

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Rudolph, Elisabeth**

## **Sturmflutuntersuchungen für das Elbeästuar vor dem Hintergrund des beantragten Ausbaus der Seehafenzufahrt nach Hamburg**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/100761>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Rudolph, Elisabeth (2007): Sturmflutuntersuchungen für das Elbeästuar vor dem Hintergrund des beantragten Ausbaus der Seehafenzufahrt nach Hamburg. In: DACH 2007 (Deutsch-Österreichische-Schweizerische Meteorologen-Tagung), Hamburg, 10. September 2007. Hamburg. S. 1-7.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# **Sturmflutuntersuchungen für das Elbeästuar vor dem Hintergrund des beantragten Ausbaus der Seehafenzufahrt nach Hamburg**

**Elisabeth Rudolph**  
**Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg**  
**Wedeler Landstrasse 175 D 22559 Hamburg**  
**elisabeth.rudolph@baw.de**

## **1 Einleitung**

Um Containerschiffen mit einem Tiefgang von 13,50 m (Salzwasser) einen tideunabhängigen Zugang von der Nordsee zum Hamburger Hafen zu ermöglichen, wurde 2004 eine weitere Fahrrinnenanpassung der Elbe zwischen Cuxhaven und Hamburg beantragt (PROJEKTBURO FAHRRINNENANPASSUNG, 2006). Für die Umweltverträglichkeitsprüfung im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens wurden von der BAW neben den ausbaubedingten Änderungen von Wasserstand und Strömung bei mittleren Tiden auch die ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutwasserstände untersucht (BAW, 2007).

Herbst- und Winterstürme über der Nordsee können zu Sturmfluten in der Tideelbe führen. Neben Gezeitendynamik und Windstau in der Deutschen Bucht haben auch Prozesse im Ästuar selbst Einfluss auf die Sturmflutwasserstände im Elbeästuar. Sowohl die lokale Windwirkung über der Elbe als auch der Oberwasserzufluss und die Topographie, d.h. Form und Tiefe des Ästuares, modifizieren den Sturmflutwasserstand entlang der Tideelbe.

Der Einsatz von numerischen Modellen zur Modellierung des Windes über der Elbe sowie von Wasserstand und Strömung in der Elbe ermöglichen es, sowohl historische Sturmfluten als auch Sturmflutszenarien zu untersuchen.

## **2 Untersuchungskonzept**

Die Bedeutung von lokalem Wind, Oberwasserzufluss und Topographie für die Sturmflutwasserstände entlang der Tideelbe wird auf der Grundlage von Sturmfluten mit unterschiedlicher Charakteristik betrachtet:

SF76: Die Sturmflut vom 3.1.1976 erreichte die höchsten je gemessenen Wasserstände in der Elbe (Scheitelwasserstand Cuxhaven NN + 5,12 m, Hamburg St.Pauli NN + 6,45 m). Am Tag der Sturmflut erreicht der westliche Wind über der Elbmündung Geschwindigkeiten bis 30 m/s (11 Bft). Der Oberwasserzufluss aus der Mittelelbe beträgt 500 m<sup>3</sup>/s (zum Vergleich: Mittlerer Oberwasserzufluss 712 m<sup>3</sup>/s).

SF94: Die Sturmflut vom 28.1.1994 erreicht auf Grund des hohen Oberwasserzuflusses aus der Mittelelbe stromauf von Hamburg sehr hohe Wasserstände (Scheitelwasserstand Cuxhaven NN + 4,51 m, St.Pauli NN + 6,02 m). Am Tag der Sturmflut werden über der Elbmündung Windgeschwindigkeiten bis 24 m/s (9 Bft) aus westlichen Richtungen beobachtet. Der Oberwasserzufluss beträgt 1350 m<sup>3</sup>/s.

SFB: Die Bemessungssturmflut 2085A ist eine synthetische Sturmflut, die aus der Sturmflut SF76 entwickelt wurde (LÄNDERARBEITSGRUPPE, 1988). Es wird ein

säkularer Meeresspiegelanstieg von 30 cm/Jh. sowie ein im Vergleich zur SF76 um 20 - 50 cm erhöhter Windstau berücksichtigt. SFB erreicht entlang der Tideelbe die Bemessungswasserstände (Scheitelwasserstand Cuxhaven NN + 5,65 m, St.Pauli NN + 7,30 m). Der definierte Oberwasserzufluss beträgt  $Q = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Für die hier vorgestellten Untersuchungen wird das hydrodynamische numerische (HN-) Modell UnTRIM (BAW, 2004 bzw. CASSULLI, V. UND WALTERS, R.A., 2000) eingesetzt.

Die verwendete Modelltopographie gibt den Zustand der Tideelbe im Jahr 2003 (planerischer Ist – Zustand PIZ, siehe Bild 1, nicht genordet) wieder. Bei Sturmfluten und Oberwasserabflüssen größer  $1100 \text{ m}^3/\text{s}$  wird das Wehr Geesthacht gelegt und trennt dann nicht mehr die Tideelbe von der Mittelelbe. Das Modellgebiet reicht deshalb für Sturmflutuntersuchungen von der Elbmündung (Bake Z bei Elbe km 756) über Hamburg (Elbe km 623), Geesthacht (Elbe km 585) bis Bleckede (Elbe km 550). Als landseitige Begrenzung wird die Deichlinie gewählt. Detaillierte Informationen zum verwendeten HN – Modell des Elbeästuares gibt das Sturmflutgutachten(BAW, 2007).

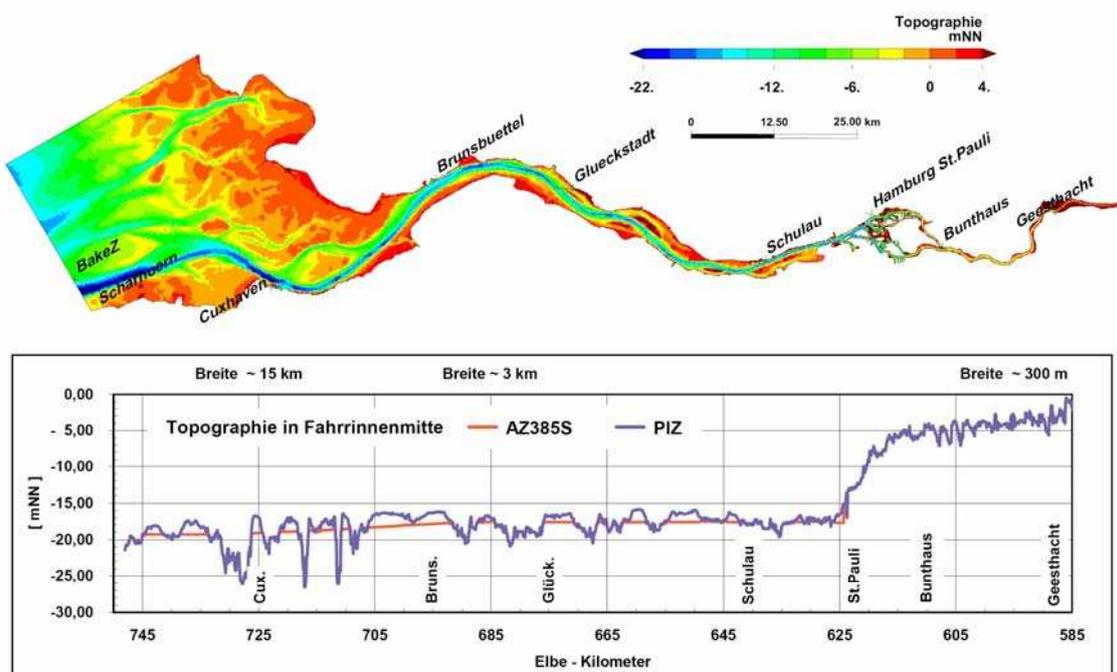


Bild 1: Topographie der Tideelbe (nicht genordet) von der Mündung bei Cuxhaven bis zum Wehr Geesthacht (oben), sowie die Tiefe der Tideelbe in Fahrrinnenmitte (unten) im heutigen Zustand (PIZ in Blau) und im Ausbauzustand (AZ385S in Rot).

Zur Modellierung von Wasserstand und Strömung benötigt das HN – Modell zur Bestimmung des Impulseintrages aus der Atmosphäre Informationen über Windrichtung und Windgeschwindigkeit über der Tideelbe. Der räumlich und zeitlich hochaufgelöste lokale Wind ergibt sich aus der großräumigen Wetterlage und wird kleinräumig durch die Topographie und die Rauigkeitsverteilung des Geländes modifiziert. Die zur Sturmflutmodellierung benötigten lokalen Windfelder wurden vom DWD GF Seeschifffahrt mit MKW (SCHMIDT, H. UND PÄTSCH, J., 1992) berechnet.

## 2.1 Einfluss des lokalen Windes

Um den Einfluss des lokalen über der Elbe herrschenden Windes auf die Sturmflutwasserstände zu untersuchen, wird der lokale Wind variiert. Die mit MKW für die Sturmfluten SF76 und SF94 berechnete Windgeschwindigkeit wird um 5 % bzw. 10 % erhöht sowie um 5 % bzw. 10 % gesenkt. Es wird die Topographie 2003 (PIZ) und der gemessene Oberwasserzufluß verwendet.

## 2.2 Einfluss des Oberwasserzufluss

Für die Untersuchung des Oberwassereinflusses auf die Sturmflutwasserstände wird der Oberwasserzufluss aus der Mittel-Elbe variiert. Zusätzlich zum während der Sturmfluten SF76 und SF94 gemessenen Abfluss wird ein Oberwasserzufluss von  $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$  vorgegeben. Es werden die mit MKW berechneten Windfelder und die Topographie 2003 (PIZ) verwendet.

## 2.3 Einfluss der Topographie

Um die ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutwasserstände zu bestimmen werden die Sturmfluten SF76, SF94 und SFB sowohl in der heutigen Topographie (PIZ, siehe Bild 1) als auch in der geplanten Ausbautopographie AZ385S (siehe Bild 1) modelliert. Der Ausbauzustand AZ385S enthält die Anpassung der Fahrrinne zwischen Cuxhaven und Hamburg, eine 385 m breite Begegnungsstrecke zwischen Elbe km 644 und Elbe km 636 sowie Unterwasserablagerungsflächen im Bereich der Außenelbe. Es werden die mit MKW berechneten Windfelder und der gemessene bzw. definierte Oberwasserabfluss verwendet.

# 3 Ergebnisse der Systemanalyse

## 3.1 Wind

Für die in Abschnitt 2.1 beschriebenen Szenarien wird jeweils die Sturmflut SF76 und SF94 modelliert. Beispielhaft ist in Bild 2 die Zeitreihe des Wasserstandes am Pegel Schulau für die fünf Windszenarien der Sturmflut SF76 dargestellt. Am Tag vor der Sturmflut, bei niedrigen

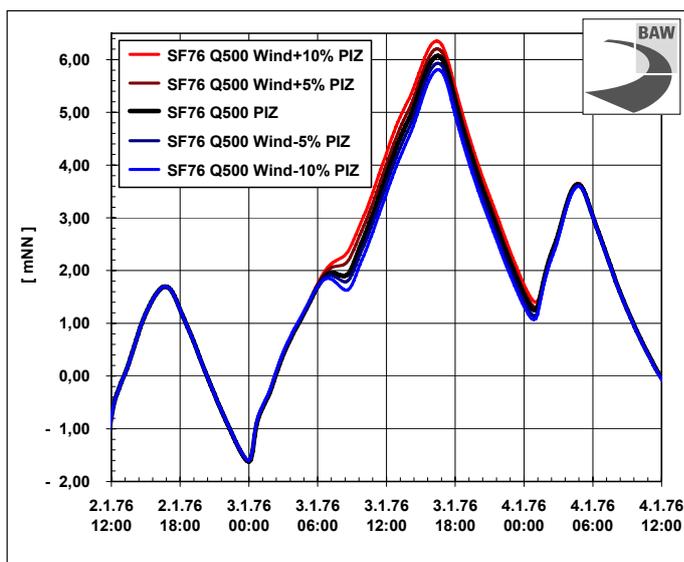


Bild 2: Variation der Windgeschwindigkeit über der Elbe. Wasserstandsentwicklung am Pegel Schulau (Elbe km 641) für die Sturmflutszenarien SF76.

vor der Sturmflut, bei niedrigen Windgeschwindigkeiten, bewirkt eine Variation der Windgeschwindigkeit um  $\pm 10\%$  keine Variation des Wasserstandes. Die sehr hohen Windgeschwindigkeiten am Vormittag des 3.1.1976 bewirken ein Ausbleiben der Ebbe vor der Sturmflut. Dieser Effekt wird durch eine Erhöhung der lokalen Windgeschwindigkeit über der Elbe verstärkt, bzw. durch eine Erniedrigung verringert. Der Sturmflutscheitelwasserstand (höchster Wasserstand im Sturmflutzeitraum) bei Schulau verändert sich durch eine

Variation der Windgeschwindigkeit um  $\pm 25$  cm. Tabelle 1 gibt für fünf Orte entlang der Elbe die Veränderungen im Sturmflutscheitelwasserstand für SF76 und SF94 aufgrund der Variation des lokalen Windes an. Verändert man den Wind um  $\pm 5$  % so verändern sich in der Elbmündung bei Cuxhaven die Scheitelwasserstände um  $\pm 5$  cm und in Hamburg St.Pauli um ca.  $\pm 12$  cm. Eine Variation der Windgeschwindigkeit um  $\pm 10$ % verändert die Sturmflutscheitelwasserstände bei St.Pauli um ca.  $\pm 25$  cm.

### 3.2 Oberwasser

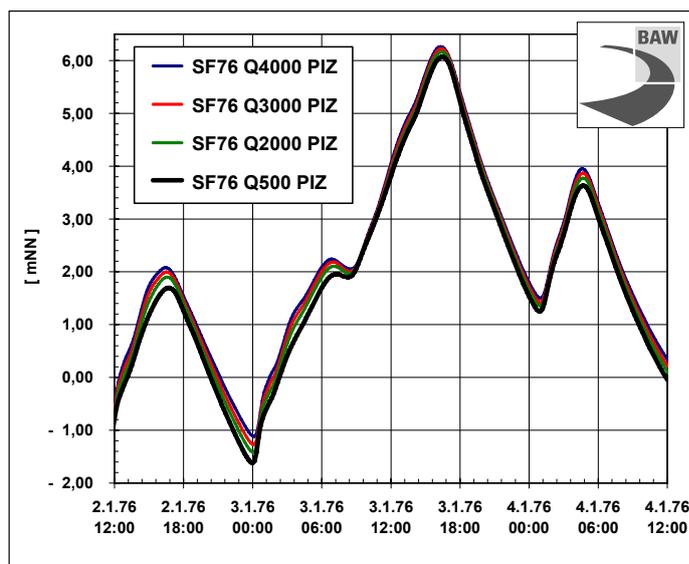


Bild 3: Variation des Oberwasserabflusses Q aus der Mittel-Elbe. Wasserstandsentwicklung am Pegel Schulau (Elbe km 641) für die Sturmflutszenarien SF76.

entlang der Elbe die Veränderungen im Sturmflutscheitelwasserstand für SF76 und SF94 aufgrund der Variation des Oberwasserzuflusses an. Im Elbmündungsbereich (Cuxhaven) hat ein erhöhter Oberwasserzufluss keinen Einfluss auf die Höhe der Sturmflutscheitelwasserstände. Bei Brunsbüttel sind Veränderungen im Zentimeterbereich zu beobachten. Den größten Einfluss auf den Sturmflutscheitelwasserstand hat der Oberwasserzufluss stromauf von Hamburg. Hier treten Änderungen von mehreren Dezimetern auf.

### 3.3 Topographie

Die Sturmfluten SF76, SF94 und SFB werden jeweils unter Berücksichtigung des heutigen topographischen Zustandes der Elbe (PIZ; siehe Bild 1 unten in Blau) und des geplanten Ausbauzustandes AZ385SV (siehe Bild 1 unten in Rot) modelliert. Bild 4 zeigt beispielhaft die Wasserstandszeitreihe am Pegel Schulau. Die in Abschnitt 3.3 vorgestellte Variation der Topographie der Elbe bewirkt bei Schulau Veränderungen im Sturmflutscheitelwasserstand von weniger als  $\pm 2$  cm. Tabelle 1 gibt für fünf Orte entlang der Elbe die Veränderungen im Sturmflutscheitelwasserstand für SF76; SF94 und SFB aufgrund der Variation der Topographie an.

Für die in Abschnitt 2.2 beschriebenen Szenarien wird jeweils die Sturmflut SF76 und SF94 modelliert. Beispielhaft ist in Bild 3 die Zeitreihe des Wasserstandes am Pegel Schulau für die vier Oberwasser-szenarien der Sturmflut SF76 dargestellt. Die Erhöhung des Oberwasserzuflusses erhöht am Tag vor der Sturmflut sowohl das Tideniedrigwasser als auch das Tidehochwasser (RUDOLPH, E., 2005). Während der Sturmflut wird ebenfalls das Hochwasser erhöht. Der Sturmflutscheitelwasserstand bei Schulau verändert sich durch die vorgegebene Variation der Oberwassers um bis zu 20 cm. Tabelle 1 gibt für fünf Orte

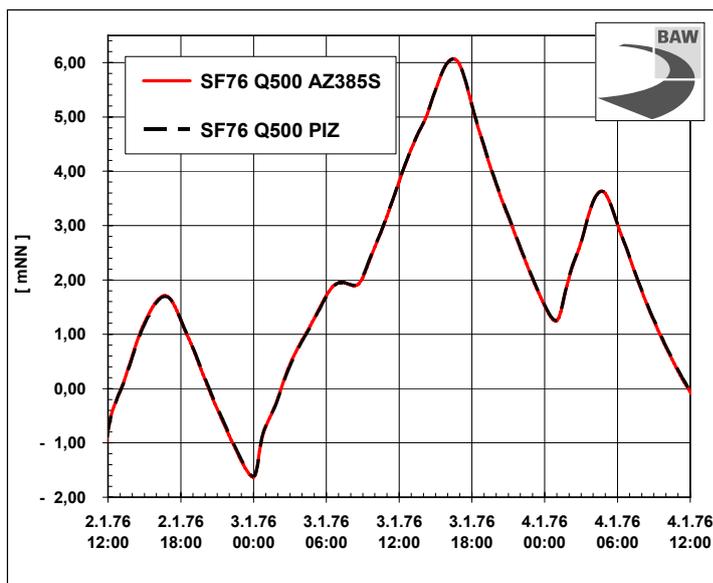


Bild 4: Variation der Topographie. Wasserstands-entwicklung am Pegel Schulau (Elbe km 641) für die Sturmflut Szenarien SF76.

An den gezeigten Orten sind die durch die topographischen Veränderungen bedingten Änderungen der Wasserstände kleiner als  $\pm 1$  cm.

### 3.4 Hochwasser-neutralität

Das 5 – Punkte Programm der Bundesregierung vom 15. September 2002 (BMVBW, 2003) sieht vor, dass alle Ausbauplanungen vor dem Hintergrund der Hochwasserereignisse der Elbe im August 2002 in ihrer Wirkung auf den Hochwasserschutz zu bewerten sind (siehe auch WaStrG §12). Zur Bewertung der Hochwasserneutralität der

geplanten Fahrrinnenanpassung in Unter- und Außenelbe wird die in Abschnitt 2 beschriebene Bemessungsturmflut 2085A sowie die Bemessungsturmflut mit extremem Oberwasserzufluss von  $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$  in den Topographien PIZ und AZ385S betrachtet. Auch für diese sehr hohe Sturmflut mit extrem hohem Oberwasserzufluss sind die ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutscheitelwasserstände in der Unter- und Außenelbe kleiner als  $\pm 2$  cm (siehe Bild 5). Da Änderungen des Hochwasserstandes in dieser Größenordnung nicht relevant für das Hochwasserschutzniveau sind, wird die geplante Fahrrinnenanpassung als hochwasserneutral bewertet.

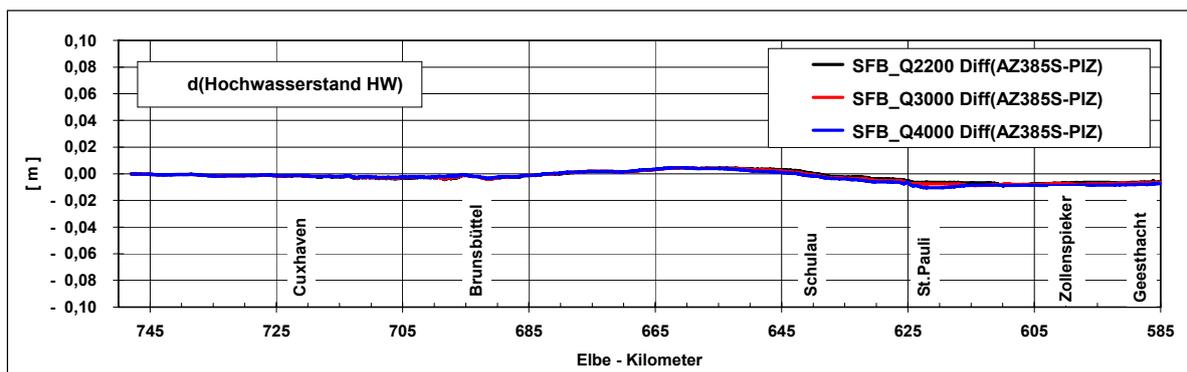


Bild 5: Änderung des Sturmflutscheitelwasserstandes AZ385S – PIZ für die Bemessungsturmflut 2085A (SFB in Schwarz) und die SFB mit extrem hohem Oberwasser  $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$  (rot) und  $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$  (blau) entlang der Elbe von Elbe km 748 (Mündung) bis Elbe km 585 (Geesthacht).

		Cuxhaven km 724	Brunsbüttel km 696	Schulau km 641	St.Pauli km 623	Bunthaus km 609	Zollenspieker Km 598
		dHW [cm]	dHW [cm]	dHW [cm]	dHW [cm]	dHW [cm]	dHW [cm]
Q2000	SF76	< + 1	+ 3	+ 9	+ 13	+ 22	+ 35
	SF94	< + 1	+ 1	+ 6	+ 8	+ 11	+ 22
Q3000	SF76	+ 1	+ 6	+ 15	+ 20	+ 31	+ 50
	SF94	< + 1	+ 2	+ 16	+ 20	+ 29	+ 45
Q4000	SF76	+ 1	+ 9	+ 19	+ 27	+ 42	+ 69
	SF94	+ 1	+ 4	+ 26	+ 32	+ 41	+ 60
Wind + 10 %	SF76	+ 12	+ 22	+ 28	+ 28	+ 30	+ 29
	SF94	+ 10	+ 17	+ 25	+ 26	+ 24	+ 24
Wind + 5 %	SF76	+ 6	+ 10	+ 13	+ 13	+ 13	+ 13
	SF94	+ 5	+ 8	+ 12	+ 12	+ 11	+ 11
Wind – 5 %	SF76	- 6	- 10	- 14	- 16	- 16	- 16
	SF94	- 5	- 7	- 11	- 11	- 11	- 9
Wind - 10 %	SF76	- 12	- 20	- 26	- 29	- 28	- 30
	SF94	- 9	- 14	- 22	- 22	- 21	- 18
AZ385S - PIZ	SF76	< - 1	< - 1	< - 1	< - 1	< - 1	< - 1
	SF94	< - 1	< - 1	<+ 1	<+ 1	± 0	± 0
	SFB	± 0	± 0	± 0	< - 1	< - 1	< - 1

Tabelle 1: Änderungen der Sturmflutscheitelwasserstände dHW für die betrachteten Sturmflutszenarien SF76, SF94 und SFB auf Grund der Variation des Oberwasserzuflusses Q (siehe Abschnitt 2.2), des lokalen Windes (siehe Abschnitt 2.1) und der Topographie (siehe Abschnitt 2.3) entlang der Tideelbe.

## 4 Zusammenfassung

Der Einsatz von numerischen Modellen ermöglicht es, systematische Variationen des lokalen Windes, des Oberwasserzuflusses und der Topographie bei Sturmfluten in der Elbe durchzuführen. Die Variation des lokale Windes über der Elbe um bis zu  $\pm 10\%$  bewirkt eine Veränderung des Sturmflutscheitelwasserstandes in der Tideelbe im Dezimeterbereich. Der Einfluss des Oberwassers ist stromauf von Hamburg am größten. Hier sind ebenfalls Veränderungen des Sturmflutscheitelwasserstandes im Dezimeterbereich zu beobachten. Der Einfluss der veränderten Fahrrinne ist stromauf von Cuxhaven zu erkennen und bewirkt Veränderungen des Sturmflutscheitelwasserstandes von  $\pm 2$  cm. Eine Erhöhung des Oberwasserzuflusses der Bemessungssturmflut auf  $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$  bzw.  $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$  erhöht ebenfalls die Sturmflutscheitelwasserstände stromauf von Hamburg. Auch für diese Sturmflutszenarien verändert sich der Sturmflutscheitelwasserstand ausbaubedingt um  $\pm 2$  cm.

Die vorgestellte Untersuchung zeigt, dass die geplante Fahrrinnenanpassung der Elbe als hochwasserneutral bewertet werden kann. Sie zeigt aber auch, dass relativ kleine Veränderungen der lokalen Windgeschwindigkeiten ( $\pm 10\%$ ) bzw. Veränderungen im Abflussverhalten der Elbe in der Sturmflutsaison (15. September bis 31. März) deutliche Veränderungen (1 bis 3 dm) in den Sturmflutscheitelwasserständen verursachen können.

## 5 Literaturverzeichnis

- BAW, 2007: Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt – Gutachten zu ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutkenngrößen. Gutachten BAW A3955 03 10062 H.1 b, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstrasse 157, 22559 Hamburg. Siehe auch [http://www.zukunftelbe.de/Projektbuero/service/kapitel\\_h1-h3/index.php](http://www.zukunftelbe.de/Projektbuero/service/kapitel_h1-h3/index.php)
- BAW, 2004: Validation document – Mathematical Model UnTRIM. Bundesanstalt für Wasserbau Dienststelle Hamburg. Wedeler Landstrasse 157, 22559 Hamburg. [http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Methoden/hnm/untrim/hnm\\_untrim-de.html](http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Methoden/hnm/untrim/hnm_untrim-de.html)
- BMVBW, 2003: Flusskonferenz 2002 – Dokumentation der gemeinsamen Konferenz zum vorbeugenden Hochwasserschutz, 15. September 2002. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen, 11030 Berlin.
- CASULLI, V. UND WALTERS, R.A., 2000: An unstructured, three – dimensional model based on the shallow water equations. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 32, 331 – 348.
- LÄNDERARBEITSGRUPPE, 1988: Bemessungswasserstände entlang der Elbe, Bericht der Länderarbeitsgruppe. Die Küste, Heft 47, 31 - 50.
- PROJEKTBURO FAHRRINNENANPASSUNG VON UNTER- UND AUßENELBE, 2006: Planfeststellungsantrag Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe für 14,5 m tiefgehende Containerschiffe. Antragsunterlagen und weitere Informationen siehe: <http://www.zukunftelbe.de/Projektbuero/service/index.php>
- RUDOLPH, E. 2005: Einfluss sehr hoher Abflüsse auf die Wasserstände in der Tideelbe. Promet, 31, Heft 2 – 4, 186 – 190.
- Schmidt, H. und Pätsch, J., (1992): Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnungen, Die Küste, Heft 54, 131 - 142.