

Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf das Weserästuar

Anna C. Zorndt und Torsten Schlurmann

Zusammenfassung

Dem *Intergovernmental Panel on Climate Change* zufolge wird der globale Klimawandel in der Zukunft weitreichende Folgen für unsere Lebensumwelt haben. Dies gilt insbesondere für Küstenbereiche wie Ästuar, da sie nicht nur durch meteorologische Änderungen, sondern auch durch den Anstieg des mittleren Meeresspiegels, Änderungen im Abflussregime und möglicherweise auch durch verstärkte Sturmfluten gefährdet sind. Da Impactuntersuchungen in Ästuaren demnach von Impactstudien in benachbarten Systemen wie beispielsweise den Einzugsgebieten oder angrenzenden Meeresgebieten abhängen, addieren sich Unsicherheiten. Dies erschwert die Ableitung von belastbaren Projektionen für politische Entscheidungsträger und Planer. Dieser Beitrag beschreibt ein Teilprojekt des Klimafolgenforschungsprojektes KLIFF des Landes Niedersachsen, welches sich mit den Folgen für die Hydrodynamik und die Salzgehalte im Weserästuar befasst. Als Impactmodell kommt ein 3D hydrodynamisch-numerisches Modell zum Einsatz. Schwerpunkt des Beitrags sind unter anderem Ergebnisse und Diskussion eines Szenarios mit einem mittleren Meeresspiegelanstieg.

Schlagwörter

Hydrodynamische Modellierung, Klimafolgen, Weserästuar, Salzintrusion, Tidedynamik

Summary

According to the Intergovernmental Panel on Climate Change, global climate change will have profound impacts on our environment. This applies to estuaries in particular, as they are not only influenced by changes in the meteorological conditions, but also by the mean sea level rise, changes in river runoff regimes and possibly more intense storm surges. As this makes impact studies in estuaries rely on impact studies of neighbouring systems such as watersheds or adjacent shelf seas, uncertainties may accumulate. This complicates deriving reliable projections for planners and decision makers. This contribution describes a work package of a joint climate impact project of the German state Lower Saxony. The aim of the project is to investigate impacts on hydrodynamics and salinities of the Weser estuary. The impact model used in the study is a 3D hydrodynamic modelling tool. The article focuses among others on results and the discussion of a mean sea level rise scenario.

Keywords

hydrodynamic modelling, climate impact, Weser estuary, salinity intrusion, tidal dynamics

Inhalt

1	Einleitung.....	588
2	Salinität und Hydrodynamik des Weserästuars im IST-Zustand.....	589
3	Methoden.....	591
3.1	Simulationswerkzeug.....	591
3.2	Modell des Weserästuars	591
3.3	Berechnung untersuchter Tidekennwerte	592
4	Untersuchung eines Szenarios mit einem mittleren Meeresspiegelanstieg	592
4.1	Versuchsaufbau.....	592
4.2	Untersuchtes Szenario	593
4.3	Ergebnisse.....	594
5	Zusammenfassung und Diskussion.....	595
6	Schriftenverzeichnis	597

1 Einleitung

Die Salzgehaltsverhältnisse und die Hydrodynamik des Weserästuars werden von den Gezeiten in der Deutschen Bucht, dem Abfluss aus dem Einzugsgebiet, meteorologischen Einflüssen wie Wind- oder Sturmereignissen sowie der Geometrie des Ästuars beeinflusst. Neben den Auswirkungen des Klimawandels auf die Weser durch unmittelbare Veränderungen der meteorologischen Verhältnisse sind es hauptsächlich mittelbare Einflüsse bedingt durch Veränderungen in benachbarten Systemen wie der Nordsee oder dem Einzugsgebiet, die wichtige Randbedingungen für das Ästuar darstellen (s. Abb. 1).

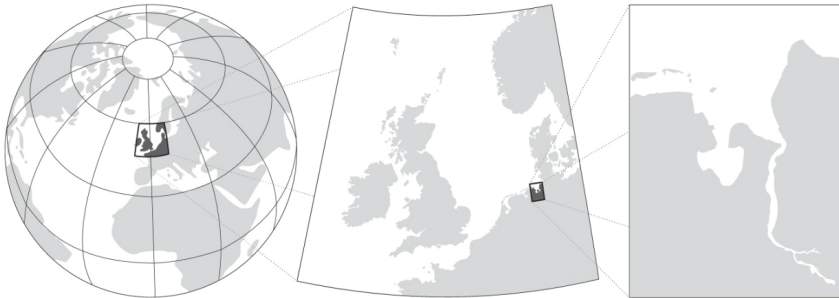


Abbildung 1: Herausforderung für die Klimafolgenforschung: Die Folgen globaler Klimaveränderungen wirken auf die Weser hauptsächlich über Veränderungen in anderen Systemen wie z. B. der Nordsee.

In den vergangenen Jahrzehnten erfolgte Forschung zur Untersuchung möglicher Auswirkungen des Klimawandels auf die Weser beim Land Niedersachsen (Projekte KLIMU und KRIM, z. B. SCHIRMER und SCHUCHARDT 2001), und derzeit werden Forschungsaktivitäten beim Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur verfolgt (KLIWAS, s. SEIFFERT et al. in dieser Schriftenreihe). Dennoch bestehen Unsicherheiten fort, einerseits im Hinblick auf die veränderten Randbedingungen, andererseits im

Hinblick auf die Reaktion des Systems. Planer und Entscheidungsträger benötigen belastbare Projektionen, da frühzeitige Anpassungsmaßnahmen erforderlich sind, um auf künftige Herausforderungen vorbereitet zu sein. Dies war die Motivation des Niedersächsischen Ministeriums für Wissenschaft und Kultur, die Auswirkungen des Klimawandels auf das Weserästuar im Rahmen eines weiteren im Jahr 2009 lancierten interdisziplinären Forschungsprojekts zu untersuchen (KLIFF – www.kliff-niedersachsen.de).

Ein 3D-Modell zur Untersuchung der Veränderungen der Salinitätsverteilung und der Hydrodynamik des Ästuars wurde erstellt und mit Beobachtungen vergangener Ereignisse validiert. Mithilfe von Szenariosimulationen wurden mögliche Einwirkungen des Klimawandels auf den heutigen Zustand des Weserästuars mit seinen natürlichen saisonalen, periodischen und meteorologisch induzierten Variationen untersucht. Um mehr Verlässlichkeit zu erreichen, wurde der Versuch unternommen, die Unsicherheit der Projektionen auf Grund der internen Variabilität des Systems und die Unsicherheit der Randbedingungen zu quantifizieren bzw. wo möglich zu reduzieren.

Die Studie wurde in enger Zusammenarbeit mit Projektpartnern durchgeführt, die die Klimafolgen für das angrenzende Einzugsgebiet des Ästuars (z. B. KREYE et al. 2010) und das Grundwasser (z. B. YANG et al. 2013) untersuchten.

Der vorliegende Beitrag gibt in Kap. 2 eine Einführung zur Hydrodynamik und zur Salzintrusion im Weserästuar in seinem gegenwärtigen Zustand. Die Methoden sind in Kap. 3 beschrieben. Im Hauptteil werden die Ergebnisse eines einfachen Szenarios mit mittlerem Meeresspiegelanstieg beleuchtet (Kap. 4). Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung und Diskussion (Kap. 5).

2 Salinität und Hydrodynamik des Weserästuars im IST-Zustand

Im Rahmen dieser Studie wurde die Hydrodynamik des Weserästuars im IST-Zustand detailliert untersucht. Die Ergebnisse werden im Folgenden kurz zusammengefasst. Im gegenwärtigen Zustand beträgt der Tidenhub etwa 2,8 m im äußeren Ästuar (Leuchtturm Alte Weser) und steigt stromaufwärts kontinuierlich auf einen Höchstwert von 4,10 m am Weserwehr in Bremen an. Die Tidedynamik des Ästuars wird durch astronomisch bedingte periodische Schwankungen wie den Spring-Nipp-Zyklus beeinflusst. Weiter stromaufwärts kommt der Oberwasserabfluss als Einflussfaktor hinzu. Der Oberwasserabfluss, der am Wehr von der Mittelweser und auch aus kleineren benachbarten Einzugsgebieten zufließt, unterliegt allerdings starken saisonalen Schwankungen. Das langfristige Mittel liegt bei etwa $324 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (1990-2010). Die niedrigsten monatlichen Mittel ergeben sich im September, die höchsten im März ($166 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ und $564 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, Extreme von $74 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ bzw. $2190 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$).

Entsprechend diesen Werten variiert die Lage der Brackwasserzone zwischen Süßwasser und Meerwasser. Diese lässt sich durch die Positionen tidegemittelten 2- und 10-PSU-Isohalinen beschreiben, welche hier als Entfernung vom Tidewehr in Bremen ausgedrückt werden (P_{12} , P_{110}). Unter mittleren Abflussbedingungen, wie sie im Frühjahr oder Herbst vor oder nach erhöhtem Winterhochwasser vorherrschen, findet sich die 2-PSU-Isohaline 57 km seewärts vom Tidewehr, wie aus Abb. 2 ersichtlich ($P_{12} = 57 \text{ km}$, $P_{110} = 70 \text{ km}$). Im Sommer, bei üblicherweise geringem Oberwasserabfluss, verlagert sie sich im Ästuar stromaufwärts, sodass gilt: $P_{12} = 52 \text{ km}$ bei $Q = 200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Während der

Winterhochwasser ist eine Verlagerung stromabwärts zu beobachten (z. B. $P_{12} = 73$ km bei $Q = 1800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$).

Ein wichtiger Indikator für die Sedimentdynamik und die Lage des Maximums der Trübungszone des Ästuars ist die residuelle Strömungsgeschwindigkeit, dargestellt in Abb. 2 (unten) bei durchschnittlichen Abflussbedingungen. Im Abschnitt stromaufwärts bis zu einer Entfernung von etwa 57 km vom Tidewehr ist die residuelle Strömungsgeschwindigkeit stromab gerichtet. Ihr vertikaler Aufbau stellt sich überwiegend gleichmäßig dar. Stromabwärts von hier ändert sich jedoch die Richtung der bodennahen residuellen Strömungsgeschwindigkeit und ist dann stromauf orientiert. Parallel zur Lage der Brackwasserzone verlagert sich der Nullpunkt der bodennahen residuellen Strömungsgeschwindigkeit stromab- oder -aufwärts in Abhängigkeit vom variierenden Abfluss.

Tidebedingte lokale Schwankungen des Salzgehalts gehen an der seeseitigen und der Binnengrenze der Brackwasserzone gegen null und steigen zur Mitte der Brackwasserzone auf Werte von 12 PSU. Die Simulationen zeigen, dass auch die vertikale Schichtung mit dem Abfluss und der Tide schwankt. Bei höheren Abflüssen und auch zunehmend bei Nipptide bildet sich eine Schichtung mit höherem Salzgehalt in bodennahen Schichten und niedrigerem Salzgehalt im oberflächennahen Teil der Wassersäule. Dies ist besonders während des Ebbestroms der Fall und wird in der Literatur als „Strain Induced Periodic Stratification“ bezeichnet (SIMPSON et al. 1990).

Eine frühere Veröffentlichung der Autoren untersucht die Auswirkungen von Stürmen auf die Salzintrusion (ZORNDT et al. 2012). Die Untersuchung basierte auf vergangenen Sturmereignissen und Szenariestürmen, welche aus modellbasierten Untersuchungen zur Nordsee von Projektpartnern entnommen wurden (GASLIKOVA et al. 2012). Aus den Simulationen ging hervor, dass je nach Dauer und Intensität der Sturmflut ein Sturmereignis die Brackwasserzone um 30 km stromaufwärts verschieben kann.

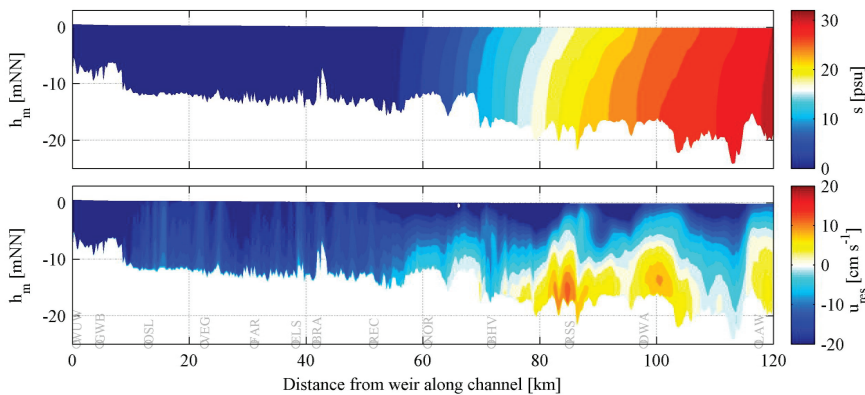


Abbildung 2: Salzgehalt (oberflächennah) und residuelle Strömungsgeschwindigkeit (bodennah) im Hauptquerschnitt des Ästuars (Fluss-km), gemittelt über Spring-Nipp-Zyklus einer Simulation unter durchschnittlichen Abflussbedingungen (MQ siehe Kap. 4.1) Strömungen seewärts sind negativ (blau), Strömungen stromaufwärts positiv (rot) definiert.

3 Methoden

3.1 Simulationswerkzeug

Das in diesem Projekt eingesetzte Simulationswerkzeug wurde von ZHANG und BAPTISTA (2008) entwickelt. Es löst die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen mit Flachwasserannahme und Boussinesq-Approximation. SELFE ist ein semi-implizites Euler-Lagrangesches Finite Elemente Modell. Es wird ein hybrides Vertikalkoordinatenschema verwendet. Für die Turbulenzschließung stehen mehrere Ein- oder Zweigleichungssysteme zur Verfügung. Als quelloffenes Community-Modell bietet SELFE mehrere zusätzliche Module für die Untersuchung u. a. von Tsunami-Überschwemmungen, Sedimenttransport, Ölverschmutzung oder Wasserqualität. Das Modellierungssystem wird mittels Gebietszerlegung parallelisiert. Eine detaillierte Beschreibung liefern ZHANG und BAPTISTA (2008).

3.2 Modell des Weserästuars

Das Modellgebiet umfasst eine Fläche von 2.140 km² und es enthält 191.111 Knoten sowie 372.708 Elemente. Richtung Norden erstreckt es sich bis etwa 54° nördlicher Breite. Die Modellränder folgen der Hauptdeichlinie und enden im Süden am Tidewehr (s. Abb. 1 rechts). Das Modell bezieht teilweise in das Ästuar mündende Nebenflüsse mit ein. Die Hunte wird bis zur Stadt Oldenburg modelliert, die kleineren Nebenflüsse Hamme und Wümme reichen bis nach Ritterhude bzw. Niederbrockland.

Zum Aufbau der Bathymetrie wurden mit Echoloten und Fächerloten ermittelte Datensätze herangezogen, sowie Befliegungsdaten und ein digitales Geländemodell von Niedersachsen. Die Daten wurden von den Wasser- und Schifffahrtsämtern des Bundes und vom Land Niedersachsen zur Verfügung gestellt. Überwiegend stammen sie aus Messungen zwischen 2006 und 2010. Dieser Zeitraum wurde daher als Referenzzustand für das Modell definiert.

Das Modell wird angetrieben durch den Wasserstand am nördlichen offenen Rand zur Deutschen Bucht, die Abflüsse an den offenen Rändern Ritterhude, Niederbrockland, Hunte, Ochtum, Geeste und Bremen, sowie darüber hinaus durch Windeinfluss. Das Modell wurde anhand eines Zeitraums mit mittlerem Abfluss im April 2009 kalibriert. Es wurde anhand von Simulationen von Zeiträumen mit unterschiedlichen Abflüssen validiert. Abb. 3 zeigt einen Vergleich zwischen beobachteten und modellierten Zeitreihen für einen Validierungszeitraum aus dem Winter 2003 mit einem Abflusshöchstwert von 2190 m³ s⁻¹.

Um die Fähigkeit des Modells, gemessenen Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit und Salzgehalt zu reproduzieren, zu quantifizieren, wurde unter anderem der Skill nach Murphy (1988) herangezogen. Ausgehend von zwei Validierungszeiträumen mit jeweils 12 ausgewerteten Messstationen, die zum Teil aus drei auf die Wassersäule verteilten Messgeräten bestanden, betragen die durchschnittlichen Skill-Werte 0,95 für den Wasserstand, 0,89 für den Salzgehalt und 0,80 für die Strömungsgeschwindigkeit.

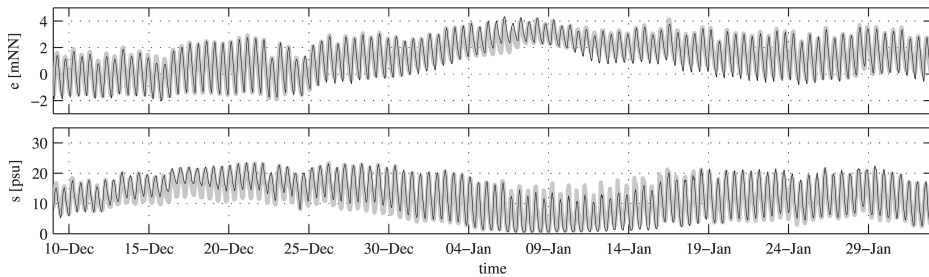


Abbildung 3: Beobachtete (grau) und modellierte (schwarz) Zeitreihen des Wasserstands am Wehr (oben) und des Salzgehalts an der Station 85 km entfernt vom Wehr (unten) für einen Validierungszeitraum.

3.3 Berechnung untersuchter Tidekennwerte

Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse wurden mithilfe der folgenden automatisierten Schritte erzeugt: Die simulierten Zeitreihen mit einer Auflösung von 30 min. wurden mithilfe einer Spline-Interpolation auf 10 min. hochskaliert. Die Zeitreihen von Salzgehalt und Strömungsgeschwindigkeit wurden für die hier vorgestellten Ergebnisse überwiegend tiefengemittelt. Die Strömungsgeschwindigkeitsvektoren wurden in Richtung der Fahrrinne gedreht und nur die Hauptströmungsrichtung wurde genauer betrachtet, wobei der Flutstrom als positiv definiert wurde. Die Zeitreihen wurden in einzelne Tidezyklen aufgeteilt. Beginn und Ende eines Tidezyklus waren jeweils definiert durch: Niedrigwasser für den Wasserstand, niedrigster Salzgehalt für den Salzgehalt und Ebbkenterung für die Hauptströmungsgeschwindigkeit. Für jede Tide wurden Tidekennwerte (Tdk) berechnet. Hier vorgestellt werden tidegemittelter Wasserspiegel (Tmw), Tidehochwasser (Thw), Tideniedrigwasser (Tnw), Tidenhub (Thb), tidegemittelter Salzgehalt (S_M), Salzgehaltmaximum (S_{MAX}) und das Residuum der Strömungsgeschwindigkeit in Richtung der Fahrrinne (U_{RES}). Die Tiden zwischen den Referenz- und Szenarioläufen wurden verglichen und Unterschiede zwischen den Tidekennwerten (ΔTdk) für jede Tide berechnet.

4 Untersuchung eines Szenarios mit einem mittleren Meeresspiegelanstieg

4.1 Versuchsaufbau

Wie eingangs erwähnt wurde der Versuch unternommen, die Unsicherheit in den Projektionen auf Grund der internen Variabilität des Systems zu verringern. Bei Klimafolgenstudien, die die Auswirkungen von Veränderungen der meteorologischen Bedingungen unmittelbar untersuchen (z. B. Wind auf Sturmfluten wie bei GASLIKOVA et al. 2012), kann dies durch die Simulation von Daten aus globalen Klimamodellläufen mit unterschiedlichen initialen Bedingungen geschehen.

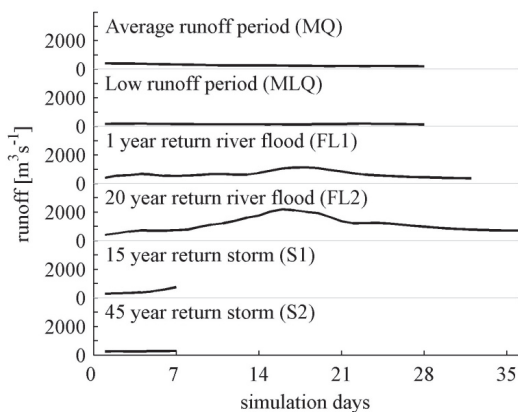


Abbildung 4: Repräsentation des Referenzzustands.

In dieser Impaktstudie ist allerdings der vorherrschende Grund für die Veränderung nicht der unmittelbare meteorologische Antrieb, sondern die Veränderungen der Randbedingungen verursacht durch Änderungen in anderen Systemen, wie etwa der Nordsee oder dem Einzugsgebiet. Auf Grund der begrenzten Information über die transienten Veränderungen der Randbedingungen über die Zeit durch begrenzte Rechenkapazität beschränken sich die Simulationen in dieser Studie auf kürzere Zeiträume. Unter dieser Voraussetzung sollten die simulierten Zeitscheiben so gewählt werden, dass sie bestmöglich die gesamte Schwankungsbreite des IST-Zustandes erfassen. Daher orientiert sich die Studie an den Herangehensweisen in Projekten wie KRIM oder KLIMU (z. B. GRABEMANN et al. 2001) und testet untersuchte Szenarien in einem Satz von Simulationen, die jeweils unterschiedliche charakteristische Situationen im Referenzzustand repräsentieren. Die Simulationen basieren auf vergangenen Ereignissen mit aus Messungen generierten Randbedingungen. Die Wahl der Simulationen basiert auf der Analyse des IST-Zustandes (siehe Kap. 2). Insgesamt wurden sechs Zeiträume ausgewählt, die typische Zeiträume mit mittlerem Abfluss (MQ), geringem Abfluss (MLQ) und Hochwasserereignissen mit Wiederkehrwerten von ca. einem (FL1) und 20 Jahren (FL2) sowie Sturmfluten (S1, S2) repräsentieren (Abb. 4). Dieser Beitrag befasst sich ausschließlich mit den Ergebnissen der Untersuchung der ersten vier Zeiträume.

4.2 Untersuchtes Szenario

Dieser Beitrag befasst sich ausschließlich mit den Ergebnissen des einfachen Szenarios eines mittleren Meeresspiegelanstiegs (engl. mean sea level rise, MSLR), welches als „wahrscheinliches“ („likely“) Szenario gilt. Der untersuchte MSLR von 0,74 m basiert auf dem Fünften Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) und gilt dort als der „wahrscheinlichste“ („most likely“) Wert des globalen Anstiegs bis zum Jahr 2100 unter Annahme des Repräsentativen Konzentrationspfads (Representative Concentration Pathway) RCP8.5 (IPCC 2013). Innerhalb des Projekts wurde auch ein Szenario mit einem höheren Wert untersucht, das hier nicht dargestellt wird. Der Meeresspiegelanstieg wird als Konstante zu der Zeitreihe der Wasserstände am offenen

Modellrand zur Nordsee addiert. Dieser vereinfachte Ansatz wird in Kap. 5 eingehender erläutert. Auch bleiben in den hier vorgelegten Ergebnissen die Salzgehaltsveränderungen an den offenen Rändern unberücksichtigt. Allmähliche Veränderungen der bathymetrischen Verhältnisse oder der Sohlrauhheit auf Grund sich ändernder Sedimentationsmuster im Gebiet selbst oder eine veränderte Rauheit sind zu erwarten, bleiben in den Ergebnissen jedoch ebenfalls unberücksichtigt.

4.3 Ergebnisse

Die Simulationen des Referenzzustands (s. Kap. 4.1) wurden mit an das untersuchte Szenario angepassten Randbedingungen wiederholt (s. Kap. 4.2). Die Abbildungen 5 und 6 zeigen Box- und Whisker-Diagramme der berechneten ΔTdk (s. Kap. 3.3). Es werden lediglich die Ergebnisse für drei Schwerpunktregionen des Untersuchungsgebiets dargestellt. Die Schwerpunktregion BHV befindet sich nördlich der Zufahrt zum engen Unterweser-Abschnitt des Ästuars bei Bremerhaven, ca. 75 km entfernt vom Tidewehr. Sie zeichnet sich durch große tide- und abflussabhängige Salzgehaltsschwankungen aus. Die Schwerpunktregion BRA befindet sich auf Höhe der Stadt Brake im inneren Ästuar (in 45 km Entfernung vom Wehr) und markiert heute den Beginn der Brackwasserzone mit Salzgehalten von meist weniger als 1 PSU, wobei im Sommer oder Herbst bei Tidehochwasser Höchstwerte von 5 PSU erreicht werden können. Die Schwerpunktregion HB liegt im Abschnitt des Süßwasserzeitengebiets ca. 15 km entfernt vom Wehr.

Die in Abb. 5 dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, dass das untersuchte Szenario eines MSLR von 0,74 m am offenen Rand zu einer Veränderung der Tidedynamik führt. Im oberstrom gelegenen Bereich des inneren Ästuars bewirkt ein Anstieg der Gezeitenamplituden M2 und M4 (hier nicht dargestellt) eine Vergrößerung des Tidenhubs T_{hb} . In der Schwerpunktregion HB beträgt der Anstieg ca. 15 cm (Abb. 5d). Der Anstieg des T_{hb} geht einher mit einer Absenkung des Tideniedrigwassers T_{nw} im Verhältnis zum vorgegebenen MSLR (Abb. 5c). Die Auswirkungen auf das Tidehochwasser (Abb. 5b) sind geringer und entsprechen weitgehend dem eingesteuerten MSLR. Der Anstieg des Mittelwassers (Abb. 5a) ist geringer als der vorgegebene MSLR, stärkere Auswirkungen zeigen sich wieder weiter stromaufwärts im Ästuar. Insgesamt sind die berechneten ΔTdk ähnlich für die vier Repräsentationen des Referenzzustands MQ, MLQ, FL1 und FL2.

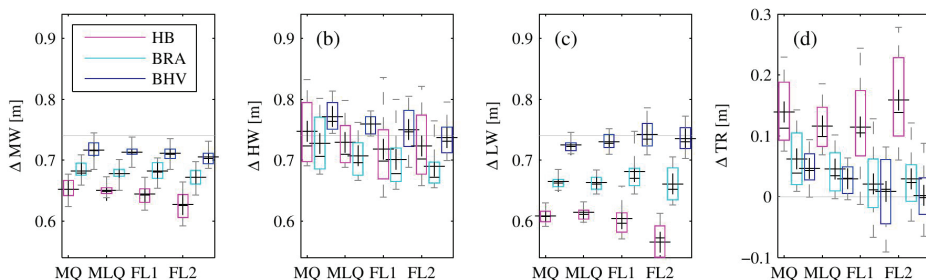


Abbildung 5: Berechnete Differenzen ΔTdk für den Wasserstand zwischen dem MSLR 0,74 m-Szenario- und den Referenzsimulationen für drei Schwerpunktgebiete. Die 25/75 % sind als Kästen, die 10/90 % Perzentile als graue Striche, die Mediane als (-) sowie die Mittel als (+) dargestellt.

Das Szenario zeigt auch Auswirkungen auf den Salzgehalt (s. Abb. 6). Die Brackwasserzone als Übergangsbereich zwischen Salz- und Frischwasser (s. Abb. 2) dringt ins Ästuar vor (hier nicht dargestellt, siehe z. B. SEIFFERT et al. in dieser Schriftenreihe). Die Folge ist ein Anstieg der Salzkonzentration stromaufwärts im Ästuar. Der mittlere Salzgehalt S_M steigt um circa 2 PSU in der Schwerpunktregion BHV (Abb. 6a) Dies gilt für die Simulationen eines mittleren und geringen Abflusses und auch für Zeiträume von Flusshochwassern. In der Schwerpunktregion BRA war nur ein sehr geringer Anstieg des S_M zu beobachten, doch das tideabhängige Salzgehaltsmaximum S_{MAX} erhöht sich um nahezu 1 PSU in der MNQ-Simulation (Abb. 6b). Es zeigt sich, dass, besonders bei niedrigem Abfluss im Sommer, der erhöhte Salzgehalt für die Nutzung des Ästuarwassers in der Region möglicherweise problematisch wird.

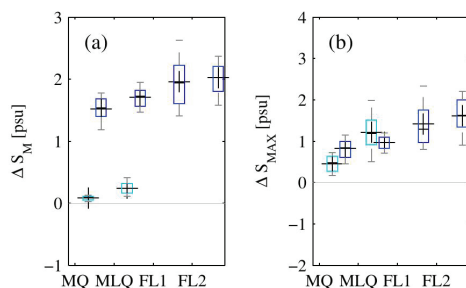


Abbildung 6: Fortsetzung von Abb. 5 für den Salzgehalt.

Die Veränderungen der Tidedynamik gehen mit Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeiten in Richtung der Fahrrinne einher. Die Simulationen zeigen eine verstärkte Intensität des Flutstroms im Vergleich zur Ebbestromgeschwindigkeit (hier nicht dargestellt).

5 Zusammenfassung und Diskussion

Ziel des hier dargestellten Projekts ist die Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf Hydrodynamik und Salzgehalte im Weserästuar. Ein 3D-HN-Modell des Ästuars wurde erstellt und erfolgreich validiert. Zur Beschreibung des IST-Zustandes des Ästuars und zur bestmöglichen Erfassung der internen natürlichen Variabilität wurde ein Satz von Simulationen gewählt, die jeweils unterschiedliche charakteristische Perioden des derzeitigen Zustandes repräsentieren, wie etwa Hochwasserereignisse, mittlere und niedrige Abflüsse sowie Sturmfluten. Ein vereinfachtes Szenario mit einem MSLR von 0,74 m wurde simuliert und Tidekennwerte der Szenario-Simulationen wurden mit denen des Referenzzustandes verglichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass der am Rand vorgegebene Anstieg des Mittelwassers mit Veränderungen der Tidedynamik im Ästuar einhergeht. Insbesondere sind eine Vergrößerung des Tidenhubs und eine relative Senkung des Tideniedrigwassers zu beobachten sowie eine Verstärkung des Flutstroms im Verhältnis zum Ebbestrom. Der Salzgehalt im inneren Ästuar steigt. Es besteht die generelle Tendenz einer Stromaufwärtsverlagerung der Brackwasserzone und des Nullpunkts der bodennahen residuellen Strömungsgeschwindigkeit. Die Ursache für die Stromaufwärtsverlagerung ist möglicherweise die Verstärkung des Flutstroms aufgrund geringerer Dissipation.

Um die Ergebnisse in Relation zu setzen und Informationen für die Praxis und für Entscheider abzuleiten, folgt eine knappe Diskussion der Unsicherheiten des untersuchten Szenarios und der Verlässlichkeit der Ergebnisse. Laut IPCC (2013) ist es „virtually certain“ („so gut wie sicher“), dass sich die Geschwindigkeit des globalen Meeresspiegelanstiegs (engl.: global mean sea level rise, GMSLR) in den letzten Jahrhunderten erhöht hat, und „sehr wahrscheinlich“ („very likely“), dass künftig die Beschleunigungsraten des Meeresspiegelanstiegs weiter wachsen und die Beschleunigungsraten vergangener Jahre übersteigen werden. Die Projektionen für den GMSLR bis 2100 werden für unterschiedliche Repräsentative Konzentrationspfade (engl.: Representative Concentration Pathways, RCPs) jeweils versehen mit ein Spektrum wahrscheinlicher Werte und einem Mittelwert dargestellt. Die hier präsentierten Ergebnisse basieren auf dem RCP8.5 mit der Annahme eines kontinuierlichen Anstiegs der Treibhausgasemissionen. Aus dem Spektrum der für dieses Szenario gegebenen wahrscheinlichen GMSLR-Werte wird der Mittelwert als der wahrscheinlichste ausgewählt. Global gesehen lässt sich diesem Wert ein „mittleres Vertrauen“ („medium confidence“) für RCP8.5 (IPCC 2013) zumessen, allerdings ist zu bemerken, dass sich das Vertrauen drastisch verringert, wenn der GMSLR direkt auf die Randbedingungen der Weser projiziert wird. Hierfür gibt es zwei Gründe: Zunächst gibt es Hinweise darauf, dass sich der GMSLR nicht gleichmäßig über die Erdkugel verteilen wird. Die globale Projektion an die regionalen Verhältnisse in der süd-östlichen Nordsee anzupassen ist jedoch auf Grund des begrenzten Wissens über diese Vorgänge nicht möglich. Zweitens zeigen aktuelle Studien, dass sich die Tidedynamik (TD) der Nordsee verändern wird, wodurch es möglicherweise zu einem höheren oder verringerten Tidenhub in der Deutschen Bucht kommt. Die Auswirkungen des MSLR auf die Tidedynamik der Nordsee waren in jüngster Zeit Gegenstand einiger Studien, doch liefert die verlässlichsten Ergebnisse noch immer PLÜß (2004) auf Grund der besseren Auflösung des Wattenmeers im verwendeten Modell. Jedoch haben PELLING et al. (2013) mit einem vereinfachten Modell gezeigt, dass Veränderungen der Tidedynamik hauptsächlich von der Dissipation abhängen, die durch die flachen Wattenmeerbereiche der süd-östlichen Nordsee verursacht wird. Das deutet darauf hin, dass Veränderungen der Sedimentationsmuster und mögliche Küstenlinienveränderungen eine wichtige Rolle für die künftigen Veränderungen der Tidedynamik bei erhöhtem mittlerem Meeresspiegel spielen werden. So kann argumentiert werden, dass eine Nichtverformung des Gezeitensignals am Modellrand der Deutschen Bucht im selben Maße mit Unsicherheit der Randbedingungen behaftet ist wie eine Anpassung ohne genauere Untersuchung der Tidedynamikveränderungen in der Nordsee. Darüber hinaus sind, wie in Kap. 4.2 erwähnt, Veränderungen der Sedimentationsmuster in der Weser wie auch in der Nordsee gleichermaßen zu erwarten. Da bathymetrische Verhältnisse und Rauheit in dieser Hinsicht als Randbedingungen angesehen werden können, führt dies zu einer weiteren Unsicherheit der Randbedingungen.

Trotz der Unsicherheiten im Szenario und den Randbedingungen können die aus dem Szenario abgeleiteten Ergebnisse als bestmöglicher Schätzwert zum gegenwärtigen Zeitpunkt gelten, vorausgesetzt, dass die Treibhausgasemissionen nicht zurückgehen. Wie oben erwähnt, werden die Untersuchungen durch ein High-end Szenario sowie weitere Studien vervollständigt, die zur Quantifizierung der Randbedingungenunsicherheit dienen.

6 Schriftenverzeichnis

- GASLIKOVA, L.; GRABEMANN, I. and GROLL, N.: Changes in North Sea storm surge conditions for four transient future climate realizations. *Natural Hazards*, Vol. 66(3), 1501-1518, 2012.
- GRABEMANN, H.-J.; GRABEMANN, I.; HERBERS, D. and MÜLLER, A. M.: Effects of a specific climate scenario on the hydrography and transport of conservative substances in the Weser estuary, Germany: a case study. *Climate Research*, Vol. 18, 77-87, 2001.
- IPCC 2013: Summary for Policymakers. In: STOCKER, T. F.; Qin, D.; PLATTNER, G.-K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V. and MIDGLEY, P. M. (eds.): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2013.
- KREYE, P.; GOCHT, M. und FÖRSTER, K.: Entwicklung von Prozessgleichungen der Infiltration und des oberflächennahen Abflusses für die Wasserhaushaltsmodellierung. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Vol. 5, 268-27, 2010.
- MURPHY, A. H.: Skill Scores Based on the Mean Square Error and Their Relationships to the Correlation Coefficient. *Monthly Weather Review*, Vol. 16, 2417-2424, 1988.
- PELLING, H. E.; GREEN, J. M., and WARD, S. L.: Modelling tides and sea-level rise: To flood or not to flood. *Ocean Modelling*, Vol. 63(0), 21-29, 2013.
- PLÜß, A.: Nichtlineare Wechselwirkung der Tide auf Änderungen des Meeresspiegels im Übergangsbereich Küste/Ästuar am Beispiel der Elbe. In: GÖNNERT, G.; GRASSL, H.; KELLETAT, D.; KUNZ, H.; PROBST, B.; VON STORCH, H. und SÜNDERMANN, J. (eds): *Klimaänderung und Küstenschutz*. Universität Hamburg, 129-138, 2004.
- SCHIRMER, M. and SCHUCHARDT, B.: Assessing the impact of climate change on the Weser estuary region: an interdisciplinary approach. *Climate Research*, Vol. 18, 133-140, 2001.
- SIMPSON, J. H.; BROWN, J.; MATTHEWS, J. and ALLEN, G.: Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification. *Estuaries*, Vol. 13, 125-132, 1990.
- YANG, J.; GRAF, T.; HEROLD, M. and PTAK, T.: A fully coupled surface-subsurface approach to simulate flow dynamics in coastal aquifers. *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 149, 61-75, 2013.
- ZHANG, Y. J. and BAPTISTA, A. M.: SELFE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. *Ocean Modeling*, Vol. 21, 71-96, 2008.
- ZORNDT, A. C.; SCHLURMANN, T. and GRABEMANN, I.: The influence of extreme events on hydrodynamics and salinities in the Weser estuary in the context of climate impact research. *Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering*, Vol. 33, 2012.