Die Küste, 86 (2018), 311-320

Sturmfluten in den Ästuaren der Elbe, Jade-Weser und Ems

Elisabeth Rudolph

Zusammenfassung

Sturmfluten in den Ästuaren von Elbe, Jade-Weser und Ems können große Schäden verursachen und das Leben der Bewohner dieser Küstengebiete gefährden. Um ein besseres Verständnis für die Bedeutung der Prozesse zu bekommen, die die Höhe einer Sturmflut entlang des Ästuars beeinflussen, werden die Ergebnisse einer Sensitivitätsstudie analysiert. Durch den Einsatz hydrodynamischer numerischer Modelle der Ästuare können die Auswirkungen des Windes über dem Ästuar, eines Meeresspiegelanstieges in der Mündung des Ästuars und einer Zunahme des Oberwasserzuflusses in das Ästuar getrennt untersucht werden. Wind, Abfluss und Meeresspiegelanstieg werden auf der Grundlage des heutigen Wissens über die möglichen Auswirkungen des Klimawandels systematisch verändert. Die Ergebnisse der Sensitivitätsstudie geben einen Hinweis auf die mögliche Bandbreite der durch den Klimawandel hervorgerufenen Veränderungen der Sturmflutscheitelwasserstände, ermöglichen Vulnerabilitäten zu identifizieren und Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln.

Schlagwörter

Sturmflut, Sturmflutszenario, hydrodynamisch numerisches Modell, Ästuar, Sensitivitätsstudie, Wind, Meeresspiegelanstieg, Oberwasserzufluss

Summary

Storm surges in the estuaries along the German Bight of Elbe, Jade-Weser and Ems may cause severe damages and endanger the life of the inhabitants of these coastal areas. The results of a sensitivity study are analysed in order to arrive at a better understanding of the importance of the processes modifying the height of a storm surge along an estuary. Hydrodynamic-numerical models can be used to carry out separate investigations on the impact of the wind over the estuary, the sea level rise at the mouth of the estuary and the freshwater discharge into the estuary. Wind, freshwater discharge and sea level rise are varied systematically, in line with today's knowledge, within the range of expected changes in future climates. The results of this sensitivity study show a bandwidth of possible changes in water levels during storm surge. This study enables vulnerabilities along the estuaries due to climate change to be identified and adaptation strategies to be developed.

Keywords

storm surge, storm surge scenario, hydrodynamic numerical model, estuary, sensitivity study, wind, sea level rise, fresh water discharge

Inhalt

1 Einleitung 312
2 Numerische Modellierung von Sturmfluten 313
3 Sensitivitätsstudie 314
4 Ergebnisse 315
4.1 Meeresspiegelanstieg 315
4.2 Lokaler Wind über den Ästuaren 316
4.3 Oberwasserzufluss 317
5 Schlussfolgerungen 318
6 Danksagung 319
7 Schriftenverzeichnis 319

1 Einleitung

Numerische Modelle von Ästuaren werden für unterschiedliche Zwecke eingesetzt. Im Projekt OPTEL wurde gezeigt, dass es möglich ist, mit hydrodynamisch-numerischen Modellen des Elbeästuars zuverlässige Vorhersagen von Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit und Salzgehalt sowohl unter alltäglichen Bedingungen als auch unter Sturmflutbedingungen zu erstellen (BORK und MÜLLER-NAVARRA 2012; KREMP et al. 2012). Im Projekt MUSE wurden mit numerischen Modellen historische Sturmfluten nachgerechnet, um Aufschluss zu erhalten, wie eine historische Sturmflut in der heutigen Topographie aussehen würde (MÜLLER-NAVARRA et al. 2006). Hydrodynamisch-numerische Modelle von Ästuaren leisten einen nützlichen Beitrag bei der Untersuchung der Bedeutung der Prozesse, die Sturmfluten in Ästuaren verursachen oder beeinflussen.

Herbst- und Winterstürme über der Nordsee können in den zur Deutschen Bucht gehörenden Ästuaren von Elbe, Jade-Weser und Ems Sturmfluten auslösen. Die Sturmfluten in diesen Ästuaren werden nicht nur durch die Tidedynamik und den Windstau in der Deutschen Bucht beeinflusst, sondern auch durch Prozesse in den Ästuaren selbst, die bis zu 100 km in die Norddeutsche Tiefebene hineinreichen. Der lokale Wind über den Ästuaren, die Bathymetrie, z. B. die an das Ästuar grenzenden Überschwemmungsgebiete oder der Oberwasserzufluss in das Ästuar haben ebenfalls einen Einfluss auf die Wasserstände während einer Sturmflut.

Klimatische Veränderungen können sich auf die Bandbreite der Werte dieser Parameter auswirken. In einer Sensitivitätsstudie wird der Einfluss von Wind, Abfluss und Meeresspiegelanstieg auf die Scheitelwasserstände während einer Sturmflut untersucht. Um den Einfluss der einzelnen Prozesse getrennt untersuchen zu können, kommen numerische Modelle des Elbe-, Jade-Weser- und Emsästuares zum Einsatz. Wind, Abfluss und Meeresspiegelanstieg werden auf der Grundlage des heutigen Wissens über die möglichen Auswirkungen des Klimawandels systematisch verändert.

In den Ästuaren von Elbe, Jade-Weser und Ems befinden sich die Zufahrten (Wasserstraßen) zu den Häfen von Hamburg (Elbe), Bremerhaven (Weser), Bremen (Weser) und Emden (Ems). Sturmfluten können an den Küsten der Ästuare schwere Schäden anrichten und das Leben der Bewohner dieser Küstengebiete gefährden. Daher ist es wichtig,

ein besseres Verständnis der Prozesse zu erlangen, die Sturmfluten entlang der Ästuare verändern. Die Kenntnisse fließen in die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen ein, die heute und unter den durch den Klimawandel veränderten zukünftigen Bedingungen zur Verbesserung beispielsweise des Küstenschutzes beitragen sollen (SCHULTE-RENTROP und RUDOLPH 2012; SEIFFERT und HESSER 2014).

2 Numerische Modellierung von Sturmfluten

Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchung wird das hydrodynamisch-numerische Modell UnTRIM (CASULLI und LANG 2004; CASULLI und WALTERS 2000) verwendet. UnTRIM ist ein dreidimensionales Finite-Differenzen Verfahren. Es löst die Flachwassergleichungen und die Transportgleichungen für Salz auf einem unstrukturierten orthogonalen Gitter. UnTRIM eignet sich für Anwendungen in geometrisch komplexen Ästuaren mit regelmäßigem Trockenfallen und Überfluten großer Wattflächen.

Die Ästuarmodelle verwenden Bathymetrien aus den Jahren 2003 (Elbe und Jade-Weser) bzw. 2006 (Ems). Das Modellgebiet deckt den von Sturmfluten betroffenen Bereich des Ästuars ab. Bei Sturmflut werden die Wehre bei Geesthacht (Elbe), Hemelingen (Weser) und Herbrum (Ems) gelegt. Dadurch beeinflusst die Sturmflut auch die Wasserstände bis in den Binnenbereich von Elbe, Weser und Ems hinein. Abb. 1 zeigt eine schematische Darstellung des Untersuchungsgebiets. In der vorliegenden Studie wird davon ausgegangen, dass das Sturmflutsperrwerk in der Ems bei Gandersum permanent geöffnet ist. (Simulationsergebnisse einer Studie mit gesteuertem Sperrwerk werden in SEIFFERT und HESSER (2014) vorgestellt).

Das Modell erhält als Randwerte für die betrachteten Zeiträume Informationen zum Oberwasserzufluss am flussseitigen Ende des Ästuars, zum Wasserstand und Salzgehalt am offenen seeseitigen Rand und zum Wind über dem Ästuar. Im Referenzszenario („heute“) sind dies die vom Deutschen Wetterdienst (DWD) bereitgestellten Windfelder, die am Rand zur Nordsee aus Messungen generierten Wasserstände und die gemessenen Oberwasserzuflüsse. Das Ästuarmodell erzeugt für jeden Ort im Modellgebiet Zeitreihen der Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten und anderer Parameter. Für jedes Ästuar kommt ein individuell kalibriertes Modell zum Einsatz.

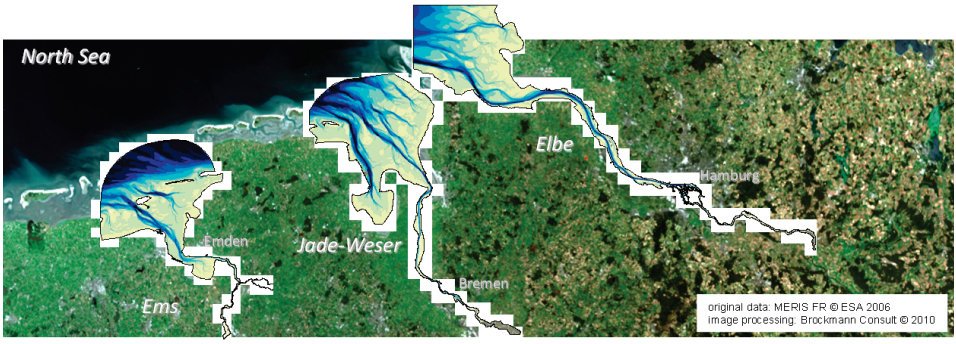

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Modellgebiete der Ästuare von Elbe, Jade-Weser und Ems in der Deutschen Bucht. Die Entfernung zwischen Cuxhaven an der Elbemündung und Hamburg beträgt 100 km.

3 Sensitivitätsstudie

Der Wasserstand am Rand des Ästuars zur Nordsee, der Oberwasserzufluss in das Ästuar und das Windfeld über dem Ästuar bestimmen die Höhe der Sturmflut im Ästuar. Mit Hilfe einer Sensitivitätsstudie werden Szenarien untersucht, die zentralen Elemente möglich Zukünfte hervorheben. Durch den Einsatz von numerischen Modellen können in allen drei Ästuaren identische Szenarien zu untersucht werden. Damit können gemeinsame und unterschiedliche Reaktionen der Sturmfluten auf geänderte Randwerte ermittelt werden.

Als Grundlage der Szenarien dienen hohe historische Sturmfluten: die Sturmflut vom 3. Januar 1976 (SF76) in Elbe und Weser und die Sturmflut vom 1. November 2006 (SF06) im Emsästuar. Es wird davon ausgegangen, dass die grundlegenden Eigenschaften von Stürmen über der Deutschen Bucht auch bei einem Klimawandel gleich bleiben und daher die ausgewählten Sturmfluten auch unter zukünftigen klimatischen Verhältnissen auftreten können. In der Sensitivitätsstudie wird der Einfluss eines

- Meeresspiegelanstieges in der Nordsee, einer
- Zunahme des Oberwasserzufluss in die Ästuare und einer
- Zunahme der lokalen Windgeschwindigkeit über den Ästuaren

auf den Sturmflutscheitelwasserstand (HW) entlang der Ästuare untersucht. Die genannten Parameter werden auf der Grundlage des heutigen Wissens über die möglichen Auswirkungen des Klimawandels systematisch verändert (BECKER 2012; HEINRICH et al. 2012; HORSTEN et al. 2012). Das Sturmflut-Referenzszenario wird mit der an der Grenze zur Nordsee gemessenen Wasserstandsentwicklung, der über dem Ästuar gemessenen Windgeschwindigkeit und dem gemessenen Abfluss angetrieben.

An der Grenze des Ästuars zur Nordsee werden die Wasserstandsrandwerte um einen möglichen Meeresspiegelanstieg erhöht. Untersucht werden drei verschiedene Szenarien eines Meeresspiegelanstiegs - 25 cm, 80 cm und 115 cm -, die jeweils in der Fachliteratur diskutiert wurden (GÖNNERT et al. 2009). Zur Untersuchung der Auswirkung der lokalen Windgeschwindigkeit über den Ästuaren wird die Windgeschwindigkeit um 10 % erhöht.

Tabelle 1: Während historischer Sturmfluten gemessene Abflüsse an den Pegeln Neu Darchau (Elbe), Intschede (Weser) und Versen (Ems) sowie typische Abflusswerte (HPA HAMBURG PORT AUTHORITY 2012; NLWKN NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ 2013).

	Elbe [m^3/s]	Weser [m^3/s]	Ems [m^3/s]
3. Januar 1976	500	250	114
1. November 2006	299	147	33
MQ (mittlerer Abfluss)	709	326	80
HHQ (höchster beobachteter Abfluss)	3620	3500	1200
$Q_{\text{Bemessungssturmflut}}$	2200	2000	700

Der Oberwasserzufluss Q wird für das numerische Modell am flussseitigen Ästuarende bereitgestellt. Die Sturmflutszenarien werden mit dem gemessenen Abfluss und drei erhöhten Abflüssen gebildet: 2000 m^3/s, 3000 m^3/s und 4000 m^3/s für Elbe und Weser sowie 350 m^3/s, 700 m^3/s und 1200 m^3/s für die Ems. Zum Vergleich sind in Tab. 1 typische Messwerte für den Oberwasserzufluss aufgeführt.

4 Ergebnisse

4.1 Meeresspiegelanstieg

Abb. 2 zeigt Zeitreihen des Wasserstandes bei Hamburg (Elbe-Km 623N), Bremen (Weser-Km 0) und Emden (Ems-Km 40) für den heutigen Meeresspiegel sowie für einen Meeresspiegelanstieg von 25 cm, 80 cm und 115 cm am seeseitigen Rand der Ästuare.

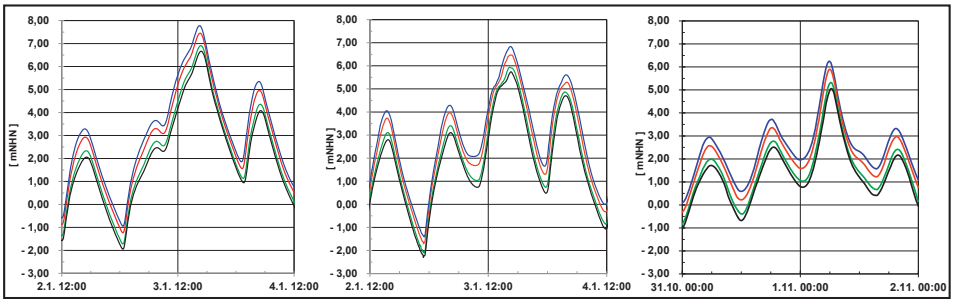

Abbildung 2: Sensitivitätsstudie Meeresspiegelanstieg: Zeitreihen des Wasserstandes bei Hamburg (Elbe-Km 623N, SF76, links), Bremen (Weser-Km 0, SF76, Mitte) und Emden (Ems-Km 40, SF06, rechts). Die schwarze Kurve steht für das Referenzszenario. Ein Meeresspiegelanstieg in der Ästuarmündung von 25 cm ist in Grün, von 80 cm in Rot und von 115 cm in Blau gekennzeichnet.

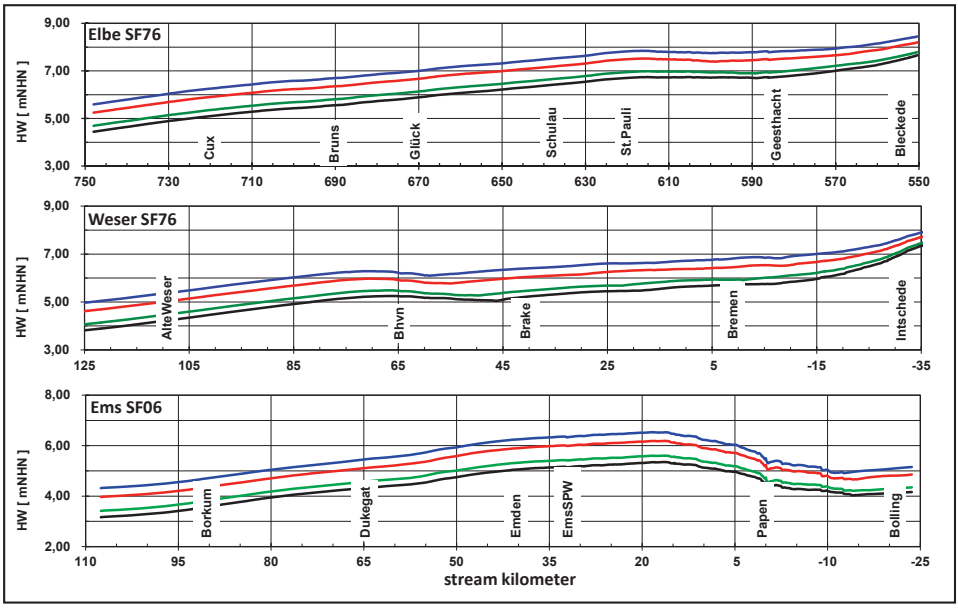

Abbildung 3: Sensitivitätsstudie Meeresspiegelanstieg: Sturmflutscheitelwasserstand (HW) entlang der Ästuare von Elbe (oben), Weser (Mitte) und Ems (unten). Ein Meeresspiegelanstieg in der Ästuarmündung von 25 cm ist in Grün, von 80 cm in Rot und von 115 cm in Blau gekennzeichnet.

Durch den Meeresspiegelanstieg erhöhen sich sowohl am Vortag als auch am Tag der Sturmflut die Tidehoch- und Tideniedrigwasserstände. Infolge des Meeresspiegelanstiegs

ist der Sturmflutscheitelwasserstand höher und wird einige Minuten früher erreicht. Hohe Wasserstände, z. B. Wasserstände über NHN + 3,00 m, dauern bei Berücksichtigung eines Meeresspiegelanstiegs bis zu mehreren Stunden länger.

Der Sturmflutscheitelwasserstand (HW) wird für alle Szenarien auf einem Profil von der Ästuarmündung entlang der Ästuare bis Bleckede (Elbe), Intschede (Weser) und Bollingerfähr (Ems) analysiert. Abb. 3 zeigt die Sturmflutscheitelwasserstände (HW) für das Referenzszenario und die drei untersuchten Szenarien mit Meeresspiegelanstieg.

Ein Anstieg des Meeresspiegels in der Ästuarmündung führt bei Sturmflut zu einem Anstieg der Scheitelwasserstände entlang des gesamten Ästuares, d. h. im gesamten bereits heute von Sturmfluten betroffenen Gebiet.

4.2 Lokaler Wind über den Ästuaren

In einer zweiten Sensitivitätsstudie wird der Einfluss des lokalen Windes über dem Ästuar bei Sturmflut untersucht. Für diese künstliche Sensitivitätsstudie wird davon ausgegangen, dass die Windgeschwindigkeit über den Ästuaren im Untersuchungszeitraum um 10 % zunimmt. Im Referenzszenario SF76 erreichen die über der Elbe gemessenen Windgeschwindigkeiten 29 m/s im Mündungsbereich und 20 m/s im Gebiet von Hamburg. Die über der Weser gemessenen Windgeschwindigkeiten erreichen 25 m/s im Mündungsbereich und 22 m/s im Gebiet von Bremen. Im Referenzszenario SF06 erreichen die über der Ems gemessenen Windgeschwindigkeiten 25 m/s im Mündungsbereich und 16 m/s im Gebiet von Emden. Am Vortag der Referenzszenarien werden über den drei Ästuaren lediglich niedrige Windgeschwindigkeiten beobachtet.

Abb. 4 zeigt den Einfluss des lokalen Windes auf die Wasserstände bei Sturmflut bei heutigem Meeresspiegel und bei einem Meeresspiegelanstieg von 80 cm. Wie erwartet hat die prozentual erhöhte Windgeschwindigkeit keinen Einfluss auf die Wasserstände am Vortag der Sturmflut, da die Windgeschwindigkeiten niedrig sind. Am Tag der Sturmflut führt die um 10 % erhöhte Windgeschwindigkeit jedoch zu einer Zunahme des Wasserstandes um bis zu 30 cm. Dies gilt sowohl für das Referenzszenario mit dem heutigen Meeresspiegel als auch für das Szenario mit einem Meeresspiegelanstieg von 80 cm.

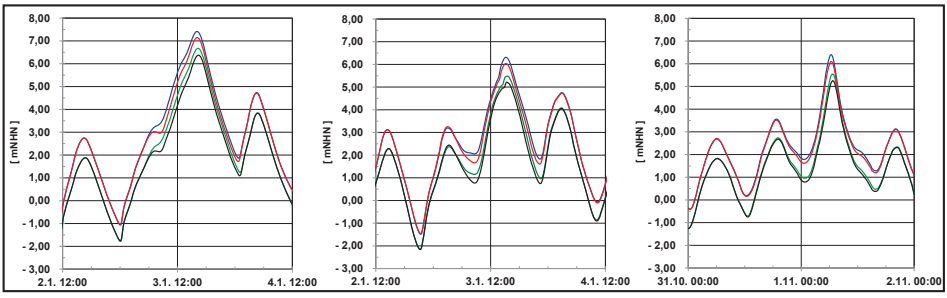

Abbildung 4: Sensitivitätsstudie Wind und Sensitivitätsstudie Wind und Meeresspiegelanstieg: Wasserstandszeitreihen bei Schulau (Elbe-Km 640, SF76, links), Brake (Weser-Km 40, SF76, Mitte) und Terborg (Ems-Km 25, SF06, rechts). Schwarz: heutiger Meeresspiegel, grün: heutiger Meeresspiegel und um 10 % erhöhte lokale Windgeschwindigkeit, rot: Meeresspiegelanstieg von 80 cm, blau: Meeresspiegelanstieg von 80 cm und um 10 % erhöhte lokale Windgeschwindigkeit.

4.3 Oberwasserzufluss

Der Einfluss des Oberwasserzuflusses auf die Sturmflutscheitelwasserstände im Elbeästuar wird z. B. von der LÄNDER-ARBEITSGRUPPE (1988) beschrieben. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden Messungen analysiert und für verschiedene Orte von Interesse Wasserstandserhöhungen pro 1000 m^3/s Oberwasserzufluss abgeleitet. Durch den Einsatz eines numerischen Modells lässt sich die Untersuchung auf eine größere Bandbreite von Kombinationen von Oberwasserzufluss mit Sturmfluten ausweiten.

Die Auswirkungen eines erhöhten Oberwasserzuflusses (3000 m^3/s in Elbe und Weser, 700 m^3/s in der Ems) auf die Wasserstände bei Sturmflut für den heutigen mittleren Meeresspiegel sowie einen Meeresspiegelanstieg in der Ästuarmündung von 80 cm sind in Abb. 5 für die Orte Hamburg (Elbe-Km 623N) in der Mitte des Elbeästuars, Bremen (Weser-Km 0) im oberen Teil des Weserästuars und Emden (Ems-Km 40) in einem breiten Teil des Emsästuars dargestellt.

Im Referenzszenario und im Szenario mit zusätzlichem Meeresspiegelanstieg führt der erhöhte Oberwasserzufluss am Vortag der Sturmflut insbesondere im mittleren und oberen Bereich der Ästuare zu höheren Tidehoch- und Tideniedrigwasserständen und zu einem reduzierten Tidehub. Der Einfluss des erhöhten Abflusses auf den Sturmflutscheitelwasserstand hängt auch von der Position im Ästuar ab. In Bremen steigt der Sturmflutscheitelwasserstand bei einer Erhöhung des Oberwasserzuflusses um mehrere Dezimeter an. In Emden hingegen wird ein geringer Anstieg festgestellt.

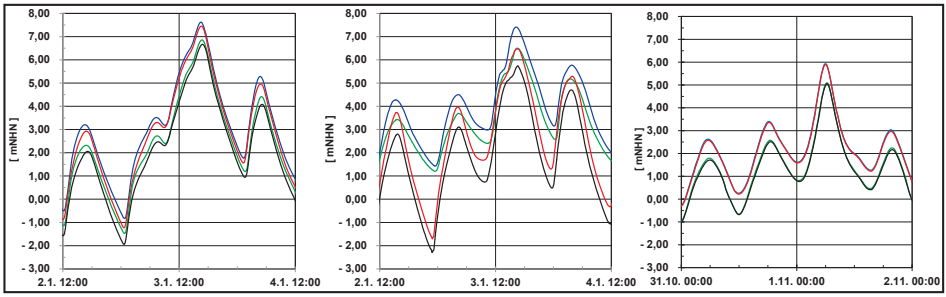

Abbildung 5: Sensitivitätsstudie Oberwasserzufluss und Sensitivitätsstudie Oberwasserzufluss und Meeresspiegelanstieg: Wasserstandszeitreihen bei Hamburg (Elbe-Km 623N, SF76, links), Bremen (Weser-Km 0, SF76, Mitte) und Emden (Ems-Km 40, SF06, rechts). Schwarz: heutiger Meeresspiegel, grün: heutiger Meeresspiegel und Abfluss von 3000 m^3/s für Elbe und Weser sowie von 700 m^3/s für Ems, rot: Meeresspiegelanstieg von 80 cm, blau: Meeresspiegelanstieg von 80 cm und Abfluss von 3000 m^3/s für Elbe und Weser sowie von 700 m^3/s für Ems.

Der Sturmflutscheitelwasserstand (HW) wird für alle Szenarien zum Oberwasserzufluss und den Szenarien zu Oberwasserzufluss und Meeresspiegelanstieg auf einem Profil analysiert, das von der Mündung der Ästuare bis nach Bleckede (Elbe), Intschede (Weser) und Bollingerfähr (Ems) verläuft. Abb. 6 zeigt die Sturmflutscheitelwasserstände für die genannten Szenarien.

Der Sturmflutscheitelwasserstand (HW) wird in der Mündung der drei untersuchten Ästuare hauptsächlich durch den Meeresspiegelanstieg verändert. Die Zunahme des HW entspricht ungefähr dem Meeresspiegelanstieg. In diesen breiten Teilen der Ästuare, in denen das Flut- und Ebbevolumen viel größer ist als der Oberwasserzufluss, hat ein erhöhter Abfluss keine signifikante Auswirkung auf den Wasserstand. In den oberen,

engeren Bereichen der Ästuare führt der Oberwasserzufluss zu einer Veränderung des Scheitelwasserstandes bei Sturmflut. Im oberen Bereich der Ästuare an der Grenze zum Binnengewässer bestimmt der Oberwasserzufluss die Höhe des Wasserstandes. Im mittleren Teil der drei untersuchten Ästuare wird der Sturmflutscheitelwasserstand sowohl durch den Meeresspiegelanstieg als auch durch den Oberwasserzufluss beeinflusst.

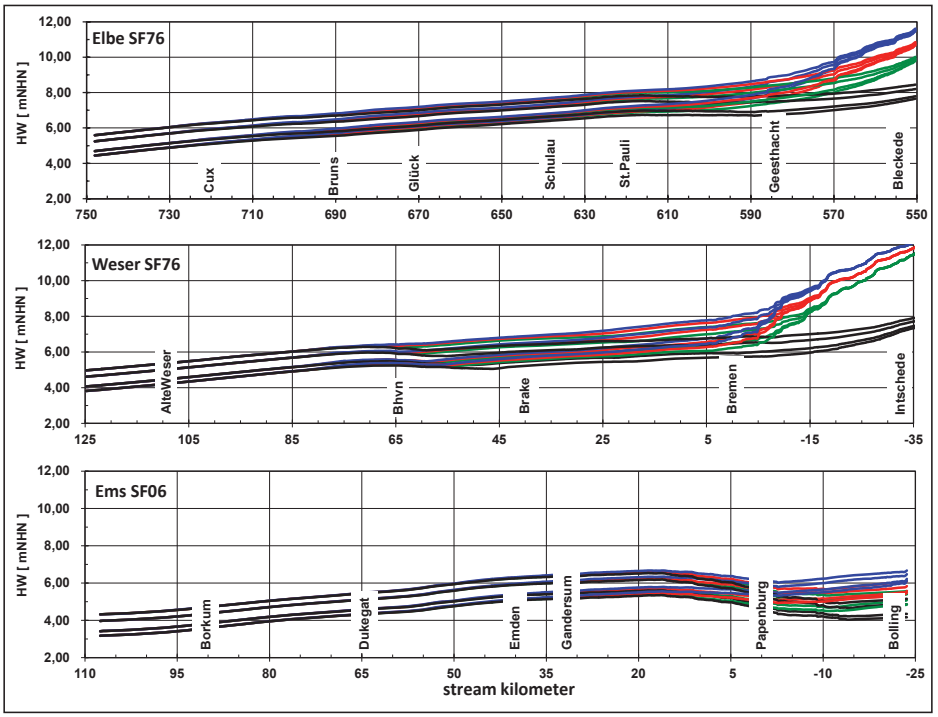

Abbildung 6: Sensitivitätsstudie Oberwasserzufluss und Meeresspiegelanstieg. Sturmflutscheitelwasserstand (HW) entlang der Ästuare von Elbe (oben), Weser (Mitte) und Ems (unten) bei einem Meeresspiegelanstieg von 25 cm, 80 cm bzw. 115 cm in der Ästuarmündung. Die Farben kennzeichnen die Menge des Oberwasserzuflusses: Schwarz: Elbe 500 m^3/s, Weser 250 m^3/s, Ems 32 m^3/s, grün: Elbe und Weser 2000 m^3/s sowie Ems 350 m^3/s, rot: Elbe und Weser 3000 m^3/s sowie Ems 700 m^3/s, blau: Elbe und Weser 4000 m^3/s sowie Ems 1200 m^3/s.

5 Schlussfolgerungen

Um eine geeignete Strategie zur Anpassung der deutschen Ästuare an den Klimawandel entwickeln zu können, bedarf es eines besseren Verständnisses der gegenwärtigen Situation und geeigneter Analysen der möglichen durch den Klimawandel bedingten Entwicklungen in der Zukunft. Der Einfluss des Klimawandels auf Sturmfluten in den Ästuaren von Elbe, Jade-Weser und Ems wird mit Hilfe einer Sensitivitätsstudie untersucht. Die Studie analysiert den Einfluss eines Meeresspiegelanstiegs in den Ästuarmündungen, des Windes über dem Ästuar und des Oberwasserzuflusses. Mit Hilfe von hydrodynamisch-numerischen Modellen der Ästuare von Elbe, Jade-Weser und Ems lässt sich der Einfluss der einzelnen Prozesse getrennt untersuchen. Wind, Abfluss und Meeresspiegelanstieg

werden auf der Grundlage des heutigen Wissens über die möglichen Auswirkungen des Klimawandels systematisch verändert. Die drei untersuchten Ästuare zeigen dieselbe Reaktion auf die untersuchten Szenarien. Die Ergebnisse der Studie sind in Tab. 2 zusammengefasst.

In der Mündung der Ästuare wird der Sturmflutscheitelwasserstand durch die Bedingungen in der Nordsee (das heißt, Sturmflut und Meeresspiegelanstieg (slr)) bestimmt. Im oberen Teil und in der Mitte des Ästuars wird der Sturmflutscheitelwasserstand sowohl durch die in der Nordsee als auch die im Binnenland (Abfluss Q) vorherrschenden Bedingungen verändert. Eine Zunahme des lokalen Windes über dem Ästuar beeinflusst den Sturmflutscheitelwasserstand entlang des gesamten Ästuars.

Die betrachteten Szenarien führen zu einer Zunahme der Sturmflutscheitelwasserstände, einer früheren Eintrittszeit der Sturmflutscheitelwasserstände sowie einer längeren Dauer hoher Wasserstände.

Tabelle 2: Veränderungen der Sturmflutscheitelwasserstände in den Ästuaren von Elbe, Weser und Ems für die in der Sensitivitätsstudie untersuchten Szenarien.

	Mündung des Ästuars	Mitte des Ästuars	Oberer Teil des Ästuars
Meeresspiegelanstieg (slr)	+ slr	+slr ± 10 cm	+ slr ± 10 cm
Abfluss Q	± 1 cm	5 cm bis 30 cm	10 cm bis 100 cm
Q und slr	+ slr	≤ (slr + Q)	≤ (slr + Q)
Lokaler Wind	bis 10 cm	bis 30 cm	bis 30 cm
Wind und slr	~ (slr + Wind)	~ (slr + Wind)	~ (slr + Wind)

Die Ergebnisse dieser Sensitivitätsstudie dienen SEIFFERT und HESSER (2014) als Grundlage für die Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels und die Entwicklung von Anpassungsstrategien für die deutschen Ästuare.

6 Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen der Forschungsprogramme KLIWAS „Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt“ und KLIMZUG-Nord „Anpassungsstrategien für die Metropolregion Hamburg“ durchgeführt. KLIWAS wird durch das BMVBS (heute BMVI) finanziert; KLIMZUG-Nord wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (01LR0805A), die Stadt Hamburg und die Metropolregion Hamburg gefördert. Wir bedanken uns bei allen Mitarbeitern der Teams von KLIWAS/KLIMZUG-Nord bei der Bundesanstalt für Wasserbau in Hamburg für ihre Unterstützung und für die Durchführung verschiedener Simulationen. Besonderer Dank geht an Annette Büscher, Anika Johannsen, Annkathrin Rinnus, Rita Seiffert und Norbert Winkel.

7 Schriftenverzeichnis

BECKER, P.: Climate and Climate Impact Research in Germany – Where Do We Stand Today? In: FEDERAL MINISTRY OF TRANSPORT, BUILDING AND URBAN DEVELOPMENT (ed.): KLIWAS - impacts of climate change on waterways and navigation in Germany. 17-19, 2012.

BORK, I. und MÜLLER-NAVARRA, S.: OPTEL-A - Entwicklung eines operationellen Tideelbemodells auf der Basis des hydrodynamisch-numerischen Modellverfahrens BSHcmod für die Nord- und Ostsee. Die Küste, 79, 2012.

CASULLI, V. and LANG, G.: Mathematical Model UnTRIM - Validation Document. Bundesanstalt für Wasserbau (Hamburg), 2004.

CASULLI, V. and WALTERS, R. A.: An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations. In: International Journal for numerical methods in fluids, 32, 331-348, 2000.

GÖNNERT, G.; JENSEN, J.; STORCH, H. VON; THUMM, S.; WAHL, T. und WEISSE, R.: Der Meeresspiegelanstieg - Ursachen, Tendenzen und Risikobewertung. Die Küste, 76, 225-256, 2009.

HEINRICH, H.; MIKOLAJEWICZ, U.; MEYER-REIMER, E.; SEIN, D.; KLEIN, B.; GANSKE, A. and BÜLOW, K.: Impacts of Climate Change on Waterways in Estuaries, on Coasts and in the Sea. In: Federal Ministry of Transport, Building and Urban Development (ed.): KLIWAS - impacts of climate change on waterways and navigation in Germany. 121-123, 2012.

HORSTEN, T.; KRAHE, P.; NILSON, E.; BELZ, J. U. and EBNER VON ESCHENBACH, A.: Impacts of Climate Change on the Elbe. In: FEDERAL MINISTRY OF TRANSPORT, BUILDING AND URBAN DEVELOPMENT (ed.): KLIWAS - impacts of climate change on waterways and navigation in Germany. 89-93, 2012.

HPA HAMBURG PORT AUTHORITY (ed.): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch - Elbegebiet, Teil III 2008. Untere Elbe ab der Havelmündung. 178 p., 2012.

KREMP, C.; RUDOLPH, E. und SEHILI, A.: OPTEL-C: Entwicklung eines operationellen Tidemodells der Elbe sowie einer Modellkopplung mit dem BSH-Vorhersagemodell der Nordsee. Die Küste, 79, 2012.

LÄNDER-ARBEITSGRUPPE: Bemessungswasserstände entlang der Elbe. Die Küste, 47, 31-50, 1988.

MÜLLER-NAVARRA, S.; BORK, I.; JENSEN, J.; KOZIAR, C.; MUDERSBACH, C.; MÜLLER, A. und RUDOLPH, E.: Modellstudien zur Sturmflut und zum Hamburg-Orkan 1962. In: HANSA International Maritime Journal, Vol. 143, 12, 72-88, 2006.

NLWKN NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ (ed.): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch - Weser-Emsgebiet 2010. 301 p., 2013.

SCHULTE-RENTROP, A. and RUDOLPH, E.: A Sensitivity Study of Storm Surges Under the Conditions of Climate Change in the Elbe Estuary. In: FILHO, W. L. (ed.): Climate Change and Disaster Risk Management. Berlin, 295-309, doi: 10.1007/978-3-642-31110-9_18, 2012.

SEIFFERT, R. and HESSER, F.: Investigating climate change impacts and adaptation strategies in German estuaries. Die Küste, 81, 2014.