

Auswirkungen klimabedingter Änderungen auf das Strömungs- und Transportverhalten deutscher Nordseeästare

ein Vergleich von Ems, Jade-Weser und Elbe

275

Frau Dipl.-Ing. Ingrid Holzwarth

Ingrid Holzwarth, Annette Schulte-Rentrop, Fred Hesser

Abstract

Um die Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs auf die deutsche Nordseeküste und ihre Ästare besser abschätzen zu können, ist im Rahmen von KLIWAS und KLIMZUG-NORD eine Systemstudie durchgeführt worden. Mit Hilfe 3D-hydrodynamisch-numerischer Modelle der Nordsee sowie der Ästare von Elbe, Weser und Ems werden zwei Situationen simuliert: eine Situation, die aktuelle, typische Verhältnisse repräsentiert und eine Situation, die eine Erhöhung des Meeresspiegels um 80 cm einschließt. Im Vergleich zur aktuellen Variante zeigen die Ergebnisse der Situation mit erhöhtem Meeresspiegel eine Vergrößerung des Tidenhubs aufgrund eines unterschiedlich starken Anstiegs von Tidehoch- und Tideniedrigwasser. Damit einher geht eine Verschiebung der Eintrittszeiten der Tidescheitel und Kenterpunkte sowie der Strömungsgeschwindigkeiten, die generell ansteigen. Zudem verändert sich das Flutstrom- zu Ebbestromverhältnis in vielen Bereichen zugunsten des Flutstroms. Aufgrund dessen ist mit einem verstärkten Stromauftransport von Sedimenten zu rechnen. Darüber hinaus zeigt sich in den Simulationen eine Verschiebung der Brackwasser- sowie der Trübungszone stromauf.

Diese Untersuchung ist Teil der Grundlage, auf der zunächst Betroffenheiten ermittelt und dann Anpassungsoptionen entwickelt werden, die den Auswirkungen eines sich wandelnden Klimas begegnen.

Motivation

Im aktuellen vierten Sachstandsbericht (AR4) des IPCC wird für die nächsten Jahrzehnte ein Wandel im Klima projiziert, der sich unter anderem in veränderten Lufttemperaturen, Niederschlagsmengen (TRENBERTH et al. 2007) und Meeresspiegelhöhen (BINDOFF et al. 2007) zeigt.

Ein verändertes Klima beeinflusst auch die Situation an den deutschen Nordseeästaren und es können Betroffenheiten z. B. bezüglich Grundwasser, landwirtschaftlicher Nutzung des Flusswassers, Flora und Fauna, Schiffbarkeit der Bundeswasserstraßen sowie Hochwasserschutz entstehen. In wieweit Klimaänderungen zu den genannten Betroffenheiten im Bereich der deutschen Küste führen, untersucht die Bundesanstalt für Wasserbau in der Dienststelle Hamburg im Rahmen der Forschungsprogramme KLIWAS und KLIMZUG-NORD. Dies geschieht mit Hilfe dreidimensionaler hydrodynamisch-numerischer Modelle.

Die projizierten Klimaänderungen sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Aus diesem Grund können auch die möglichen Folgen nur mit großen Unsicherheiten abgeschätzt werden. Deshalb sind die Untersuchungen als Sensitivitätsstudien angelegt, in denen eine Bandbreite möglicher Änderungen des Wasserstandes in der Nordsee, des Oberwasserzuflusses, der Windstärke und Windrichtung sowie der Topographie berücksichtigt wird. Ziel der Untersuchungen ist die Entwicklung von Anpassungsoptionen, mit deren Hilfe den klimabedingten Veränderungen begegnet werden kann.

Dabei werden in den Untersuchungen extreme Situationen, z. B. Sturmfluten, sowie typische Verhältnisse betrachtet. Die Letzteren sind mit Blick auf den Transport von Sediment besonders interessant, da sie die Hauptrichtung und die Menge des im Wasser transportierten Materials bestimmen. Eine Veränderung hat somit Einfluss auf die Unterhaltungsmaßnahmen an den Wasserstraßen.

Es wird erwartet, dass insbesondere ein Anstieg des mittleren Meeresspiegels die Strömungs- und Transportverhältnisse in der Deutschen Bucht und damit auch in deren Ästaren beeinflusst (BMVBS 2007, FICKERT & STROTSMANN 2009) und aufgrund dessen Forschungsbedarf besteht (KDM 2007). In der hier beschriebenen Studie werden deshalb zwei Situationen verglichen: 1) eine Situation, die die aktuellen typischen Verhältnisse repräsentiert (*IST*), 2) eine experimentelle Situation (*EXP*), in der der mittlere Meeresspiegel am Rand der Nordsee um 80 cm höher liegt. Betrachtet wird das Gebiet der Deutschen Bucht mit einem Fokus auf den Ästaren von Elbe, Weser und Ems (Abb.1).

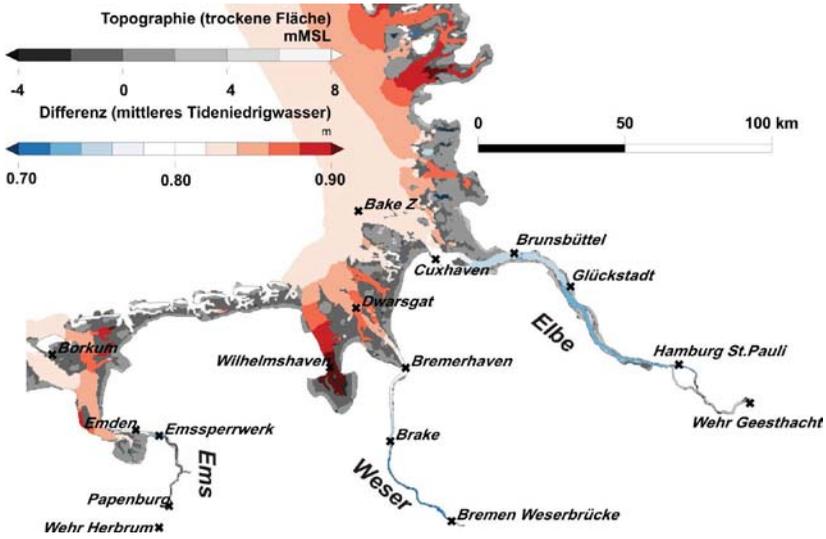


Abbildung 1: Untersuchungsgebiet; Darstellung der Änderung des mittleren Tideniedrigwassers in der Deutschen Bucht zwischen den Situationen *IST* und *EXP*. Eine weiße Färbung bedeutet eine Änderung im Bereich des eingesteuerten Betrags von 80 cm, blaue Färbung zeigt eine geringere Zunahme als 80 cm und rote Färbung eine größere Zunahme des Tideniedrigwassers an.

Methode

In der vorliegenden Studie wird das dreidimensionale, hydrodynamisch-numerische (HN-) Verfahren UnTRIM (CASULLI & ZANOLLI 1998) verwendet. Zunächst wird ein Modell der Nordsee betrieben, das durch den Wasserstand an den offenen Rändern zum Atlantik gesteuert wird. Es werden in dem Referenzlauf *IST* die hydrodynamischen Verhältnisse des Jahres 2006 modelliert. In einer Situation *EXP* wird der mittlere Wasserstand an den Modellrändern erhöht und so ein Anstieg des Meeresspiegels simuliert. Der Wert von 80 cm wurde gewählt, da er der oberen Grenze des im AR4 genannten Betrags für einen mittleren, weltweiten Anstieg des Meeresspiegels zum Jahr 2100 von 79 cm entspricht (SOLOMON et al. 2007). Hierbei handelt es sich um einen globalen Wert. Ein Anstieg des Meeresspiegels kann sich im Nordostatlantik sehr unterschiedlich auswirken, jedoch kann nach GÖNNERT et al. (2009) dieser Wert auch als oberer, zentraler Wert für die deutsche Küste angesetzt werden. Die Auswirkungen des simulierten Meeresspiegelanstiegs hinsichtlich des Wasserstandes werden für die Nordsee und die deutsche Nordseeküste untersucht. Anschließend werden die Ergebnisse beider Simulationen als Randwerte für die nachgeschalteten Ästuarmodelle von Elbe, Weser und Ems verwendet. Für die Modelle der Ästuarie wird ebenfalls das Modellverfahren UnTRIM verwendet, jedoch besitzen die Ästuarmodelle im Vergleich zum Nordseemodell eine höhere räumliche Auflösung. Es werden wieder jeweils die Zustände *IST* und *EXP* modelliert, die sich lediglich durch ihre Nordseerandwerte für Wasserstand und Salzgehalt unterscheiden. Mögliche Änderungen im Oberwasserzufluss, in den Windverhältnissen oder in der Topographie bleiben in dieser Studie unberücksichtigt. So werden für die beiden Zustände *IST* und *EXP* jeweils die für das Jahr 2006 gemessenen Oberwassermengen eingesteuert. An der Elbe gehen die Abflüsse im Analysezeitraum von ca. 450 auf ca. 250 m³/s zurück, in der Weser steigen sie von 126 auf 159 m³/s und an der Ems (inkl. Leda und Jümme) von 31 auf 61 m³/s an.

Die Ergebnisse der Modellierung werden für einen Spring-Nippzyklus (etwa 14 Tage) analysiert und dabei zum einen direkt ausgewertet und zum anderen über eine Tidekennwertanalyse (www.baw.de/methoden/index.php5/Tidekennwerte_des_Wasserstandes) hinsichtlich des Wasserstandes, der Strömungsgeschwindigkeit, sowie des Salz- und Schwebstoffgehalts aufbereitet. Von allen skalaren und vektorialen Größen können auch Differenzen zwischen zwei modellierten Situationen – in diesem Fall *EXP-IST* – ermittelt werden. Diese Differenzen zeigen direkt die Veränderungen, die sich aus einem Anstieg des Meeresspiegels gegenüber dem gegenwärtigen Zustand ergeben. Dies hilft, mögliche Betroffenheiten abzuleiten.

In dieser Studie liegt der Fokus auf:

- Wasserstand (Tideniedrigwasser, Tidemittelwasser, Tidehochwasser, Tidenhub)
- Strömungsgeschwindigkeiten (Flut- und Ebbstromgeschwindigkeit)
- Salzgehalt (Lage der Brackwasserzone)
- Schwebstofftransport

Resultate

Zunächst werden die Ergebnisse des Modells der Nordsee im Bereich der deutschen Küste und in den Außenbereichen der Ästuar betrachtet. Hier zeigen sich bezogen auf den Wasserstand zwischen den modellierten Situationen *IST* und *EXP* folgende Effekte des simulierten Meeresspiegelanstiegs um 80 cm auf die typischen Verhältnisse:

- Das Tidehochwasser steigt zwischen +86 cm und +100 cm an, d.h. um 6-20 cm zusätzlich zur eingesteuerten Änderung
- Das Tideniedrigwasser steigt bis zu 86 cm an (s. Abb. 1)
- Der Tidenhub steigt zwischen 6 cm in der Außenweser und der Außenems und bis zu 10 cm in der Außenelbe

Im Folgenden werden die Ergebnisse betrachtet, die sich für die Ästuar von Elbe, Weser und Ems ergeben. Abbildung 2 zeigt die Differenzen des mittleren Tidehochwassers und des mittleren Tideniedrigwassers der untersuchten Situationen. Würde sich der eingesteuerte Wert unverändert bis zur Tidegrenze fortsetzen, läge die Differenz konstant bei 0,8 m. So zeigt eine Differenz über 0,8 m, dass in der Situation *EXP* der Wasserstand um mehr als 80 cm steigt. Entsprechend gilt für Differenzen unter 0,8 m, dass der Wasserstand um weniger als den eingesteuerten Wert ansteigt.

Die Kurven zeigen für die Elbe entlang der gesamten Fahrinne einen stärkeren Anstieg des Tidehochwassers im Vergleich zum Tideniedrigwasser. Damit ist auch der Tidenhub in der Situation mit erhöhtem Meeresspiegel größer als in der Referenzvariante. Dabei vergrößert sich die Zunahme des Tidenubs in Richtung Wehr, insbesondere oberhalb von Hamburg, durch die geringe Zunahme des Niedrigwassers. Auch für die Weser und die Unterems ergibt sich eine größere Zunahme des Tidehochwassers mit dem damit verbundenen Anstieg des Tidenubs. Allerdings fällt der Anstieg nicht so stark aus wie in der Elbe. Im Bereich der Außenems, etwa vom Emdener Fahrwasser bis zum Pegel Emsbörn, zeigt sich dagegen ein stärkerer Anstieg des Niedrigwassers im Vergleich zum Hochwasser und damit eine Verkleinerung des Tidehub.

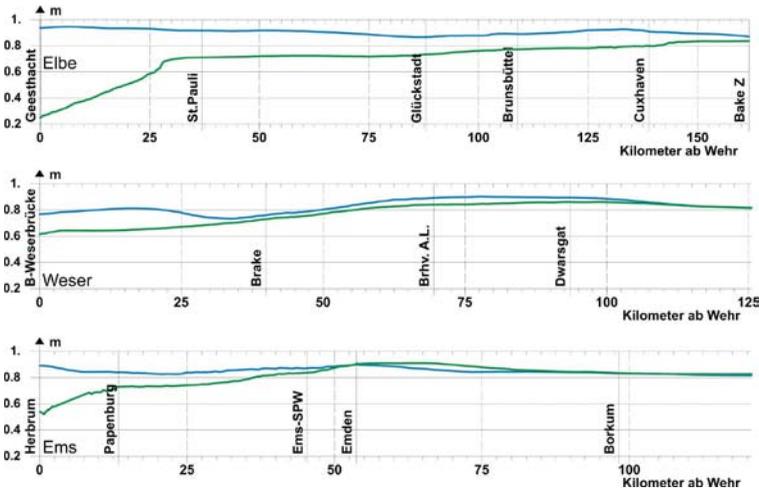


Abbildung 2: Differenz des mittleren Tidehochwassers (in blau) und Tideniedrigwassers (in grün) zwischen Referenz- und Experimentalsituation (*EXP-IST*) entlang der Fahrinne des jeweiligen Ästuars. Die Abbildung zeigt das Wehr links und die Nordsee rechts.

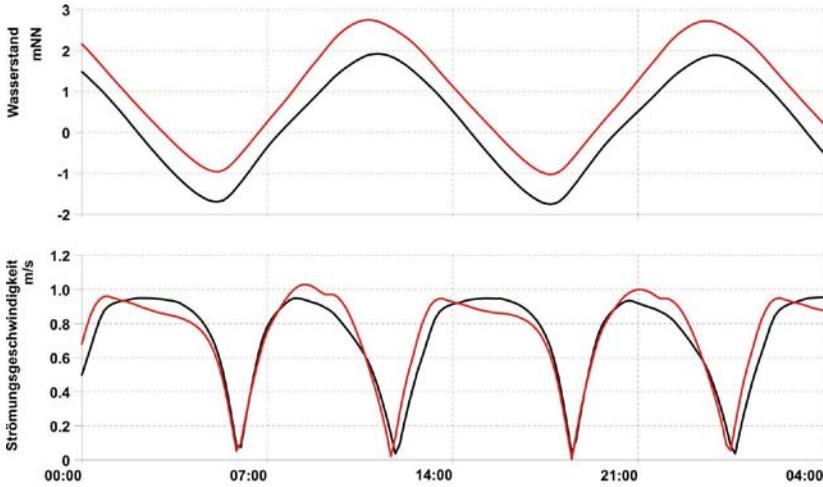


Abbildung 3

3: Zeitreihen des Wasserstands (oben) und der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit (unten) für die Situation *IST* (schwarze Kurve) und die Situation *EXP* (rote Kurve) am Pegel Brake der Weser.

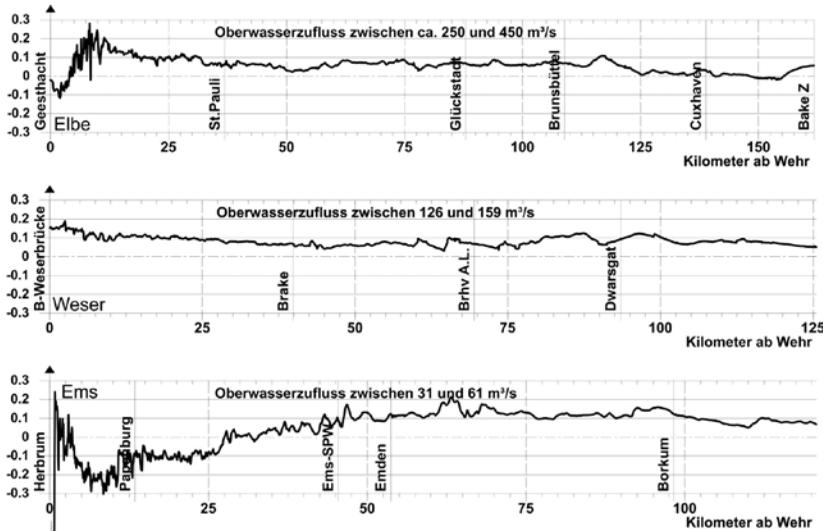


Abbildung 4: Differenz (*EXP* – *IST*) des Verhältnisses der mittleren, tiefengemittelten Flutstromgeschwindigkeit zur mittleren, tiefengemittelten Ebbestromgeschwindigkeit zwischen den untersuchten Situationen, gemittelt über den Analysezeitraum, entlang der Fahrinne des jeweiligen Ästuars. Werte über Null zeigen eine Stärkung des Flutstroms im Vergleich zum Ebbestrom in der Situation *EXP*. Werte unter Null zeigen eine Änderung des Verhältnisses in Situation *EXP* zugunsten des Ebbestroms.

Neben der Erhöhung der Wasserstände kommt es auch zu einer Deformation der Tidekurve verbunden mit einer Verschiebung der Eintrittszeiten und Änderung der Strömungsgeschwindigkeiten. Hier werden beispielhaft der Wasserstand und die Strömungsgeschwindigkeit am Pegel Brake der Weser gezeigt. In Abbildung 3 (obere Hälfte) sind ein früheres Einsetzen des Tidehochwassers und damit ein Aufsteilen des Flutastes zu erkennen. Dies ist verbunden mit einer Erhöhung der Flutstromgeschwindigkeit und einem früheren Einsetzen der Flutstromkenterung (untere Hälfte Abb. 3).

Entlang der Elbe und der Weser zeigt sich im Verhältnis der Flut- zur Ebbstromgeschwindigkeit ein stärkerer Anstieg der Flutstromgeschwindigkeit (Abb. 4). In der Außenems und dem unteren Bereich der Unterems lässt sich dieser Effekt auch erkennen. Im Abschnitt der Unterems bis zur Tidegrenze hingegen zeigt sich in der Situation *EXP* ein stärkerer Anstieg der Ebbstromgeschwindigkeit. Bei der Betrachtung der Abbildung 4 ist zu beachten, dass der Verhältniswert der Flut- zur Ebbstromgeschwindigkeit auch vom eingesteuerten Oberwasser abhängt. Auf Abbildung 5 ist beispielhaft anhand der Elbe die Differenz der Restschwebstofftransporte zwischen den Varianten *IST* und *EXP* dargestellt. In den meisten Bereichen ist eine Zunahme der Restschwebstofftransporte zu erkennen, die in der Fahrrinne mehr als 10% beträgt. Wie bereits die Auswertung der Strömungsgeschwindigkeiten vermuten lässt, zeigt dort auch die Richtung der Differenz des Resttransportes, gekennzeichnet durch die schwarzen Pfeile, stromauf.

Darüber hinaus ist in allen drei Ästuaren in der Situation *EXP* eine Verschiebung der Trübungszone um mehrere Kilometer stromauf festzustellen. Dies ist für die Weser in Abbildung 6 beispielhaft dargestellt.

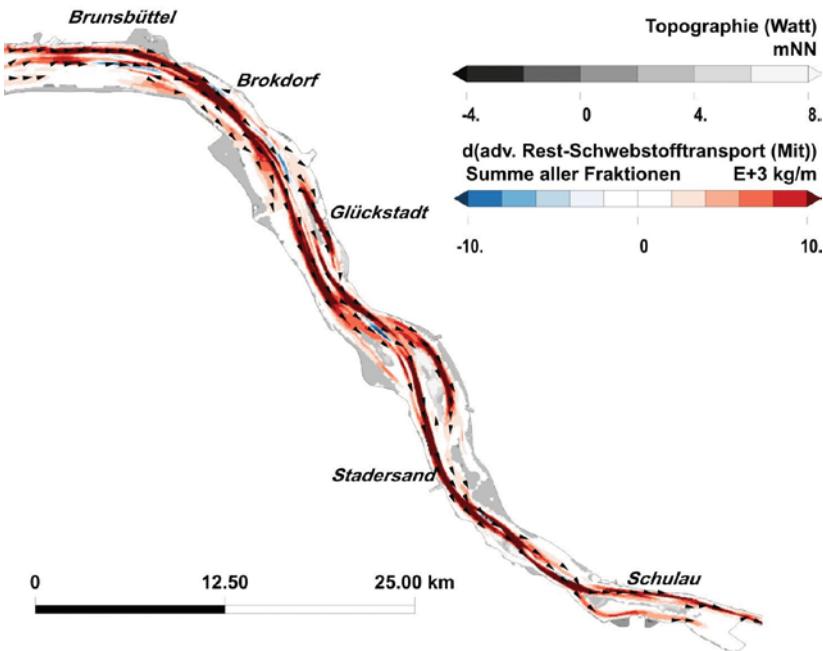


Abbildung 5: Änderung (*EXP-IST*) der mittleren, tiefengemittelten Restschwebstofftransporte im mittleren Bereich des Ästuars der Elbe. Rote Färbung zeigt eine Zunahme der Transporte in der Situation *EXP*.

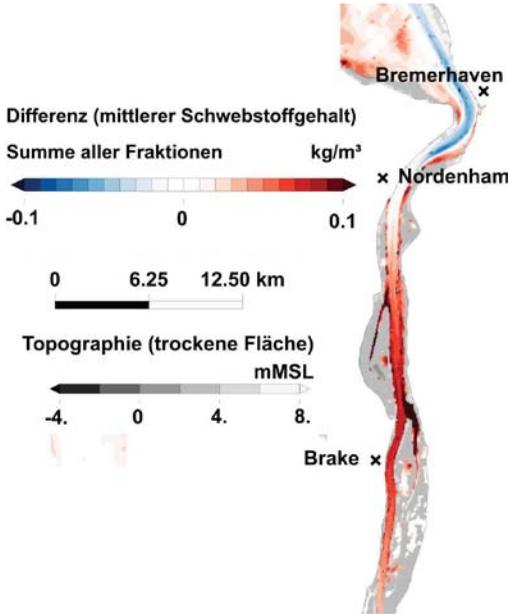


Abbildung 6: Änderung des mittleren, tiefengemittelten Schwebstoffgehaltes im mittleren Abschnitt des Weser-Ästuars zwischen den betrachteten Situationen (*EXP* - *IST*). Rote Färbung bedeutet eine Zunahme der Schwebstoffkonzentration in der Wassersäule, blaue Färbung entsprechend eine Abnahme in der Situation *EXP* im Vergleich zur Variante *IST*.

In Abbildung 7 ist der mittlere Salzgehalt der untersuchten 28 Tiden entlang der Fahrrinne des jeweiligen Ästuars dargestellt und so die Verschiebung der Brackwasserzone für die drei Ästuar zu sehen. In allen drei Ästuaren liegt sie in der Situation mit erhöhtem Meeresspiegel weiter stromauf. Ursache dafür ist die erhöhte Wassertiefe im Ästuar, die mehr Wasser von See kommend einströmen lässt (Transgression). Unter den vorgegebenen Randbedingungen im Analysezeitrum (s. Methode) wandert die 1 PSU Grenze in der Elbe um 9 km, in der Weser um km 3 und in der Ems um 6 km in Richtung Wehr. Die 10 PSU Linie verschiebt sich in der Elbe um 7 km, in der Weser um 4 km und in der Ems um 5 km stromauf (vgl. Abb.7).

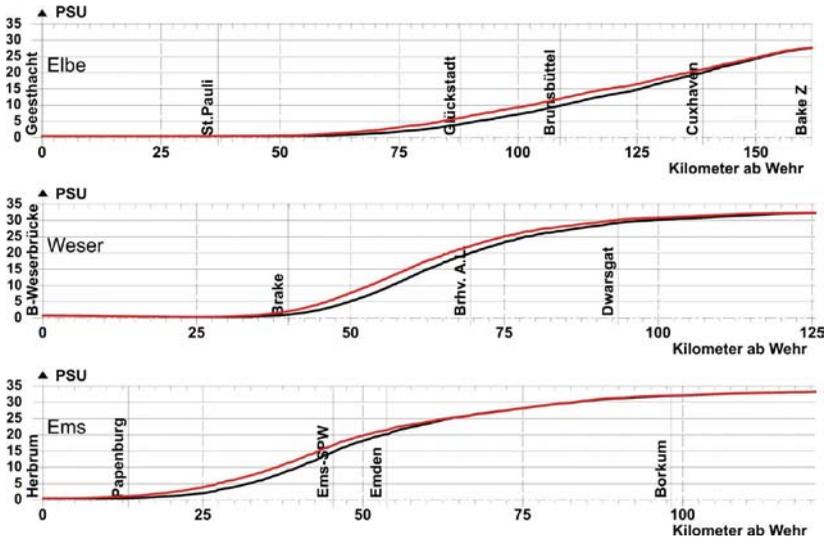


Abbildung 7: Tiefengemittelter mittlerer Salzgehalt über 28 Tiden in PSU entlang der Fahrhinne des jeweiligen Ästuars für die Situationen *IST* (schwarze Kurve) und *EXP* (rote Kurve).

Diskussion

Mit einem 3D-HN-Modell wurde ein Spring-Nippzeitraum für zwei Situationen in der Nordsee und den drei Ästuaren Elbe, Weser und Ems simuliert. Situation *IST* repräsentiert den Referenzzustand für die heutige Meeresspiegellage. In Situation *EXP* wurde der Meeresspiegel am Rand des Nordseemodells gegenüber *IST* um 80 cm erhöht. In dieser Situation zeigen die Modellergebnisse im Vergleich zum Zustand *IST* erhöhte Wasserstände in den Ästuaren Elbe, Weser und Ems. Die Erhöhung entspricht dabei nicht dem eingesteuerten Anstieg des Meeresspiegels im Nordatlantik von 80 cm. Das deutet auf eine Änderung der Tidecharakteristik durch die Wasserstandserhöhung hin. Eine Auswertung der Strömungsgeschwindigkeiten bestätigt dieses und zeigt hauptsächlich eine Zunahme, die für die Ebbestrom- bzw. Flutstromgeschwindigkeiten unterschiedlich stark ausfällt. Dabei verformt sich die Tidekurve mit zunehmender Nähe zu den Tidegrenzen der Ästuare und es ergibt sich eine Verschiebung der Eintrittszeiten der Tidehoch-, Tideniedrigwasser und der Kenterpunkte. In den Ästuaren von Elbe und Weser führt die Verformung der Tidekurve zu einer Stärkung der Flutstromgeschwindigkeit im Vergleich zur Ebbestromgeschwindigkeit in der Situation *EXP*. In der Ems zeigen die Modellergebnisse zwar eine generelle Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten, jedoch wird dort die Flutstromdominanz in der oberen Unterems geringer. Die Gründe hierfür sind noch genauer zu untersuchen, z.B. mittels einer Partialtidenanalyse und mit Fokus auf den Obertiden der M2. Eine Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten bedeutet eine höhere Belastung auf die natürlichen und konstruktiven Uferbefestigungen in den Ästuaren.

Die Zunahme der Flutstromdominanz in der Situation *EXP* lässt einen erhöhten Stromauftransport von Sedimenten durch einen Anstieg des Meeresspiegels erwarten. Die Auswertung der Restschwebstofftransporte bestätigt dies. Daraus lassen sich Betroffenheiten beispielsweise für die Unterhaltung der Wasserstraßen sowie die vom Sedimenthaushalt abhängigen ökologischen Faktoren ableiten.

Darüber hinaus verschiebt sich in allen drei Ästuaren die Trübungszone sowie die Brackwasserzone in der Situation *EXP* weiter stromauf. Dadurch ergeben sich Betroffenheiten für die biogeochemischen und ökologischen Prozesse im Ästuar sowie für die Landwirtschaft, die in bestimmten Bereichen auf Flusswasser zur Bewässerung ihrer Anbaugelände angewiesen ist. In der oberen Unterems ist eine Versalzung des Baggergutes problematisch, da es dann nicht mehr auf Land verbracht werden dürfte. Außerdem ändern sich im Bereich der Verschiebung die Lebensbedingungen für Tiere und Pflanzen.

Bei der Verschiebung der oberen Grenze der Brackwasserzone zeigt sich in der Elbe mit 9 km der größte Einfluss. Die Verschiebung in der Weser mit 3 km und der Ems mit 6 km liegen darunter.

Ausblick

Die hier beschriebene Untersuchung ist ein Teil der Sensitivitätsstudien für den Parameter Meeresspiegelanstieg und bildet die Grundlage für die Vulnerabilitätsstudien. In gleicher Weise werden weitere Werte eines möglichen Anstiegs des Meeresspiegels untersucht. Darüber hinaus finden Untersuchungen statt, die mehrere mögliche Änderungssignale kombinieren (Oberwasserzufluss, Windstärke, etc.). Auch die Topographie ist ein wesentlicher Faktor, der eng in Wechselwirkung mit der Hydrodynamik steht. Deshalb werden Untersuchung zusammen mit dem KFKI-Projekt AufMod (Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht) durchgeführt. Schließlich werden in Kooperation mit der WSV und Interessenvertretern der Ländern in KLIWAS und KLIMZUG-Nord Anpassungsoptionen entwickelt. Dabei werden nachhaltige Maßnahmen in Bezug auf Schiffbarkeit, Bauwerke, Ökologie (Wasserrahmenrichtlinie), Wasserentnahme, Tourismus etc. angestrebt. Falls sich diese Maßnahmen im Modell abbilden lassen, können ihre Wirksamkeiten mit dem HN-Modell überprüft und gegebenenfalls optimiert werden.

Dank

Die Untersuchungen wurden im Rahmen von KLIWAS und KLIMZUG NORD durchgeführt. Die harmonischen Konstanten der wichtigsten Partialtiden zur Steuerung des Wasserstands am Rand des Modells der Nordsee wurden vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie zur Verfügung gestellt.

Literaturliste

- BINDOFF, N.L., J. WILLEBRAND, V. ARTALE, A. CAZENAVE, J. GREGORY, S. GULEV, K. HANAWA, C. LE QUÉRÉ, S. LEVITUS, Y. NOJIRI, C.K. SHUM, L.D. TALLEY & A. UNNIKRISHNAN 2007: Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [SOLOMON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. TIGNOR & H.L. MILLER (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- BMVBS 2007: Schiffahrt und Wasserstraßen in Deutschland - Zukunft gestalten im Zeichen des Klimawandels, Eine Bestandsaufnahme
- CASULLI, V. & ZANOLLI, P. 1998: A three-dimensional semi-implicit algorithm for environmental flows on unstructured grids. ICFD Conference on Numerical Methods in Fluid Dynamics, Oxford
- FICKERT, M. & STROTMANN, T. 2009: Zur Entwicklung der Tideverhältnisse in der Elbe und dem Einfluss steigender Meeresspiegel auf die Tidedynamik in Ästuaren - Textbeitrag zum HTG-Kongress 2009
- GÖNNERT, G., VON STORCH, H., JENSEN, J., THUMM, S., WAHL, T. & R. WEISSE 2009: Der Meeresspiegelanstieg - Ursachen, Tendenzen und Risikobewertung, *Die Küste*, Heft 76, 225 - 256
- KDM (2007): Positionspapier: Küstenmeere im Wandel - Forschungsbedarf der deutschen Küsten- und Randmeerforschung
- SOLOMON, S., D. QIN, M. MANNING, R.B. ALLEY, T. BERNTSEN, N.L. BINDOFF, Z. CHEN, A. CHIDTHAISONG, J.M. GREGORY, G.C. HEGERL, M. HEIMANN, B. HEWITSON, B.J. HOSKINS, F. JOOS, J. JOUZEL, V. KATTSOV, U. LOHMANN, T. MATSUNO, M. MOLINA, N. NICHOLLS, J. OVERPECK, G. RAGA, V. RAMASWAMY, J. REN, M. RUSTICUCCI, R. SOMERVILLE, T.F. STOCKER, P. WHETTON, R.A. WOOD & D. WRATT 2007: Technical Summary. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [SOLOMON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. TIGNOR & H.L. MILLER (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- TRENBERTH, K.E., P.D. JONES, P. AMBENJE, R. BOJARIU, D. EASTERLING, A. KLEIN TANK, D. PARKER, F. RAHIMZADEH, J.A. RENWICK, M. RUSTICUCCI, B. SODEN & P. ZHAI 2007: Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [SOLOMON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. TIGNOR & H.L. MILLER (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.