

# Untersuchung von Folgen des Klimawandels und Anpassungsstrategien in deutschen Ästuaren

Rita Seiffert und Fred Hesser

## Zusammenfassung

Aufgrund des Meeresspiegelanstiegs sind Ästuare besonders durch den Klimawandel betroffen. Neben dem Meeresspiegelanstieg können auch Änderungen im Niederschlag, die den Oberwasserzufluss beeinflussen, und veränderte Sturmverhältnisse Auswirkungen auf die Ästuare haben. Die Ästuare Elbe, Jade-Weser und Ems werden als Wasserstraßen genutzt und bilden wichtige Ökosysteme. Voraussetzung für die Entwicklung von Anpassungsoptionen ist das Verständnis darüber, wie sich der Klimawandel auf die Ästuare auswirkt. Im Allgemeinen ist es schwierig die Folgen des Klimawandels auf lokaler Ebene abzuschätzen, da die Unsicherheiten groß werden können. In diesem Artikel beschreiben wir eine Herangehensweise, wie lokale Folgen des Klimawandels und Anpassungsoptionen trotz großer Unsicherheiten analysiert werden können. Im ersten Schritt identifizieren wir die Haupteinflussfaktoren, die voraussichtlich durch den Klimawandel beeinflusst werden. Anschließend führen wir Sensitivitätsstudien durch, in denen die Haupteinflussfaktoren variiert werden. Dafür verwenden wir 3D-hydrodynamisch-numerische Modelle. Um Anpassungsoptionen zu untersuchen, wiederholen wir ausgewählte Simulationen unter Berücksichtigung verschiedener Anpassungsmaßnahmen. Die Ergebnisse zu den Folgen des Klimawandels deuten darauf hin, dass sich Herausforderungen, die schon heute bestehen, vergrößern werden. Es muss mit höheren Salzgehalten, einem verstärkten Transport von Sedimenten nach stromauf und höheren Sturmflutwasserständen gerechnet werden. Die untersuchten Anpassungsmaßnahmen zeigen, dass sie die Auswirkungen reduzieren können.

## Schlagwörter

Hydrodynamisch-numerisches Modell, Unsicherheiten, Sensitivitätsstudien, Meeresspiegelanstieg, Oberwasserzufluss, Wasserstraße, Tidedynamik, Salztransport, Sedimenttransport, Sturmflut

## Summary

*Due to sea level rise, estuaries are particularly affected by climate change. Besides sea level rise, changes in precipitation resulting in changing fresh water discharge and changes in storm activities can also have an impact on estuaries. The Elbe, Jade-Weser and Ems estuaries located in the German Bight (North Sea) are not only important ecosystems, they are also used as waterways. We need to know how climate change affects the estuaries in order to develop adaptation strategies. Generally, it is difficult to project climate change impacts on a local scale. The uncertainties involved can become very large. In this paper we describe an approach to determining the impacts of local climate change and to the investigation of adaptation measures without getting lost in the large range of uncertainty. First, we identify the main drivers which*

*are assumed to be altered by climate change. In the next step we carry out sensitivity studies in which the main drivers are varied. For the sensitivity studies we use 3D-hydrodynamic numerical models. To test possible adaptation measures we repeat selected simulations which then include different adaptation measures. The results on local climate change impacts suggest that today's challenges are likely to become more acute. Higher salinities, increased upstream sediment transport, and higher water levels during storm surge must be expected. Adaptation measures can reduce these effects.*

## Keywords

*hydrodynamic numerical model, uncertainties, sensitivity study, sea level rise, fresh water discharge, waterways, tidal dynamic, salt transport, sediment transport, storm surge*

## Inhalt

1	Einleitung.....	600
2	Methode .....	602
3	Ergebnisse der Sensitivitätsstudien.....	603
3.1	Lokale Auswirkungen von Klimaänderungen .....	603
3.2	Entwicklung von Anpassungsoptionen .....	607
4	Diskussion und Schlussfolgerungen.....	609
5	Danksagung .....	610
6	Schriftenverzeichnis .....	611

## 1 Einleitung

Erhöhte Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre führen zu globalen Veränderungen des Klimas. Beinahe überall werden Mensch und Natur vom Klimawandel beeinflusst. Besonders die Küsten sind aufgrund des globalen Anstiegs des Meeresspiegels betroffen. Die Ästuarie von Elbe, Jade-Weser und Ems bilden wichtige Ökosysteme und einzigartige Lebensräume für die Tier- und Pflanzenwelt. Sie dienen außerdem als Wasserstraßen und sind somit ein bedeutender Wirtschaftsfaktor. In ihrer Funktion als Wasserstraßen könnten die Ästuarie durch den Klimawandel beeinträchtigt werden. Für die Entwicklung von Anpassungsoptionen müssen wir deshalb verstehen, wie sich der Klimawandel auf die Ästuarie auswirken wird. Der Klimawandel kann z. B. die Tidedynamik, den Salz- und Sedimenttransport sowie die Scheitelwasserstände bei Sturmfluten verändern.

Bisher untersuchen nur wenige Studien die lokalen Auswirkungen des Klimawandels und Anpassungsstrategien für die Ästuarie von Elbe, Jade-Weser oder Ems. GRABEMANN et al. (2001) analysieren die Auswirkungen des Klimawandels auf die Hydrographie und Wasserqualität des Weserästuaris. Mithilfe eines 1-dimensionalen Wasserqualitäts- und Transportmodells simulieren sie ein Klimaszenario. PLÜB (2004) untersucht die Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf die Tidedynamik im Elbeästuar. Er verwendet ein 3D-hydrodynamisch-numerisches Modell und führt Simulationen für unterschiedliche Meeresspiegelanstiegsszenarien durch. Seine Auswertungen konzentrieren sich auf die

Wasserstände. ZORNDT und SCHLURMANN (2014) untersuchen die Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf das Weserästuar (siehe diese Schriftenreihe). Sie setzen ebenfalls ein 3D-hydrodynamisch-numerisches Modell ein und analysieren Veränderungen in Kennzahlen für den Wasserstand und Salzgehalt. Weitere Studien zu Klimafolgen und Anpassungsstrategien in den deutschen Ästuaren konzentrieren sich auf den Sturmflutschutz (LIEBERMANN et al. 2005; GROSSMANN et al. 2006). Studien zu Klimafolgen in den Ästuaren von Elbe, Jade-Weser und Ems, die konkret die Anforderungen der Schifffahrt berücksichtigen, gibt es bisher nicht.

Im Rahmen des Forschungsprojekts KLIWAS (Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen) untersuchen wir daher mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die deutschen Ästuare im Hinblick auf die Belange der Schifffahrt und entwickeln Anpassungsoptionen. Im Gesamtprojekt KLIWAS werden sowohl Binnenwasserstraßen als auch Küstengewässer betrachtet. Mittels einer Modellkette (von globalen Klimamodellen über regionale Klimamodelle, hydrologische Modelle und hydrodynamische Modelle) wird das globale Klimaänderungssignal Schritt für Schritt auf kleinere räumliche Skalen bis zur lokalen Ebene der Wasserstraßen übertragen.

Die Ergebnisse aus diesem Skalierungsverfahren sind in vielen Fällen schwierig zu interpretieren, da sie mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind. Modelle bilden die Natur stets vereinfacht ab. Zudem enthalten die Randwerte der Modelle vereinfachende Annahmen und stammen aus anderen Modellen oder aus Beobachtungen, die mit Messungenauigkeiten oder mangelnder Repräsentanz behaftet sind. Daraus ergeben sich Unsicherheiten, die sich im Verlauf der Modellkette fortpflanzen. Am Ende der Modellkette ist die Bandbreite der möglichen Klimafolgen auf lokaler Ebene sehr groß (WILBY und DESSAI 2010; CARTER et al. 2007). Für lokale Regionen wie Ästuare ist es aufgrund dieser Unsicherheiten schwierig, konkrete Aussagen zu den lokalen Auswirkungen zu treffen.

Eine Möglichkeit, mit diesen Unsicherheiten umzugehen, beschreiben LOWE et al. (2009). Am Beispiel des Themse-Ästuars entwickeln sie Anpassungsoptionen zum Sturmflutschutz im Zusammenhang mit einem Meeresspiegelanstieg. Ihre Grundidee besteht darin, Schwellwerte für den Meeresspiegelanstieg zu bestimmen, bis zu denen verschiedene Anpassungsoptionen wirksam wären. Da sie nicht wissen wie stark der Meeresspiegel ansteigen wird, entwickeln sie einen Anpassungsplan für unterschiedliche Szenarien. In dem Anpassungsplan müssen auch die Zeiten beachtet werden, die zur Planung und Bau/Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen benötigt werden. KWADIJK et al. (2010) beschreiben einen ähnlichen Ansatz. Sie führen das Konzept der „Adaptation Tipping Points“ ein. „Adaptation Tipping Points“ sind Zeitpunkte, zu denen die gegenwärtigen Maßnahmen (z. B. Sturmflutschutz) aufgrund des Klimawandels nicht mehr ausreichen. Mithilfe des Konzepts soll ermittelt werden, wie viel Klimawandel bzw. Meeresspiegelanstieg die gegenwärtig umgesetzte Maßnahme bewältigen kann. Um Schwellwerte zu finden, an denen die gegenwärtigen Maßnahmen versagen werden, wird eine Sensitivitätsstudie durchgeführt.

Wir führen im Rahmen dieser Studie auch Sensitivitätsstudien durch. Während sich LOWE et al. (2009) und KWADIJK et al. (2010) hauptsächlich mit der Entwicklung von Anpassungsstrategien befassen, kombinieren wir die Untersuchung lokaler Auswirkungen und die Entwicklung von Anpassungsoptionen. Dieser Artikel beschreibt eine Methode wie mithilfe hydrodynamisch-numerischer Modelle lokale Auswirkungen des

Klimawandels auf begrenzte Regionen wie Ästuare untersucht und Anpassungsoptionen entwickelt werden können. Die wichtigsten Ergebnisse verschiedener Sensitivitätsstudien werden im Abschnitt Ergebnisse beschrieben.

## 2 Methode

Für die Modellsimulationen hydrodynamischer Prozesse wird das numerische Verfahren UnTRIM (CASULLI und WALTERS 2000; CASULLI und LANG 2004) in der Version UnTRIM2007, gekoppelt mit dem morphodynamischen Verfahren SediMorph (MALCHEREK et al. 2005) verwendet. UnTRIM ist ein semi-implizites Finite-Differenzen-Verfahren. Es löst die dreidimensionalen Flachwassergleichungen und die Transportgleichungen für Salz, Wärme und suspendierte Sedimente auf einem unstrukturierten orthogonalem Gitter. SediMorph modelliert sedimentologische Prozesse am Gewässerboden von Ästuaren. Wir verwenden das Verfahren in einem Modus, in dem keine morphodynamischen Veränderungen der Wassertiefen berücksichtigt werden. Für jedes Ästuar verwenden wir ein individuell kalibriertes Modell. Die räumliche und zeitliche Auflösung, die Größe des Untersuchungsgebiets und die Länge des Simulationszeitraums werden an die jeweilige Fragestellung angepasst. Die horizontale Auflösung der unstrukturierten Gitter variiert von wenigen Metern bis zu mehreren hundert Metern. Die Analysezeiträume reichen von wenigen Tagen bis zu mehreren Monaten. Im Gegensatz zu Klimamodellierungen, bei denen üblicherweise mehrere Dekaden simuliert werden, sind hier die Analysezeiträume eher kurz. Kurze Analysezeiträume sind deshalb möglich, weil die modellierten Prozesse rasch auf veränderte äußere Einflussfaktoren reagieren.

Um mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Ästuare zu untersuchen, führen wir verschiedene Sensitivitätsstudien durch. Im ersten Schritt identifizieren wir die Haupteinflussfaktoren, die voraussichtlich vom Klimawandel beeinflusst werden. Haupteinflussfaktoren sind die wichtigsten äußeren Faktoren, die die lokalen Prozesse antreiben. Sie beeinflussen den Wasserstand, die Strömungsgeschwindigkeiten, den Salztransport und den Sedimenttransport. Die Haupteinflussfaktoren sind der Meeresspiegel und das Gezeitensignal in der Nordsee, der Oberwasserzufluss und der Wind. Die Topographie des Ästuars ist ebenfalls eine wichtige Randbedingung für die Hydrodynamik. Zukünftige Änderungen der Topographie sind jedoch schwer abschätzbar. Änderungen der Topographie erfolgen lokal unterschiedlich und hängen sowohl von anthropogenen Einflüssen wie Baggern und Verklappen von Sedimenten als auch von natürlichen Vorgängen ab. In den Simulationen halten wir die Topographie daher konstant. Der Meeresspiegel, der Oberwasserzufluss und der lokale Wind werden einzeln und in Kombination variiert. Sie werden innerhalb der Bandbreite möglicher Klimaänderungen verändert. Auf Grund des Klimawandels steigt der Meeresspiegel an. Längere Trockenperioden mit wenig Niederschlag im Einzugsgebiet können in Zukunft zu einem lang anhaltend niedrigen Oberwasserzufluss führen. Andererseits können extrem hohe Niederschlagsmengen sehr hohe Oberwasserzuflüsse bewirken. Der Wind beeinflusst das Ästuar hauptsächlich bei Sturmfluten. Größerer Windgeschwindigkeiten würden zu höheren Scheitelwasserständen führen.

Eine Sensitivitätsstudie besteht aus der Simulation eines Referenzzustands und einem oder mehreren Szenarien in dem bzw. denen die Haupteinflussfaktoren variiert werden. Durch den Vergleich der Szenarien mit dem Referenzzustand können Aussagen darüber

getroffen werden, wie sich Wasserstand, Strömung, Salzgehalt und Sedimenttransport an die veränderten Randbedingungen anpassen. Dadurch ist es möglich festzustellen, unter welchen Bedingungen ein Schwellwert überschritten wird, der eine Betroffenheit auslöst. Im nächsten Schritt untersuchen wir wie wirksam unterschiedliche Anpassungsoptionen sind. Dazu werden ausgewählte Szenarien der Sensitivitätsstudien wiederholt. Dieses Mal werden jedoch Anpassungsoptionen in das numerische Modell integriert (Abb. 1). Auf diese Weise ist es unmittelbar möglich, Anpassungsoptionen zu testen und zu vergleichen.

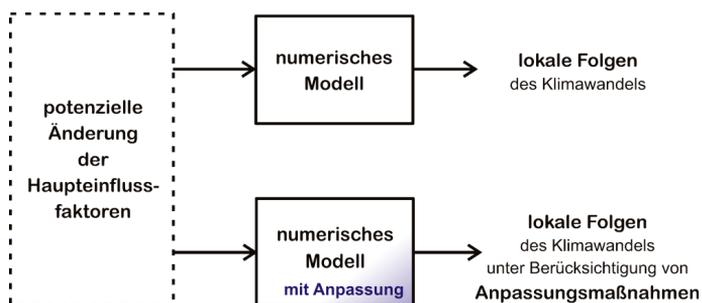


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Untersuchung lokaler Auswirkungen des Klimawandels und zur Entwicklung von Anpassungsoptionen, nach SEIFFERT et al. (2013).

### 3 Ergebnisse der Sensitivitätsstudien

#### 3.1 Lokale Auswirkungen von Klimaänderungen

Um die Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs auf die Tidedynamik zu untersuchen, wird in einer der Sensitivitätsstudien der Meeresspiegel in der Nordsee variiert. Der Meeresspiegel wird um 80 cm angehoben. Dieser Wert liegt innerhalb einer Bandbreite von Schätzungen für den Meeresspiegelanstieg der Nordsee bis zum Ende dieses Jahrhunderts (GÖNNERT et al. 2009). Die Wahl des Wertes 80 cm impliziert nicht, dass dieser Wert wahrscheinlicher wäre als andere Werte. Vielmehr ist er gut geeignet, um die wichtigsten Prozesse im Zusammenhang mit einem Meeresspiegelanstieg zu untersuchen. Eine ausführliche Beschreibung der im Rahmen der Sensitivitätsstudie durchgeführten Simulationen findet sich in HOLZWARTH et al. (2011). Die Studie zeigt, dass es im Inneren der Ästuare auf Grund des Meeresspiegelanstiegs nicht einfach zu einer Parallelverschiebung der Wasserstände nach oben kommt. Durch den Meeresspiegelanstieg verändert sich die Tidedynamik. In den meisten Bereichen der Ästuare nimmt das Tidehochwasser stärker zu als das Tideniedrigwasser (Abb. 2). Dadurch vergrößert sich der Tidenhub in den Simulationen mit Meeresspiegelanstieg. Die Tidekurve verformt sich. In vielen Bereichen der Ästuare steigen die Flutstromgeschwindigkeiten stärker als die Ebbestromgeschwindigkeiten, d. h. das Verhältnis von Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeit vergrößert sich (Abb. 3). Durch die verstärkte Flutstromdominanz erhöht sich der stromaufgerichtete Sedimenttransport. Eine Ausnahme bildet der obere Teil der Unterems. In diesem Bereich verringert sich das Verhältnis von Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeit.

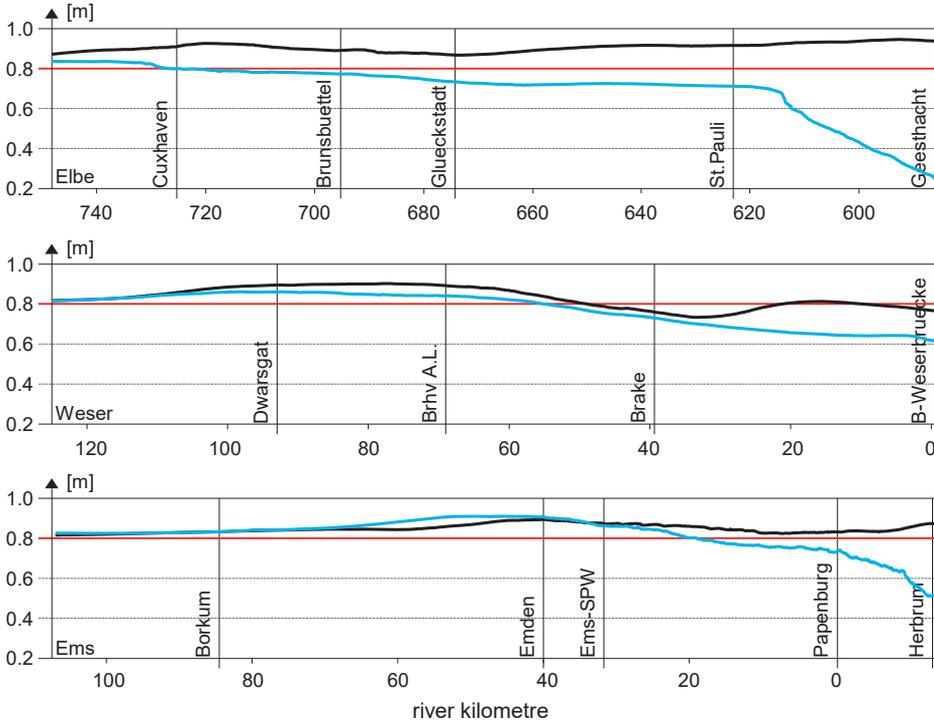


Abbildung 2: Änderung des mittleren Tidehochwassers (in Schwarz) und Tideniedrigwassers (in Blau) bei einem um 80 cm erhöhtem Meeresspiegel entlang der Fahrrinnen von Elbe, Weser und Ems.

In einer anderen Studie untersuchen wir die Auswirkungen eines lang anhaltend niedrigen Oberwasserzuflusses und eines Meeresspiegelanstiegs auf die Lage der Brackwasserzone (SEIFFERT et al. 2012). Ein lang anhaltend niedriger Oberwasserzufluss wird angenommen, da Trockenperioden mit wenig Niederschlag im Einzugsgebiet zu niedrigem Oberwasserzufluss führen können. Simulationen mit und ohne Meeresspiegelanstieg wurden mit einem über mehrere Wochen hinweg konstant gehaltenen Oberwasserzufluss durchgeführt, zunächst mit dem mittleren Oberwasserzufluss (MQ), dann mit dem Mittel der niedrigsten Oberwasserzuflüsse in den Sommerhalbjahren (SoMNQ). Sowohl durch den niedrigen Oberwasserzufluss als auch durch den Meeresspiegelanstieg verschiebt sich Brackwasserzone stromaufwärts (Abb. 4). Langanhaltend niedrige Oberwasserzuflüsse können im Vergleich sehr viel größere Auswirkungen auf die Salzgehalte haben als ein Meeresspiegelanstieg um 80 cm. Die Kombination beider Einflussfaktoren erzeugt die höchsten Salzgehalte. Zeitlich wirken sich Änderungen des Meeresspiegels und Änderungen des Oberwasserzuflusses jedoch sehr unterschiedlich aus. Während die Oberwasserzuflüsse kurzfristigen Schwankungen unterliegen und zu kurzfristigen Anstiegen des Salzgehalts führen, vollzieht sich der Meeresspiegelanstieg nur allmählich, dies jedoch mit dauerhaften Auswirkungen.

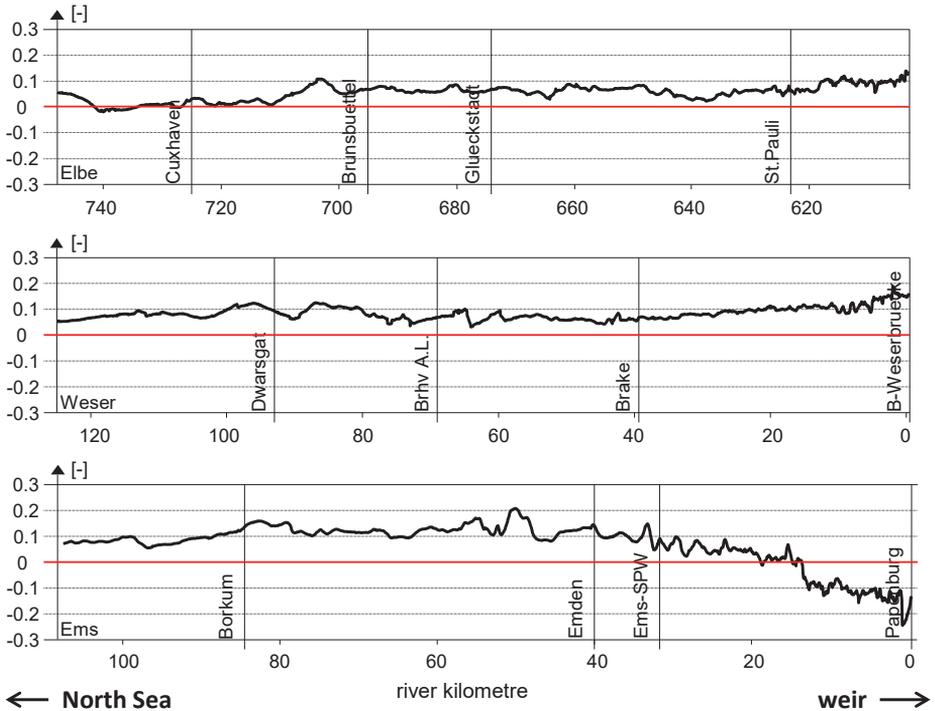


Abbildung 3: Änderung des Verhältnisses der Flutstromgeschwindigkeit (gemittelt) zur Ebbestromgeschwindigkeit (gemittelt) bei einem um 80 cm erhöhtem Meeresspiegel entlang der Fahrrinnen von Elbe, Weser und Ems.

Ergebnisse einer Sensitivitätsstudie zu den Auswirkungen einer Klimaänderung im Falle von Sturmfluten werden von RUDOLPH (2014) in dieser Schriftenreihe dargestellt. In dieser Sensitivitätsstudie werden historische Sturmfluten mit unterschiedlichen Meeresspiegelanstiegen, Windgeschwindigkeiten und hohen Oberwasserabflüssen simuliert. Die Studie zeigt, dass die Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs bis weit ins Innere des Ästuars vordringen. Die Scheitelwasserstände im inneren Ästuar erhöhen sich ungefähr um den Meeresspiegelanstieg, der an der Mündung des Ästuars eingesteuert wird. Höhere Windgeschwindigkeiten können ebenfalls zu erhöhten Scheitelwasserständen führen. Stromaufwärts im Ästuar dominiert der Oberwasserzufluss die Scheitelwasserstände.

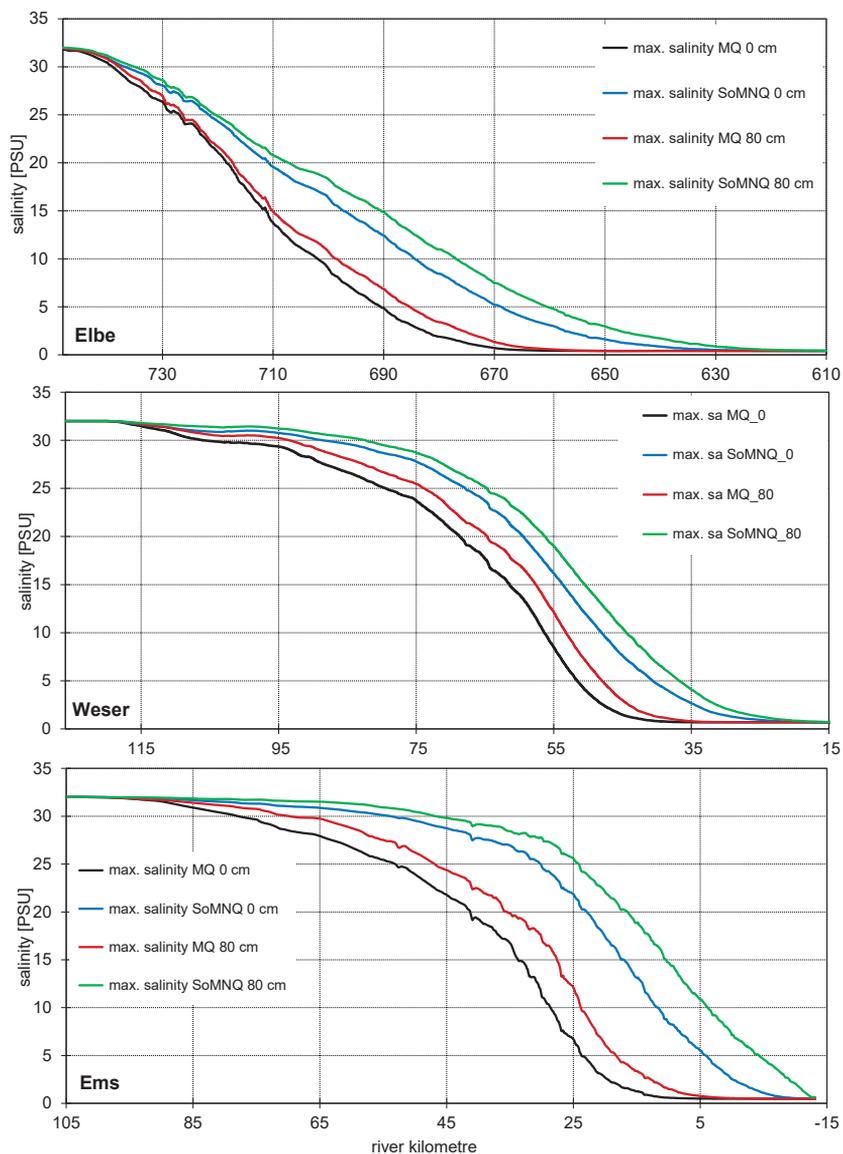


Abbildung 4: Maximaler Salzgehalt (gemittelt über einen Spring-Nipp-Zyklus) entlang der Fahr-  
rinnen. Schwarz: gemittelter Oberwasserzufluss (MQ). Rot: gemittelter Oberwasserzufluss und  
Meeresspiegelanstieg um 80 cm. Blau: niedriger Oberwasserzufluss (SoMnQ). Grün: niedriger  
Oberwasserzufluss und Meeresspiegelanstieg um 80 cm.

### 3.2 Entwicklung von Anpassungsoptionen

Die oben angeführten Sensitivitätsstudien zeigen, dass der Klimawandel die bereits bestehenden Herausforderungen verstärken wird. Es muss mit höheren Salzgehalten, einem verstärkten Transport von Sedimenten nach stromauf und höheren Sturmflutscheitelwasserständen gerechnet werden. Das Ziel der Untersuchung von Anpassungsmaßnahmen ist es, bestehende Maßnahmen zu überprüfen und zu verbessern und neue Anpassungsoptionen zu entwickeln. Eine Anpassungsstrategie kann unterschiedliche Möglichkeiten beinhalten. Im Hinblick auf die Unterhaltung der Wasserstraßen ist es zum Beispiel möglich, das Sedimentmanagement in den Ästuaren anzupassen. Auch Bauwerke können geeignete Anpassungsmaßnahmen sein. Beispielhaft untersuchen wir unterschiedliche Maßnahmen.

Für das Emsästuar wird eine Sohlschwelle am Sturmflutsperrwerk Gandersum diskutiert. Numerische Simulationen deuten darauf hin, dass eine Sohlschwelle den Sedimenteintrag von der Nordsee verringern könnte. Dadurch ließe sich der Unterhaltungsaufwand reduzieren. Mittels des oben beschriebenen Ansatzes (Abb. 1) prüfen wir, ob die Wirkung der Sohlschwelle auch unter geänderten Randbedingungen durch den Klimawandel erhalten bleibt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Sohlschwelle auch bei Meeresspiegelanstieg und niedrigem Oberwasserzufluss eine wirksame Maßnahme darstellt (SEIFFERT et al. 2014).

Sperrwerke dienen als Schutz vor Sturmfluten. Das Sturmflutsperrwerk im Emsästuar bei Gandersum schützt schon heute das Hinterland vor extremen Wasserständen, die als Folge von Sturmfluten auftreten können. Um zu ermitteln, wie sich das Sturmflutsperrwerk unter künftigen Klimabedingungen verhält, wird eine Sensitivitätsstudie mit unterschiedlichen Meeresspiegelanstiegen und unterschiedlichen Oberwasserzuflüssen durchgeführt (RUDOLPH et al. 2012). Die Ergebnisse zeigen, dass das Sperrwerk das Hinterland bis zu einem bestimmten Meeresspiegelanstieg schützt (Abb. 5).

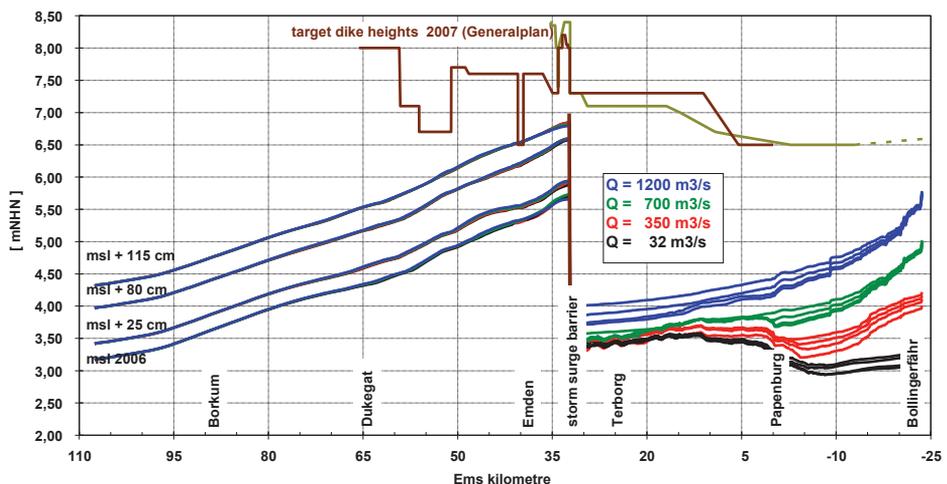


Abbildung 5: Scheitelwasserstände entlang der Fahrrinne des Emsästuars für unterschiedliche Szenarien eines Anstiegs des mittleren Meeresspiegels (msl) und der Oberwasserzuflüsse (Q). Das Sperrwerk wird bei einem Wasserstand von NHN +3,50 m geschlossen.

Ähnlich wie das Emssperrwerk könnte ein Sturmflutsperrwerk in der Mündung des Weserästuars eine Anpassungsoption sein. Unsere Simulationen mit und ohne Sperrwerk und Meeresspiegelanstieg zeigen, dass ein Sturmflutsperrwerk bei Bremerhaven Gebiete stromaufwärts von Bremerhaven wirksam schützen würde (SEIFFERT et al. 2014). Wenn das Sperrwerk geschlossen ist, hat der Meeresspiegelanstieg keine Auswirkungen auf die Wasserstände stromaufwärts des Sperrwerks (Abb. 6). Die Küstengebiete vor dem Sperrwerk bleiben dem Meeresspiegelanstieg ausgesetzt. Darüber hinaus kann das Sperrwerk die Scheitelwasserstände auf der seewärtigen Seite beeinflussen. Je nach Schließzeitpunkt des Sperrwerks entsteht eine Schwallwelle. Eine Schwallwelle bildet sich dann, wenn das Schließen des Sperrwerks mit ausgeprägten Flutstromgeschwindigkeiten zusammenfällt.

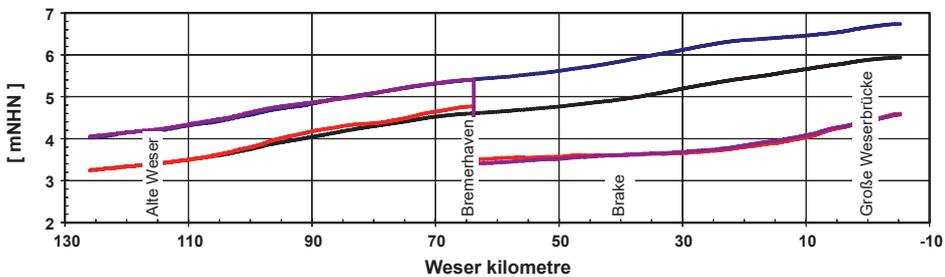


Abbildung 6: Scheitelwasserstände entlang der Fahrrinne des Weserästuars während der simulierten Sturmflut am 1. November 2006 (schwarz), mit Meeresspiegelanstieg von +80 cm (blau), mit Sperrwerk (rot), mit Meeresspiegelanstieg von +80 cm und Sperrwerk (violett).

Sturmflutsperrwerke verschließen den Eingang zum Ästuar für die Dauer der Sturmflut vollständig. Eine Alternative zum vollständigen Verschließen des Ästuars bei Sturmflut können Einengungsmaßnahmen im Mündungsgebiet bieten (SEIFFERT et al. 2014). Auf diese Weise lassen sich Sturmfluten beim Einlaufen in das Ästuar dämpfen. Einengungsmaßnahmen würden die Schifffahrt weniger beeinträchtigen. Darüber hinaus könnten sie auch einen positiven Effekt auf den Sedimenttransport unter normalen Wasserstandsbedingungen haben (KLÖPPER 2013). Abb. 7 zeigt zwei Maßnahmen im Elbe-Mündungsbereich: eine Insel im Außenbereich der Mündung und einen Damm weiter innen in der Mündung. Die Höhe beider Bauwerke beträgt jeweils NHN + 10 m.

Abb. 8 zeigt die Ergebnisse von Simulationen der Sturmflut vom 1. November 2006 mit und ohne der genannten Maßnahmen. Während die Insel kaum Einfluss auf die Scheitelwasserstände hat, senkt der Damm die Scheitelwasserstände hinter dem Bauwerk entlang des gesamten Ästuars um circa 20 cm. Der Damm hat eine größere Wirkung, weil er den hydraulisch wirksamen Fließquerschnitt stärker einengt als die Insel im äußeren Bereich. Allgemein gilt, dass die Senkung der Scheitelwasserstände größer ausfällt, je mehr die Maßnahme den Fließquerschnitt einengt. Im Vergleich zu einem Sperrwerk, das Sturmfluten vollständig kehrt, reduziert der Damm den Effekt des Meeresspiegelanstiegs auf den Sturmflutscheitelwasserstand nur teilweise.

Die Einengungsmaßnahmen beeinflussen auch die Strömungsgeschwindigkeiten. Im Bereich der Fahrrinne in der Nähe des Damms sind die Strömungsgeschwindigkeiten deutlich erhöht. Höhere Strömungsgeschwindigkeiten können zu erhöhten Erosionsraten führen und die Schifffahrt beeinträchtigen.

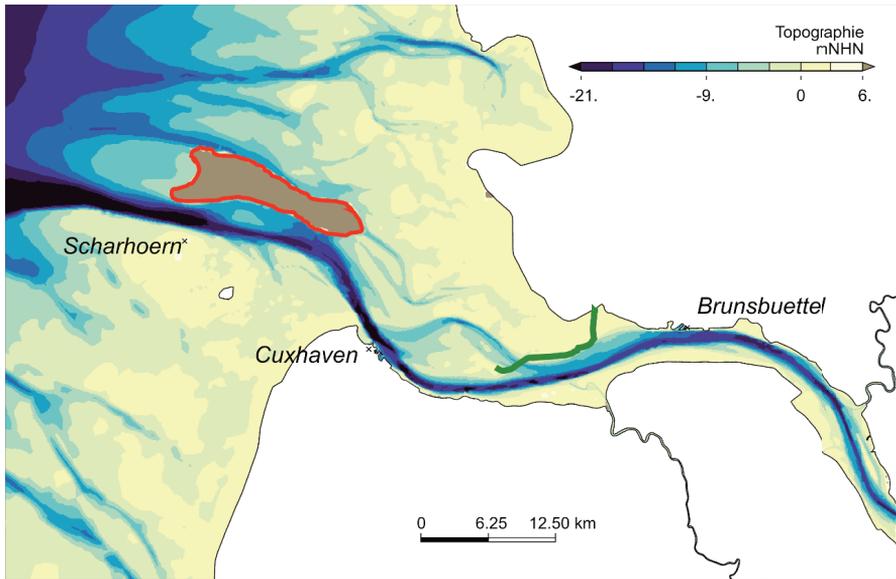


Abbildung 7: Zwei unterschiedliche Einengungsmaßnahmen im Elbe-Mündungsbereich: eine Insel im Außenbereich der Mündung (rot) und ein Damm weiter im Inneren in der Mündung (grün).

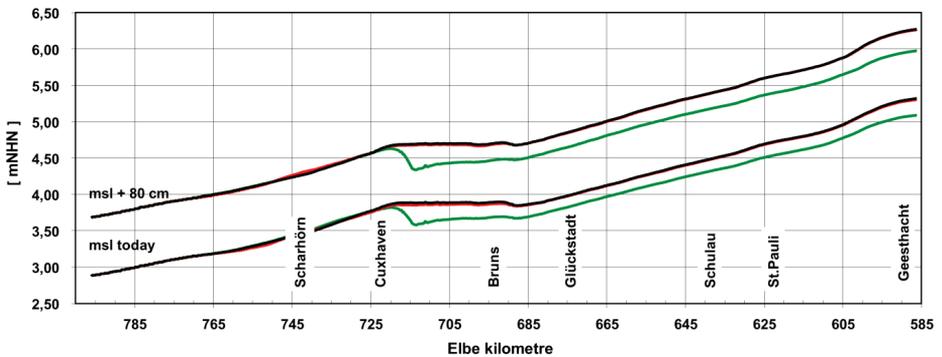


Abbildung 8: Scheitelwasserstände entlang der Fahrrinne des Elbeästuars während der Simulation der Sturmflut vom 1. November 2006, mit (msl +80 cm) und ohne (msl today) Meeresspiegelanstieg von +80 cm, schwarz: keine Einengungsmaßnahmen, rot: mit Insel, grün: mit Damm.

#### 4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Dieser Beitrag verdeutlicht, wie hydrodynamisch-numerische Modelle zur Untersuchung von lokalen Klimafolgen und Anpassungsstrategien eingesetzt werden können. Die Herausforderung besteht darin, Klimafolgen in einem lokalen System trotz großer Unsicherheiten zu bestimmen. Sensitivitätsstudien helfen uns, die beteiligten Prozesse besser zu verstehen. Sie liefern klare Wenn-Dann-Aussagen, die leicht verständlich sind. Die Formulierung von Wenn-Dann-Aussagen reduziert nicht die tatsächlich bestehenden Unsicherheiten. Per Definition basiert jede Wenn-Dann-Aussage auf einer Annahme. In der

Regel ist nicht bekannt, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass die Annahme richtig ist. Beispielsweise wissen wir nicht, wie stark der Meeresspiegel bis zum Jahr 2100 ansteigen wird. Deshalb ist es nicht möglich, eine Vorhersage zum Beispiel über die Vergrößerung des Tidenhubs um den Wert  $x$  im Jahr 2100 zu treffen. Sensitivitätsstudien zeigen, ob wir mit einer Zunahme oder Abnahme rechnen müssen und liefern Hinweise zu den Größenordnungen potenzieller Veränderungen. Daher ist es nicht entscheidend, welche genauen Annahmen wir für die einzelnen Simulationen treffen.

Die Länge der numerischen Simulationen kann relativ kurz sein, weil sich das System Ästuar rasch an veränderte externe Bedingungen anpasst. Die Anpassungszeit morphodynamischer Prozesse bildet eine Ausnahme. Langfristige Simulationen morphodynamischer Prozesse sind aber mit großen Unsicherheiten behaftet. Bevor langfristige morphodynamische Simulationen belastbare Ergebnisse liefern, besteht weiterer Forschungsbedarf. Das ist ein Grund, warum wir die Topographien in allen Simulationen konstant gehalten haben. Rückkopplungsprozesse in Verbindung mit morphodynamischen Änderungen werden in den Simulationen daher nicht berücksichtigt. Die Sensitivitätsstudie zu den Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs deutet zum Beispiel auf einen erhöhten Sedimenttransport von der Nordsee in die Ästuare auf Grund des Meeresspiegelanstiegs hin. Das bedeutet mehr Sediment wird im Ästuar abgelagert. Um die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt zu gewährleisten, könnte ein erhöhter Aufwand für Unterhaltungsbaggerungen entstehen. Unter der Annahme, dass keine Baggerungen stattfinden, würde die Sedimentation zunehmen und zu geringeren Wassertiefen führen. Die Wassertiefe wiederum wirkt sich auf die Tidedynamik und damit auch auf den Sedimenttransport aus. In künftigen Studien werden daher Langfristsimulationen der Morphodynamik benötigt, um solche Rückkopplungsprozesse zu berücksichtigen.

In diesem Artikel werden erste prinzipielle Ideen für mögliche Anpassungsmaßnahmen beschrieben und eine Möglichkeit aufgezeigt wie sie mithilfe hydrodynamischer numerischer Modelle und Sensitivitätsstudien getestet werden können. Die Ergebnisse dieser Studie stellen eine Grundlage für weitere Untersuchungen dar. Weiterführende Untersuchungen sollten sich nicht nur auf die wasserbauliche Wirksamkeit konzentrieren, sondern auch Auswirkungen auf andere Bereiche, wie z. B. die Ökologie, berücksichtigen. Im Allgemeinen sollte der Entwicklung bereichsübergreifender Anpassungsstrategien besondere Priorität eingeräumt werden. Auswirkungen auf andere Bereiche müssen jedoch spätestens dann analysiert und berücksichtigt werden, wenn die Verwirklichung einer Anpassungsmaßnahme tatsächlich erwogen wird.

## 5 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 wurde durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung finanziert; KLIMZUG-Nord wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung, die Stadt Hamburg und die Metropolregion Hamburg gefördert. Wir bedanken uns bei allen Mitarbeitern des Teams von KLIWAS/KLIMZUG-Nord bei der Bundesanstalt für Wasserbau in Hamburg für ihre Unterstützung und für die Durchführung verschiedener

Simulationen. Unser besonderer Dank gilt Annette Büscher, Ayla Johanna Bockelmann, Ingrid Holzwarth, Elisabeth Rudolph, Annkathrin Rinnus und Norbert Winkel.

## 6 Schriftenverzeichnis

- CARTER, T. R.; JONES, R. N.; LU, X.; BHADWAL, C.; CONDE, C.; MEARNS, L. O.; O'NEILL, B. C.; ROUNSEVELL, M. D. A. and ZUREK, M. B.: New Assessment Methods and the Characterisation of Future Conditions. In: PARRY, M. L., CANZIANI, O. F., PALUTIKOF, J. P., LINDEN, P. J. VAN DER and HANSON, C. E. (eds.): *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, 133-171, 2007.
- CASULLI, V. and LANG, G.: *Mathematical Model UnTRIM Validation Document. Technical Report*. Bundesanstalt für Wasserbau Dienststelle Hamburg (BAW), 2004. [http://www.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische\\_verfahren/pdf/vd\\_unt\\_rim-2004.pdf](http://www.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische_verfahren/pdf/vd_unt_rim-2004.pdf)
- 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*, Vol. 32, 3, 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.
- GRABEMANN, H.-J.; GRABEMANN, I.; HERBERS, D. and MÜLLER, A.: Effects of a specific climate scenario on the hydrography and transport of conservative substances in the Weser estuary, Germany: a case study. In: *Climate Research*, Vol. 18, 77-87, 2001.
- GROSSMANN, I.; WOTH, K. and STORCH, H. VON: *Localization of Global Climate Change: Storm Surge Scenarios for Hamburg in 2030 and 2085*. Die Küste, 71, 169-182, 2006.
- HOLZWARTH, I.; SCHULTE-RENTROP, A. und HESSER, F.: *Auswirkungen klimabedingter Änderungen auf das Strömungs- und Transportverhalten deutscher Nordseeästuare*. In: *Hafentechnische Gesellschaft e.V. (ed.): Vorträge HTG-Kongress 2011*. Würzburg, 275-282, 2011.
- KLÖPPER, M.: *Dissipating Tidal Energy in the Mouth of the Elbe Estuary*. In: *Hamburg Port Authority (HPA) and Flemish government, Department of Mobility and Public Works (MOW) (eds.): Joint Study on Mitigation Measures in the Estuary Mouth (Scheldt & Elbe)*. by HPA and MOW Jun. 2013. Bundesanstalt für Wasserbau Dienststelle Hamburg (BAW); Svasek Hydraulics, 2013.
- KWADIJK, J. C. J.; HAASNOOT, M.; MULDER, JAN P. M.; HOOGVLIET, MARCO M. C.; JEUKEN, AD B. M.; VAN DER KROGT, ROB A. A.; VAN OOSTROM, NIELS G. C.; SCHELFHOUT, H. A.; VAN VELZEN, EMIEL H.; VAN WAVEREN, H. and DE WIT, MARCEL J. M.: Using adaptation tipping points to prepare for climate change and sea level rise: a case study in the Netherlands. In: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, Vol. 1, 5, 729-740, doi: 10.1002/wcc.64, 2010.
- LIEBERMANN, N. VON; GRABEMANN, I.; MÜLLER, A. und OSTERKAMP, S.: *Vergleichende Abschätzung von Effektivität und Nebenwirkungen verschiedener Reaktionsvarianten des Küstenschutzes an der Unterweser gegenüber einer Klimaänderung*. In:

- SCHUCHARDT, B. (ed.): Klimawandel und Küste. Die Zukunft der Unterweserregion. Berlin [u. a.], 243-254, 2005.
- LOWE, J. A.; HOWARD, T.; PARDAENS, A.; TINKER, J.; JENKINS, G.; RIDLEY, J.; HOLT, J.; WAKELIN, S.; WOLF, J.; HORSBURGH, K.; REEDER, T.; MILNE, G.; BRADLEY, S. and DYE, S.: UK Climate Projections Science Report: Marine and Coastal Projections. Met Office Hadley Centre, 95 p., 2009.
- MALCHEREK, A.; PIECHOTTA, F. and KNOCH, D.: Mathematical Module SediMorph Validation Document. Technical Report. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), 2005. [http://www.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische\\_verfahren/pdf/vd-sedimorph.pdf](http://www.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische_verfahren/pdf/vd-sedimorph.pdf)
- NILSON, E.; KRAHE, P.; LINGEMANN, I.; HORSTEN, T.; KLEIN, B.; CARAMBIA, M. und LARINA, M.: Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.01. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) and KLIWAS Koordination, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz, (KLIWAS Schriftenreihe, KLIWAS-43/2014), doi: 10.5675/Kliwas\_43/2014\_4.01, 2014.
- PLÜß, A.: Nichtlineare Wechselwirkung der Tide auf Änderungen des Meeresspiegels im Übergangsbereich Küste/Ästuar am Beispiel der Elbe. In: GÖNNERT, G.; GRABL, H.; KELLETAT, D.; KUNZ, H.; PROBST, B.; STORCH, H. VON und SÜNDERMANN, J. (eds.): Klimaänderung und Küstenschutz. Universität Hamburg, 129-138, 2004.
- RUDOLPH, E.: Storm surge studies in the estuaries Elbe, Jade-Weser and Ems. Die Küste, 81, 2014.
- RUDOLPH, E.; SCHULTE-RENTROP, A.; SCHÜBLER, A. and JOHANNSEN, A.: Storm Surges in the Elbe, Jade-Weser, and Ems Estuaries - A Sensitivity Study against the Backdrop of Climate Change. In: FEDERAL MINISTRY OF TRANSPORT, BUILDING AND URBAN DEVELOPMENT (ed.): KLIWAS Impacts of Climate Change on Waterways and Navigation in Germany. 131-135, 2012.
- SEIFFERT, R.; HESSER, F.; BÜSCHER, A.; FRICKE, B.; HOLZWARTH, I.; RUDOLPH, E.; SEHLI, A.; SEIB, G. und WINKEL, N.: Auswirkungen des Klimawandels auf die deutsche Küste und die Ästuar. Mögliche Betroffenheiten der Seeschiffahrtsstraßen und Anpassungsoptionen hinsichtlich der veränderten Hydrodynamik und des Salz- und Schwebstofftransports - Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.04/3.02 (KLIWAS Schriftenreihe, 36), doi: 10.5675/Kliwas\_36/2014\_3.02, 2014.
- SEIFFERT, R.; RUDOLPH, E. and WINKEL, N.: Investigating Impacts and Developing Adaptation Strategies on Local Scale - An Example. In: Impacts World 2013 Conference Proceedings. Potsdam, 580-587, 2013.
- SEIFFERT, R.; HESSER, F. B.; SCHULTE-RENTROP, A. and SEIB, G.: Potential effects of climate change on the brackish water zone in German estuaries. In: HINKELMANN, R.-P.; LIONG, Y.; SAVIC, D.; NASERMOADDELL, M. H.; DAEMRICH, K.-F.; FRÖHLE, P. and JACOB, D. (eds.): Hydroinformatics 2012.
- WILBY, R. L. and DESSAI, S.: Robust adaptation to climate change. In: Weather, Vol. 65, 7, 180-185, doi: 10.1002/wea.543, 2010.
- ZORNDT, A. C. and SCHLURMANN, T.: Investigating impacts of climate change on the Weser Estuary. Die Küste, 81, 2014.