

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Report, Published Version

**Kösters, Frank; Zorndt, Anna**

## **Ereignisgesteuerte Morphodynamik im Weserästuar (MorphoWeser). FuE-Abschlussbericht B3955.02.04.70223**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106566>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2018): Ereignisgesteuerte Morphodynamik im Weserästuar (MorphoWeser). FuE-Abschlussbericht B3955.02.04.70223. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

**FuE-Abschlussbericht**  
**Ereignisgesteuerte Morphodynamik im**  
**Weserästuar (MorphoWeser)**

**B3955.02.04.70223**



**Dezember 2018**



**FuE-Abschlussbericht**  
**Ereignisgesteuerte Morphodynamik**  
**im Weserästuar (MorphoWeser)**

Beginn des Vorhabens: September 2014

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. B3955.02.04.70223

Aufgestellt von:           Abteilung:           Wasserbau im Küstenbereich  
                                  Referat:            Ästuarsysteme I (K2)  
                                  Projektleiter:    Dr. Frank Kösters  
                                  Bearbeiter:       Dr.-Ing. Anna Zorndt

Hamburg, Dezember 2018

Der Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.



## Zusammenfassung

Die Ausbau- und Unterhaltungsmaßnahmen an den Seeschiffahrtsstraßen werden zunehmend hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Sedimenttransport und die Morphodynamik hinterfragt. Die Interpretation von Modellergebnissen ist jedoch nur vor dem Hintergrund eines umfassenden Systemverständnisses, insbesondere den Wirkzusammenhängen und in Verbindung mit den speziellen Reviereigenschaften möglich. Für die Beratung der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung durch die Bundesanstalt für Wasserbau ist es daher notwendig, das Systemverständnis der natürlichen Dynamik des Sedimenttransportes im heutigen Zustand zu verbessern und insbesondere dem wissenschaftlichen Fortschritt bei der Abbildung des Sedimenttransportes Rechnung zu tragen. Dazu gehört auch, die kontinuierliche Weiterentwicklung der Bearbeitungsmethoden und der eingesetzten Modellverfahren sicher zu stellen. Durch eine verbesserte Abbildung morphodynamischer Prozesse in Modellen kann die Beratungsleistung im Bereich Sedimentmanagement weiter erhöht und das Fernziel einer modellbasierten Prognose weiter verfolgt werden. Das Forschungsprojekt MorphoWeser beschäftigte sich mit Einflussfaktoren morphologischer Änderungen in der Außen- und Unterweser und verfolgte das Ziel, hydrologische und meteorologische Effekte im Hinblick auf ihre Wirkung auf Sedimenttransport und Morphodynamik zu quantifizieren.

Die Untersuchungen erfolgen mit Hilfe von Analysen von Messungen in der Natur und Prozessstudien mit Modellsimulationen. Ein Schwerpunkt des Projektes war daher der Aufbau von Modellsystemen, die in der Lage sind, die natürlichen Transportprozesse in Außen- und Unterweser zu beschreiben, sowie deren Validierung. Hierfür erfolgte eine Anpassung und Aktualisierung des bisherigen Sedimenttransport- und Morphodynamikmodells des Jade-Weser-Ästuars, welches auf dem Modellverfahren UnTRIM-SediMorph beruht. Weiterhin wurden in Zusammenarbeit mit zwei universitären Partnern zwei Modelle mit Hilfe des Modellverfahrens Delft3D aufgebaut. Um weitere Erkenntnisse zum Einfluss von Sturmfluten auf Prielbewegungen in der Außenweser zu erhalten, erfolgte neben der Aufbereitung und Analyse vorhandener Daten eine Profilmesskampagne an Prielkanten des Suezpriel in Zusammenarbeit mit dem Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Bremerhaven. Weiterhin wurde ein stationäres Kamerasystem zum Monitoring von Prielbewegungen in der Außenweser pilotartig getestet.

Der Modellaufbau der zwei Delft3D Modelle und deren Validierung mit Hilfe von Naturmessungen waren erfolgreich. Eins der Modelle (Herrling et al., 2017) ist als 2D-Modell durch eine Kopplung von Delft3D und dem Seegansmodell SWAN insbesondere für die Abbildung der Morphodynamik in der Außenweser optimiert. Das zweite Modell (Hesse und Fröhle, 2016) zielt auf die Abbildung der Dynamik der Trübungszone mit Hilfe von neuartigen Modellkonzepten u. a. für den Bodenaustausch ab. Beide Modelle entsprechen dem Stand der Wissenschaft, sind somit wertvolle Werkzeuge für die Untersuchung von Forschungsfragestellungen und konnten teilweise bereits für Fragestellungen aus dem Bereich der wasserbaulichen Systemanalyse unterstützend eingesetzt werden.



<b>Inhaltsverzeichnis</b>		<b>Seite</b>
1	Problemdarstellung und Ziel	1
1.1	Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens	1
1.2	Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung	2
1.3	Untersuchungsziel	3
2	Untersuchung der Schwebstoffdynamik in der Trübungszone	4
2.1	Grundlagen	4
2.2	Methodik	5
2.3	Ergebnisse	6
2.4	Diskussion	8
2.5	Zusammenfassung und Ausblick	9
3	Untersuchung der Morphodynamik in der Außenweser	10
3.1	Grundlagen	10
3.2	Methodik	10
3.3	Ergebnisse	11
3.4	Diskussion	13
3.5	Zusammenfassung und Ausblick	13
4	Untersuchung von Sedimenttransport und Morphodynamik im Jade-Weser Gebiet	15
4.1	Grundlagen	15
4.2	Methodik	15
4.3	Ergebnisse	16
4.4	Diskussion	18
4.5	Zusammenfassung und Ausblick	18
5	Untersuchung der Morphodynamik der Außenweser auf Zeitskalen von Dekaden	20
5.1	Grundlagen	20
5.2	Methodik	20
5.3	Ergebnisse	21
5.4	Diskussion	23
5.5	Zusammenfassung	23
6	Messungen in der Natur	24
6.1	Handmessungen von Prielkanten in der Außenweser	24
6.2	Pilotmessungen mit stationärem Kamerasystem in der Außenweser	25
7	Zusammenfassung	28
8	Literaturverzeichnis	30





<b>Bildverzeichnis</b>	<b>Seite</b>	
Bild 1	Schematische Beschreibung des Modellkonzeptes mit dem 2-Schichten Modell und der Auswirkungen auf den großräumigen Sedimenttransport (Hesse 2019).	6
Bild 2	Zeitliche Änderung der Trübungszone als Bereich erhöhter Schwebstoffgehalte im Modell in Abhängigkeit vom Abfluss. Links: Abfluss über die Zeit, Rechts: Schwebstoffgehalt (farbig) und Salzgehalt (Isolinien, schwarz) über Zeit und Weser-km, 7-Tage Mittel (Hesse 2019).	7
Bild 3	Deponierte Sedimentmasse an der Sohle am Ende des Simulationszeitraums des Jahres 2009 (grau: Tiefenlinien) (verändert nach Hesse und Fröhle 2017).	8
Bild 4	Einfluss unterschiedlicher Prozesse auf die Morphodynamik der Außenweser. Dargestellt sind die anteiligen Wirkungen am morphologischen Raum (bed elevation range) eines sechsmonatigen Zeitraums unter gemäßigten hydrodynamischen Bedingungen (oben) und während eines extremen Sturmereignisses (unten); modifiziert nach Herrling und Winter (2017a).	12
Bild 5:	Entwicklung der Unterhaltungsbagervolumina im Vergleich zum Abfluss über die Zeit entlang der Weser-km (Quelle: MoNa Datenbasis, örtlich zu 0,6 km Abschnitten und zeitlich zu Monatssummen zusammengefasst).	17
Bild 6	Morphologische Entwicklung der Außenweser von 1791 bis 1950 (Ramacher 1974)	20
Bild 7	Vergleich der Lage der Rinnen. a) Schematische Überlagerung der Rinnen mehrerer historischer Topographien, b) Simulation nach 365 morphologischen Jahren, c) Simulation nach 650 morphologischen Jahren (verändert nach Gundlach 2018)	21
Bild 8	Alternieren der Rinnen über einen Querschnitt in der inneren Außenweser dargestellt als Tiefenverteilung entlang eines beispielhaften Querschnitts in der Außenweser bei Weser-km 75 (Gundlach 2018).	22
Bild 9	Lageplan des Suezprielis mit Messprofilen (rot) und Schraubpfählen (cyan) (WSA Bremerhaven, persönliche Kommunikation).	24
Bild 10	Wandergeschwindigkeit der -1,75 m Höhenlinie des westlichen Prielufers in östliche Richtung für alle Messprofile (eigene Berechnung).	25
Bild 11	Aufbau des Kamerasystems am Unterfeuer Wremerloch (Herrling und Winter 2017a).	26
Bild 12	Direktaufnahme und Ausschnitt des transformierten Ausschnitts des Untersuchungsgebietes mit Kennzeichnung der Prielkanten (rot) (verändert nach Herrling und Winter 2017a).	26



## 1 Problemdarstellung und Ziel

### 1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die weitläufigen Watten im Gebiet der Außenweser sind morphologisch aktive Bereiche und zeichnen sich durch dynamische Rinnensysteme aus, die durch ein Zusammenspiel verschiedener Randbedingungen beeinflusst werden. Kösters und Winter (2014) untersuchten die Wirkung von Wind-, Wellen und Gezeitenströmungen auf die Morphodynamik der Deutschen Bucht auf Basis von Messungen und numerischen Modellergebnissen. Es zeigt sich, dass tideinduzierte Strömungen die treibende Kraft bei den beobachteten morphologischen Änderungen der Rinnensysteme in den äußeren Ästuaren von Elbe, Weser und Ems, der Jadebucht und den ostfriesischen Seegatten sind. Der Vorstrandbereich der nord- und ostfriesischen Inseln wird dagegen durch die Seegangsbelastung dominiert. In den offenen Wattbereichen überlagern sich die unterschiedlichen Einflussgrößen.

In den inneren Ästuaren wie beispielsweise der Unterweser ist das Transportverhalten der Sedimente ebenfalls stark tidegetrieben. Durch die ästuarine Zirkulation (Restströmungen durch das Zusammentreffen von Salz- und Süßwasser) kommt es dazu, dass sich die Sedimente im Bereich der Brackwasserzone akkumulieren und die sogenannte Trübungszone entsteht. Die Position des ästuarinen Trübungsmaximums wird vom Oberwasser moduliert. Bei niedrigen Abflüssen ( $<200 \text{ m}^3/\text{s}$ ) findet eine Netto-Deposition vornehmlich im Bereich Nordenham statt, bei mittleren und höheren Abflüssen ( $>200 \text{ m}^3/\text{s}$ ) dagegen im Bereich des Blexer Bogens bzw. seewärts davon (WSA Bremerhaven 2007). Dies hat einen wichtigen Einfluss auf die Baggermengen, die laut WSA Bremerhaven und WSA Bremen (2016) im Jahresdurchschnitt der Jahre 2004 bis 2015 im Abschnitt Weser-km 55 bis Weser-km 58 knapp 1,5 Mio.  $\text{m}^3/\text{a}$  betragen. Die Lage und das Inventar des ästuarinen Trübungsmaximums sind jedoch nicht ausschließlich von der Höhe des Oberwassers beeinflusst, sondern unterliegen auch saisonalen und meteorologischen Bedingungen (vgl. Grabemann und Krause 2001), deren komplexe Interaktionen bislang kaum untersucht sind.

Es ergibt sich hieraus, dass sowohl in der Außenweser als auch in der Unterweser nicht nur der Tideeinfluss, sondern auch energiereiche meteorologische oder hydrologische Einzelereignisse einen Einfluss auf das Transportverhalten der Sedimente und die morphologische Entwicklung haben können. Es wurden die folgenden Fragestellungen abgeleitet, die genauer untersucht werden sollten:

- Stürme: Wie ist die morphologische Reaktion der Rinnensysteme im Bereich der Außenweser auf Sturmereignisse?
- Hohe Oberwasser: Welche morphologischen Änderungen ergeben sich aus hohen Oberwasserabflüssen in der Unterweser?

Um morphologische Änderungen besser zu verstehen und zu prognostizieren, werden morphodynamische Modelle unterschiedlicher Komplexität eingesetzt (vgl. Überblick von Syvitski et al.

2009). Inzwischen ist der Einsatz von 2D und 3D numerischen hydro- und morphodynamischen Modellsystemen Standard bei der wasserbaulichen Systemanalyse und wurde erfolgreich in unterschiedlichen regionalen Studien zur Simulation zurückliegender Zeiträume, wie z.B. in Buchten (San Pablo Bay, Kalifornien, van der Wegen et al. 2011), Wattgebieten (Nordfriesland, Junge et al. 2005) und Ästuaren (Schelde, Niederlande, Dam et al. 2008) eingesetzt. Die Belastbarkeit der Aussagen wird jedoch heute noch durch die Parametersensitivität der zugrundeliegenden empirischen Beziehungen eingeschränkt (z. B. Lesser et al. 2004). Eine weitere Einschränkung der Modellverfahren ergibt sich aus der häufig verwendeten Annahme, dass die morphologische Änderung einer kurzen Zeitspanne auf eine längere Zeitspanne extrapoliert werden kann („morphologische Beschleunigung“ oder „morphologischer Faktor“). Insbesondere im Hinblick auf die Wirkung von Einzelereignissen wie Stürmen und Hochwasserabflüssen ist diese Annahme kritisch zu hinterfragen bzw. erfordert besondere Berücksichtigung bei der Modellierung.

Die Modellierung suspendierter Sedimente mit kohäsiven Eigenschaften, wie sie im Untersuchungsgebiet vorkommen, ist Gegenstand aktueller Forschung. Derzeit noch nicht vollständig berücksichtigte Prozesse umfassen die Flokkulation und die damit verbundene hohe Variation der Sinkgeschwindigkeiten in den Ästuaren, die Änderung rheologischer Eigenschaften durch hohe Sedimentkonzentrationen, Flüssigschlickbildung sowie die Beeinflussung der Erosion durch organische Faktoren sowie Konsolidierung.

## **1.2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung**

Im Hinblick auf die Beratung der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) durch die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) ist es notwendig, dem wissenschaftlichen Fortschritt bei der Abbildung des Sedimenttransports Rechnung zu tragen und eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Bearbeitungsmethoden und eingesetzten Modellverfahren sicher zu stellen. Durch eine verbesserte Abbildung morphodynamischer Prozesse kann die Beratungsleistung der BAW im Hinblick auf das Sedimentmanagement weiter erhöht und das Fernziel einer modellbasierten Prognose weiter verfolgt werden.

Zur Optimierung des Sedimentmanagements und zur sicheren Prognose der Wirkung wasserbaulicher Maßnahmen ist ein umfassendes Verständnis der Sedimentdynamik im Arbeitsgebiet notwendig. Durch langjährige Erfahrung in der Unterhaltung ist bekannt, dass sich die Mindertiefen, in denen Baggermaßnahmen anfallen, in Abhängigkeit des Oberwassers verlagern. Eine zuverlässige Prognose ist derzeit jedoch noch nicht möglich. Greiferproben des Wasserstraßen- und Schifffahrtsstraßenamtes (WSA) Bremerhaven zeigen, dass die Sedimente an der Gewässer- sohle in der Fahrrinne in den Bereichen des Blexer Bogens und der Schlickstrecke Nordenhams fast ausschließlich aus Schluffen mit variablen, aber im Mittel hohen organischen Bestandteilen (>6 % Glühverlust) bestehen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, sowohl den Einfluss von hydrodynamischen und meteorologischen Randbedingungen, als auch die Transportprozesse selbst besser verstehen und abbilden zu können. Zur Berechnung des Verhaltens der kohäsiven Sedimente (Erodibilität, Deposition, Sinkgeschwindigkeit) sind weitere Untersuchungen notwendig, um die ortsspezifischen Eigenschaften besser abzubilden bzw. die entsprechenden Modellansätze zu verbessern und insgesamt die Güte der wissenschaftlichen Analysen weiter zu erhöhen.

### 1.3 Untersuchungsziel

Voraussetzung für die geplanten Analysen ist die Aktualisierung des bisherigen Sedimenttransport- und Morphodynamikmodells der Unter- und Außenweser. Dazu ist neben einer Aufbereitung des aktuellen Stands des Wissens auch die Aufbereitung und Analyse von Messdaten notwendig.

- *Ziel 1: Sedimenttransport- und Morphodynamikmodell der Unter – und Außenweser ist aktualisiert*
- *Ziel 2: Validierungsdaten sind aufbereitet*

Als Hauptuntersuchungsziel erlaubt der Abgleich der Modellergebnisse mit Messdaten eine Abschätzung der Prognosegenauigkeit für Kenngrößen des Sedimenttransports und morphologischer Änderungen. Insbesondere die Effekte meteorologischer und hydrologischer Ereignisse stellen einen weiteren Untersuchungsschwerpunkt dar, deren Wirkung quantifiziert werden soll. Dies schließt eine Evaluation der bisherigen Naturmessungen und mögliche Erweiterungen ein.

- *Ziel 3: Modellvalidierung ist abgeschlossen, die Prognosegenauigkeit kann quantifiziert werden*
- *Ziel 4: Hydrologische und meteorologische Effekte lassen sich im Hinblick auf ihre Wirkung auf Sedimenttransport und Morphodynamik für den Untersuchungsbereich quantifizieren.*
- *Ziel 5: Anforderungen an zukünftige Messprogramme sind formuliert und pilotartig getestet.*

In weitergehenden wissenschaftlichen Untersuchungen ist geplant die zugrundeliegenden Prozessbeschreibungen (Transportformulierungen nicht-kohäsiver Sedimente und kohäsiver Sedimente) weiter zu entwickeln und so eine Verbesserung der Modellgüte zu erreichen.

- *Ziel 6: Bestehende Prozessbeschreibungen sind evaluiert und Optimierungsmöglichkeiten liegen ggf. vor.*

## 2 Untersuchung der Schwebstoffdynamik in der Trübungszone

### 2.1 Grundlagen

In den Unterhaltungsschwerpunkten des Weserästuars bei Nordenham und im Blexer Bogen wird hauptsächlich sehr feines, kohäsives Material entnommen. Zu einer naturähnlichen Abbildung der Schwebstoffdynamik in der Trübungszone des Weserästuars im numerischen Modell gehört auch die Abbildung dieser Unterhaltungsschwerpunkte in der Fahrrinne. Hierfür sollen im Rahmen des Projektes Methoden getestet und Modelle aufgebaut und auf Forschungsfragenstellungen angewendet werden. Die Arbeiten für diesen Untersuchungsschwerpunkt wurden vom Institut für Wasserbau der Technischen Universität Hamburg, Prof. Peter Fröhle, durchgeführt und sind in den Berichten Hesse und Fröhle (2015), Hesse und Fröhle (2016) und Hesse und Fröhle (2017) dokumentiert. Weiterhin sind eine Dissertationsschrift (Hesse 2019) sowie eine Veröffentlichung (Hesse et al. 2019) eingereicht, in denen weitere Ergebnisse dokumentiert sind.

Die Abbildung der Nettodepositionsschwerpunkte von feinen Sedimenten in tiefen, stark durchströmten Rinnen ist für klassische Sedimenttransportmodelle wie Delft3D (Lesser et al. 2004) oder UnTRIM SediMorph (Malcherek et al. 2005) auch heute noch eine Herausforderung. In der Natur ist die Fahrrinne im Bereich der Trübungszone durch hohe Strömungsgeschwindigkeiten während Ebbe- und Flutstrom gekennzeichnet. Dass es dennoch zu einer Deposition feiner Sedimente kommen kann, ist durch ein Zusammenspiel mehrerer Prozesse zu erklären. Steigt die Schwebstoffkonzentration in der Wassersäule an, kommt es abhängig von den Umgebungsbedingungen zu Flockenbildung und zu einem Absinken der Schwebstoffe aus der Wassersäule an den Boden, welches weitaus schneller ist, als dies bei einem Einzelpartikel der Fall wäre (Winterwerp und van Kesteren 2004). Sind die Flocken in der kurzen Stauwasserdauer zwischen Ebbestrom und Flutstrom aus der Wassersäule zu Boden gesunken, kann es sohnah zur Bildung einer hochkonzentrierten Suspension kommen. Im Verlauf von einer Stauwasserzeit oder mehreren Tiden, insbesondere während weniger energiereichen Tiden bei Nippgezeit, kommt es zu einem fortschreitenden Austreten von Porenwasser aus dem Flockengerüst und damit zu einer beginnenden Konsolidierung. Die Dichteunterschiede an der Grenzschicht zwischen Wasserkörper und der am Boden befindlichen hochkonzentrierten Suspension führen außerdem zu einer Unterdrückung der turbulenten Impulse und ein Resuspendieren während der nächsten Flut- oder Ebbestromphase wird zunehmend erschwert. In den heutigen Sedimenttransportmodellen werden diese Prozesse in der Regel aufgrund der hohen Komplexität durch Parametrisierungen angenähert. Relevante Parameter sind die Sinkgeschwindigkeit sowie die Parametrisierung des Sedimentaustausches zwischen Wassersäule und Boden.

In der hier durchgeführten Untersuchung wurde ein Modellaufbau gewählt, welcher sich ausschließlich auf die naturähnliche Abbildung der Schwebstoffdynamik in der Trübungszone konzentriert. Weitere, für die Gesamtdynamik im Jade-Weser Ästuar wichtige, Prozesse wie beispielsweise die Transporte sandiger Sedimente und die Morphodynamik in der Außenweser wurden zugunsten einer optimalen Abbildung dieser Aspekte vernachlässigt.

In einer ersten Studie wurde ein Modell mit realistischen Anfangs- und Randbedingungen aufgesetzt um die Dynamik der Trübungszone abzubilden (Hesse und Fröhle 2015). Es zeigte sich jedoch, dass es unter Berücksichtigung einer initialen Sedimentbelegung mit mehreren Sedimentfraktionen aus dem schluffigen und sandigen Bereich schwierig ist, die o. g. Parameter so einzustellen, dass sich ein dynamisches Gleichgewicht zwischen turbulenten Impulsen und Sinkgeschwindigkeiten sowie Erosion und Deposition einstellt (siehe auch Bild 1). Es konnte im Bereich der Unterhaltungsschwerpunkte in der Fahrrinne der Trübungszone keine Deposition im Modell erreicht werden (Hesse und Fröhle 2015).

Es wurde daher ein zweites Modell aufgesetzt, welches zwei neue Aspekte miteinander verbindet und in den folgenden Kapiteln weiter beschrieben wird: Es wurde ein sogenanntes „Randwertmodell“ (van Maren et al. 2015) in Verbindung mit einem neuartigen Bodenaustauschkonzept, dem 2-Schichten Modell von van Kessel et al. (2011) angewendet. Als Randwertmodell wird hier der Ansatz bezeichnet, bei dem Sedimente nur über die offenen Ränder eingetragen werden und sich eine Trübungszone zunächst selbständig ausbildet. Hiermit kann ein dynamisches Gleichgewicht zwischen dem residuellen Sedimentimport von den offenen Rändern und der lokalen Sedimentation erreicht werden (Hesse und Fröhle 2016, 2017).

## 2.2 Methodik

Es wurde das Modellwerkzeug Delft3D (Lesser et al. 2004) ausgewählt. Innerhalb dieses Modellwerkzeugs wurde zur besseren Abbildung des Bodenaustausches ein 2-Schichten Modell nach van Kessel et al. (2011) verwendet. Dies führt neben der Austauschschicht noch eine weitere Bilanzierungsschicht (Schicht 1) ein, die dem temporären Speichern von feinen Sedimenten dient. Diese können dann entweder erneut resuspendiert oder in die darunter gelegene Bodenschicht (Schicht 2) deponiert werden. Dieser Ansatz kann als sehr stark vereinfachter Konsolidierungsansatz betrachtet werden. Weiterhin kann Schicht 1 als sohlnahe Flüssigschlickschicht ohne eigene Dimensionen interpretiert werden, in der feine Sedimente zwischengespeichert werden.

Das Randwertmodell, auch als „supply-limited model“ (van Maren et al. 2015) bezeichnet, ist ein Modellaufbau, in dem feine Sedimente ausschließlich über die offenen Modellränder und nicht über eine initiale Sedimentvorbelegung dem Modell verfügbar gemacht werden. Durch Restströmungen, die aus der ästuarinen Zirkulation resultieren, baut sich dann nach einiger Zeit eine Zone erhöhter Schwebstoffkonzentration im Modell auf, die in einem dynamischen Gleichgewicht steht. Die Einstellung der unten genannten Modellparameter, die dies dynamische Gleichgewicht (Bild 1) ermöglichen, wird erleichtert. Die Verwendung eines Randwertmodells begegnet zudem der möglichen Kritik, dass sich die Schwebstoffdynamik in der Trübungszone im Modell nur durch lokale Erosion vom Nutzer vorgegebener Sedimente einstellt, wie es beim erosionslimitierten Ansatz (van Maren et al. 2015) der Fall sein könnte.



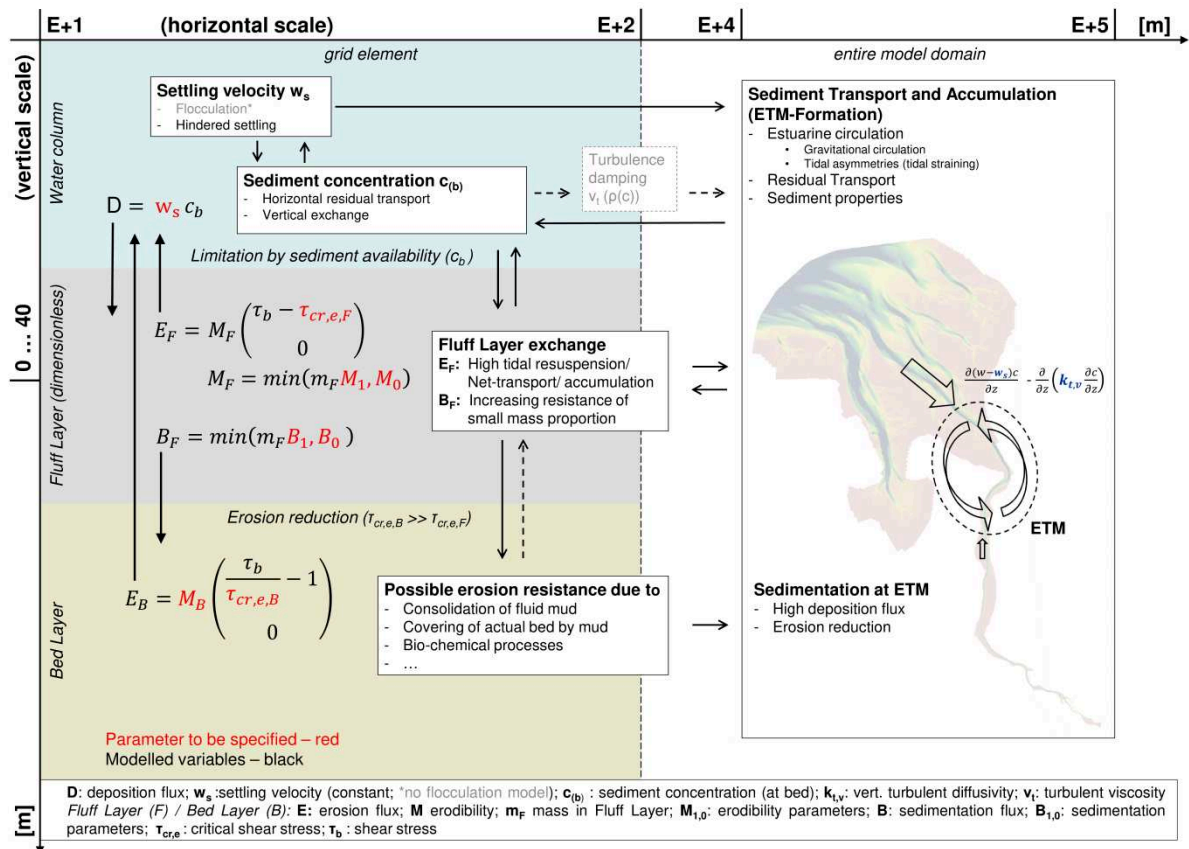


Bild 1 Schematische Beschreibung des Modellkonzeptes mit dem 2-Schichten Modell und der Auswirkungen auf den großräumigen Sedimenttransport (Hesse 2019).

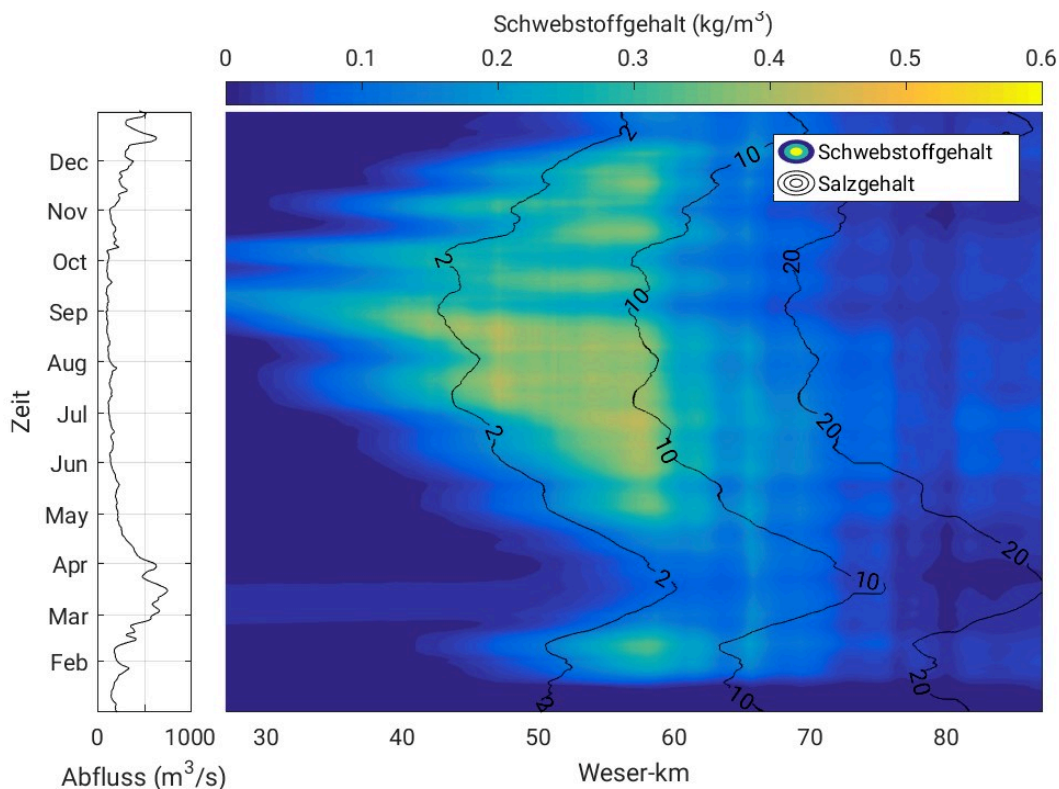
Die weiteren Spezifikationen des Modellaufbaus, der Datengrundlage, und weiteren Modellparametern sind Hesse und Fröhle (2016) zu entnehmen. Entscheidend sind die Einstellung der Sinkgeschwindigkeit sowie der kritischen Bodenschubspannungen für Erosion für die beiden Bodenschichten, sowie Depositions- und Erosionskonstanten.

Eine notwendige Annahme für die gewählte Modelleinstellung ist, dass die im Modell nicht abgebildeten Materialentnahmen durch Unterhaltungsbaggerungen dadurch kompensiert werden, dass der Rückfluss von akkumuliertem Material aus Schicht 2 unterdrückt wird. Hierfür wird die kritische Bodenschubspannung für den Rückfluss von Material aus Schicht 2 auf einen Wert von  $\tau_{cr,e,B} = 6,0 \text{ N/m}^2$  erhöht. Dieser Wert ist um zwei Größenordnungen höher als der für die Erosion aus Schicht 1 angesetzte Wert von  $\tau_{cr,e,F} = 0,01 \text{ N/m}^2$ .

### 2.3 Ergebnisse

Beim verwendeten Ansatz werden die Sedimente nicht durch eine Vorbelegung der Sohle vorgegeben, sondern über die offenen Ränder des Modells eingetragen. In Bild 2 ist der Schwebstoffgehalt über die Zeit und entlang eines Ästuar-Längsschnitts dargestellt. Wie hier ersichtlich wird, bildet sich bereits nach einer kurzen Simulationsdauer eine Trübungszone aus. Diese befindet sich erwartungsgemäß hauptsächlich im Bereich zwischen den 2 psu und 10 psu Isohalinen.

Durch das so durchgeführte Experiment wird demonstriert, dass sich die Trübungszone im Modell unabhängig von einer Vorbelegung der Sohle selbst einrechnet. Nach dem Aufbau der Trübungszone im Modell zeigt sich die natürliche Dynamik der Trübungszone. Dazu gehört die saisonale Variabilität der Trübungszone, die von den Randbedingungen dabei insbesondere vom Oberwasserabfluss abhängt. Während Perioden niedriger Abflüsse wie im Herbst 2009 verschiebt sich die Brackwasserzone stromauf und mit ihr die Trübungszone. Während hoher Abflüsse in den Wintermonaten befindet sich die Brackwasserzone rund 20 km weiter stromab als während niedriger Abflüsse im Sommer. Diesem Verhalten folgt die Trübungszone. Es ist eine zu erwartende Hysterese des Schwebstoffgehaltes zu erkennen, das heißt der Wiederaufbau der Trübungszone nach einem hohen Oberwasserabfluss erfolgt zeitverzögert. Die Lage der Trübungszone ist als nicht nur abhängig vom aktuellen Oberwasserabfluss, sondern wird von den vorhergehenden Oberwasserabflüssen beeinflusst.



*Bild 2* Zeitliche Änderung der Trübungszone als Bereich erhöhter Schwebstoffgehalte im Modell in Abhängigkeit vom Abfluss. Links: Abfluss über die Zeit, Rechts: Schwebstoffgehalt (farbig) und Salzgehalt (Isolinien, schwarz) über Zeit und Weser-km, 7-Tage Mittel (Hesse 2019).

Es wurde eine umfassende Validierung der Modellergebnisse mit Dauermessungen der Wasserstände, des Salzgehaltes und der Trübung vorgenommen. Die Trübung kann nach der in BAW (2018) erläuterten Methodik in Schwebstoffkonzentration umgerechnet werden. Die Validierungsergebnisse sind in Hesse und Fröhle (2016, 2017) dokumentiert. Die RMSE Werte liegen zwischen 6 cm am Pegel am Nordseerand und 44 cm am Pegel nahe des Wehrs in Bremen. Der höchste Fehler im Salzgehalt tritt bei Bremerhaven mit einem RMSE Wert von 2,7 psu auf.

Die Depositionsschwerpunkte in der Fahrrinne im Bereich der Trübungszone werden vom Modell zumindest teilweise richtig wiedergegeben, wie in Bild 3 ersichtlich. Gleichzeitig ist auch in anderen Teilen des Modells Deposition erkennbar. Erosion wird vom Modell nicht abgebildet.

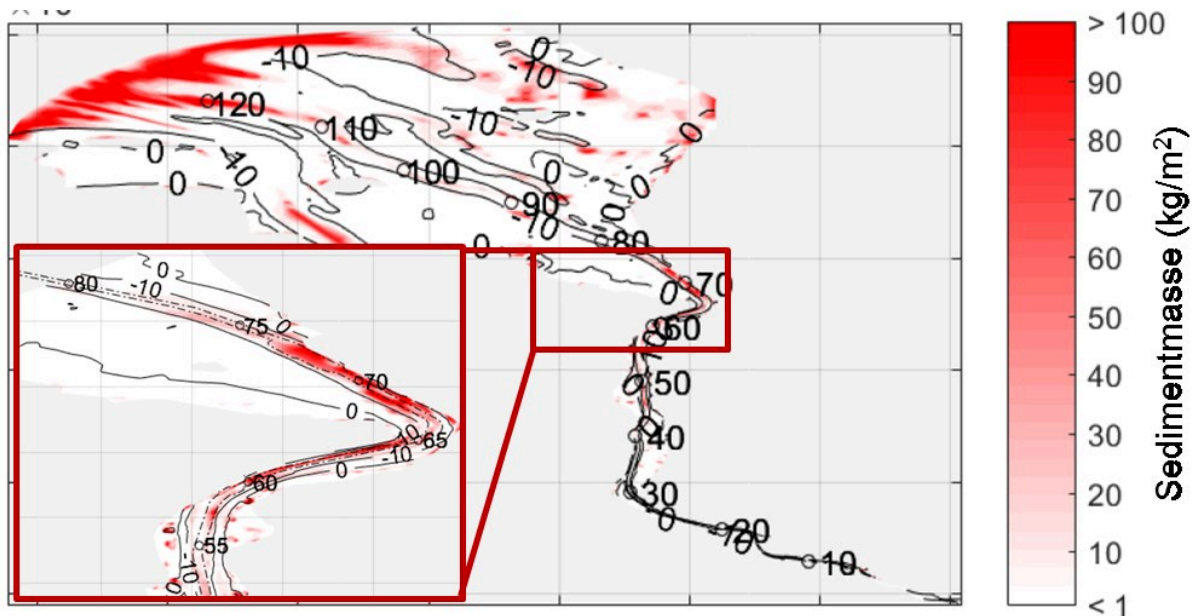


Bild 3 Deponierte Sedimentmasse an der Sohle am Ende des Simulationszeitraums des Jahres 2009 (grau: Tiefenlinien) (verändert nach Hesse und Fröhle 2017).

## 2.4 Diskussion

Mit dem Modellaufbau „Randwertmodell“ ist es möglich, ohne eine Sedimentvorbelegung sehr schnell eine Akkumulation der kohäsiven Sedimente in der Trübungszone zu erreichen. Dies zeigt, dass die ästuarine Zirkulation im Modell zumindest ausreichend für eine Bildung der Trübungszone wiedergegeben wird. Die Validierung des Modells bzgl. Wasserstände und Salzgehalte kann für die untersuchte Anwendung als ausreichend betrachtet werden. Die Position der Brackwasserzone ist leicht nach stromab verschoben, daraus resultiert ein leicht nach stromab verschobenes Schwebstoffmaximum. Dies führt dazu, dass die Depositionsschwerpunkte etwas stromab der in der Unterhaltungspraxis beobachteten Depositionsschwerpunkte liegen.

Ein kritisch zu beurteilender Aspekt ist die Tatsache, dass sich nicht nur in den Unterhaltungsschwerpunkten, sondern an vielen Stellen im Modellgebiet ein Ansteigen der Sedimentmasse am Boden zeigt. Aufgrund der Vereinfachung, dass die nicht berücksichtigten Unterhaltungsbaggerungen durch eine Verhinderung der Resuspension von Material aus der unteren Bodenschicht kompensiert werden, ist eine Abbildung eines für das gesamte Modellgebiet gültigen Bodenaustausches nicht möglich. Bei einer noch längeren Simulation mit dem so eingerechneten Modell erhöhen sich die Schwebstoffkonzentrationen nicht weiter, da diese in einem Gleichgewicht stehen mit dem Import über die Ränder und der Deposition (Hesse und Fröhle 2017). Die Deposition im Modellgebiet steigt jedoch immer weiter an, da eine Erosion aus der unteren Bodenschicht aufgrund der oben genannten vereinfachenden Annahme verhindert wird.

## 2.5 Zusammenfassung und Ausblick

Die ästuarine Zirkulation führt dazu, dass sich kohäsive Sedimente im Bereich der Trübungszone ansammeln (Burchard et al. 2018; Geyer und MacCready 2014). Hier bestimmen dann Erosion, Transportverhalten, Deposition und Konsolidierung das charakteristische Transportverhalten. Die Abbildung dieser Prozesse im numerischen Modell ist auch heute noch eine Herausforderung. Es wurde in dieser Untersuchung ein Delft3D Modell des Jade-Weser Ästuars aufgebaut, welches sich auf die Wiedergabe der Dynamik in der Trübungszone mit den charakteristischen Depositionsschwerpunkten in den Rinnen konzentriert. Die angewendete Kombination aus einem Randwertmodell (van Maren et al. 2015) in Verbindung mit dem Bodenaustauschkonzept von van Kessel et al. (2011) erwies sich als eine gute Herangehensweise, um zum einen Depositionsschwerpunkte in der Trübungszone abzubilden und zum anderen im Modell eine natürliche Trübungszone durch die modellierte ästuarine Zirkulation zu erzeugen. Zur Validierung wurden zwei aufeinanderfolgende Jahresverläufe simuliert und mit Messungen von Dauermessstationen verglichen. Das entwickelte Modell gibt das prinzipielle Systemverhalten gut wieder und ist aus unserer Sicht für die Verwendung für Forschungsfragestellungen geeignet. Es ermöglicht eine einfache und effiziente Untersuchung von verschiedenen hohen Abflussereignissen oder sonstigen Extremereignissen für die Schwebstoffkonzentration in der Wassersäule wie zum Beispiel Stürme mit erhöhtem Seegang. Die detaillierte Untersuchung von Szenarien wurde im Projekt zugunsten einer genaueren Einstellung der Parametrisierung des Ansatzes nicht mehr durchgeführt.

Für eine Anwendung für praktische Fragestellungen des Küsteningenieurwesens ist das Modell mit dem im Projekt erarbeiteten Stand aus unserer Sicht nicht geeignet. Obwohl das generelle Systemverhalten wiedergegeben wird, wird die Lage der Brackwasserzone noch etwas zu weit stromab abgebildet. Weiterhin ist mit der gewählten Parametrisierung des 2-Schichten Modells keine realistische Modellierung von Tiefenänderungsmustern möglich, die auch Resuspendierung von vormals deponiertem Material erfordern würde. Dies wäre jedoch nötig für eine Anwendung des Modells zur Prognose von Unterhaltungsschwerpunkten oder Fragestellungen des Sedimentmanagements.

Es wurde weiterer Forschungsbedarf identifiziert, der insbesondere die Abbildung von Bodenaustauschprozessen betrifft. Das 2-Schichten Modell kann als eine Art erste Vorstufe eines vereinfachten Konsolidierungsmodells betrachtet werden, da es eine Bodenschicht mit einer sehr hohen Erodibilität (die nicht konsolidierte Schicht) beschreibt, die über einer Schicht mit einer deutlichen niedrigeren Erodibilität liegt (die konsolidierte Schicht) und die Bodenaustauschprozesse in diese puffert. Es ist jedoch keine zeitliche Veränderung der Erodibilität wie bei einem Konsolidierungsmodell gegeben. Zur besseren Abbildung der Depositionsschwerpunkte in der Fahrrinne der Trübungszone könnten eine weitergehende Entwicklung dieses Ansatzes oder die Verwendung eines komplexeren Konsolidierungsmodells dienen.

### **3 Untersuchung der Morphodynamik in der Außenweser**

#### **3.1 Grundlagen**

Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt des Projektes ist die Morphodynamik in der Außenweser und der Einfluss von Extremereignissen auf morphologische Änderungen wie die Verlagerung von Prielen. Morphologische Änderungen in der Außenweser entstehen vor allem durch die Transportprozesse sandiger Sedimente. Antriebskräfte hierfür sind die Tidenströmungen, der lokale Seegang und die aus der Nordsee einlaufende Dünung. Als Schwerpunktgebiet wurde der Fedderwarder Priel ausgewählt, da vorherige Systemuntersuchungen und eine gute topographische Datengrundlage vorhanden sind. Letztere wurde auch von Benninghoff und Winter (2018) für eine Untersuchung der dekadischen Morphodynamik des Gebietes verwendet. Es wurde ein Modell des Jade-Weser Ästuars erstellt, welches sich auf den Transport sandiger Sedimente fokussiert.

Die Arbeiten hierfür wurden von der Arbeitsgruppe von Christian Winter am Zentrum für Marine Umweltwissenschaften der Universität Bremen (MARUM) durchgeführt. Der Modellaufbau, die Validierung und kleinere morphodynamische Modellstudien sind in Herrling et al. (2016) und Herrling und Winter (2017a) beschrieben. Der Projektabschlussbericht von Herrling und Winter (2017b) umfasst Ergebnisse zur Differenzierung der Wirkung einzelner hydrodynamischer Antriebskräfte auf die Morphodynamik der Außenweser, sowie des Oberwassers auf der räumlichen Skala des Gesamtästuars. Die Ergebnisse sind teilweise in Herrling et al. (2017) veröffentlicht. Ein Überblick über relevante Literatur zur Modellierung der Morphodynamik sandiger Sedimente wurde von Zorndt und Herrling (2015) und Herrling et al. (2016) zusammengefasst.

#### **3.2 Methodik**

Für die Untersuchung wurde das Modellwerkzeug Delft3D (Lesser et al. 2004) mit zweidimensionaler Strömungsberechnung und gekoppelter Seegangsberechnung mit dem Modell SWAN verwendet. In den hier aufgeführten Ergebnissen wurden die dreidimensionale barokline Strömung und der dreidimensionale advektive Schwebstofftransport nicht berücksichtigt.

Die entscheidenden Schritte in der Bearbeitung waren folgende:

- die Erstellung des Netzes, schwerpunktmäßige Verfeinerung im Fokusgebiet ohne hohen Gesamtverlust an Effizienz
- die Parallelisierung des Modellsystems
- die Erstellung einer initialen Sedimentbelegung und dessen Einrechnung
- der Vergleich mit Messungen aus der Natur

Die detaillierte Vorgehensweise für Modellaufbau und Validierungsergebnisse sind in Herrling et al. (2016) dargestellt.

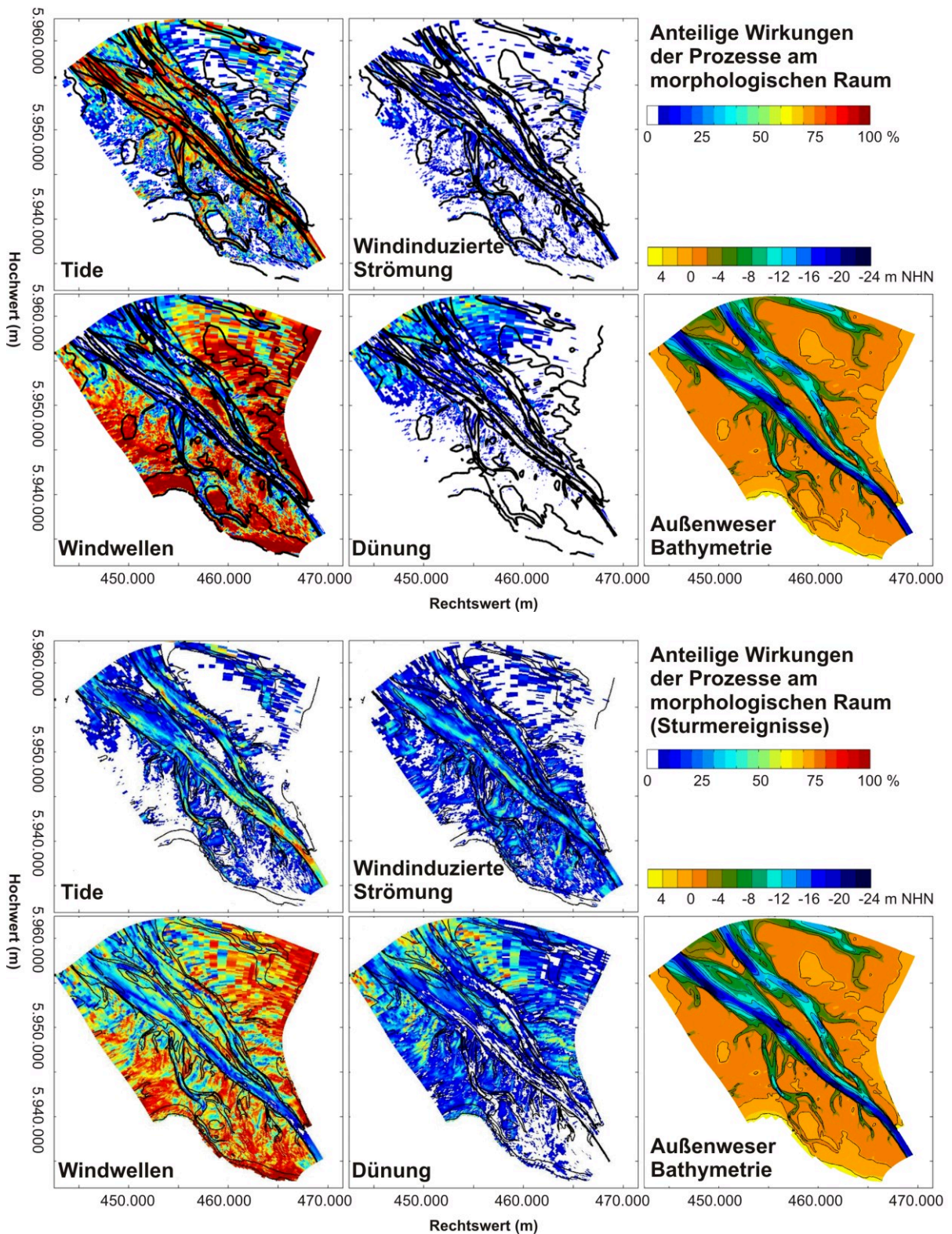
Nach der Modellvalidierung wurden zahlreiche Studien zur Wirkung von Extremereignissen auf die Morphodynamik in der Außenweser durchgeführt. Hierfür wurden unter anderem Experimente mit reduzierten Randbedingungen durchgeführt, um die relevanten Einflussfaktoren

morphologischer Änderungen in verschiedenen Gebieten zu erfassen (Herrling und Winter 2017b, 2017a).

### **3.3 Ergebnisse**

Die Ergebnisse des Teilprojektes sind in den Berichten von Herrling und Winter (2017b) und Herrling und Winter (2017a) sowie Herrling et al. (2017) beschrieben. Ein Beispiel für eine Anwendung auf Forschungsfragestellungen ist die Untersuchung von Herrling et al. (2017), in der der Einfluss unterschiedlicher Prozesse auf die Morphodynamik der Außenweser quantifiziert wurde (siehe Bild 4). Als Maß für morphologische Aktivität wurde der sog. morphologische Raum gewählt (englisch "*bed elevation range (BER)*" nach Winter 2011); die absolute Differenz zwischen der höchsten und niedrigsten Sohllage an einem Punkt über die Zeit. Mit Hilfe von Prozessstudien für einen sechsmonatigen Zeitraum unter gemäßigten hydrodynamischen Bedingungen wurden die anteiligen Wirkungen verschiedener Prozesse auf den morphologischen Raum quantifiziert.

Den Ergebnissen zufolge wirken die Tideströmungen hauptsächlich in den tieferen Rinnen, während die Wirkung von lokal generiertem Seegang (Windwellen) auf den Watten dominiert. Der Einfluss des Seegangs der offenen Nordsee (Dünung) ist während des betrachteten Zeitraums hauptsächlich auf den weit außen gelegenen, flachen Sänden erkennbar. Windinduzierte Strömungen spielen diesen Ergebnissen zufolge eine untergeordnete Rolle. Bei Sturmereignissen zeigt sich ein anderes Bild: Der relative Einfluss der Tide ist deutlich weniger hoch. Der Einfluss der lokal erzeugten Windwellen wirkt aufgrund der höheren Wasserstände weitaus stärker in höher gelegenen Wattbereichen. Der aus der Nordsee einlaufende Seegang zeigt eine deutlichere Wirkung (Herrling und Winter 2017a).



**Bild 4** Einfluss unterschiedlicher Prozesse auf die Morphodynamik der Außenweser. Dargestellt sind die anteiligen Wirkungen am morphologischen Raum (bed elevation range) eines sechsmonatigen Zeitraums unter gemäßigten hydrodynamischen Bedingungen (oben) und während eines extremen Sturmereignisses (unten); modifiziert nach Herrling und Winter (2017a).

### 3.4 Diskussion

Die Vergleiche zwischen gemessenen und simulierten Wasserständen, Strömungen und Seegangparametern zeigen, dass das Modell die Hydrodynamik und den Seegang in der Außenweser gut abbildet. Die visuellen Vergleiche zwischen Depositions- und Erosionsmustern zeigen ein uneinheitliches Bild. In einigen Bereichen wird die Tiefenänderung im Modell sehr ähnlich derer dargestellt, die in der Natur in einer ähnlichen Zeitspanne beobachtet wurde. In anderen Bereichen stimmen die Tiefenänderungen nicht überein. Dies liegt hauptsächlich daran, dass es wenig Bereiche in der Außenweser gibt, in denen die im Modell berechnete morphologische Änderung mit einer ungestörten morphologischen Entwicklung in der Natur verglichen werden kann. Die Hauptrinne der Außenweser ist fixiert durch die Leitdämme, die Rinnenverlagerungen und großräumige morphologische Veränderungen in diesem Bereich verhindern. Weiterhin wird die Fahrrinne auf einer planerischen Solltiefe regelmäßig unterhalten, so dass auch hier ein Vergleich nicht möglich ist. Unbehinderte morphologische Veränderungen lassen sich also nur in Nebensystemen wie dem Fedderwarder Priel beobachten, sowie in der Nebenrinne, der Robinsbalje etc. Es ist jedoch aufgrund der aufwändigen Berechnung nicht möglich, all diese Bereiche ausreichend gut aufzulösen um realistische morphodynamische Änderungen erwarten zu können. Der Bereich des Fedderwarder Priels zeigt jedoch, dass eine ausreichend hohe Auflösung in diesem Fokusgebiet auch zu zumeist realistischen Änderungen führen kann.

Die Zeiträume, die mit dem hier verwendeten Modell simuliert werden können, bewegen sich im Bereich mehrerer Monate. Die Simulation ist aufgrund der Kopplung zwischen Seegang und Strömung und der im Fokusgebiet notwendigen Auflösung sehr aufwändig. Hinsichtlich des Modellaufbaus, d. h. berücksichtigte Prozesse und Auflösung, ist das Modell zeitlich und räumlich auf der sogenannten Mesoskala einzuordnen, die laut Brommer und Bochev-van der Burgh (2009) typisch für Anwendungen im Küsteningenieurwesen ist. Eine Prognose der Langzeit-Morphodynamik auf Zeitskalen von Dekaden ist mit dem Modell nicht möglich, war jedoch auch nicht Ziel des Projektes.

### 3.5 Zusammenfassung und Ausblick

In der Außenweser haben Tideströmungen, lokaler Seegang und Dünung die größten Einflüsse auf die morphologischen Änderungen. Dies wurde mit Hilfe eines Delft3D Modells des Jade-Weser Ästuars untersucht, welches zweidimensionale Strömung und Seegang berücksichtigt. Es konnten neue Erkenntnisse zum relativen Einfluss der oben genannten Randbedingungen auf die morphologischen Änderungen gewonnen werden.

Beim Modellaufbau stellten insbesondere die Einrechnung des Sedimentinventars sowie die langen Simulationsdauern durch die gekoppelte Strömung-Seegang Simulation Herausforderungen dar.

Das entwickelte Modell zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen den entscheidenden Simulations- und Messgrößen. Es ist sowohl für die Anwendung in Forschungsfragestellungen als auch für die Anwendung in praktische Fragestellungen des Küsteningenieurwesens und der wasserbaulichen Systemanalyse geeignet. Für beides wurde es bereits erfolgreich, auch über den Rahmen des hier vorgestellten Forschungsprojektes hinaus, verwendet.



Weiterer Forschungsbedarf besteht aus unserer Sicht hauptsächlich darin, die Modellierung der morphologischen Änderungen auf längere Zeitskalen auszudehnen. Hier gibt es verschiedene Herausforderungen wie die Verfügbarkeit von Anfangs- und Randbedingungen sowie auch die Modelleffizienz. Dies kann aus unserer Sicht nur durch die weitere Reduzierung von berücksichtigten Prozessen (siehe auch Kapitel 4) oder durch performantere Modelle gelingen.

Für die Verbesserung der morphodynamischen Simulationen ist weiterhin eine bessere Abbildung der Rauheit durch Sohlformen (z. B. Unterwasserdünen, Riffel) notwendig. Dies gilt im Besonderen, wenn die morphodynamischen Simulationen auf die Unterweser ausgedehnt werden sollen, in deren Rinne stromauf von Weser-km 54 Sohlformen verschiedener Größen anzufinden sind. Die Sohlformen wirken sich auf die Strömung aus; und die Interaktionen zwischen den Sohlformen und der Schwebstoffdynamik in der Trübungszone ist noch weitgehend unerforscht.

## **4 Untersuchung von Sedimenttransport und Morphodynamik im Jade-Weser Gebiet**

### **4.1 Grundlagen**

In einem an der BAW bearbeiteten Teilprojekt wurden Untersuchungen von Sedimenttransport und Morphodynamik im Jade-Weser Gebiet durchgeführt. Der Untersuchungsschwerpunkt lag auf der Darstellung des aktuellen Zustandes im Jade-Weser Ästuar. Hierbei waren sowohl die Morphodynamik in der Außenweser (siehe auch Kapitel 3) als auch die Schwebstoffdynamik in der Trübungszone (siehe auch Kapitel 2) zu berücksichtigen. Darauf aufbauend erfolgte eine Analyse der Sedimenttransportmechanismen im aktuellen Zustand mit besonderem Fokus auf den Mechanismen für Sedimentation in Unterhaltungsschwerpunkten. Es wurden mögliche Änderungen der Sedimenttransportmechanismen durch eine Anpassung der Fahrrinne der Außen- und Unterweser herausgearbeitet. Die Untersuchung erfolgte mit Hilfe von numerischen Modellierungen und Analyse von Messungen in der Natur.

Grundlagen sind Vorarbeiten der BAW zum Jade-Weser Ästuar (Lange et al. 2008) sowie insbesondere zu Sedimenttransport und Morphodynamik im diesem Gebiet. Zu letzterem Punkt sind neben gutachterlichen Tätigkeiten und Veröffentlichungen die Arbeiten von Kösters et al. zur Dynamik der Trübungszone in der Weser zu nennen (Kösters et al. 2010, 2014), welche auf Analysen von früheren Studien zur Schwebstoffdynamik in der Weser aufbauen (Grabemann und Krause 2001; Grabemann und Krause 1989; Grabemann et al. 1997), sowie gemeinsame Veröffentlichungen von Kösters und Winter (Kösters und Winter 2014) zur Morphodynamik in der Deutschen Bucht. Weitere Grundlagen zu Sedimenttransport und Morphodynamik im Untersuchungsgebiet wurden im Projekt AufMOD erarbeitet und dokumentiert (Heyer und Schrottke 2013).

### **4.2 Methodik**

Zur Untersuchung von Sedimenttransporten und Morphodynamik im Jade-Weser Ästuar wurde ein bestehendes numerisches Modell aktualisiert. Das verwendete Modellwerkzeug ist UnTRIM gekoppelt mit SediMorph und UnK. UnTRIM ist ein semi-implizites Finite-Differenzen- bzw. Finite-Volumen-Verfahren für unstrukturierte orthogonale Gitter zur Simulation stationärer und instationärer Strömungs- und Transportprozesse in Gewässern mit freier Oberfläche (Casulli und Walters 2000; Casulli und Lang 2004). Zusätzlich wird die Advektions-Diffusions-Gleichung (Transportgleichung) für Salz, Temperatur und fraktionierte suspendierte Sedimente gelöst. Das Verfahren SediMorph ist eine Eigenentwicklung der Bundesanstalt für Wasserbau zur Simulation von Sedimenttransport und Morphodynamik und berechnet u. a. den Geschiebetransport sowie die Bodenevolution (Malcherek et al. 2002). Das spektrale Seegangmodell UnK (Schneegemberger et al. 2000) dient zur instationären Berechnung der Entstehung, Ausbreitung und Dissipation von Seegang und basiert auf der Erhaltungsgleichung der Aktionsdichte der Wellen („*wave action density*“). Das verwendete Jade-Weser Modell umfasst das die Jade sowie Außen- und Unterweser vom Weserwehr in Bremen bis in die Deutsche Bucht, sowie die Nebenflüsse Hunte, das Lesum-Wümme System und die Ochtum. Die Datengrundlage wurde an die realisti-

sche Simulation des hydrologischen Jahres 2012 angepasst. Die Modelltopographie sowie die Rand- und Initialwerte wurden so vorgegeben, dass möglichst ein naturähnlicher Hindcast für diesen Zeitraum entsteht. Hierzu gehört beispielsweise die Vorgabe einer detaillierten flächenhaften Sedimentverteilung am Boden, die auf Sedimentdaten des WSA Bremerhaven beruht und entsprechend der Methodik von Milbradt et al. (2015) erstellt wurde. Es wurde ein multifraktioneller Modellansatz mit insgesamt acht Sedimentfraktionen verfolgt, um sowohl die Dynamik der Trübungszone mit ihren feinen suspendierten Sedimenten, als auch die Morphodynamik hauptsächlich sandiger Sedimente in der Außenweser abbilden zu können.

Das Modell wurde aufwändig getestet und Studien zum Einfluss verschiedener Formulierungen und Parameter zur Sedimenttransportberechnung wurden durchgeführt. Es erfolgten eine Kalibrierung und anschließende Validierung. Die Simulationsergebnisse wurden hierzu mit Messungen in der Natur verglichen. Hierzu zählen Pegelmessungen, Dauermessungen von Salzgehalt und Trübung (BAW 2018), ADCP Ganztidenmessungen auf ausgewählten Querschnitten (Grünler und Maushake 2016) sowie Bathymetriedaten (siehe auch Tabelle 1). Die Ergebnisse werden in Validierungsdokumenten beschrieben (BAW 2019a, 2019b).

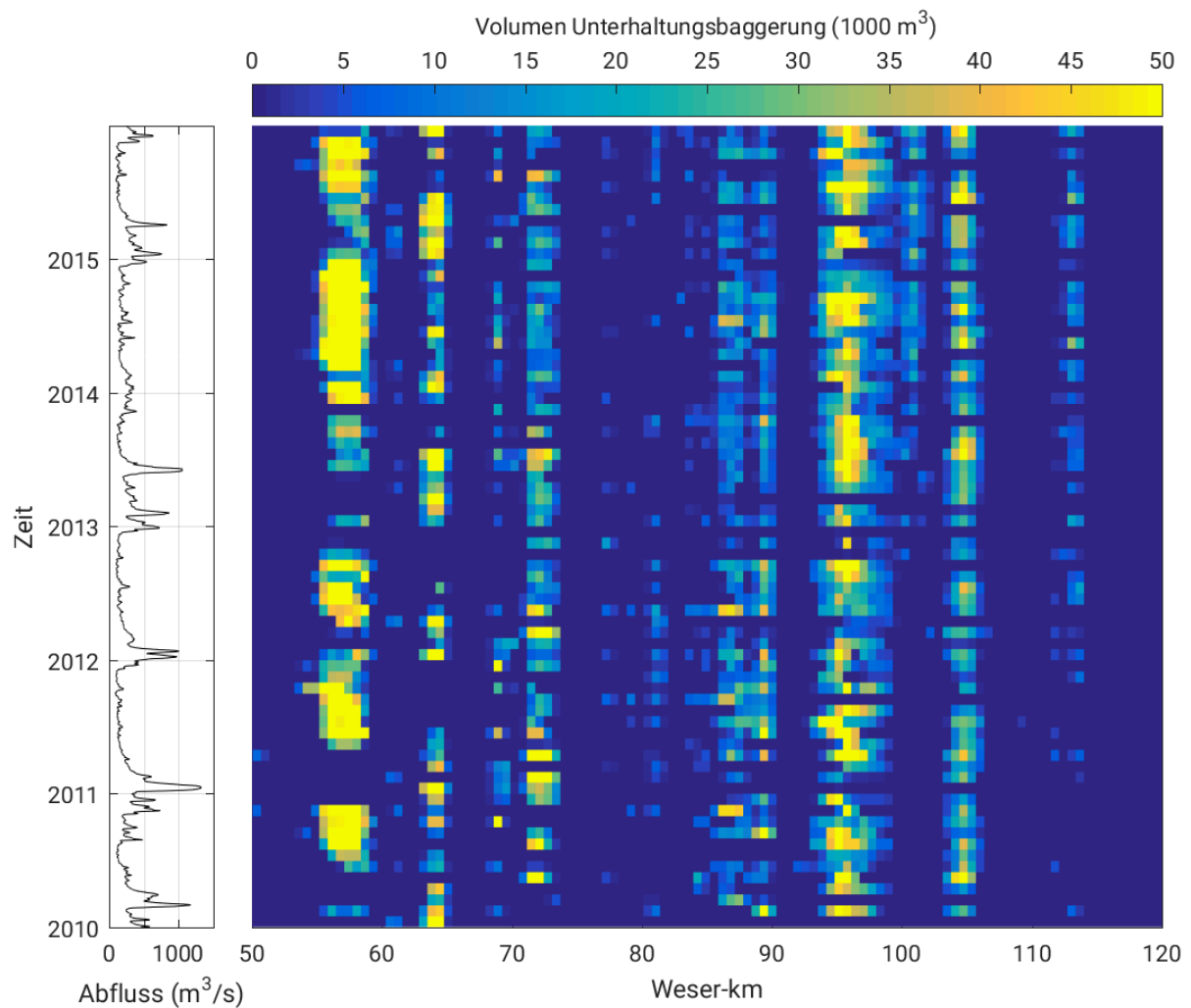
*Tabelle 1: Verwendete Daten.*

<b>Daten</b>	<b>Datenquelle bzw. Urheber</b>
Trübungsmessungen von Dauermessstationen	WSA Bremerhaven, bezogen über das Wasserstraßeninformationssystem (WISKI)
Strömungsgeschwindigkeiten, Sondermesskampagne 2009	WSA Bremerhaven
ADCP Querschnittsmessungen, Sedimentecholotaufnahmen	Grünler und Maushake (2016)
Schwebstoffgehalt, Pegel Intschede	Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)
Flächenhafte Sedimentverteilung am Boden	Sedimentdaten des WSA Bremerhaven und des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH). Zur Erstellung der Verteilung siehe Milbradt et al. (2015).
Bathymetriedaten	Bathymetriedaten als funktionales Bodenmodell, Methodik siehe Milbradt et al. (2015)
Unterhaltungsdaten	Baggerbüro Küste, bezogen über die MoNa (Monitoring Nassbaggerei) Schnittstelle
Wasserstandsmessungen und -kennwerte	WSA Bremerhaven und WSA Bremen, bezogen über WISKI
Oberwasserabfluss am Pegel Intschede	WSA Hann.-Münden, bezogen über WISKI

### 4.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Modellkalibrierung und -Validierung sind ausführlich in BAW (2019a) und BAW (2019b) dargestellt. Die Darstellung des Sedimenttransportes im heutigen Zustand mit Systembeschreibung unter Zuhilfenahme von Messungen in der Natur erfolgt in BAW (2019c).

Ein Beispiel für die Analyse von Naturmessungen ist die räumlich-zeitliche Analyse von Unterhaltungsbaggevolumina zwischen Weser-km 50 und Weser-km 120 von 2010 bis 2015. Hierfür wurden die Unterhaltungsdaten aus der MoNa Datenbasis der Jahre 2010 bis 2015 verwendet (siehe Tabelle 1)<sup>1</sup>. In Bild 5 sind die in 600 m Abschnitten zu Monatssummen zusammengefassten Unterhaltungsvolumina über die Weser-km und über die Zeit, gemeinsam mit dem Oberwasserabfluss, dargestellt.



**Bild 5:** *Entwicklung der Unterhaltungsbaggerungsvolumina im Vergleich zum Abfluss über die Zeit entlang der Weser-km (Quelle: MoNa Datenbasis, örtlich zu 0,6 km Abschnitten und zeitlich zu Monatssummen zusammengefasst).*

Im Bereich des Blexer Bogens und der Schlickstrecke kann eine starke Beeinflussung der Baggerschwerpunkte durch saisonale Schwankungen beobachtet werden. Während hoher Oberwasserabflüsse sinken die Unterhaltungsvolumina im Bereich zwischen Weser-km 54 und Weser-

<sup>1</sup> Diese Daten enthalten Abweichungen gegenüber den höher aggregierten, dafür aber geprüften Angaben in den Jahresberichten des Baggerbüros Küste. Die Daten eignen sich daher nur für qualitative örtlich/zeitliche Analysen der Unterhaltungsschwerpunkte und nicht zur Ableitung genauer Unterhaltungsvolumina.

km 60. Währenddessen steigen die Unterhaltungsvolumina im stromab gelegenen Sedimentations-schwerpunkt um Weser-km 64 tendenziell an. Dies ist dadurch zu begründen, dass bei höheren Abflüssen die Brackwasserzone, der Vermischungsbereich zwischen Salz- und Süßwasser, stromab verschoben wird. Die Position der Brackwasserzone bestimmt in der Weser stark die Ausprägung und Position der Trübungszone (Grabemann und Krause 1989, siehe auch Kapitel 2), in der sich feine Sedimente in der Wassersäule und am Boden akkumulieren. Dies ist durch die ästuarine Zirkulation bedingt (Geyer und MacCready 2014; siehe auch Burchard et al. 2018). In der Außenweser sind derartige saisonale Muster nicht erkennbar. Hier lassen sich in den Jahren 2012 bis 2013 leicht erhöhte Unterhaltungsvolumina in den Bereichen um Weser-km 100 und Weser-km 112 erkennen.

#### **4.4 Diskussion**

Die detaillierten Validierungsergebnisse für Sedimenttransport und Morphodynamik sind in BAW (2019c) dargestellt. Es wird gezeigt, dass sich mit dem gewählten Modellansatz die intra-, subtidale und saisonale Dynamik der Schwebstoffe naturähnlich abbilden lässt. Teilweise ist die Charakteristik im numerischen Modell jedoch weniger stark ausgebildet als in der Natur. Auch die dort aus der Natur bekannten Unterhaltungsschwerpunkte werden vom Modell nur eingeschränkt wiedergegeben. Sie sind in den Modellergebnissen durch eine leichte Deposition bzw. weniger starke Erosion erkennbar. Dies ist durch die sowohl im Modell, als auch in der Natur beobachteten hohen maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in diesem Bereich erklärbar. In der Natur kommt es durch ein komplexes Zusammenspiel von mehreren Prozessen dennoch zu einer verstärkten Deposition. Hierzu gehören die Bildung von Sohlformen und damit verbundene lokale Änderung der Rauheit und Turbulenz, Konsolidierungsprozesse sowie schnelleres Absinken der Schwebstoffe aus der Wassersäule durch Flokkulation. Das Wechselspiel dieser Prozesse wird im Modell nicht im beobachteten Maße abgebildet, so dass hier die Unterhaltungsschwerpunkte in den Modellergebnissen zwar zu erkennen, aber nicht durch eine ähnlich starke Deposition gekennzeichnet sind. Der Vergleich zwischen berechneten und beobachteten Tiefenänderungen in der Außenweser zeigt, dass das Modell in der Lage ist, größere Strukturveränderungen und Unterhaltungsschwerpunkt teilweise qualitativ naturähnlich abzubilden. Kleinere Priele hingegen werden vom numerischen Modell nicht aufgelöst. Änderungen in stark unterhaltenen und befestigten Bereichen wie der Fahrrinne können ebenfalls nicht mit den Modellergebnissen verglichen werden, wie auch bei dem Delft3D Modell der Außenweser der Fall (vgl. auch Kapitel 3.4). Ähnlich wie bei dem Delft3D Modell können auch mit dem hier vorgestellten Modell Zeiträume im Bereich mehrerer Monate bis Jahre simuliert werden, da die Berücksichtigung des multifraktionellen Transportes und des Seegangs zu langen Rechenzeiten führen. Daher ist das Modell zeitlich und räumlich ebenfalls auf der sogenannten Mesoskala (Brommer und Bochev-van der Burgh 2009) einzuordnen.

#### **4.5 Zusammenfassung und Ausblick**

In dem an der BAW bearbeiteten Teilprojekt wurden Sedimenttransport und Morphodynamik im Jade-Weser Gebiet in einem integrierten Ansatz untersucht. Die Dynamik des heutigen Zustandes wurde beschrieben und insbesondere im Hinblick auf Sedimenttransportmechanismen und Mechanismen für Sedimentation in Unterhaltungsschwerpunkten sowie im Hinblick auf

mögliche Änderungen durch eine Fahrrinnenanpassung untersucht. Dies erfolgte auf Basis von Messungen in der Natur und Studien mit einem numerischen Modell. Das verwendete Modell des Jade-Weser Ästuars zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen den entscheidenden Simulations- und Messgrößen und ist in der Lage, die Schwebstoffdynamik sowie grundlegende Tiefenänderungsmuster des heutigen Zustandes naturähnlich zu beschreiben. Es ist sowohl für die Anwendung in Forschungsfragestellungen als auch für die Anwendung in praktische Fragestellungen des Küsteningenieurwesens und der wasserbaulichen Systemanalyse geeignet. Für beides wurde es bereits erfolgreich, auch über den Rahmen des hier vorgestellten Forschungsprojektes hinaus, verwendet.

Weiterentwicklungsbedarf des Modells wurde identifiziert, wie beispielsweise die bessere Prognose von Sohlformen und der assoziierten Modellrauheit sowie eine verbesserte Beschreibung des Erosionsverhaltens kohäsiver Sedimente. Diese Aspekte werden in zukünftigen Forschungsprojekten weiter untersucht.

## 5 Untersuchung der Morphodynamik der Außenweser auf Zeitskalen von Dekaden

### 5.1 Grundlagen

Die Morphologie der Außenweser ist geprägt von den Leitdämmen, welche zu Beginn des 20. Jahrhunderts zur Stabilisierung der Haupttrinne für die Schifffahrt errichtet wurden. Das auch jetzt noch vorhandene Zweirinnensystem war vorher von einer Alternierung der Haupttrinne zwischen den beiden Rinnen geprägt (siehe Bild 6). Der Verlauf der Schifffahrtsstraße wurde dieser fortlaufend angepasst.

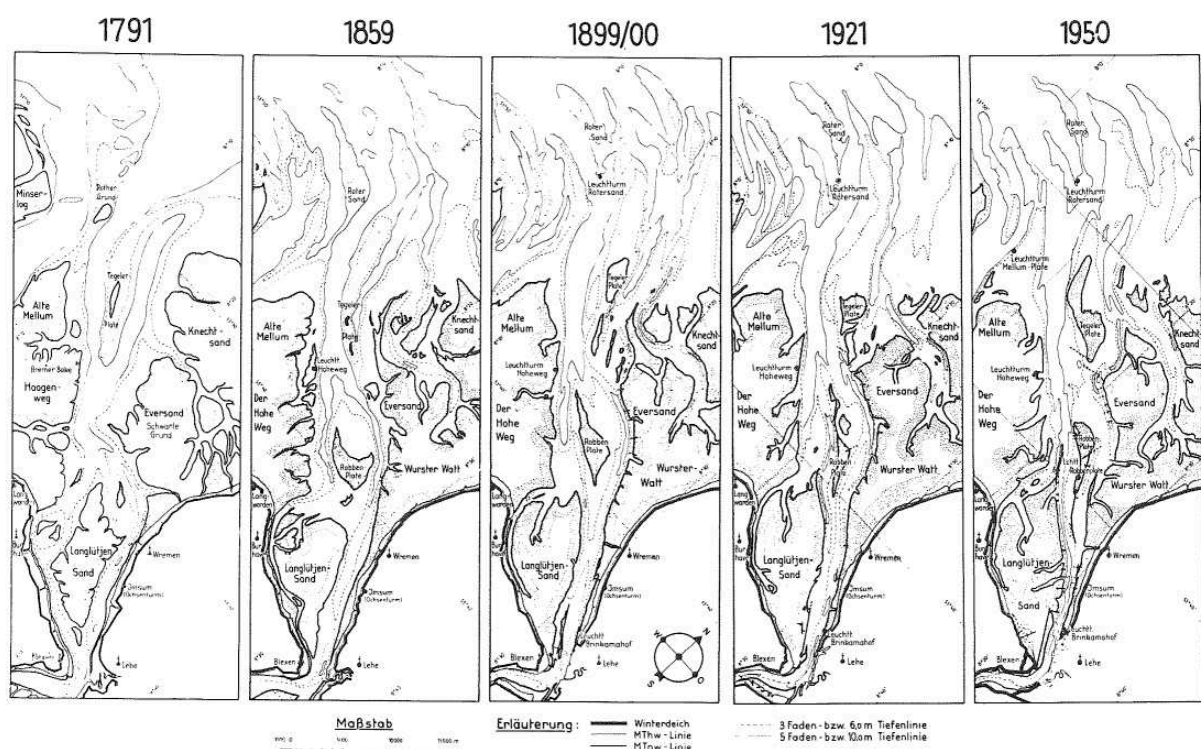


Bild 6 Morphologische Entwicklung der Außenweser von 1791 bis 1950 (Ramacher 1974)

Dieses Systemverhalten sowie die Gründe hierfür sind bislang nicht untersucht. Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Systemstudie zur Untersuchung der Morphodynamik der Außenweser auf Zeitskalen von Dekaden durchgeführt. Hierfür wurde nach dem Beispiel von van der Wegen und Roelvink (2012) ein stark vereinfachtes Modell aufgesetzt, welches durch die Einrechnung der Morphodynamik aus einer initial flachen Sohle eine freie morphologische Entwicklung ermöglicht. Diese Arbeiten wurde im Rahmen einer Masterarbeit durchgeführt (Gundlach 2018).

### 5.2 Methodik

Als Modellwerkzeug wurde Delft3D gewählt. Die Simulationen wurden zweidimensional mit einer initial flachen Sohle und nur einer Sedimentfraktion mit der Korngröße 200 µm durchge-

führt. Als Randbedingungen der Hydrodynamik dienten astronomische Konstanten und ein mittlerer Abfluss. Es wurde die Transportformel nach Engelund und Hansen mit einer Korrektur für gravitationellen Transport in Richtung des Sohlgradienten verwendet. Mit einem morphologischen Beschleunigungsfaktor von 400 wurden 10 Jahre Hydrodynamik berechnet, welche einer Simulation von 4000 Jahren Morphodynamik entsprechen sollen. Eine ausführlichere Darstellung ist in Gundlach (2018) gegeben.

Die sich hieraus ergebenden Rinnen wurden mit dem qualitativen Verlauf der Rinnen des 19. Jahrhunderts verglichen. Danach wurde eine Reihe Systemstudien durchgeführt, in denen Modellprozesse und Randbedingungen variiert wurden um deren Einfluss auf die Tiefenmuster zu untersuchen.

### 5.3 Ergebnisse

Der Vergleich der entstehenden Rinnensysteme mit denen des 19. Jahrhunderts in Bild 7 zeigt, dass es möglich ist, in den Simulationen ein Zweirinnensystem zu erzeugen. In der inneren Außenweser entstehen eine westliche und eine östliche Hauptrinne, welche über den Verlauf der Zeit unterschiedlich stark sind.

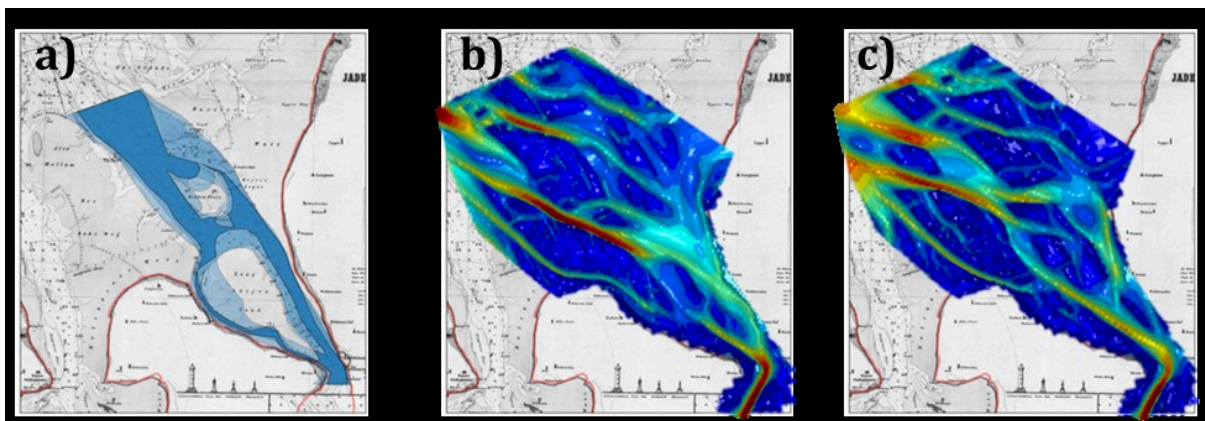
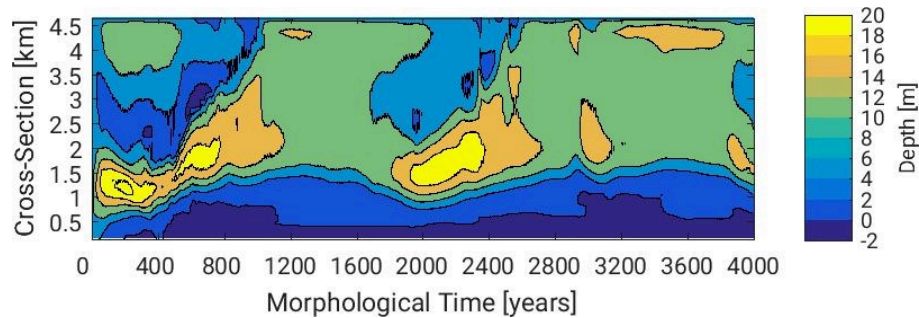


Bild 7 Vergleich der Lage der Rinnen. a) Schematische Überlagerung der Rinnen mehrerer historischer Topographien, b) Simulation nach 365 morphologischen Jahren, c) Simulation nach 650 morphologischen Jahren (verändert nach Gundlach 2018)

In Bild 8 ist das Alternieren des Rinnensystems über die Zeit dargestellt, in dem die Tiefe eines Querschnittes durch die Ästuararmündung über die morphologischen Jahre gezeigt wird. Die Periode des Alternierens kann aufgrund der starken Wirkung des morphologischen Faktors nicht weiter ausgewertet werden.





*Bild 8 Alternieren der Rinnen über einen Querschnitt in der inneren Außenweser dargestellt als Tiefenverteilung entlang eines beispielhaften Querschnitts in der Außenweser bei Weser-km 75 (Gundlach 2018).*

In einer Reihe Systemstudien wurde dann der Einfluss verschiedener Randbedingungen und Prozesse auf die Tiefenänderungsmuster in der Außenweser untersucht. Hier können zwei Arten von Szenarien unterschieden werden: Solche, die zu grundsätzlich anderen Tiefenänderungsmustern, also zu einem anderen Systemverhalten, führen und solche, die zu qualitativ ähnlich ausgeprägten Tiefenänderungsmustern führen.

Zur ersten Gruppen gehört die Corioliskraft, die in zwei Experimenten untersucht wurde. Durch die Wirkung der Corioliskraft auf die Wasserbewegungen im Tidebecken der Nordsee kommt es zu einer Verformung der Tidewelle beim Propagieren gegen den Uhrzeigersinn durch die Deutsche Bucht. Dies zeigt sich in der nördlichen Außenweser in einem Phasenunterschied in den Partialtiden von West nach Ost. Wird der Phasenunterschied in der Modellsteuerung am offenen Nordseerand berücksichtigt, stützt dies die Entstehung der westlichen Rinne. Weiterhin wirkt die Corioliskraft auch auf die Wasserbewegungen im Weserästuar selbst. Im verwendeten numerischen Modell kann diese Wirkung der Corioliskraft in der Impulsgleichung berücksichtigt werden. Dies führt zu einer größeren Tiefe der westlichen Rinne. Die Corioliskraft spielt demnach sowohl über ihre Wirkung auf die Randsteuerung des Weserästuars als auch über ihre Wirkung in der Außenweser selbst eine wichtige Rolle für die Ausprägung der Rinnen. An den grundsätzlichen Mustern ändert sich jedoch nichts (Gundlach 2018).

Zu grundsätzlich anderen Tiefenmustern führt die Berücksichtigung von Seegang im Modell. Dies wurde in einem weiteren Experiment untersucht, in dem ein Seegang aus Nordwestlicher Richtung berücksichtigt wurde. Insgesamt gehen die supra- und intertidalen Bereiche in der Fläche zurück zugunsten mehr tiefer Bereiche. Weiterhin wird das Rinnensystem insgesamt nach Osten verschoben. In einem weiteren Szenario wurde die Wirkung eines sehr hohen Abflusses untersucht. In diesem Experiment änderten sich das Systemverhalten und die Tiefenänderungsmuster ebenfalls grundsätzlich. Die Alternierung der Hauptrinne im Bereich der inneren Außenweser wird komplett unterbunden, vermutlich weil die Ebbrinne durch den hohen Abfluss nach Osten gezwängt wird, während sich die Flutrinne nach Westen ausprägt (Gundlach 2018).

Die Ergebnisse der hydrodynamischen Validierung des Modells sind noch verbesserungswürdig. Vergleiche der simulierten Wasserstände zeigen einen kontinuierlichen Anstieg des Tidehubs von etwa 3 m bis zu über 4 m von der offenen Grenze durch das Ästuar bis hin zur südlichen Modellgrenze, welche etwa bei Vegesack liegt (Gundlach 2018). Laut Lange et al. (2008) betrug der Tidehub bei Vegesack nahe Vegesack im 19. Jahrhundert jedoch nur ca. 75 cm. Die Dissipati-

on der Tidewelle in der Außenweser und der nördlichen Unterweser wird im Modell demnach stark unterschätzt.

## **5.4 Diskussion**

Es hängt von der Geometrie des Untersuchungsgebietes ab, ob mit dem verwendeten Ansatz ein grundsätzlich ähnliches Muster von Tiefenänderungen erreicht werden kann wie in der Natur. Grund für die guten Ergebnisse in der Westerschelde von van der Wegen und Roelvink (2012) ist die starke Restriktion durch die Modellränder, die kaum alternative Rinnenverläufe zulassen. Dies ist in einem offenen System wie der Außenweser nicht gegeben. Somit entspricht es der Erwartung, dass die entstehenden Tiefenänderungsmuster denen in der Natur weniger stark ähneln als bei van der Wegen und Roelvink (2012). Weitere Abweichungen zur Tiefenentwicklung in der Natur entstehen durch die im Modell räumlich konstant vorgegebene, nicht erodierbare Schicht. In der Natur ist die Tiefenentwicklung in der Außenweser durch die Holozänbasis vermutlich weitaus stärker eingeschränkt, als dies bislang im Modell abgebildet wurde.

Eine weitere Einschränkung der Aussagekraft der Ergebnisse entsteht bislang durch die starke Unterschätzung der Dissipation der Tideenergie im Modellsystem. Hier bedarf es zum Beispiel einer besseren Einstellung der Modellrauheit. Limitierend ist der sehr hoch gewählte morphologische Beschleunigungsfaktor. Weitere Systemstudien sollten auch der Wahl der Sedimentfraktion dienen. Hohen Einfluss hat die Wahl des Korrekturfaktors für den gravitationellen Transport. Daraus entsteht eine gewisse Abhängigkeit von dem gewählten Parameter.

## **5.5 Zusammenfassung**

Für die Außenweser wurden Experimente mit einem numerischen Modell mit initial flacher Sohle nach dem Beispiel von van der Wegen und Roelvink (2012) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass einige grundlegende morphologische Eigenschaften des Weserästuars aus einer anfangs idealisierten Topographie entstehen, also als systemspezifische Charakteristika gesehen werden können, die aus Form und Lage des Ästuars entstehen.

Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass der verwendete Modellansatz hohe Unsicherheiten aufweist. Einige Parameter des Modells, wie beispielsweise der Korrekturfaktor für gravitationellen Transport und der morphologische Faktor, führen zu stark abweichenden Ergebnissen. Diese Methode ist daher ausschließlich für die Durchführung von Systemstudien zur Verbesserung des grundsätzlichen Systemverständnisses, d. h. für Forschungsfragestellungen anzuwenden, und nicht geeignet für die praktischen Fragestellungen des Küsteningenieurwesens.

## 6 Messungen in der Natur

### 6.1 Handmessungen von Prielkanten in der Außenweser

Um Migrationsraten von Prielen näher zu untersuchen, können Jahrestopographien der Außenweser verwendet werden. Um den Einfluss einzelner Ereignisse auf diese morphologischen Tendenzen untersuchen zu können, ist jedoch eine zeitlich höher aufgelöste Datenbasis erforderlich. Daher wurden durch das WSA Bremerhaven Sondermessungen an den Prielkanten des Suezpriels durchgeführt. Weiterhin fand am 20.08.2015 eine Begehung durch das WSA Bremerhaven, die BAW und das MARUM statt.

Es wurden von Juni 2014 bis Juni 2015 insgesamt neun Sondermessungen durchgeführt. Auf der Westseite des Priels wurden hierfür zwei Schraubpfähle eingebaut, die als feste Bezugspunkte eingemessen wurden. Prielparallel wurde auf jedem Ufer jeweils eine 60 m lange Standlinie festgelegt. Hiervon ausgehend wurden auf dem westlichen Ufer 13 und auf dem östlichen 10 Profillinien festgelegt, die senkrecht zum Priel verlaufen und ca. den Bereich der Prielkante zwischen -2 m NHN und 0 m NHN erfassen (siehe Bild 9). Die Messungen erfolgten durch Ablufen der Profile von der Standlinie aus mit einem GPS Handmessgerät.

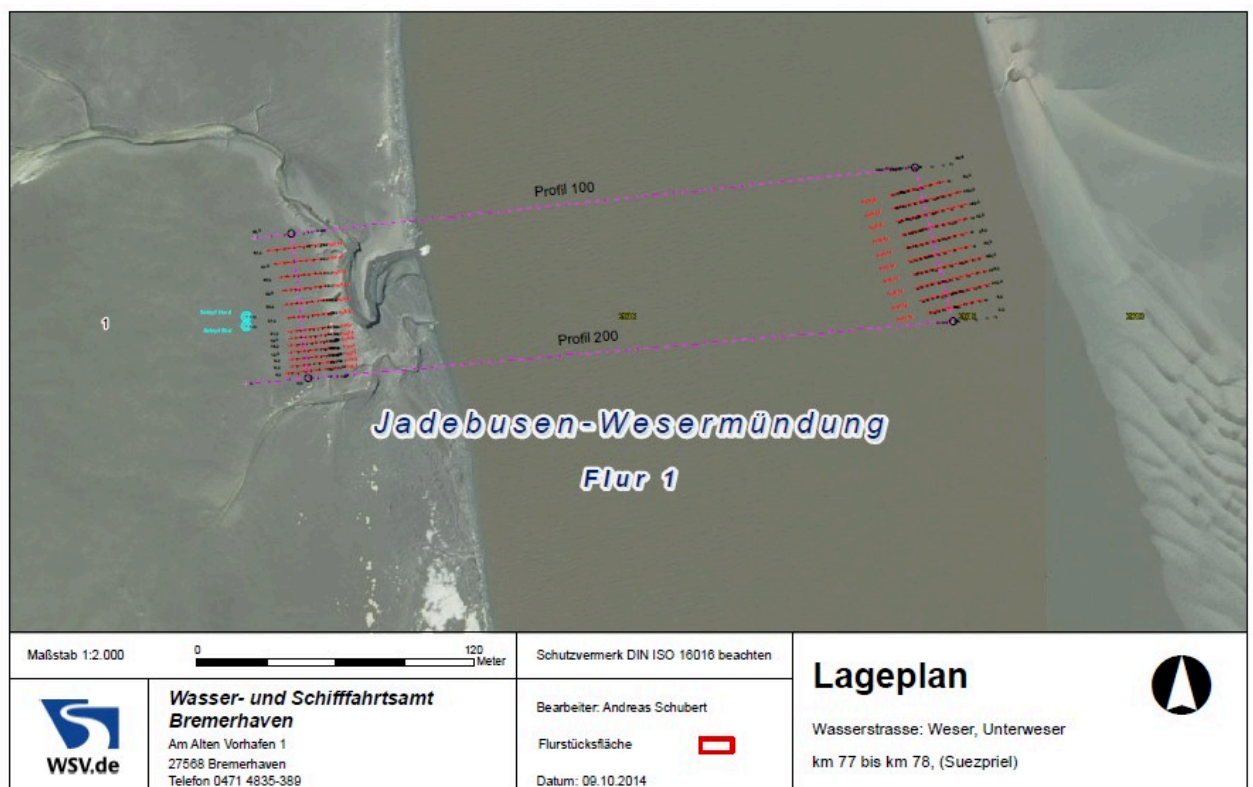


Bild 9 Lageplan des Suezpriels mit Messprofilen (rot) und Schraubpfählen (cyan) (WSA Bremerhaven, persönliche Kommunikation).

Zur Quantifizierung der morphologischen Tendenzen wurde die Wandergeschwindigkeit der Höhenlinie von -1,75 m zwischen zwei zeitlich aufeinander folgenden Profilen verwendet. Diese Höhenlinie ist in den meisten Profilen enthalten und weist eine relativ hohe Robustheit gegen-

über kleinräumigeren morphologischen Veränderungen im Intertidalbereich auf, wie beispielsweise die Nebenrielbildung am Westufer. In Bild 10 sind die für das westliche Ufer ermittelten Wandergeschwindigkeiten aller Profile über die Zeit dargestellt.

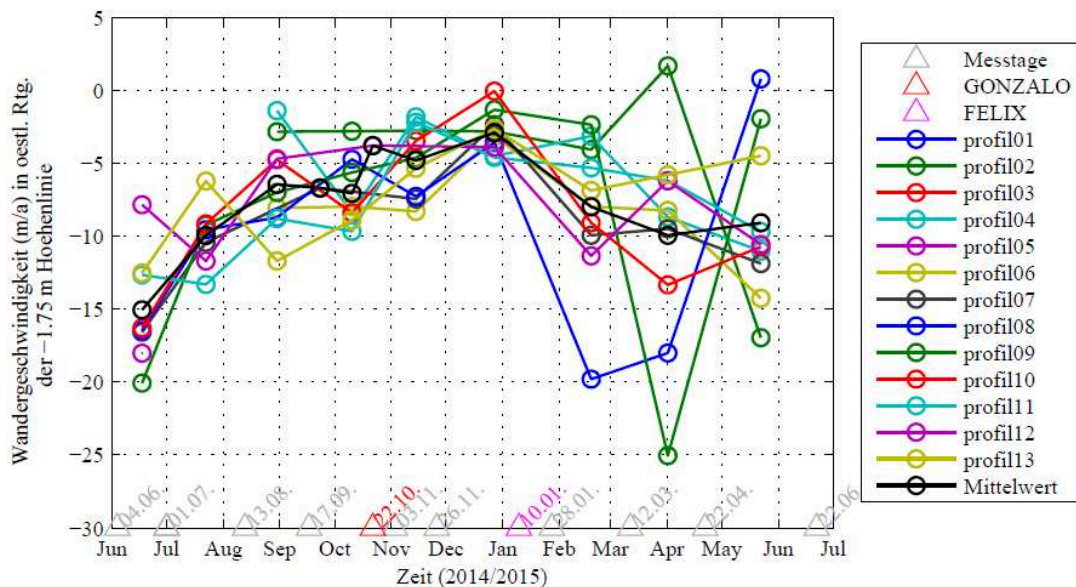


Bild 10 Wandergeschwindigkeit der -1,75 m Höhenlinie des westlichen Prielufers in östliche Richtung für alle Messprofile (eigene Berechnung).

Gemittelt über alle Profile und alle Messpaare ergibt sich eine mittlere Migrationsgeschwindigkeit der -1,75 m Höhenlinie am Westufer von -8 m/a, sowie eine mittlere Migrationsgeschwindigkeit der -1,75 m Höhenlinie am Ostufer von -17 m/a. Insgesamt ist die absolute mittlere Wandergeschwindigkeit der Ostseite höher als auf der Westseite. Dies passt zu dem beobachteten beschriebenen Trend der Verschmälerung und Vertiefung des Priels. Es ergibt sich eine jahreszeitliche Variation, die auf eine Verringerung der Migration im Winter und eine Verstärkung der Migration im Sommer hinweist. Dies kann durch den in den Sommermonaten im Vergleich zum Jahresdurchschnitt leicht erhöhten Tidehub bedingt sein (siehe auch Müller et al. 2014). Es ist in den vorhandenen Daten kein Einfluss der zwei durch die Messung abgedeckten Sturmereignisse zu erkennen.

## 6.2 Pilotmessungen mit stationärem Kamerasystem in der Außenweser

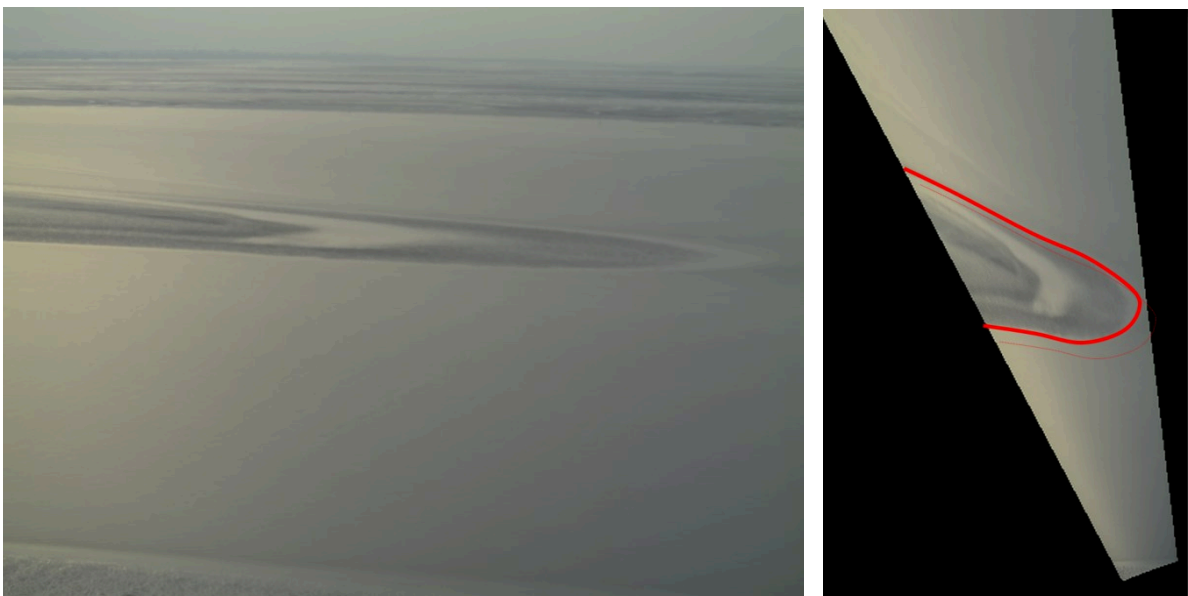
Ein weiteres Ziel des Forschungsprojektes war der Test von neuartigen Messsystemen zur Detektierung von morphodynamischen Änderungen. Die Arbeiten hierfür wurden von der Arbeitsgruppe von Christian Winter am Zentrum für Marine Umweltwissenschaften der Universität Bremen durchgeführt und im Bericht von Herrling und Winter (2017a) dokumentiert. In Zusammenarbeit mit dem WSA Bremerhaven wurde pilotartig ein stationäres Kamerasystem nach dem Beispiel von Blossier et al. (2017) in der Nähe morphologisch aktiver Bereiche der Außenweser eingesetzt.

Als Beobachtungsstelle wurde das Wremer Loch ausgewählt. Auf dem Wremerloch Oberfeuer wurde am 14.9.2016 das Kamerasystem installiert (Bild 11). Dies wurde nach einer Aufbau- und

Erprobungsphase über eine Zeitspanne von vier Monaten betrieben. Die Auswertung der Bilder (Bild 12) erfolgte nach der in Blossier et al. (2017) erläuterten Methode.



*Bild 11 Aufbau des Kamerasystems am Unterfeuer Wremerloch (Herrling und Winter 2017a).*



*Bild 12 Direktaufnahme und Ausschnitt des transformierten Ausschnitts des Untersuchungsgebietes mit Kennzeichnung der Prielkanten (rot) (verändert nach Herrling und Winter 2017a).*

Insgesamt wurde durch den Pilotversuch demonstriert, dass stationäre Kamerasysteme eine kostengünstige Möglichkeit bieten, über längere Zeiträume quasi-kontinuierliche geomorphologische Daten bereitzustellen. Das Untersuchungsgebiet ist hierbei auf trocken fallende Bereiche und den Sichtbereich der Kamera beschränkt.

Die Erfahrungen mit der Technik zeigen noch technische Herausforderungen. Selbst hochwertige Router und Modems sind unter den Umgebungsbedingungen der Außenweser teils nicht zuverlässig. Vor einem möglichen operationellen Betrieb sind weitere Tests und Optimierung der Messeinrichtungen nötig.

## 7 Zusammenfassung

**Projektziel** Das Forschungsprojekt MorphoWeser beschäftigte sich mit Einflussfaktoren morphologischer Änderungen in der Außen- und Unterweser und verfolgt das Ziel, hydrologische und meteorologische Effekte im Hinblick auf ihre Wirkung auf Sedimenttransport und Morphodynamik zu quantifizieren. Hierfür wurden Messungen in der Natur durchgeführt und analysiert und Modellsimulationen vorgenommen.

**Methoden** Die Untersuchungen erfolgten mit Hilfe von Analysen von Messungen in der Natur und Prozessstudien mit numerischen Modellen. Ein Schwerpunkt des Projektes war daher der Aufbau von Modellsystemen, die in der Lage sind, die natürlichen Transportprozesse in Außen- und Unterweser zu beschreiben, sowie deren Validierung. Hierfür erfolgte eine Anpassung und Aktualisierung des bisherigen Sedimenttransport- und Morphodynamikmodells des Jade-Weser Ästuars, welches auf dem Modellverfahren UnTRIM SediMorph beruht. Weiterhin wurden in Zusammenarbeit mit zwei universitären Partnern zwei Modelle mit dem Modellverfahren Delft3D aufgebaut.

Um weitere Erkenntnisse zum Einfluss von Sturmfluten in der Außenweser zu erhalten, erfolgte neben der Aufbereitung und Analyse vorhandener Daten eine Profilmesskampagne an Prielkannten des Suezpriel in Zusammenarbeit mit dem Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Bremerhaven. Zuletzt wurden weiterhin Anforderungen an zukünftige Messprogramme formuliert und ein pilotartiger Test eines Kamerasystems am Wremer Loch zum Monitoring von Prielbewegungen durchgeführt.

**Produkte für die BAW** Der Modellaufbau der insgesamt drei numerischen Modelle und deren Validierung mit Hilfe von Naturmessungen waren erfolgreich. Eins der Modelle (Herrling et al., 2017) ist als 2D-Modell durch eine Kopplung von Delft3D und dem Seegansmodell SWAN insbesondere für die Abbildung der Morphodynamik in der Außenweser optimiert. Das zweite Modell (Hesse und Fröhle, 2016) zielt auf die Abbildung der Dynamik der Trübungszone mit Hilfe von neuartigen Modellkonzepten u. a. für den Bodenaustausch. Das dritte Modell (BAW 2019b) bildet sowohl die Morphodynamik sandiger Sedimente in der Außenweser, als auch die Schwebstoffdynamik in der Trübungszone ab. Alle Modelle entsprechen dem Stand der Wissenschaft, sind somit wertvolle Werkzeuge für die Untersuchung von Forschungsfragestellungen und konnten teilweise bereits für Fragestellungen aus dem Bereich der wasserbaulichen Systemanalyse unterstützend eingesetzt werden.

**Wissenschaftliche Ergebnisse und Vernetzung** Es wurde insgesamt 35 Vorträge, Konferenzbeiträge und Fachartikel zum Projekt verfasst, die in Anlage 1 aufgeführt sind. Besonders hervorzuheben ist, dass aus den Arbeiten für das von Hesse und Fröhle (2017) bearbeitete Teilprojekt eine Dissertation zur Erlangung des Doktors der Ingenieurwissenschaften eingereicht wurde.

Weiterhin wurde ein Delft3D Nutzer Workshop initiiert um den Wissensaustausch unter Nutzern der Software Delft3D zu intensivieren. Dieser fand im Jahr 2015 erstmalig an der Bundesanstalt für Wasserbau am Standort Hamburg statt und wurde in den Folgejahren bei jeweils unterschiedlichen Instituten veranstaltet. Auf den zweitägigen Workshops kamen jeweils zwi-

schen 15 und 20 Wissenschaftler von Behörden, Forschungsinstituten und Universitäten zu Vorträgen und Diskussionen zusammen. Unterstützt wurden die Workshops durch Keynote Speaker von Deltares wie Bas van Maren (2015, veranstaltet bei der BAW), Mick van der Wegen (2016, veranstaltet beim Ludwig-Franzius-Institut, Hannover) und Jebbe van der Werf (2017, veranstaltet beim Institut für Wasserbau, Technische Universität Hamburg).

Bundesanstalt für Wasserbau  
Hamburg, Dezember 2018



## 8 Literaturverzeichnis

BAW (2018): Kalibrierung von Trübungsmessungen für Aussagen zur Schwebstoffkonzentration in den Ästuaren Weser und Elbe (B3955.02.04.70227-1, unveröffentlicht).

BAW (2019a): Validierung des Jade-Weser-Basismodells 2012 für das Verfahren UnTRIM2007-SediMorph. Teilbericht 1: Hydrodynamik und Salztransport (BAW-Bericht B3955.02.10.10048.1-7).

BAW (2019b): Validierung des Jade-Weser-Basismodells 2012 für das Verfahren UnTRIM2007-SediMorph. Teilbericht 2: Sedimenttransport und Morphodynamik (BAW-Bericht B3955.02.10.10048.4-7).

BAW (2019c): Validierung des Jade-Weser-Basismodells 2012 für das Verfahren UnTRIM2007-SediMorph. Teilbericht 3: Systembeschreibung (B3955.02.10.10048.1-8).

Benninghoff, Markus; Winter, Christian (2018): Decadal evolution of tidal flats and channels in the Outer Weser estuary, Germany. In: *Ocean Dynamics* 68 (9), S. 1181–1190. DOI: 10.1007/s10236-018-1184-2.

Blossier, Brice; Bryan, Karin R.; Daly, Christopher J.; Winter, Christian (2017): Spatial and temporal scales of shoreline morphodynamics derived from video camera observations for the island of Sylt, German Wadden Sea. In: *Geo-Mar Lett* 37 (2), S. 111–123. DOI: 10.1007/s00367-016-0461-7.

Brommer, Marit B.; Bochev-van der Burgh, Lisette M. (2009): Sustainable Coastal Zone Management: A Concept for Forecasting Long-Term and Large-Scale Coastal Evolution. In: *Journal of Coastal Research* 251, S. 181–188. DOI: 10.2112/07-0909.1.

Burchard, H.; Schuttelaars, H. M.; Ralston, D. K. (2018): Sediment Trapping in Estuaries. In: *Annual review of marine science* 10, S. 371–395. DOI: 10.1146/annurev-marine-010816-060535.

Casulli, Vincenzo; Lang, Günther (2004): Mathematical Model UnTRIM. Validation Document Version June 2004 (1.0). Bundesanstalt für Wasserbau.

Casulli, Vincenzo; Walters, Roy A. (2000): An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations. In: *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 32, S. 331–348.

Dam, Gerard; Blick, A. J.; Labeur, R. J.; Ides, S. J.; Plancke, Y. M. G. (2008): Long term process-based morphological model of the Western Scheldt Estuary. In: C. Marjolein Dohmen-Janssen und Suzanne Jacqueline Marie Hélène Hulscher (Hg.): River, coastal, and estuarine morphodynamics. RCEM 2007 : proceedings of the 5th IAHR Symposium on River, Coastal, and Estuarine Morphodynamics, Enschede, the Netherlands, 17-21 September 2007. London, New York: Taylor & Francis (Balkema-proceedings and monographs in engineering, water and earth sciences), S. 1077–1084.

Geyer, W. Rockwell; MacCready, Parker (2014): The Estuarine Circulation. In: *Annu. Rev. Fluid Mech.* 46 (1), S. 175–197.

Grabemann, I.; Krause, G. (2001): On Different Time Scales of Suspended Matter Dynamics in the Weser Estuary. In: *Estuaries* 24, S. 688–698.

Grabemann, Iris; Kappenberg, Jens; Krause, Gunther (1995): Aperiodic variations of the turbidity maxima of two German coastal plain estuaries. In: *Netherlands Journal of Aquatic Ecology* 29 (3-4), S. 217–227.

Grabemann, Iris; Krause, Gunther (1989): Transport Processes of Suspended Matter Derived From Time Series in a Tidal Estuary. In: *Journal of Geophysical Research* 94, S. 14373–14379.

Grabemann, Iris; Kühle, H.; Kunze, B.; Müller, A. (1996): Studies on the Transport Times and Water Quality in the Weser Estuary (Germany). In: *Coastal and Estuarine Studies* 50, S. 291–301.

Grabemann, Iris; Uncles, R. J.; Krause, Gunther; Stephens, J. A. (1997): Behaviour of Turbidity Maxima in the Tamar (U.K.) and Weser (F.R.G.) Estuaries. In: *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 45, S. 235–246.

Grünler, S.; Maushake, C. (2016): Feststofftransport in Ästuaren. FuE-Forschungsbericht an Bundesanstalt für Wasserbau. Im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Hamburg (B3955.02.04.70150). Online verfügbar unter <http://ewisa.baw.de/document/22248>, zuletzt geprüft am 15.06.2017.

Gundlach, Jannek (2018): Set-Up of a Process-based Model to Investigate the Outer Weser Estuary Development. Long-term morphological modeling with Delft 3D to hindcast the genesis and development of channel-shoal patterns in the Outer Weser estuary. Master Thesis. TU Delft, Delft. Online verfügbar unter [uuid:a3ce6a6b-51c7-45f0-ac62-21a6df2021b5](https://doi.org/10.26907/2646-8263.2018.01.001), zuletzt geprüft am 06.12.2018.

Herrling, G.; Benninghoff, M.; Winter, C. (2016): Morphodynamic model of the Outer Weser estuary. Model set-up and validation. MorphoWeser - Interim report 1. MARUM (unveröffentlicht).

Herrling, G.; Winter, C. (2017a): Drivers of morphodynamics at the Outer Weser estuary. MorphoWeser - Final project report. MARUM (unveröffentlicht).

Herrling, G.; Winter, C. (2017b): Outer Weser estuary model applications. MorphoWeser - Interim report 2. MARUM (unveröffentlicht).

Herrling, Gerald; Benninghoff, Markus; Zorndt, Anna Christina; Winter, Christian (2017): Drivers of channel-shoal morphodynamics at the Outer Weser estuary. In: *Coastal Dynamics* (261), S. 333–345.

Hesse, Roland (2019): Zum Transportverhalten kohäsiver Sedimente in Ästuaren. Dissertation (eingereicht). Technische Universität Hamburg, Hamburg. Institut für Wasserbau.

Hesse, Roland; Fröhle, Peter (2015): Ereignisgesteuerte Morphodynamik im Weserästuar- Untersuchungen zur Dynamik kohäsiver Sedimente in der Weser im Abschnitt Blexer Bogen und Nordenham. Modellaufbau. Technische Universität Hamburg (unveröffentlicht).

Hesse, Roland; Fröhle, Peter (2016): Ereignisgesteuerte Morphodynamik im Weserästuar- Untersuchungen zur Dynamik kohäsiver Sedimente in der Weser im Abschnitt Blexer Bogen und Nordenham. Projektzwischenstand 1. Technische Universität Hamburg (unveröffentlicht).

Hesse, Roland; Fröhle, Peter (2017): Ereignisgesteuerte Morphodynamik im Weserästuar- Untersuchungen zur Dynamik kohäsiver Sedimente in der Weser im Abschnitt Blexer Bogen und Nordenham. Projektabschlussbericht. Technische Universität Hamburg (unveröffentlicht).

Hesse, Roland; Zorndt, Anna Christina; Fröhle, Peter (2019): Modelling dynamics of the estuarine turbidity maximum and local net deposition. In: *Ocean Dynamics*, in review.

Heyer, H.; Schrottke, K. (2013): Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht. AufMod ; gemeinsamer Abschlussbericht für das Gesamtprojekt mit Beiträgen aus allen 7 Teilprojekten. Online verfügbar unter [http://vzb.baw.de/publikationen/kfki\\_projekte/0/105\\_2\\_1\\_e36075.pdf](http://vzb.baw.de/publikationen/kfki_projekte/0/105_2_1_e36075.pdf), zuletzt geprüft am 05.05.2017.

Junge, I.; Wilkens, J.; Hoyme, Hans Helge; Mayerle, Roberto (2005): Modelling of Medium-Scale Morphodynamics in a Tidal Flat Area in the South-Eastern German Bight. In: *Die Küste* 69, S. 279–310.

Kösters, Frank; Grabemann, Iris; Schubert, Reiner (2010): River Discharge Related Changes of the Turbidity Maximum Sediment Inventory in the Weser Estuary. In: *Proceedings of the 15th Physics of Estuaries and Coastal Seas (PECS) Conference, Colombo, Sri Lanka* 15, S. 133–136.

Kösters, Frank; Grabemann, Iris; Schubert, Reiner (2014): On SPM Dynamics in the Turbidity Maximum Zone of the Weser Estuary. In: *Die Küste* 81, S. 393–408.

Kösters, Frank; Winter, Christian (2014): Exploring German Bight coastal morphodynamics based on modelled bed shear stress. In: *Geo-Mar Lett* 34, S. 21–36.

Lange, Dietrich; Müller, Helmut; Piechotta, Friederike; Schubert, Reiner (2008): The Weser Estuary. In: *Die Küste* 74, S. 275–287.

Lesser, G. R.; Roelvink, J. A.; van Kester, J. A. T. M.; Stelling, G. S. (2004): Development and validation of a three-dimensional morphological model. In: *Coastal Engineering* 51 (8-9), S. 883–915. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2004.07.014.

Malcherek, A.; Piechotta, F.; Knoch, D. (2005): Mathematical Module SediMorph. Validation Document. Technical report. Bundesanstalt für Wasserbau. Hamburg (1.1).

Malcherek, Andreas; Piechotta, Friederike; Knoch, Denise (2002): Mathematical Module Sedi-morph. Validation Document Version 1.1. 03.2005. Aufl. Bundesanstalt für Wasserbau. Hamburg. Online verfügbar unter [http://wiki.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische\\_verfahren/pdf/vd-sedimorph.pdf](http://wiki.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische_verfahren/pdf/vd-sedimorph.pdf).

Milbradt, Peter; Valerius, J.; Zeiler, Manfred (2015): Das Funktionale Bodenmodell: Aufbereitung einer konsistenten Datenbasis für die Morphologie und Sedimentologie. In: *Die Küste* 83, S. 39–63.

Müller, Malte; Cherniawsky, Josef Y.; Foreman, Michael G. G.; Storch, Jin-Song von (2014): Seasonal variation of the M 2 tide. In: *Ocean Dynamics* 64 (2), S. 159–177. DOI: 10.1007/s10236-013-0679-0.

Ramacher, H. (1974): Der Ausbau von Unter- und Außenweser. Hg. v. Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen (Franzius-Mitteilungen, Heft-Nr. 41).

- Schneggenburger, Christoph; Günther, Heinz; Rosenthal, Wolfgang (2000): Spectral wave modeling with non-linear dissipation. Validation and applications in a coastal tidal environment. In: *Coastal Engineering* 41 (1-3), S. 201–235. DOI: 10.1016/S0378-3839(00)00033-8.
- Syvitski, James P. M.; Slingerland, Rudy L.; Burgess, Peter; Meiburg, Eckart; Murray, A. Brad; Wiberg, Patricia et al. (2009): Morphodynamic Models: An Overview. In: *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, S. 3–20.
- van der Wegen, Mick; Dastgheib, Ali; Jaffe, Bruce E.; Roelvink, Dano (2011): Bed composition generation for morphodynamic modeling: case study of San Pablo Bay in California, USA. In: *Ocean Dynamics* 61 (2-3), S. 173–186. DOI: 10.1007/s10236-010-0314-2.
- van der Wegen, Mick; Roelvink, J. A. (2012): Reproduction of estuarine bathymetry by means of a process-based model: Western Scheldt case study, the Netherlands. In: *Geomorphology* 179, S. 152–167. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.08.007.
- van Kessel, Thijs; Winterwerp, Han; van Prooijen, Bram; van Ledden, Mathijs; Borst, Wil (2011): Modelling the seasonal dynamics of SPM with a simple algorithm for the buffering of fines in a sandy seabed. In: *Continental Shelf Research* 31 (10), S. S124-S134. DOI: 10.1016/j.csr.2010.04.008.
- van Maren, Dirk S.; van Kessel, T.; Cronin, K. M.; Sittoni, Luca (2015): The impact of channel deepening and dredging on estuarine sediment concentration. In: *Continental Shelf Research* 95, S. 1–14. DOI: 10.1016/j.csr.2014.12.010.
- Winter, Christian (2011): Macro scale morphodynamics of the German North Sea coast. In: *Journal of Coastal Research* 64, S. 706–710.
- Winterwerp, Johan C.; van Kesteren, Walther G. M. (2004): Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment. Amsterdam: Elsevier (Developments in Sedimentology, 56).
- WSA Bremerhaven (2007): Mindertiefen in den Schlickstrecken Blexer Bogen und Nordenham. Dokumentation und Analyse der Veränderungen nach dem 14 m-Ausbau der Außenweser (1999). (Gewässerkundlicher Bericht 2007 - 3).
- WSA Bremerhaven; WSA Bremen (2016): Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenweser an die Entwicklungen im Schiffsverkehr (WAP). Fahrrinnenanpassung der Unterweser Teil 2: Ermittlung und Konzept zur Umlagerung des künftigen Unterhaltungsbaggervolumens nach Anpassung der Unterweser. Hg. v. Projektgruppe Weseranpassung. Bremerhaven (WAP-Studie 2016-1).
- Zorndt, Anna Christina; Herrling, Gerald (2015): Methods for the simulation of morphodynamic processes in estuaries. In: TU Hamburg (Hg.): Workshop on Numerical Methods of Water-Soil Boundary Layers under Currents and Waves.

# Anlage 1

## Liste von Veröffentlichungen

### Berichte

Herrling, G.; Benninghoff, M., Winter, C. (2016): MorphoWeser - Interim report 1 - May 2016, Morphodynamic model of the Outer Weser estuary, Model set-up and validation (unveröffentlicht).

Herrling, G.; Winter, C. (2017): MorphoWeser - Interim report 2 - May 2017, Outer Weser Estuary model applications (unveröffentlicht).

Herrling, G.; Winter, C. (2017): MorphoWeser - Final project report - Nov. 2017, Drivers of morphodynamics at the Outer Weser estuary (unveröffentlicht).

Hesse, R.; Fröhle, P. (2015): Ereignisgesteuerte Morphodynamik im Weserästuar- Untersuchungen zur Dynamik kohäsiver Sedimente in der Weser im Abschnitt Blexer Bogen und Nordenham. Modellaufbau. Technische Universität Hamburg-Harburg (unveröffentlicht).

Hesse, R.; Fröhle, P. (2016): Ereignisgesteuerte Morphodynamik im Weserästuar- Untersuchungen zur Dynamik kohäsiver Sedimente in der Weser im Abschnitt Blexer Bogen und Nordenham. Projektzwischenstand 1. Technische Universität Hamburg-Harburg (unveröffentlicht).

Hesse, R.; Fröhle, P. (2018): Ereignisgesteuerte Morphodynamik im Weserästuar- Untersuchungen zur Dynamik kohäsiver Sedimente in der Weser im Abschnitt Blexer Bogen und Nordenham. Projektabschlussbericht. Technische Universität Hamburg-Harburg (unveröffentlicht).

### Poster

Herrling, G.; Benninghoff, M.; Zorndt, A.; Winter, C. (2017): Channel-shoal morphodynamics in response to distinct hydrodynamic drivers at the Outer Weser estuary, EGU General Assembly 2017, Wien, 25. April 2017

Hesse, R.; Fröhle, P. (2017): Modelling net-deposition of cohesive sediments within the ETM of the Weser Estuary, INTERCOH 2017, Montevideo, November 2017

Zorndt, A.; Grünler, S.; Schiller, U.; Kösters, F. (2015): Hydrodynamic and suspended sediment patterns in the estuarine turbidity maximum zone, EGU General Assembly 2015, Wien, 15. April 2015

Zorndt, A.; Kösters, F. (2016): River runoff driven changes in sediment budgets in the Weser estuary, 18th Physics of Estuaries and Coastal Seas Conference, Scheveningen, 12. Oktober 2016

## Vorträge

- Herrling, G.; Winter C. (2015): Morphological and sedimentological response of barrier island tidal inlets to fair-weather and storm conditions, *Delft3D Workshop, Hamburg*, 20. Mai 2015
- Herrling, G.; Winter C. (2016): Residual circulation patterns of a multiple-inlet system: implications for sedimentology and morphology, *Delft3D Workshop*, Franzius Institut, Uni Hannover, 28. Juni 2016
- Herrling, G.; Winter, C. (2016): Barrier island ebb-tidal delta sediment dynamics in response to a synthetic sequence of extreme storms, *18th Physics of Estuaries and Coastal Seas Conference*, Scheveningen, Niederlande, 11. Oktober 2016
- Herrling, G.; Winter C. (2017): Residual sediment transport patterns at the Outer Weser estuary, *Delft3D Workshop*, Hamburg, 24. April 2017
- Herrling, G.; Benninghoff, M.; Zorndt, A.; Winter, C. (2017): Drivers of channel-shoal morphodynamics at the Outer Weser estuary, *Coastal Dynamics Conference 2017*, Helsingør, Denmark, 13. Juni 2017
- Herrling, G.; Winter C. (2017): Open tidal basins: Outer Weser estuary, Excursion and talk during *DGGV GeoBremen 2017*, Bremen, 28. Sept. 2017
- Herrling, G.; Winter C. (2017): Large-scale modelling of circulations and sediment transports at Wadden Sea tidal basins: 'open' and 'back-barrier' tidal basins, *Coastal dynamics workshop IFREMER/ IUEM/ MARUM*, Plouzané, Frankreich, 3. Oktober 2017
- Herrling, G.; Winter C. (2017): Large-scale modelling of circulations and sediment transports at Wadden Sea tidal basins: 'open' and 'back-barrier' tidal basins, *Workshop at Royal Belgian Institute of Natural Sciences*, Brussels, Belgien, 5. Oktober 2017
- Hesse, R.; Fröhle, P. (2016): Modelling Estuarine Cohesive Sediment Dynamics and Net-Deposition at the ETM, *German Chinese Joint 2016*, Qingdao, China, 22. September 2016
- Hesse, R.; Fröhle, P. (2016): Modellierung des Transportes kohäsiver Sedimente im Weserästuar, *Ästuar Workshop TUHH-HZG*, Hamburg, 24. November 2016
- Hesse, R.; Zorndt, A. (2016): Modelling net-deposition of cohesive sediments within the ETM, *18th Physics of Estuaries and Coastal Seas Conference*, Scheveningen, Niederlande, 13. Oktober 2016
- Hesse, R.; Fröhle, P. (2017): Modelling net-deposition of cohesive sediments within the ETM of the Weser estuary, *Delft3D User Days*, Delft, Niederlande, 31. Oktober 2017
- Zorndt, A.; Herrling, G. (2015): Methoden der Simulation morphodynamischer Prozesse in Ästuaren, *Workshop on Numerical Methods of Water-Soil Boundary Layers under Currents and Waves*, Hamburg, 22. September 2015
- Zorndt, A.; Hesse, R.; Herrling, G. (2016): Modeling etm dynamics and morphodynamic change in the Weser estuary using two different Delft3D model approaches, *Delft3D WS*, Hannover, 27. Juni 2016

Zorndt, A.; Kösters, F. (2016): River runoff driven changes in sediment budgets and channel-shoal interaction in the Weser estuary, *ECOA 56 Coastal systems in transition*, Bremen, 06. September 2016

Zorndt, A. (2016): Untersuchung zu Effekten einer Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenweser auf Sedimenttransport und Morphodynamik, *Wasserbau Seminar*, Braunschweig, 06. Juli 2016

Zorndt, A.; Herrling, G. (2016): Untersuchung zu Sedimenttransport und Morphodynamik im Rahmen der Fahrrinnenanpassung von Unter und Außenweser, *BAW Kolloquium*, Hamburg, 14. Juni 2016

Zorndt, A.; Dulal, B. (2017): Investigating macro scale morphodynamics of the Weser estuary. First results of a simplified model approach, *Delft3D Workshop*, Hamburg, 24. April 2017

Zorndt, A. (2017): Drivers of estuarine sand and mud dynamics, the example of the Weser estuary, *Delft3D User Days*, Delft, Niederlande, 31. Oktober 2017

Zorndt, A. (2017): How settling velocity impacts modeled intra-tidal ssc patterns and residual sediment fluxes, *INTERCOH 2017*, Montevideo, Uruguay, 16. November 2017

Zorndt, A. (2018): Impacts of channel deepening on sediment transport mechanisms in a meso-tidal estuary, *36<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering*, Baltimore, USA, 02. August 2018

### **Konferenzbände**

Herrling, G.; Benninghoff, M.; Zorndt, A.; Winter, C. (2017): Drivers of channel-shoal morphodynamics at the outer Weser estuary. *Proceedings Coastal Dynamics Conference 2017*, No. 261

Zorndt, A.; Herrling, G. (2015): Methoden der Simulation morphodynamischer Prozesse in Ästuaren, *Workshop on Numerical Methods of Water-Soil Boundary Layers under Currents and Waves*, Hamburg, 22. September 2015, TU Hamburg (Hrsg.)

### **Fachartikel**

Herrling, G.; Winter, C. (2016): Spatiotemporal variability of sedimentology and morphology in the East Frisian barrier island system. *Geo-Marine Letters*, 1-13. DOI: 10.1007/s00367-016-0462-6

Hesse, R.; Zorndt, A.; Fröhle, P. (2019): Modelling sediment transport dynamics focusing on the estuarine turbidity maximum and local net deposition, *Ocean Dynamics*, in review







Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe  
Tel. +49 (0) 721 97 26-0 · Fax +49 (0) 721 97 26-45 40

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg  
Tel. +49 (0) 40 81 908-0 · Fax +49 (0) 40 81 908-373

[www.baw.de](http://www.baw.de)