbe die Strecke Cuxhaven – Brokdorf) findet sich an der Weser nicht. Insofern sind hier die Bedingungen für eine zusätzliche Stauerhöhung mutmaßlich einfacher als in der Elbe. Bei der Stauübertragung vom Mündungspegel in das Ästuar hinein sind deshalb an der Weser keine so deutlichen windbedingten „Ausreißer“ wie bei der Elbe zu erwarten. Weiterhin findet die signifikante Richtungsänderung der Weser in einem Bereich des Ästuars statt (Höhe Bremerhaven/Nordenham), in der das Gewässer so schmal wird, dass oberhalb keine nennenswerte Windeinwirkung auf die Wasserstände möglich ist. Oberhalb von Bremerhaven/Nordenham ist auf der Unterweser eine vom Wind unbeeinflusste Stauentwicklung zu erwarten.

Die geographische Gestalt der Emsmündung lässt hingegen prinzipiell auf ähnliche Verhältnisse bei der Stauentwicklung wie bei der Elbe schließen. Durch den Dollart – eine Bucht, die sich zusätzlich an den Mündungsbereich zur Nordsee anschließt – steht eine große, weite Wasserfläche zur Verfügung, die als Pendant zum Elbabschnitt Cuxhaven - Brokdorf angesehen werden kann. Auch hier kann Wind aus einer Windrichtung von ca. 260° zusätzlichen Stau produzieren. Für diese Hypothese spricht, dass die Sturmflut vom 26.02.1990, die bereits im Rahmen der Detailanalysen in Kapitel 4.4.1 beschrieben wird, auch in einer „Untersuchung zur Deichsicherheit an der Unterems“ (NIEMEYER, 1997) als eine Flut mit besonders starker Stauüberhöhung im Ästuar wieder zu erkennen ist. Insofern lässt die Anwendung der Ergebnisse aus OPTEL-D auch bei der (Außen-)Ems vielversprechende Ergebnisse erwarten.

7 Literatur

ANDERSEN, L. (2007). "A Short Note on Wind Set-Up". *T. - Aalborg University* .

ANNUTSCH, R. (1977). Wasserstandsvorhersage und Sturmflutwarnung. *Der Seewart, Vol. 38, 185 - 204* .

ANTFANG. (1983). "Aufbau und Organistaion des Hamburger Sturmflutwarndienstes". *Hamburger Küstenforschung, Heft 42* . Hamburg: Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Landwirtschaft, Strom- und Hafenaufbau.

BREMER, J.-A. (2008). "Entwicklung der Sturmfluten entlang der Tideelbe von Cuxhaven bis Hamburg-St.Pauli". Marburg: Fachbereich Geographie der Philipps-Universität Marburg.

BREMER, J.-A. & GÖNNERT, G. (2009). Das Zusammenwirken von Tide und Sturmflut im Elbe-Ästuar. (*Heft 145, S. 17-32*) . Marburg: Marburger Geographische Schichten.

Bundesanstalt für Wasserbau. (2000). *Untersuchung regionaler Windwirkungen, hydrodynamischer Systemzustände und Oberwassereinflüsse auf das Geschehen in Tideästuaren*. Hamburg: Bericht zum KFKI-Forschungsvorhaben "Sturmfluten in den Ästuaren".

COLDEWEY, H.-G. (2008). "Sturmflutwarndienst des NLWKN für die niedersächsische Küste". *Abstract zum KFKI-Seminar am 5.11.2008* .

DEAN, R., & DALRYMPLE, R. (1991). Water wave mechanics for engineers and scientists. *World Scientific* .

FICKERT, M. & STROTMANN, T. (2007). Hydrodynamische Entwicklung der Tideelbe. *EUCC - Coastline Reports (9) - Von der Geoarchäologie über die Küstendynamik zum Küstenzonenmanagement* . Hamburg.

FICKERT, M.; STROTMANN, T. (Oktober 2009). Zur Entwicklung der Tideverhältnisse in der Elbe und dem Einfluss steigender Meeresspiegel auf die Tidedynamik in Ästuaren. *Tagungsband zum HTG-Kongress im September 2009 in Lübeck, Deutschland* , S. 196-203.

GÖHREN, H. (1968). Tidewasserstände und Windstau im Elbmündungsgebiet. *Hamburger Küstenforschung* . Hamburg: Behörde für Wirtschaft und Verkehr, Strom- und Hafenaufbau.

GÖNNERT, G. & FERK, U. (1996). Natürliche und anthropogen beeinflusste Entwicklung von Sturmfluten in der Deutschen Bucht und der Unterelbe. *Vechtaer Studien zur angewandeten Geographie und Regionalwissenschaft* , 18, S. 13-31 .

GÖNNERT, G. (2003). Sturmfluten und Windstau in der Deutschen Bucht - Charakter, Veränderungen und Maximalwerte im 20. Jahrhundert. *Die Küste, Heft 67* .

GÖNNERT, G. (1999). *Windstauanalysen in der Nordsee*. Hamburg: Strom- und Hafenaufbau.

HORSBURGH, K., & WILSON, C. (2007). Tide-surge interaction and its role in the distribution of surge residuals in the North Sea. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 112, C08003, 13 PP.

JENSEN, J. & MUDERSBACH, CH. (2006). Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der Deutschen Nordseeküste. *Abschlussbericht eines KFKI-Projekts, Teil D: Statistisch-problistische Extremwertanalyse* . Siegen.

JENSEN, J. und MUDERSBACH, Ch. (2007). Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten. *Berichte zur Deutschen Landeskunde, Themenheft: Küstenszenarien, Band 81, Heft 2, S. 99-112* . Selbstverlag Deutsche Akademie für Landeskunde e.V., Leipzig.

KOOPMANN, G. (1962). Wasserstandserhöhungen in der Deutschen Bucht infolge von Schwingungen und Schwallerscheinungen und deren Bedeutung bei der Sturmflut vom 16./17. Februar 1962! (5) . Deutsche Hydrographische Zeitschrift.

LECHER, K.; ZANKE, U.; LÜHR, H.P. (2001). *Taschenbuch der Wasserwirtschaft*. Berlin / Wien: Blackwell Wissenschafts-Verlag.

LEHMANN; H.-A. (2007). Der Hamburger Sturmflutwarndienst - WADI. *KFKI aktuell/2.Ausg.* (7. Jahrgang).

MÜLLER-NAVARRA, S. (2008). Der Sturmflutwarndienst des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH). *Sturmflutgefährdung der Ostseeküste - MUSTOK-Workshop 2008* .

MÜLLER-NAVARRA, S. H., & GIESE, H. (1999). Improvements of an Empirical Model to Forecast Wind Surge in the German. *Dt. hydrogr. Z.* 51, 385—405 .

MÜLLER-NAVARRA, S. (2009). Über neuere Verfahren der Wasserstands- und Sturmflutvorhersage für die deutsche Nordseeküste. *Die Küste* 76, 193-204 .

NASNER, S. (2009). Grenzen statistischer Extrapolationen unter Berücksichtigung physikalischer Randbedingungen am Beispiel des Windstaus über der Deutschen Bucht. *Diplomarbeit an der TU Hamburg Harburg* .

NIEMEYER, H.-D. (1995). Ermittlung der Änderungen mittlerer Tidescheitel und -hübe in der Tideelbe infolge des Ausbaus von Außen- und Unterelbe auf KN -13,5m. *Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Forschungsstelle Küste* .

NIEMEYER, H.-D. (1997). Überprüfung der Bestickhöhen von Deichstrecken an der Unterems. *Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Forschungsstelle Küste* .

PETERSEN, M. & ROHDE, H. (1991). Sturmflut - Die großen Fluten an den Küsten Schleswig-Holsteins und in der Elbe. Neumünster.

PLÜß, A. (2004). Nichtlineare Wechselwirkungen der Tide auf Änderungen des Meeresspiegels im Übergangsbereich Küste/Ästuar am Beispiel der Elbe. *Proceedings Klimaänderung und Küstenschutz*, S. 129-138 .

Projektgruppe Strombau. (2007). Bericht zum Ganzheitlichen Strombau- und Sedimentmanagementkonzept für die Unter- und Außenelbe. Hamburg.

RADEGAST, C.; STROTMANN, T.; FERK, U. (2010). Studies on the Development of Wind set-up in the River Elbe. *Coastline Reports 16 (2010): From Brazil to Thailand - New Results in Coastal Research* . (E.-D. e.V., Hrsg., & K. S. Klaus Schwarzer, Redakteur) Kiel.

SCHMITZ, H. (1978). Sturmfluterzeugende Vorgänge in der Nordsee. *Promet* .

SIEFERT, W. & CHRISTIANSEN, H. (1983). Entwicklung und Stand der Sturmflutvorhersagen des Hamburger Sturmflutwarndienstes. *Hamburger Küstenforschung, Heft 42* . Hamburg: Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Landwirtschaft, Strom- und Hafenanbau.

SIEFERT, W. & HAVNØ, K. (1989). Sturmflutuntersuchungen für die Elbe mit den mathematisch-hydraulischen Modellen des Dänischen Hydraulischen Instituts. *Hamburger Küstenforschung, Heft 46* . Hamburg: Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Landwirtschaft, Strom- und Hafenanbau.

SIEFERT, W. & LASSEN, H. (1986). Entwicklung und Ablauf von Sturmfluten in Ems, Weser und Elbe. *Heft 44, S. 133-169* . Heide: Die Küste.

SIEFERT, W. (1995). Die Entwicklung des Hamburger Stromspaltungsgebietes der Elbe von 1950 bis 1994 (Statusbericht). *Studie Nr. 76 des Referates Hydrologie des Amtes Strom- und Hafenanbau* . Hamburg.

SIEFERT, W. (1977). Hamburger Sturmflutwarndienst WADI: Grundzüge des Vorhersage-Verfahrens. *HANSA, Band 114* .

SIEFERT, W. (1968). Sturmflutvorhersage für den Tidebereich der Elbe aus dem Verlauf der Windstaukurve in Cuxhaven. (*Heft 30, S. 1-142*) . Hannover: Mitteilungen des Franzius-Institutes für Grund- und Wasserbau der TU Hannover.

SIEFERT, W. (1978). Über das Sturmflutgeschehen in Tideflüssen. (*Heft 63, S. 33-166*) . Braunschweig: Mitteilungen des Leichtweiß-Institutes der Technischen Universität Braunschweig.

SIEFERT, W. (1991). Über Eintrittswahrscheinlichkeiten von Windstau, Oberwasser und örtlichem Wind in einem Tidefluss am Beispiel der Elbe. (*Heft 52, S. 171-190*) . Heide: Die Küste.

SINGH, A., & AUNG, T. (2005). "Effect of barometric pressure on sea level variations in the Pacific region". *The South Pacific Journal of Natural Science* , Vol. 23, 9 - 15 .

Strom- und Hafenanbau. (1985). *Sturmfluten von 1901-1984 vor der südlichen Nordseeküste und in Hamburg (Ganglinien)*. Hamburg: Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Landwirtschaft, Strom- und Hafenanbau.

TANG, Y., GRIMSHAW, R., SANDERSON, B., & HOLLAND, G. (1996). "A numerical study of storm surges, with application to the North Queensland coast". *Journal of Physical Oceanography (Vol. 26, 2700 - 2711)* .

THUMM, S.; GÖNNERT, G.; KETTLER, S. (2006). *Analyse von Spätentwicklern*. Hamburg: Hamburg Port Authority.

TIMMERMANN, H. (1977). Meteorological effects on tidal heights in the North Sea. *Mededelingen en Verhandelingen* .

TIMMERMANN, H. (1975). On the importance of atmospheric pressure gradients for the generation of external surges in the North Sea. *DHZ* .

TOMCZAK, G. (1960). "Über die Genauigkeit der Sturmflutvorhersage für die Deutsche Nordseeküste". (13. Jahrgang, Heft 1, S. 1-13) . Deutsche Hydrographische Zeitschrift.

TOMCZAK, G. (1952). Der Einfluss der Küstengestalt und des vorgelagerten Meeresbodens auf den windbedingten Anstau des Wassers, betrachtet am Beispiel der Westküste Schleswig-Holsteins. 5 (Heft 2/3) . Deutsche Hydrologische Zeitschrift.

WSV & HPA. (2007). *Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt, Bericht zur Beweissicherung 2006*. Hamburg.

8 Anhang

8.1 Sturmflutereignisse für die empirischen Untersuchungen in OPTEL

Flut Nr.	CUX Tnw Zeit	Cux Tnw	CUX Thw Zeit	Cux Thw	StP Tnw Zeit	StP Tnw	StP Thw Zeit	StP Thw
138	18.11.1980 15:12	545	18.11.1980 19:46	802	18.11.1980 19:05	560	18.11.1980 23:41	884
139a	31.12.1980 14:24	471	31.12.1980 21:24	745	31.12.1980 18:40	481	01.01.1981 00:46	847
139	01.01.1981 02:45	563	01.01.1981 08:58	850	01.01.1981 07:00	596	01.01.1981 12:14	958
140	01.01.1981 16:03	639	01.01.1981 20:54	796	01.01.1981 20:11	657	02.01.1981 00:19	882
140a	15.01.1981 01:35	472	15.01.1981 07:54	816	15.01.1981 05:47	492	15.01.1981 11:00	908
141	03.02.1981 05:40	428	03.02.1981 10:59	851	03.02.1981 09:48	456	03.02.1981 14:17	927
142	08.10.1981 02:14	580	08.10.1981 06:38	673	08.10.1981 06:01	545	08.10.1981 10:13	730
143	10.10.1981 17:15	560	10.10.1981 22:30	680	10.10.1981 21:45	533	11.10.1981 02:17	738
144	11.10.1981 15:40	552	11.10.1981 23:37	822	11.10.1981 21:06	550	12.10.1981 02:44	912
144a	31.10.1981 08:58	372	31.10.1981 14:56	822	31.10.1981 13:11	435	31.10.1981 18:22	935
145	21.11.1981 00:26	623	21.11.1981 08:03	711	21.11.1981 05:06	654	21.11.1981 10:52	769
146	23.11.1981 17:50	373	23.11.1981 23:40	827	23.11.1981 22:05	407	24.11.1981 03:24	923
147	24.11.1981 05:50	657	24.11.1981 10:31	953	24.11.1981 09:06	682	24.11.1981 14:01	1081
148	24.11.1981 18:59	637	24.11.1981 23:41	905	24.11.1981 22:37	666	25.11.1981 02:32	1012
149	08.04.1982 20:09	501	09.04.1982 01:08	861	09.04.1982 00:12	547	09.04.1982 04:26	954
150	19.11.1982 21:23	555	20.11.1982 02:59	826	20.11.1982 01:41	541	20.11.1982 06:42	901
151	15.12.1982 19:31	516	16.12.1982 02:17	833	15.12.1982 23:27	539	16.12.1982 04:57	954
152	16.12.1982 08:18	631	16.12.1982 12:59	865	16.12.1982 12:10	627	16.12.1982 16:21	959
153	04.01.1983 11:26	390	04.01.1983 17:02	868	04.01.1983 15:25	404	04.01.1983 20:12	977
154a	17.01.1983 21:44	432	18.01.1983 03:33	751	18.01.1983 01:55	447	18.01.1983 07:53	857
154	18.01.1983 09:38	666	18.01.1983 15:57	871	18.01.1983 13:42	705	18.01.1983 18:44	997
155	18.01.1983 22:38	583	19.01.1983 02:45	812	19.01.1983 02:31	593	19.01.1983 05:59	877
156	01.02.1983 10:15	387	01.02.1983 17:23	810	01.02.1983 14:18	426	01.02.1983 20:30	938
157	01.02.1983 22:50	675	02.02.1983 03:48	905	02.02.1983 02:46	710	02.02.1983 06:59	1016
158	02.02.1983 11:07	585	02.02.1983 16:06	773	02.02.1983 15:28	583	02.02.1983 19:35	857
159	03.01.1984 08:01	447	03.01.1984 13:27	782	03.01.1984 12:10	464	03.01.1984 17:12	856
160	03.01.1984 20:07	560	04.01.1984 01:32	856	04.01.1984 00:13	536	04.01.1984 04:48	923
161	07.01.1984 22:13	468	08.01.1984 03:31	845	08.01.1984 02:16	462	08.01.1984 07:03	936
163	14.01.1984 01:50	599	14.01.1984 07:17	759	14.01.1984 05:45	568	14.01.1984 10:38	827
164	14.01.1984 15:28	372	14.01.1984 21:53	812	14.01.1984 19:25	411	15.01.1984 01:21	921
165	15.01.1984 05:22	612	15.01.1984 09:06	713	15.01.1984 09:28	602	15.01.1984 12:48	764
166	17.01.1984 05:19	544	17.01.1984 11:48	767	17.01.1984 09:29	544	17.01.1984 15:12	862
166a	07.02.1984 10:54	499	07.02.1984 15:56	825	07.02.1984 14:52	505	07.02.1984 19:47	917
167	21.10.1984 04:03	556	21.10.1984 09:33	767	21.10.1984 08:19	549	21.10.1984 13:09	848
167a	24.11.1984 07:29	462	24.11.1984 13:28	829	24.11.1984 11:40	473	24.11.1984 16:46	914
168	05.11.1985 22:50	556	06.11.1985 07:37	842	06.11.1985 03:10	546	06.11.1985 09:21	923
169	06.11.1985 13:14	705	06.11.1985 17:43	810	06.11.1985 16:36	698	06.11.1985 20:56	892
170	11.11.1985 05:57	500	11.11.1985 11:03	821	11.11.1985 09:51	509	11.11.1985 14:36	888
171	06.12.1985 00:18	391	06.12.1985 09:54	764	06.12.1985 04:18	382	06.12.1985 13:13	899
172	20.01.1986 03:22	588	20.01.1986 07:43	722	20.01.1986 07:18	583	20.01.1986 11:20	795
173	25.03.1986 07:28	577	25.03.1986 12:18	720	25.03.1986 11:27	586	25.03.1986 16:00	807
174	10.02.1988 11:28	508	10.02.1988 17:34	789	10.02.1988 15:31	513	10.02.1988 20:56	876
175	24.09.1988 06:03	572	24.09.1988 14:21	737	24.09.1988 10:30	547	24.09.1988 17:14	833
176	07.10.1988 18:17	544	08.10.1988 00:08	749	07.10.1988 22:13	512	08.10.1988 03:36	812
177	08.10.1988 06:45	619	08.10.1988 11:24	805	08.10.1988 10:32	593	08.10.1988 15:13	885
178	28.11.1988 22:56	456	29.11.1988 04:55	777	29.11.1988 02:52	473	29.11.1988 08:49	874
179	05.12.1988 03:08	563	05.12.1988 09:17	836	05.12.1988 07:19	548	05.12.1988 12:44	918
180	24.12.1988 07:39	509	24.12.1988 13:52	840	24.12.1988 12:00	544	24.12.1988 16:59	953
181	14.02.1989 00:25	370	14.02.1989 08:20	784	14.02.1989 04:45	366	14.02.1989 12:09	898
182	14.02.1989 13:25	675	14.02.1989 18:11	798	14.02.1989 17:45	679	14.02.1989 22:00	872
183	24.03.1989 20:48	435	25.03.1989 01:38	824	25.03.1989 00:50	469	25.03.1989 05:35	907
184	25.01.1990 17:52	373	26.01.1990 01:44	876	25.01.1990 21:51	388	26.01.1990 05:04	1015
185	26.01.1990 07:45	680	26.01.1990 12:36	804	26.01.1990 11:38	660	26.01.1990 16:02	898
186	08.02.1990 17:34	569	08.02.1990 23:43	797	08.02.1990 22:21	578	09.02.1990 03:13	879
187	26.02.1990 08:38	348	26.02.1990 16:50	828	26.02.1990 12:44	385	26.02.1990 18:58	1003
188	26.02.1990 21:12	689	27.02.1990 01:42	944	27.02.1990 01:00	710	27.02.1990 04:58	1053
189	27.02.1990 08:55	561	27.02.1990 14:17	852	27.02.1990 13:03	552	27.02.1990 17:37	973
190	27.02.1990 21:06	529	28.02.1990 02:30	934	28.02.1990 01:06	542	28.02.1990 05:36	1075
191	28.02.1990 09:48	579	28.02.1990 14:08	836	28.02.1990 13:47	586	28.02.1990 17:34	933

Flut Nr.	CUX Tnw Zeit	Cux Tnw	CUX Thw Zeit	Cux Thw	StP Tnw Zeit	StP Tnw	StP Thw Zeit	StP Thw
191a	01.03.1990 22:19	366	02.03.1990 03:39	844	02.03.1990 02:27	394	02.03.1990 07:14	937
192	20.08.1990 20:09	565	21.08.1990 01:18	804	20.08.1990 23:55	580	21.08.1990 04:25	916
192a	19.09.1990 19:40	471	20.09.1990 01:16	826	20.09.1990 00:06	458	20.09.1990 05:06	886
193	21.09.1990 08:46	503	21.09.1990 15:02	866	21.09.1990 12:24	499	21.09.1990 18:26	982
194	21.09.1990 21:47	572	22.09.1990 02:02	781	22.09.1990 01:48	570	22.09.1990 05:26	849
194a	07.10.1990 09:30	542	07.10.1990 14:25	834	07.10.1990 13:14	532	07.10.1990 17:55	906
195	12.12.1990 15:50	579	12.12.1990 20:30	765	12.12.1990 19:58	533	13.12.1990 00:23	823
196	27.12.1990 14:10	563	27.12.1990 20:21	750	27.12.1990 18:26	526	27.12.1990 23:54	835
197	28.12.1990 03:19	565	28.12.1990 08:25	743	28.12.1990 07:16	537	28.12.1990 11:50	808
197b	06.01.1991 11:08	490	06.01.1991 16:58	800	06.01.1991 15:02	507	06.01.1991 20:25	905
197a	09.01.1991 00:54	373	09.01.1991 07:41	838	09.01.1991 04:56	383	09.01.1991 10:50	943
198	17.10.1991 00:06	488	17.10.1991 08:13	746	17.10.1991 03:59	450	17.10.1991 11:17	824
199	17.10.1991 13:48	620	17.10.1991 19:38	731	17.10.1991 17:50	592	17.10.1991 22:58	798
200	18.10.1991 03:12	588	18.10.1991 09:09	785	18.10.1991 06:37	548	18.10.1991 12:44	878
201	18.10.1991 14:50	629	18.10.1991 20:41	724	18.10.1991 18:58	635	19.10.1991 00:20	796
202	20.12.1991 05:47	554	20.12.1991 11:19	866	20.12.1991 09:26	526	20.12.1991 15:00	947
202a	20.12.1991 18:41	552	20.12.1991 23:34	828	20.12.1991 22:38	529	21.12.1991 03:14	888
203	19.11.1992 14:11	536	19.11.1992 20:09	820	19.11.1992 18:05	511	20.11.1992 00:00	904
204	20.11.1992 03:24	564	20.11.1992 08:01	804	20.11.1992 07:25	540	20.11.1992 12:18	875
205	12.01.1993 22:33	528	13.01.1993 03:02	846	13.01.1993 02:24	512	13.01.1993 06:53	911
206	13.01.1993 23:10	314	14.01.1993 02:42	868	14.01.1993 02:42	399	14.01.1993 06:26	959
206a	14.01.1993 11:55	462	14.01.1993 17:23	797	14.01.1993 15:45	437	14.01.1993 20:07	902
206b	22.01.1993 07:22	491	22.01.1993 13:16	785	22.01.1993 11:20	516	22.01.1993 16:35	906
207	22.01.1993 20:08	514	23.01.1993 01:13	936	22.01.1993 23:52	525	23.01.1993 04:08	1076
208	24.01.1993 08:40	513	24.01.1993 13:50	785	24.01.1993 12:40	558	24.01.1993 17:44	933
209	24.01.1993 21:29	484	25.01.1993 02:10	849	25.01.1993 01:37	499	25.01.1993 05:59	942
210	25.01.1993 09:39	527	25.01.1993 15:33	799	25.01.1993 13:42	526	25.01.1993 18:50	914
211	25.01.1993 22:20	527	26.01.1993 02:36	869	26.01.1993 02:13	516	26.01.1993 06:10	973
211a	19.02.1993 06:47	474	19.02.1993 12:14	821	19.02.1993 10:30	451	19.02.1993 15:35	915
211b	20.02.1993 19:03	417	21.02.1993 00:37	812	20.02.1993 23:01	434	21.02.1993 04:30	901
212	21.02.1993 08:23	571	21.02.1993 13:14	782	21.02.1993 12:22	567	21.02.1993 16:42	859
213	09.12.1993 13:25	551	09.12.1993 20:19	823	09.12.1993 18:00	557	09.12.1993 23:28	929
214	19.12.1993 21:45	573	20.12.1993 03:47	865	20.12.1993 02:02	610	20.12.1993 06:42	964
215	23.01.1994 16:39	504	23.01.1994 22:33	732	23.01.1994 20:42	506	24.01.1994 01:55	826
216	24.01.1994 05:28	586	24.01.1994 09:55	746	24.01.1994 09:04	587	24.01.1994 13:26	826
217	28.01.1994 07:01	562	28.01.1994 13:08	951	28.01.1994 10:53	604	28.01.1994 16:15	1102
218	28.01.1994 20:58	603	29.01.1994 00:57	866	29.01.1994 00:54	620	29.01.1994 04:24	958
219	30.01.1994 21:51	499	31.01.1994 02:30	879	31.01.1994 01:46	522	31.01.1994 06:00	982
220	13.03.1994 20:20	521	14.03.1994 00:29	848	14.03.1994 00:23	576	14.03.1994 04:36	952
220c	01.04.1994 10:21	336	01.04.1994 16:27	820	01.04.1994 14:27	361	01.04.1994 19:42	922
220a	01.01.1995 06:36	467	01.01.1995 12:18	840	01.01.1995 10:38	475	01.01.1995 15:48	923
220b	01.01.1995 19:34	480	02.01.1995 00:57	846	01.01.1995 23:36	474	02.01.1995 04:17	903
221	09.01.1995 23:56	493	10.01.1995 07:25	950	10.01.1995 05:05	480	10.01.1995 10:22	1102
222	10.01.1995 14:01	639	10.01.1995 18:26	757	10.01.1995 18:10	608	10.01.1995 21:52	841
222b	20.03.1995 09:52	464	20.03.1995 14:58	823	20.03.1995 14:00	509	20.03.1995 18:35	918
222a	27.09.1995 21:49	449	28.09.1995 03:12	846	28.09.1995 01:26	456	28.09.1995 06:30	933
223	29.10.1996 21:24	623	30.10.1996 02:05	844	30.10.1996 01:01	651	30.10.1996 05:22	949
223a	13.02.1997 23:27	459	14.02.1997 05:11	799	14.02.1997 03:15	468	14.02.1997 08:43	908
223b	10.10.1997 10:15	524	10.10.1997 18:02	821	10.10.1997 15:10	511	10.10.1997 21:55	921
223c	03.01.1998 22:36	438	04.01.1998 04:36	816	04.01.1998 02:31	433	04.01.1998 07:56	901
224	25.10.1998 09:20	433	25.10.1998 16:16	836	25.10.1998 13:08	425	25.10.1998 19:26	940
225	28.10.1998 12:16	596	28.10.1998 16:07	790	28.10.1998 15:32	596	28.10.1998 20:14	881
226	29.10.1998 13:04	532	29.10.1998 18:42	781	29.10.1998 16:50	528	29.10.1998 22:15	874
227	04.02.1999 22:27	497	05.02.1999 04:05	936	05.02.1999 02:17	534	05.02.1999 07:02	1074
228	05.02.1999 11:21	588	05.02.1999 15:50	876	05.02.1999 15:01	597	05.02.1999 19:15	996
228b	17.02.1999 08:45	418	17.02.1999 14:37	784	17.02.1999 12:44	442	17.02.1999 18:08	909
228a	01.12.1999 00:30	520	01.12.1999 06:27	791	01.12.1999 04:02	517	01.12.1999 09:59	861
229	01.12.1999 13:51	564	01.12.1999 19:09	752	01.12.1999 17:31	537	01.12.1999 22:51	835
230	03.12.1999 13:55	524	03.12.1999 20:12	955	03.12.1999 17:55	524	03.12.1999 23:14	1095
231	04.12.1999 03:57	582	04.12.1999 09:23	809	04.12.1999 08:01	533	04.12.1999 12:38	894
232	30.01.2000 00:46	638	30.01.2000 06:29	894	30.01.2000 04:29	643	30.01.2000 09:39	1016
232a	08.02.2000 20:56	430	09.02.2000 03:21	835	09.02.2000 00:52	451	09.02.2000 06:24	945
233	09.02.2000 10:20	517	09.02.2000 14:16	832	09.02.2000 13:54	544	09.02.2000 17:52	937
234	03.03.2000 18:29	547	03.03.2000 23:11	760	03.03.2000 22:32	542	04.03.2000 02:58	837
235	13.12.2000 08:22	411	13.12.2000 13:48	851	13.12.2000 12:12	418	13.12.2000 16:55	922

Flut Nr.	CUX Tnw Zeit	Cux Tnw	CUX Thw Zeit	Cux Thw	StP TnwZeit	StP Tnw	StP Thw Zeit	StP Thw
236	28.01.2002 18:45	493	29.01.2002 00:56	886	28.01.2002 22:38	508	29.01.2002 03:45	1028
237	19.02.2002 10:42	510	19.02.2002 17:11	686	19.02.2002 14:44	534	19.02.2002 20:40	776
238	23.02.2002 01:56	621	23.02.2002 06:37	844	23.02.2002 05:44	604	23.02.2002 10:29	946
239	26.02.2002 15:49	609	26.02.2002 20:25	758	26.02.2002 19:20	686	26.02.2002 23:20	853
240	26.10.2002 09:54	532	26.10.2002 15:24	747	26.10.2002 13:38	521	26.10.2002 18:41	825
241	27.10.2002 20:38	638	28.10.2002 04:16	814	28.10.2002 00:05	714	28.10.2002 07:09	904
242	14.12.2003 22:55	558	15.12.2003 04:01	794	15.12.2003 02:40	545	15.12.2003 07:14	864
243	21.12.2003 16:46	551	21.12.2003 23:10	821	21.12.2003 21:20	550	22.12.2003 02:21	898
244	01.02.2004 01:01	549	01.02.2004 06:13	683	01.02.2004 04:50	542	01.02.2004 09:37	750
244a	08.02.2004 21:04	452	09.02.2004 02:18	826	09.02.2004 01:00	459	09.02.2004 05:43	899
244b	20.03.2004 19:27	396	21.03.2004 01:33	797	20.03.2004 23:15	424	21.03.2004 04:46	923
245	21.10.2004 10:15	467	21.10.2004 16:44	661	21.10.2004 14:27	452	21.10.2004 20:11	717
246	17.11.2004 23:07	442	18.11.2004 05:32	853	18.11.2004 02:50	443	18.11.2004 08:30	980
247	01.01.2005 23:04	366	02.01.2005 05:02	765	02.01.2005 02:58	355	02.01.2005 08:32	850
247a	02.01.2005 11:21	542	02.01.2005 17:04	810	02.01.2005 15:28	524	02.01.2005 20:33	904
248	08.01.2005 14:48	604	08.01.2005 20:00	801	08.01.2005 18:24	654	08.01.2005 23:16	901
249	20.01.2005 15:08	549	20.01.2005 21:18	842	20.01.2005 18:49	540	21.01.2005 00:28	950
250	12.02.2005 10:27	279	12.02.2005 18:01	776	12.02.2005 14:26	289	12.02.2005 21:14	931
251	26.10.2005 00:06	551	26.10.2005 06:14	746	26.10.2005 03:54	523	26.10.2005 09:30	825
251a	08.02.2006 14:23	512	08.02.2006 21:04	806	08.02.2006 18:16	484	09.02.2006 00:14	905
252	01.11.2006 01:18	624	01.11.2006 06:40	892	01.11.2006 05:04	623	01.11.2006 09:36	985
252a	11.11.2006 23:55	545	12.11.2006 04:43	792	12.11.2006 03:34	505	12.11.2006 08:34	863
253	31.12.2006 02:13	432	31.12.2006 08:55	776	31.12.2006 05:39	468	31.12.2006 12:00	867
254	11.01.2007 22:24	599	12.01.2007 04:47	877	12.01.2007 01:44	621	12.01.2007 07:58	991
255	18.01.2007 17:48	610	18.01.2007 21:22	777	18.01.2007 20:53	662	19.01.2007 00:18	862
256	18.03.2007 19:22	587	18.03.2007 23:27	880	18.03.2007 23:07	580	19.03.2007 03:18	948
257	26.06.2007 14:14	515	26.06.2007 21:44	799	26.06.2007 17:22	537	27.06.2007 00:42	910
258	09.11.2007 06:31	566	09.11.2007 11:59	944	09.11.2007 10:19	544	09.11.2007 15:18	1065
258a	25.11.2007 07:35	443	25.11.2007 13:01	826	25.11.2007 11:24	434	25.11.2007 16:22	905
259	01.03.2008 11:13	649	01.03.2008 16:22	871	01.03.2008 14:38	687	01.03.2008 19:24	986

Alle Höhenangaben in cm PN

Die Flut-Nummern beziehen sich auf das „Hamburger Sturmflutverzeichnis“ (vgl. Strom- und Hafenausbau, 1985)

Datum	Group 1										Group 2						Group 3							Group 4					
	Terschelling	Borkum	Cuxhaven	Brunsbüttel	Glückstadt	Grauerort	Schulau	HH - St. Pauli	Bunthaus	Zollenspieker	Geesthacht	Terschelling	Borkum	Cuxhaven	Brunsbüttel	Glückstadt	Grauerort	Schulau	HH - St. Pauli	Borkum	Scharhörn	Neuwerk	Cuxhaven	Brunsbüttel	Ruthenstrom	Finkenwerder	HH-Fuhlsbüttel	Neu Darchau	
08.02.2006	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Red	Cyan	Cyan	Blue
01.11.2006	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Red	Cyan	Cyan	Blue
11.11.2006	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Red	Cyan	Cyan	Blue
31.12.2006	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Red	Cyan	Cyan	Blue
11.01.2007	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Red	Cyan	Cyan	Blue
18.01.2007	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Red	Cyan	Cyan	Blue
18.03.2007	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Red	Cyan	Cyan	Blue
26.06.2007	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Red	Cyan	Cyan	Blue
09.11.2007	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Red	Cyan	Cyan	Blue
25.11.2007	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Red	Cyan	Cyan	Blue
01.03.2008	Green	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Cyan	Red	Cyan	Cyan	Blue