

# **Einfluss eines gesteuerten Tidesperrwerksbetriebs auf die Tidedynamik im Emsästuar**

*Dennis Oberrecht und Andreas Wurpts*

## **Zusammenfassung**

Das Emsästuar im Nordwesten Deutschlands ist teildurchmisch und weist eine starke Ansammlung von kohäsiven Sedimenten in Form von Flüssigschlick auf. Diese ist auf die in der Vergangenheit durchgeführten Vertiefungen und Begradigungen des Flusses zurückzuführen. Im Wesentlichen wurde durch die flussbaulichen Maßnahmen die barokline Zirkulation intensiviert, deren räumliche Ausdehnung vergrößert und die Gezeitenasymmetrie gesteigert. In der Trübungszone des Ästuars bis hin zum Tidewehr findet man Flüssigschlick mit Mächtigkeiten bis zu mehreren Metern in der Wassersäule vor. Als Folge der Ausbauten ist zudem eine starke Asymmetrie entstanden, die eine kurze aber starke Flutströmung und eine lange und schwache Ebbströmung verursacht. Als Folge der verstärkten Ansammlung suspendierter Sedimente weist die Unterems insbesondere über die durch niedrige Oberwasserzuflüsse charakterisierten Sommermonate einen kritischen ökologischen Zustand auf. Die weiteren Nutzungsanforderungen an das Gewässer erlauben jedoch keine Verflachung des Gewässers zur Herstellung der vormaligen Zustände. Die hier vorgestellte Untersuchung befasst sich mit der modelltechnischen Untersuchung einer veränderten Nutzung des Emssperrwerks in Gandersum, um die Gezeitenasymmetrie zu beeinflussen. Durch eine temporäre Dämpfung des extremen Tidestiegs im ersten Drittel der Flut bei gleichzeitig möglicher Beibehaltung des Tidevolumens sollen die in dieser Tidephase sehr ausgeprägten, stromauf gerichteten Sedimenttransporte reduziert werden. Hiervon wird u. a. eine Verbesserung der Gewässergüte während Phasen niedrigen Oberwasserabflusses erwartet. Die numerischen Untersuchungen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung im Vergleich mit den Ergebnissen mehrerer Naturversuche unter Einsatz des Emssperrwerks.

## **Schlagwörter**

Emsästuar, Tideasymmetrie, barokline Zirkulation, Tidesteuerung, Emssperrwerk, Flüssigschlick

## **Summary**

*The Ems estuary in the Northwest of Germany is a partially mixed estuary which exhibits a strong accumulation of cohesive fines by means of fluid mud as a result of several deepening and straightening measures that were conducted during the past decades. The driving phenomena are intensified baroclinic circulation which extends in an inland direction by means of fluid mud induced baroclinic effects. Therefore, the turbidity zone consists of fluid mud deposits of several meters and extends throughout the whole tidally influenced reach up to the most downstream located weir. Strongly increased tidal asymmetry is present and results in short, but strong periods of flood flow in combination with weaker ebb flow over*

*longer durations. The investigation presented here deals with a modelling approach to investigate a modified use of the Ems river barrage in order to influence the tidal wave propagation towards a more symmetric shape, while maintaining the tidal volume as much as possible. The aim is to reduce upstream sediment transport as well as turbidity and increase dissolved oxygen concentration, especially during periods of low fresh water discharge. The investigation shows decreased tidal asymmetry and influences on the baroclinic circulation in both, field measurements and also well reproduced by the numerical model as a result of the barrier operation. Also, lower suspended sediment and higher dissolved oxygen concentrations in the lower Ems estuary are observed. The mode of the tidal barrier operation is subject to a hydro- and morphodynamic optimization procedure which is done by the numerical model described here.*

## Keywords

*Ems estuary, tidal asymmetry, baroclinic circulation, tidal control, storm surge barrier, fluid mud*

## Inhalt

1	Einleitung .....	464
2	Modellansatz .....	466
3	Modellkalibrierung und -validierung.....	466
4	Ergebnisse und Beobachtungen .....	467
5	Schlussfolgerungen .....	469
6	Schriftenverzeichnis.....	470

## 1 Einleitung

In der vorliegenden Studie wird eine veränderte Nutzung des Emssperrwerks in Gander-sum (GAN) untersucht. Die Analyse erfolgt auf Basis hydronumerischer Strömungsbe-rechnungen im Emsästuar. Zu diesem Zweck wurde ein dreidimensionales numerisches Modell des Ästuars entwickelt, kalibriert und anhand von Daten aus den Jahren 2009, 2010 und 2012 durchgeführten Prototypversuchen am Sturmflutsperrwerk validiert. Die Durchführung der hydrodynamischen Studie erfolgt im Rahmen einer Untersuchung der hydro- und morphodynamischen Bedingungen mit besonderem Augenmerk auf Verände-rungen der Sedimentationsraten und auf Verbesserungen der Wasserqualität im oberen Ästuar als Folge einer veränderten Nutzung des Sperrwerks. Das Emsästuar (Abb. 1) ist ein teildurchmischtes Ästuar im Nordwesten Deutschlands, an dem auch ein Teil der niederländischen Grenze verläuft. Der tidebeeinflusste Teil der Ems erstreckt sich über eine Gesamtlänge von 110 km von der ostfriesischen Insel Borkum bis zum Tidewehr in Her-brum. Der durchschnittliche Oberwasserzufluss beträgt  $78 \text{ m}^3/\text{s}$ . Infolge der in der Ver-gangenheit durchgeführten Vertiefungen und Begradigungen des Flusses hat sich das Strömungsmuster verändert: auf eine kürzere, aber starke Flutströmung folgt eine schwä-chere, aber längere Ebbströmung. Dies führte zu einer massiven Ansammlung von kohä-siven Sedimenten in Form von Flüssigschlick. Es bestehen komplexe Wechselwirkungen zwischen den suspendierten Sedimenten und den Tidedrömungen, wie zum Beispiel eine dynamische Schichtung und ein Nicht-Newtonsches Fließverhalten in den unteren Teilen

der Wassersäule. Die verkehrswasserbaulichen Maßnahmen führten zudem zu einer verringerten Schubspannung und Rauheit, was eine weniger eingeschränkte Ausbreitung der Tidewelle durch das Ästuar bedeutet und höhere Tidehochwasserstände sowie niedrigere Tideniedrigwasserstände zur Folge hatte (HERRLING und NIEMEYER 2008). Der Tidehub beträgt 2,2 m an der Mündung und erhöht sich nach oberstrom auf 3,2 m in Papenburg (PAP).

Für die Untersuchung der veränderten Tidedynamik im Zuge einer modifizierten Nutzung des Sturmflutsperrwerks bei Gandersum wurde das Sperrwerk durch eine Parametrisierung der Unterströmung der Tore im hydrodynamischen Modell implementiert. Das Sperrwerk wurde 2001 in Betrieb genommen, um das Hinterland gegen Sturmfluten zu schützen. Es verfügt über sieben Öffnungen, davon zwei Schifffahrtsöffnungen. Der Querschnitt des Sperrwerks ist 474 m breit, wobei 13 % der Fläche von Pfeilern blockiert werden, sodass die Nettobreite 414 m beträgt. Zur Beeinflussung der Gezeitendynamik werden hier die in einem Naturversuch von 2012 durchgeführten Schließungsszenarien beispielhaft erörtert. Während des Versuchs wurde durch Schließen mehrerer Nebenöffnungen der Querschnitt zu 67 % vorübergehend verbaut.

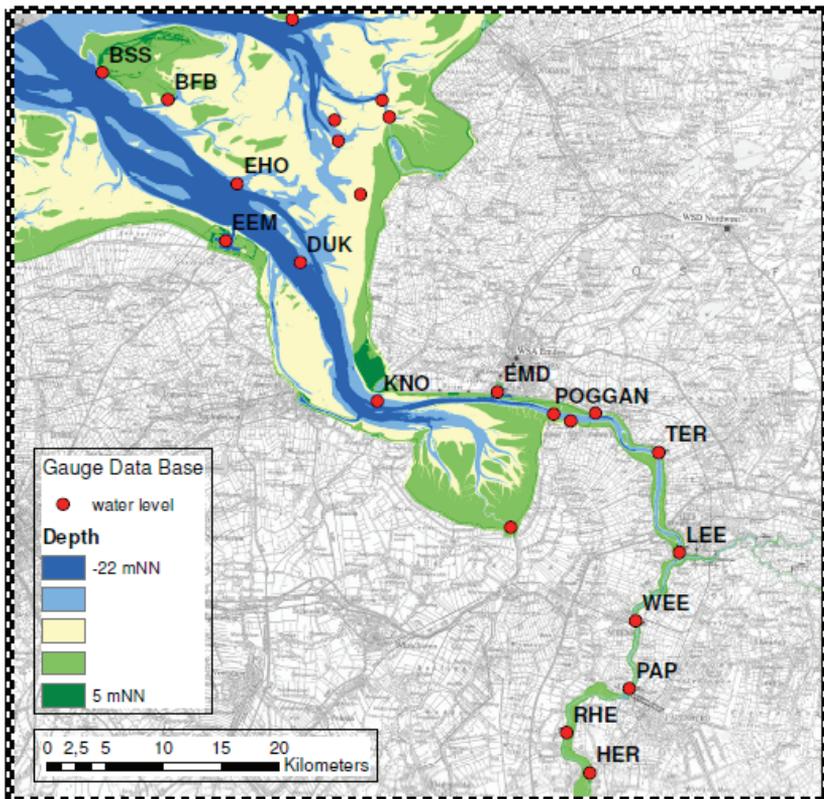


Abbildung1: Das Emsästuar. Überlagerung der Karte zur Darstellung von Bathymetrie und Wasserstand sowie Messstationen für den Salzgehalt.

## 2 Modellansatz

Es wird ein auf der Methode der Finiten Volumen basierendes Delft3D-Modell auf einem dreidimensionalen strukturierten Gitter zur Reproduktion der hydrodynamischen Mechanismen, der Sediment- und Salzgehaltsdynamik verwendet. Der spezifische zeitabhängige Betriebsmodus für die Verschlussorgane (Steuerung des Querschnittsbereichs durch unterströmte Hubtore) wird im Modell der numerischen Flachwassergleichung als Approximation eines hydrodynamischen Energieverlusts infolge der Unterströmung der Tore implementiert. Ein Modell auf Grundlage der Prandtlschen Mischungsweglänge mit einer Dämpfungsfunktion nach PERELS und KARELSE (1982) wurde implementiert, um die vertikalen Salzgehaltsgradienten während der Stauwasserphasen und das barokline Zirkulationsmuster sowie die Turbulenzsituation im Ästuar zu reproduzieren und so die Turbulenzschließung im Diffusionsterm der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichung sowie die vertikalen Diffusivitätsparametrisierungen innerhalb der gekoppelten Advektions-Diffusionsgleichungen für Salz, Temperatur und suspendiertes Sediment zu lösen.

## 3 Modellkalibrierung und -validierung

Das Untersuchungsgebiet reicht von der ostfriesischen Insel Borkum bis zum 110 km stromauf gelegenen Tidesperrwerk in Herbrum (HER). Das Leda-Jümme-Gebiet mit Mündung der Flüsse in die Unterems bei Leerort ist ebenfalls im Modellgebiet enthalten. Das Modellgebiet wird durch 51648 Knoten repräsentiert und umfasst zehn vertikale Schichten. Die seitlichen Modellränder folgen der Deichlinie. Die Bedingungen am offenen seeseitigen Modellrand werden mit dem Tideantrieb basierend auf Zeitreihen von Wasserstandsmessungen am Pegel Borkum implementiert. Beide offenen binnenseitigen Randbedingungen (Herbrum und Leda) werden als Zeitreihe des Oberwasserabflusses implementiert; für den Salztransport und die Temperatur wurden an allen Rändern die entsprechenden Zeitreihen nahe gelegener Messstationen erzeugt. Für die Anfangsbedingungen von Salzgehalt und Temperatur im gesamten Modellgebiet wurden der durchschnittliche Salzgehalt und durchschnittliche Temperaturwerte über eine Simulationsperiode berechnet und auf alle Knoten interpoliert.

Ein Simulationszeitraum von vier Wochen im Jahr 2010 wurde für die Untersuchungen ausgewählt. Die ersten beiden Wochen dienen dabei als Anlaufperiode, die beiden folgenden Wochen werden für die Analyse verwendet. Der am 10. März 2010 beginnende Simulationszeitraum beinhaltet Werte für den Oberwasserabfluss, die zunächst relativ hoch liegen ( $\sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$ ) und dann auf  $\sim 100 \text{ m}^3/\text{s}$  zurückgehen. Der Modellkalibrierung und den dargestellten Abbildungen (2 & 3) liegt der Zeitraum des Versuchs im Jahr 2012 zu Grunde.

In Abb. 2 ist die Validierung der Differenzen zwischen gemessenen und modellierten Wasserständen über das Tidesperrwerk während des Tidesteuerungsversuchs dargestellt. Mit der kalibrierten Energieverlust-Approximation gelingt dem auf der Flachwassergleichung basierenden Modell eine ausreichende Reproduktion des Einflusses der Verschlussorgane und folglich der Dämpfung der Tidedynamik aufgrund des Betriebs der Sperrwerkstore.

Abb. 3 zeigt einen Vergleich der Zeitreihen gemessener und berechneter Differenzen zwischen Salzgehalt am Boden und Salzgehalt an der Oberfläche am Standort der Tonne 61 (im „Eingangsbereich“ des Emders Fahrwassers zwischen Knock (KNO) und Emden (EMD), s. Abb. 1). Eine ausreichend genaue Reproduktion der Strömungs- und Salzgehaltsdynamik an dieser Stelle ist zwingend erforderlich, da die Gezeitendynamik in der Unterems insgesamt durch diesen, am Übergang zwischen Dollart und Unterems gelegenen Querschnitt gesteuert wird. Das großskalige barokline Zirkulationssystem wird sehr gut reproduziert.

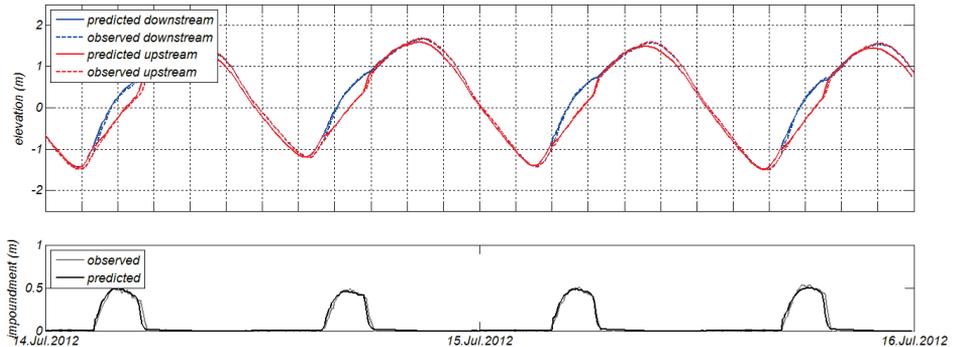


Abbildung 2: Das obere Diagramm zeigt den Vergleich zwischen den Zeitreihen gemessener und modellierter Wasserspiegelauslenkung während der Versuchsreihe 2012 in Gandersum. Im unteren Diagramm sind die entsprechenden Wasserstandsdifferenzen zwischen Sperrwerksposition im Oberwasser und im Unterwasser dargestellt.

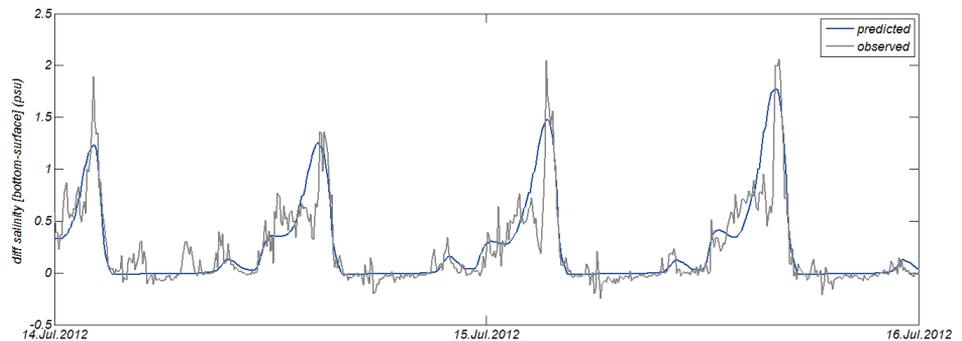


Abbildung 3: Vergleich des Salzgehalts an der Oberfläche und am Boden bei Station T61 nahe Knock (KNO) im Feldversuch 2012.

#### 4 Ergebnisse und Beobachtungen

Der hier vorgestellte Vergleich basiert auf den modellierten Ergebnissen für eine Tidedynamik mit und ohne Tidesteuerung (letztere ist der Referenzzustand) in demselben Simulationszeitraum und bei ansonsten identischer Modellkonfiguration. Die Tidesteuerungsszenarien konzentrieren sich auf eine im Jahr 2012 durchgeführte Versuchsreihe. Im Versuch von 2012 wurden alle Verschlussorgane geschlossen, mit Ausnahme der Haupt- und Nebenschiffahrtsöffnung, die sich im tiefsten Bereich der Tiderinne befinden. Die

anderen Sperrwerkstore wurden vorübergehend geschlossen, wodurch sich der Fließquerschnitt um etwa 67 % reduzierte. Die Schließung begann kurz nach Tideniedrigwasser, d. h. mit Beginn der Flutströmung und wurde dann etwa 2,5 Stunden aufrechterhalten.

Der Einfluss der Tidesteuerung auf das Verhältnis von Ebbstrom- zu Flutstromdauer entlang des Ästuars ist in Abb. 4 dargestellt. Die Veränderung der Tideasymmetrie ist im Abschnitt von Emden bis Weener deutlich erkennbar. Die in der Kurve erkennbare Stufe bei Leerort ist auf den Zufluss und Abfluss von Leda-Jümme Gebiet zurückzuführen. In der verringerten Tideasymmetrie zeigt sich ein Wechsel zu einer längeren Flutdauer mit relativ schwächerer Strömung und einer kürzeren Ebbdauer mit einem relativ stärkeren Ebbstrom.

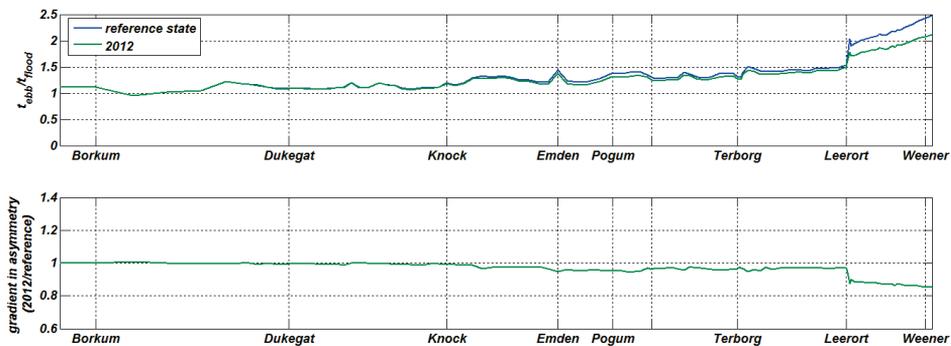


Abbildung 4: Im oberen Diagramm ist die Tideasymmetrie basierend auf simulierten Geschwindigkeitsmessungen entlang des Ästuars dargestellt. Das untere Diagramm zeigt den Unterschied zwischen Tidesteuerung und Referenzzustand.

In Abb. 5 sind die vertikalen Salzgehaltsgradienten stellvertretend für die Intensität der baroklinen Zirkulation dargestellt. Die Abszisse zeigt die Zeit, die Ordinate die Längsposition von Eemshaven (EEM) bis Oldersum (OLD, die Standorte sind Abb. 1 zu entnehmen). Der durch Flüssigschlick dominierte Teil der Unterems ist von diesem Bereich mehr oder weniger ausgenommen, da es dort zu starken Wechselwirkungen zwischen Salzgehaltstransport und Flüssigschlick kommt.

Die Lage des Sperrwerks in Gandersum wird durch die horizontale schwarze Linie bei Km 55 angegeben. Der vertikale Salzgehaltsgradient des Referenzzustands ist dem mittleren Diagramm von Abb. 5 zu entnehmen. Hier zeigt sich für die Stauwasserdauer vor Eintreten der Flut bei Nipptide (Tage 0-4 & 11-15) ein vertikaler Salzgehaltsgradient von 5-6 psu im Bereich von Km 70. Bei Springtide (Tage 4-10) fällt der Gradient mit 4-5 psu während Stauwasser vor Eintreten der Ebbe niedriger aus als bei Nipptide. Bei Tnw-Stauwasser liegt der stärkste vertikale Salzgehaltsgradient für Gandersum bei Nipptide im Bereich von 0-2 psu, während bei Springtide ein Gradient von 3-5 psu verzeichnet wird. Die Intensität des vertikalen Salzgehaltsgradienten wird überwiegend durch den horizontalen Salzgehaltsgradienten entlang des Ästuars und die Intensität der lokalen Turbulenz angetrieben.

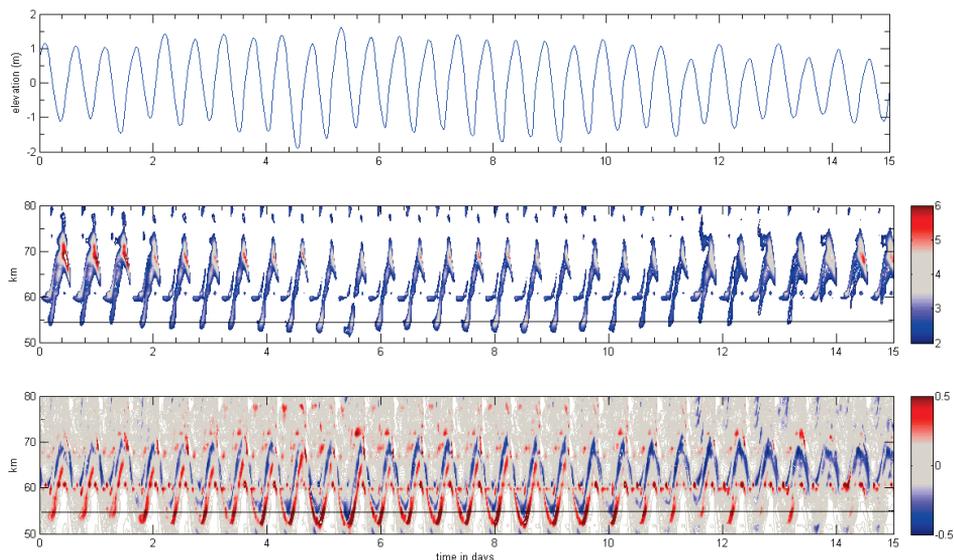


Abbildung 5: Im oberen Diagramm wird der Wasserstand am seeseitigen Rand gezeigt, im mittleren Diagramm der vertikale Salzgehaltsgradient aus den Referenzmodellergebnissen in einem Längsschnitt und im unteren Diagramm der Unterschied zwischen Referenzzustand und Tidesteuerungsszenario von 2012. Die schwarze Kurve zeigt die Lage des Sperrwerks an.

Im unteren Diagramm der Abbildung wird der Unterschied zwischen dem Referenzzustand und dem Szenario einer Tidesteuerung aufgezeigt. Im Bereich der Knock wurde ein Anstieg von 0,3 psu bei Springtidebedingungen verbunden mit einer verringerten Schichtung während Ebbperioden berechnet. Bei Nipptide kommt es zu einer signifikanten Verringerung des vertikalen Salzgehaltsgradienten um 0,5 psu stromauf von Km 70, was eine kleinere Zone barokliner Zirkulation während Stauwasser vor Eintreten der Flut zur Folge hat. In der Stauwasserphase vor Ebbe wird unter Springtidebedingungen ein signifikanter Anstieg des Salzgehaltsgradienten um mehr als 0,5 psu verzeichnet, begleitet von einer ausgeprägten Abschwächung des Gradienten im Unterwasser. Auch lässt sich eine schwächere Salzgehaltsschichtung während Ebbphasen beobachten. Berechnungen der Tidesteuerung zeigten eine Verringerung der Tideasymmetrie an der Oberfläche in der baroklinen Zirkulationszone. Die Messdaten bestätigen dies und somit die Plausibilität des numerischen Modells.

## 5 Schlussfolgerungen

Die hier vorgestellte numerische Studie ist Teil einer breiter angelegten Untersuchung zur Verbesserung der ökologischen Bedingungen der Unterems. Vorliegender Beitrag konzentriert sich auf ausgewählte hydrodynamische Phänomene und ihre Beeinflussung mittels eines neuen Tidesteuerungsansatzes durch alternative Nutzung des bestehenden Sperrwerks. Dank der Feinanpassung des Modells an die spezifischen Anforderungen der physikalischen Problemstellung (Unterströmung der Tore im Flachwassergleichungsmodell, komplexer barokliner Antrieb) bietet es einen guten Lösungsansatz für die

relevanten antreibenden Phänomene. Es wird ein Vergleich der modellierten Tidesteuerung und des Referenzzustands ohne Tidesteuerung gegeben, in dem die Veränderungen und die Intensität des vertikalen Salzgehaltsgradienten und des Musters der baroklinen Zirkulation im Ästuar berücksichtigt sind. Bedingt durch den modifizierten Sperrwerksbetrieb ist eine Veränderung des Fließverhaltens im Vergleich zum Referenzzustand erkennbar. Es wird gezeigt, dass die Tidesteuerung mittels Anpassung des Sperrwerksbetriebs die Tidesymmetrie signifikant reduziert und auch die baroklinen Mechanismen beeinflusst. Dabei werden diese Parameter nur als Indikatoren hinsichtlich des übergeordneten Ziels einer positiven Beeinflussung von Sedimentdynamik und ökologischem Haushalt verstanden. Aus diesem Grund wird die Untersuchung parallel in Richtung einer Optimierung des Betriebsmodus auf Basis belastbarer morphodynamischer Berechnungen fortgeführt.

## 6 Schriftenverzeichnis

- HERRLING, G. and NIEMEYER, H. D.: Comparison of the hydrodynamic regime of 1937 and 2005 in the Ems-Dollard estuary by applying mathematical modeling, HARBASINS Report, NLWKN-Forschungsstelle Küste, 2008.  
<http://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/70703>
- PERELS, P. A. J. and KARELSE, M.: A two-dimensional laterally averaged model for salt intrusion in estuaries, Tech. Rep. 262, Waterloopkundig Laboratorium, Delft Hydraulics Laboratory, 1982.