



## Editorial

### Modellierung von Sturmflutwasserständen in der Tideelbe

Für den langfristigen Küstenschutz sind die Auswirkungen künftiger Klimaveränderungen auf den Meeresspiegelanstieg und das Sturmflutgeschehen (Häufigkeit und Intensität) von großer Bedeutung. Projektionen dazu sind jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet, welche insbesondere für die Zeit nach 2050 zunehmen. Gerade für den Bereich der Tideelbe, in der die zukünftigen Entwicklungen der Sturmflutwasserstände besonders schwierig vorherzusagen sind, setzt dies ein abgestimmtes Handeln voraus. Aus diesem Grund unterzeichneten die Länder Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein im Jahre 2017 eine Absichtserklärung zur länderübergreifenden Harmonisierung der Deichbemessung an der Tideelbe. Angestrebt wird ein gleichwertiges Schutzniveau, um die Gleichwertigkeit der Lebensverhältnisse der Küstenbewohner zu gewährleisten. Gemäß dieser gemeinsamen Erklärung waren dazu die Bemessungswasserstände und Wellenhöhen in Angleichung der in den Ländern jeweils angewendeten Bemessungsverfahren auf einheitlichen Bemessungsgrundlagen und -verfahren zu ermitteln. Synergien waren durch die gemeinsame Beauftragung der zugrunde zu legenden wissenschaftlichen Arbeiten zu nutzen.

Auf der Grundlage der Erklärung vereinbarten die drei Bundesländer eine Kooperation über die Ermittlung von Wasserständen zur Bemessung von Deichen an der Tideelbe. Den Auftrag zur Modellierung der Bemessungswasserstände erhielt die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) im Juli 2017. Sie ermittelte die Wasserstände entlang der Tideelbe unter Zuhilfenahme eines hochauflösenden numerischen Modells der Elbe. Für die Modellierung wurde von den Ländern ein fiktives Sturmflutszenario vorgegeben, welches für den Referenzwasserstand (SFREF) die Springtide vom 10.09.2006, den modifizierten Windstau der Sturmflut vom 03.01.1976 und die

modifizierte Fernwelle vom 18.01.1993 beinhaltet. Der SFREF in Cuxhaven wies einen Scheitelwert von  $\text{NHN} + 5,78 \text{ m}$  auf. Das Sturmflutszenario für den Bemessungswasserstand (SFBEM) enthielt zusätzlich einen Klimazuschlag von  $0,5 \text{ m}$  und erreichte somit in Cuxhaven  $\text{NHN} + 6,28 \text{ m}$ . Der Windverlauf sollte der Windentwicklung während der Sturmflut vom 03.01.1976 entsprechen. Als Abfluss der Elbe wurden  $2.600 \text{ m}^3/\text{s}$  bei Neu Darchau vorgegeben.

Die Ergebnisse der Modellierung wurden im April 2018 präsentiert (Abbildung 1). So verzeichnete der Pegel in Hamburg St. Pauli beispielsweise einen SFREF von  $\text{NHN} + 7,62 \text{ m}$  und einen SFBEM in Höhe von  $\text{NHN} + 8,10 \text{ m}$ . Die Bedeutung der Wahl des Abflusses in das Elbeästuar, des Windes über dem Elbeästuar und der Wasserstand-Randwerte am Rand zur Nordsee für die Höhe der Sturmflutscheitelwasserstände der Sturmflutszenarien SFREF und SFBEM entlang der Tideelbe wurde jeweils zusätzlich im Rahmen einer Sensitivitätsuntersuchung untersucht.

Da der BAW Mitte des Jahres 2018 mit dem DGM-W 2016 eine aktuellere Topographie vorlag, wurde die Modellierung unter Beibehaltung der vorgegebenen Randwerte erneut durchgeführt. Im Ergebnis lassen sich im Bereich des Pegels Cuxhaven auf Grund der Vorgaben für die Sturmflutszenarien keine Unterschiede zwischen beiden Topographien feststellen. Im Bereich des Hamburger Hafens sind die in der Topographie 2016 berechneten Sturmflutscheitelwasserstände bis zu  $2 \text{ cm}$ , Stromauf von Zollenspieker bis zu  $4 \text{ cm}$  höher als die in der Topographie 2010 berechneten Sturmflutscheitelwasserstände. Hierbei ist zu beachten, dass die Borghorster Elbwiesen südöstlich von Hamburg in der Topographie 2010 noch überflutet wurden. In der Topographie 2016 wurde dieser Flutraum durch einen ca.  $\text{NHN} + 8,40 \text{ m}$  hohen Deich und ein geschlossenes Sperrwerk vor Überflutung geschützt.

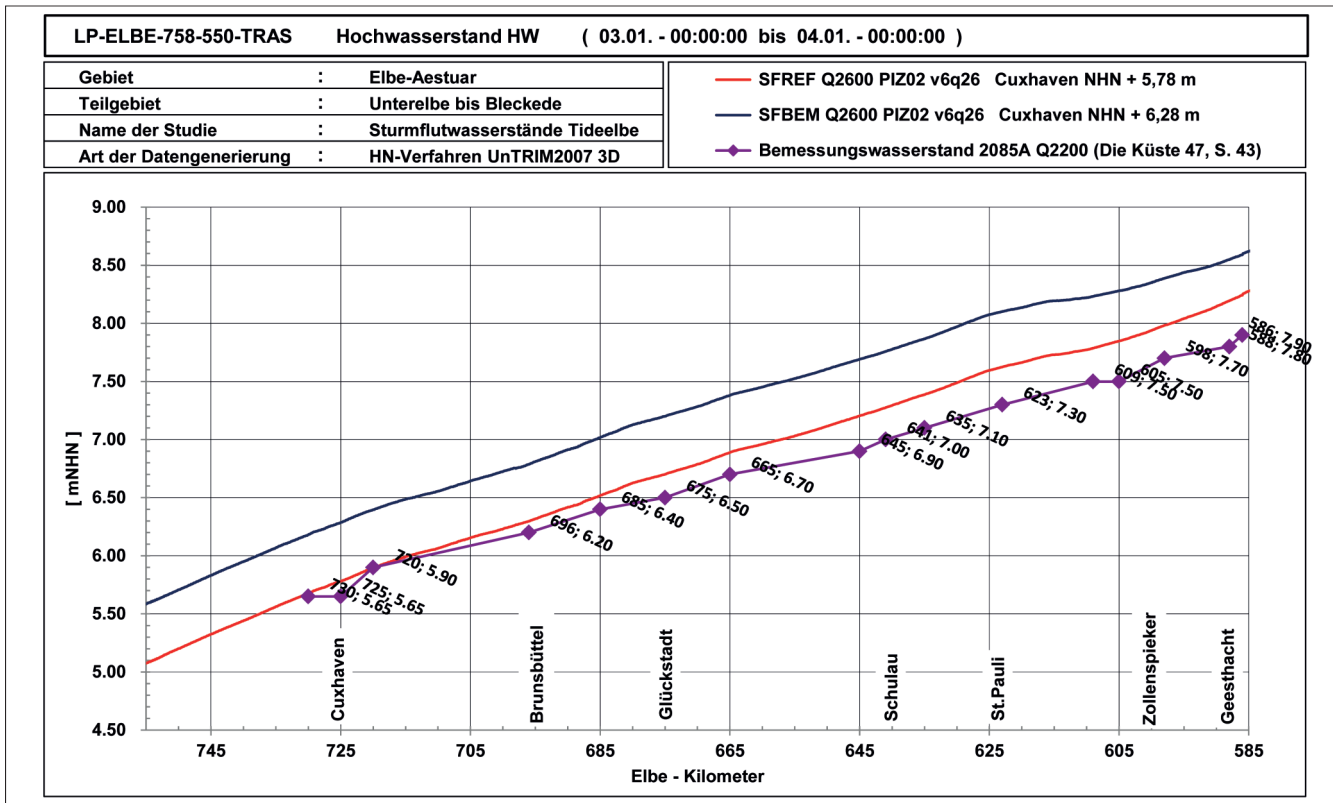


Abbildung 1: Sturmflutschwelle Wasserstände entlang der Tideelbe für die Sturmflutszenarien SFREF (rot) und SFBEM (blau). Zum Vergleich ist der Bemessungswasserstand 2085A (violett) einer trilateralen Länderarbeitsgruppe von 1988 eingetragen (Die Küste, Heft 47, S. 43).

Katharina Heinrich  
Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein  
katharina.heinrich@lkn.landsh.de

## Neue Leitung der Abteilung Hydro- mechanik, Küsteningenieurwesen und Seebau am Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig

Herr PD Dr.-Ing. habil. Nils Goseberg wurde mit Wirkung zum 01.01.2018 zum Professor für Küsteningenieurwesen und Seebau berufen. Prof. Goseberg übernimmt die Leitung der Abteilung von Professor a.D. Dr.-Ing. Hocine Oumeraci, der seit 1993 Leiter der Abteilung war.

Herr Goseberg studierte zwischen 2001 und 2007 Bauingenieurwesen an der Technischen Universität Dresden mit Studienrichtung Wasserbau und Vertiefung in der Geotechnik des Wasserbaus. Sein Diplom erhielt er im Jahr 2007 nach erfolgreichem Abschluss seiner Diplomarbeit zur Simulation

extremer Hochwasserereignisse im unteren Mississippi. Von 2007 bis 2011 arbeitete er am Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Leibniz Universität Hannover als wissenschaftlicher Mitarbeiter. Im Rahmen der wissenschaftlichen Tätigkeit forschte er als Promovend zum Thema "Tsunamieinwirkungen auf bebauete Küstenlinie". Seine Doktorarbeit mit dem Titel "The Run-up of Long Waves – Laboratory Scaled Geophysical Reproduction and Onshore Interaction with Macro-roughness Elements", betreut durch Herrn Prof. Schlurmann, schloss er erfolgreich in 2011 ab. Im gleichen Jahr trat er als postdoktoraler wissenschaftlicher Mitarbeiter die Stelle des Oberingenieurs am nunmehr umbenannten Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen an. Dabei hatte er neben der allgemeinen Lehrtätigkeiten, Drittmittelakquisition und -leitung von Forschungsprojekten sowie Finanz- und Budgetplanungen auszuführen. Aus den im Laufe der Tätigkeit mit numerischen, analytischen und experimentellen Methoden durchgeführten Projekten gilt aufgrund der seebaulichen Ausrichtung einem Projekt zur Co-Nutzung von Offshore-Windenergieanlagen

und Aquakulturräumen besondere Erwähnung. Zeitgleich mit dem Beginn seiner Habilitation warb Herr Goseberg in 2014 ein renommiertes Marie-Curie Stipendium (Studium der Karriereförderung und Berufsentwicklung, der Europäischen Union, Marie Curie Actions) ein und zog mit seiner Familie als "International Outgoing Fellow and Visiting Professor" für zwei Jahre nach

Kanada. Dort, an der Universität Ottawa im Fachbereich Bauingenieurwesen, arbeitete er an dem Projekt impLOA-Dis "Spaciotemporal Distribution and Structural Impact Loading due to Artificial Debris Objects in Violent Flows", dass sich der Untersuchung von Anpralllasten aus Treibgut in



Extremströmungen gewidmet hat. Herr Goseberg verteidigte seine Habilitation (venia legendi in der Fächerkombination "Wasserbau und Küsteningenieurwesen", Gutachter Prof. Oumeraci, Prof. Schlurmann, Prof. Rutschmann, Prof. Nistor) an der Leibniz Universität Hannover im August 2017 mit dem Thema "Advances in Laboratory Measurements for Hydraulic and Coastal Engineering".

Seit dem 01.07.2019 hat Herr Goseberg neben der Übernahme der Professur auch die Aufgabe des Geschäftsführenden Direktors des Forschungszentrums Küste (FZK) für drei Jahre übernommen. Hierbei ist gemeinsam mit dem Ludwig-Franzius-Institut derzeit das Forschungsprojekt marTech, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, wesentlich. Es erweitert derzeit den Großen Wellenkanal um eine Strömungsanlage, einen Tieftteil sowie eine erneuerte Wellenmaschine. Das Forschungsprojekt erlaubt dem FZK damit die Bearbeitung vielfältiger zukünftiger Fragestellungen, die insbesondere durch den Ausbau der erneuerbaren Energien auf See auf Küsteningenieure zukommen.

Die Abteilung Hydromechanik, Küsteningenieurwesen und Seebau arbeitet in Grundlagen- und anwendungsorientierten Forschungsprojekten der Disziplin und dient Planungsbüros sowie der Industrie mit ihrer breiten experimentellen und numerischen Expertise. Prof. Goseberg vertritt das Forschungs-

gebiet auch umfassend in der Lehre und erweitert diese in den kommenden Jahren umfassender auf dem Gebiet des "Seebaus". Neben einer weiteren Vernetzung und Zusammenarbeit deutscher Küsteningenieure ist Prof. Goseberg der internationale Austausch, derzeit u. a. mit Universitäten in Nordamerika sowie Indonesien, Japan, China und

Taiwan wichtig. Dies zeigt sich u. a. durch eine derzeit laufende Cotutelle-Promotion mit der University of Ottawa, Kanada.

Abteilungsschwerpunkte in der Forschung sind auf verschiedene Arbeitsgruppen aufgeteilt: (1) Meerestechnik, Seebau und Aquakultur – Marine Bauwerke, Offshore Industrie; (2) Küstenschutzbauwerke, Morphodynamik und Ökohydraulik- Hydraulische Bemessung, Erosion und Vegetations-Wellen-Interaktion;

(3) Naturgefahren - Tsunami, Seegang und Sturmfluten sowie (4) Verkehrswasserbau und Hafenplanung – Schiffswellen, Ästuar und Hafenbau. Querschnittsarbeitsgruppen in der numerischen und experimentellen Modellierung komplettieren das Abteilungsportfolio.

Weitere Information über die Abteilung Hydromechanik, Küsteningenieurwesen und Seebau des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau sind unter folgender Adresse zu erhalten:

Prof. Dr.-Ing. habil. Nils Goseberg | Technische Universität Braunschweig | Leichtweiß-Institut für Wasserbau | Abteilung Hydromechanik, Küsteningenieurwesen und Seebau | [n.goseberg@tu-braunschweig.de](mailto:n.goseberg@tu-braunschweig.de)

## HYGEDE (03KIS110-111)

### Wellenbelastung und Stabilität hydraulisch gebundener Deckwerke

Moritz Kreyenschulte

Prof. Dr. Holger Schüttrumpf

RWTH Aachen University, Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW)

David Schürenkamp

Nils Goseberg

Volker Kühling

Markus Brühl

Technische Universität Braunschweig, Abteilung Hydromechanik und Küsteningenieurwesen, Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI)

Ein an der deutschen Nordseeküste weit verbreitetes Verfahren zur Erhöhung der Widerstandsfähigkeit von Schüttsteindeckwerken ist der Mörtelverguss, bei dem die Schüttsteine mit einer definierten Menge an Mörtel pro Quadratmeter vergossen und so zu einem kohärenten Deckwerk zusammengefügt werden. Das Deckwerk ist somit in der Lage, Momente sowie Quer- und Normalkräfte aufzunehmen.

Aufgrund eines geringen Prozessverständnisses der Belastungsmechanismen und Widerstände erfolgt die Bemessung mörtelvergossener Schüttsteindeckwerke derzeit aufgrund von Erfahrungswerten. Es liegt kein theoretisch fundierter und durch Modellversuche verifizierter Bemessungsansatz für diese Deckwerksart vor. Regelwerke der Bundesanstalt für Wasserbau (MAR 2008; MAV 2017; RPV 2008) und die Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken (EAK 2002/2007) regeln lediglich den Aufbau der Deckwerke sowie die Prüfungen zur Sicherstellung einer ausreichenden Qualität der Deckwerke und ihrer Komponenten. Die derzeitige Bemessungspraxis kann daher potentiell zu einer Unterbemessung oder einer unwirtschaftlichen Überbemessung der Deckwerke führen.

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung und vom Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen geförderte Forschungsvorhaben "Wellenbelastung und Stabilität hydraulisch gebundener Deckwerke (HYGEDE)" hatte daher das Ziel, die wissenschaftlich-technischen Grundlagen für die Bemessung mörtelvergossener Schüttsteindeckwerke auf Seegangsbelastung zu erarbeiten. Das Verbundprojekt, an dem das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University (IWW) und das Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abteilung Hydromechanik und Küsteningenieurwesen der Technischen Universität Braunschweig (LWI) beteiligt waren, gliederte sich in die beiden Teilprojekte HYGEDE-A (03KIS111) und HYGEDE-B (03KIS110). Der Fokus der in Teilprojekt HYGEDE-A

durch das IWW durchgeführten Untersuchungen lag auf der strukturellen Integrität der Deckwerke während das LWI in Teilprojekt HYGEDE-B den Fokus auf die hydraulischen Prozesse legte.

Zur Beschreibung der strukturellen Integrität der Deckwerke wurden zuerst Schadensmechanismen aus der Begutachtung vorhandener Deckwerke an der Nordseeküste und aus einer Literaturrecherche abgeleitet. Für den Mechanismus "Rissbildung in der Deckschicht" wurde ein Modell zur Beschreibung der Einwirkungen und Widerstände im Grenzzustand erstellt. Die Einwirkungen unter Wellenbelastung wurden mit großmaßstäblichen hydraulischen Versuchen im Großen Wellenkanal in Hannover (GWK) bestimmt. Dabei wurden vier Deckwerksaufbauten untersucht, die sich in ihrer Deckschichtdicke und der verwendeten Vergussstoffmenge unterschieden. Auf diese Weise wurden zwei durchlässige und zwei undurchlässige Deckschichten erstellt. Die Deckwerke wurden mit JONSWAP-Wellenspektren mit mittleren Wellenhöhen  $H_{m0} = 0,4 - 1,0$  m und Peakperioden von  $T_p = 3,0 - 12,2$  s belastet, wodurch der Brecherparameter im Bereich von  $\xi_{m-1,0} = 1,5 - 4,6$  variiert wurde.

Die Durchlässigkeit der Deckschicht ist der wesentliche Einflussfaktor für die Drücke unter der Deckschicht in Abhängigkeit der Drücke auf der Deckschicht. Diese Drücke stellen die Einwirkung auf die als Platte wirkende Deckschicht dar. Daher wurden Durchlässigkeitsversuche an mörtelvergossenen Schüttsteindeckschichten durchgeführt und damit erstmals deren Durchlässigkeit in Abhängigkeit der Porosität und damit der Vergussstoffmenge beschrieben.

Die Widerstände und Bauwerkseigenschaften der Deckschicht wurden mit mechanischen und bruchmechanischen Ersatzversuchen an den Komponenten der Deckschicht sowie am Verbundkörper aus Mörtel und Wasserbaustein ermittelt (Klotzek, 2017). Darüber hinaus wurden Versuche zur Bestimmung der Kraft beim Lösen eines Einzelsteins im Labor und in situ für den Mechanismus "Lösen eines Einzelsteins" durchgeführt. Die hydraulischen Prozesse auf der Deckschicht wurden mit den Ergebnissen der großmaßstäblichen Versuche im GWK in Form der Wellenaufbauhöhe, des Brandungsstaus und des Reflexionskoeffizienten beschrieben.

Mit den Modellen lassen sich die für die Bemessung mörtelvergossener Schüttsteindeckwerke relevanten Prozesse "Rissbildung in der Deckschicht" und "Lösen eines Einzelsteins" und die hydraulischen Prozesse auf der Deckschicht beschreiben.

### Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Förderung des KFKI-Forschungsvorhabens HYGEDE (03KIS110-03KIS111) durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).

### Literatur

Die Küste, Heft 65, EAK (2002/2007): Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken durch den Ausschuss für Küstenschutzwerke der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. und der Hafentechnischen Gesellschaft e.V. Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI).

Klotzek, T. (2017): Mechanische und bruchmechanische Eigenschaften hydraulisch gebundener Deckwerke. Masterarbeit (unveröffentlicht). Institut für Bauforschung und Lehrstuhl für Baustoffkunde der RWTH Aachen University.

MAR (2008): BAW-Merkblatt "Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen". Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

MAV (2017): BAW-Merkblatt "Anwendung von hydraulisch gebundenen Stoffen zum Verguss von Wasserbausteinen an Wasserstraßen (MAV)". Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

RPV (2008): BAW-Richtlinie "Prüfung von hydraulisch- und bitumengebundenen Stoffen zum Verguss von Wasserbausteinen an Wasserstraßen (RPV)". Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

## AMSeL\_Ostsee A (03KIS114)

### Analyse vergangener, gegenwärtiger und zukünftiger Wasserstände in der südwestlichen Ostsee

Jessica Kelln

Dr.-Ing. Sönke Dangendorf

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen

Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt

Justus Patzke

Prof. Dr.-Ing. Peter Fröhle

TU Hamburg, Institut für Wasserbau

Dr. Ulf Gräwe

Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW)

### Einführung

Der globale Meeresspiegel (GMSL) steigt derzeit aufgrund der globalen Erwärmung und der damit verbundenen thermischen Expansion des Ozeans (Sterik) sowie der Eisschmelze der Gletscher und Eisschilde immer schneller an (Dangendorf et al. 2017; Chen et al. 2017; Cazenave et al. 2018) und es wird erwartet, dass sich die derzeitige Anstiegsrate von ca. 3,2 mm/a (Church et al. 2013) im 21. Jahrhundert weiter beschleunigt (Jevrejeva et al. 2019; Grinsted et al. 2010; Church et al. 2013; Dangendorf et al. 2017; Nerem et al. 2018). Der Anstieg des Meeresspiegels verläuft dabei allerdings weder zeitlich noch räumlich gleichmäßig, sondern unterliegt komplexen durch unterschiedliche Prozesse verursachten Mustern. Neben den häufig an Eisschmelze gekoppelten gravitativen Einflüssen beeinflussen vor allem Ozeanzirkulation, sowie Wind- und Luftdruckänderungen die regionale Ausprägung mittlerer Wasserstände. Zudem wird der Meeresspiegel an vielen Küsten weltweit von lokalen/regionalen Landbewegungen überlagert, die in vielen Fällen eine ähnliche Größenordnung wie das eigentliche klimatische Signal einnehmen (Conrad 2013). Um lokale und regionale Küstenschutzmaßnahmen zu planen, sind regionale/lokale Studien zum Verständnis beobachteter Entwicklungen sowie der Ableitung möglicher Zukunftsszenarien des Meeresspiegelanstiegs daher unerlässlich. Die Untersuchungen erfordern qualitativ hochwertige und möglichst langzeitliche Beobachtungszeitreihen des mittleren Meeresspiegels (MSL) durch Tidepegel.

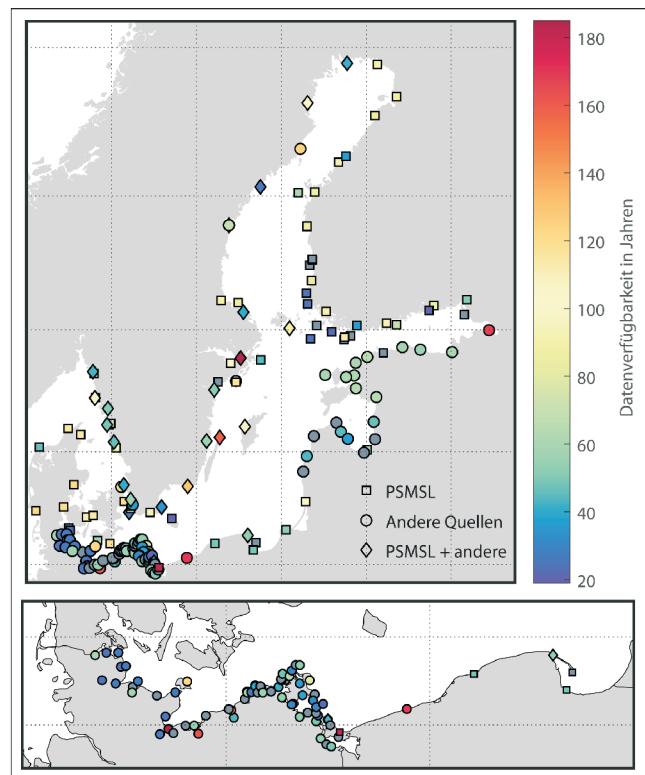
### Datengrundlage und Projektziele

In der Ostsee als Ganzes ist die Verfügbarkeit der Beobachtungsdaten, mit einigen der längsten Pegelzeitreihen weltweit, im globalen Vergleich als hervorragend zu bewerten. Dennoch sind im Untersuchungsgebiet in der südwestlichen Ostsee entlang der deutschen und polnischen Ostseeküste bisher nur an vereinzelten Pegelstandorten MSL Zeitreihen veröffentlicht (z. B. PSMSL) und unter-

sucht worden. Dies liegt vor allem auch daran, dass bisher nur für wenige Pegelstandorte langzeitliche digitalisierte Wasserstände zur Verfügung standen. Im Projekt AMSeL\_Ostsee ist es nun, aufgrund der erstmals digital verfügbaren (hochaufgelösten) Pegelzeitreihen (zusammengetragen und/oder digitalisiert im Teilprojekt AMSeL\_Ostsee B) für eine größere Anzahl an Pegeln im Untersuchungsgebiet möglich, eine detaillierte Analyse der Änderungen im MSL durchzuführen. Im Zeitraum vom 01.08.2015 bis zum 31.07.2018 wurden das Forschungsinstitut Wasser und Umwelt der Universität Siegen (fwu) sowie das Institut für Wasserbau der Technischen Universität Hamburg (TUHH) vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert, dass Verbundprojekt AMSeL\_Ostsee (03KIS0114-03KIS0115) durchzuführen. Das fwu befasste sich innerhalb dieses Verbundprojektes mit dem Vorhaben "Analyse vergangener, gegenwärtiger und zukünftiger Wasserstände in der südwestlichen Ostsee (AMSeL\_Ostsee A)". Ziel des Teilprojektes A ist es, die Entwicklung des mittleren Meeresspiegels im Untersuchungsgebiet über einen möglichst langen Zeitraum auf Basis hochaufgelöster Pegeldaten zu analysieren und mit altimetrischen Auswertungen sowie Ergebnissen numerischer Modellläufe zu verknüpfen und zu vergleichen. Einer der Arbeitsschwerpunkte bestand in der Ermittlung möglichst langzeitlicher, qualitativ hochwertiger MSL Zeitreihen auf der Basis der im Teilprojekt B zusammengetragenen Pegelzeitreihen.

## MSL-Zeitreihen

Innerhalb des Projektes konnte die Datenverfügbarkeit grundlegend erweitert werden. Dabei wurde nicht nur die Anzahl der zu analysierenden Pegelstandorte erhöht, sondern auch die Qualität der MSL Zeitreihen durch die Nutzung hochaufgelöster Daten sowie die Anbringung einer Gezeitenkorrektur an historische Einzelterminwerte verbessert. Es liegen nun MSL Monatszeitreihen an insgesamt 72 Pegelstandorten im Untersuchungsgebiet vor, wovon 66 an der deutschen und sechs an der polnischen Ostseeküste liegen. Weitergehende Analysen, insbesondere zu Langzeittrends, wurden jedoch nur an Pegeln durchgeführt, die eine Zeitreihenlänge von mindestens 19 Jahren (Nodalzyklus) aufweisen. 49 der insgesamt 72 Pegelreihen erfüllen dieses Kriterium. Zudem wurde das Datenkollektiv für die Analyse beckenweiter Prozesse um weitere 90 Pegel



**Abbildung 1:**  
Oben: Alle zusammengetragenen Pegelstandorte in der Ostsee mit Angabe der Zeitreihenlänge der ermittelten MSL Zeitreihe. Grau dargestellt sind Zeitreihen mit einer Länge von < 19 Jahren. Unten: Vergrößerte Darstellung der Pegelstandorte im Untersuchungsgebiet.

aus umliegenden Gebieten der gesamten Ostsee ergänzt.

Da vertikale Landbewegungen die Meeresspiegeltrends maskieren, wurden alle MSL Zeitreihen um vertikale Landbewegungen aufgrund von postglazialen Landbewegungen (GIA) bereinigt. Dies erfolgte indem die Landbewegungsraten des NKG2016LU Modells nach Vestøl et al. (2016) von den MSL Zeitreihen abgezogen wurden. Der Vergleich mehrerer alternativer GIA Modelle zeigte, dass sich das NKG2016LU Modell in der gesamten Ostsee als am geeignetsten erwies, wobei entlang der Deutschen Küste dennoch einige Differenzen verbleiben. Dies zeigt die großen Unsicherheiten der GIA Modellierung, die insbesondere darauf zurückzuführen sind, dass das Untersuchungsgebiet im Übergangsbereich zwischen Landhebung und Landsenkung liegt und derzeit kein Konsens in Bezug auf die Lage der Nulllinie besteht.

## Trendanalysen

In den weitergehenden Analysen der MSL Monatszeitreihen konnte an allen Pegeln im Untersuchungsgebiet ein langfristiger Meeresspiegelanstieg

beobachtet werden (gemeinsame Analyseperiode 1958-2015), wobei die Amplituden der Trends zwischen einzelnen Stationen zum Teil erheblich variieren ( $0,90 \pm 0,26$  mm/a in Marienleuchte und  $3,19 \pm 0,75$  mm/a in Wladyslawowo). Nach Bereinigung der MSL Zeitreihen um den GIA ändert sich die Streuung um den mittleren linearen Trend nur unerheblich. Gründe für diese verbleibenden Trenddifferenzen über dieselbe Analyseperiode zwischen einzelnen Stationen sind unterschiedliche Zeitreihenlängen aufgrund von Datenlücken, Unsicherheiten in den GIA Modellen, sowie lokale vertikale Landbewegungen, die nicht mit GIA in Verbindung stehen. Über das gesamte 20. Jahrhundert (1900 bis 2015) konnte ein linearer Trend für das gesamte Untersuchungsgebiet (mittlere synthetische MSL Zeitreihe) von  $1,23 \pm 0,11$  mm/a ermittelt werden. Dieser Wert liegt an der unteren Grenze derzeitiger GMSL Trendschätzer (1,3 bis 2 mm/a) für die gleiche Periode (Church und White 2006; Hay et al. 2015, Dangendorf et al. 2017) und etwas geringer als die zeitgleiche Entwicklung entlang der Deutschen Nordseeküste (ca. 1,7 mm/a) (Wahl et al. 2011). Letzteres ist vor allem auf die Ausrichtung der Küsten und die zeitgleiche Intensivierung der in der Region dominanten Westwindlagen zurückzuführen (Dangendorf et al. 2014). Vertiefte Analysen und Sensitivitätsstudien mittels numerischer Modelle finden sich in (Gräwe et al. under review).

Untersuchungen zur nichtlinearen Trendentwicklung in der synthetischen MSL Zeitreihe für das gesamte Untersuchungsgebiet zeigen eine signifikante Beschleunigung der Trends mit den höchsten beobachteten Anstiegsraten über die vergangenen drei Dekaden. Der grundsätzliche Verlauf der Trendraten stimmt mit den im Projekt AMSeL für die Deutsche Bucht (Jensen et al. 2011) ermittelten Ergebnissen sowie den Analysen der gesamten Nordsee (Wahl et al. 2011) gut überein.

### Zusammenfassung

Im Projekt AMSeL\_Ostsee wurden erstmalig alle verfügbaren Messdaten im Bereich der südwestlichen Ostsee zusammengetragen und analysiert. Die umfangreiche Zusammenstellung sowie Nachdigitalisierung langzeitlicher (hochaufgelöster) Wasserstandszeitreihen in unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen haben die Erstellung eines qualitativ hochwertigen und langzeitlichen MSL Datensatzes erst möglich gemacht. Die Ergebnisse der Analysen

verdeutlichen die Wichtigkeit und Notwendigkeit umfangreicher Datenaufbereitungen und Digitalisierungskampagnen historischer Pegelraten. Anhand des neuen qualitativ hochwertigen MSL Datensatzes konnten langzeitliche Trends und Anstiegsraten der Meeresspiegeländerungen im Untersuchungsgebiet zuverlässiger und belastbarer als mit den wenigen bisher verfügbaren MSL Zeitreihen abgeschätzt werden. Das bessere Verständnis der vergangenen und gegenwärtigen Entwicklung des MSL bietet die Basis zur Ableitung möglicher Zukunftsprognosen des Meeresspiegelanstiegs.

### Literatur

- Cazenave et al. (2018): Global sea-level budget 1993–present. In: *Earth System Science Data*, Jg. 10, 3, 1551-1590. doi: 10.5194/essd-10-1551-2018.
- Chen et al. (2017): The increasing rate of global mean sea-level rise during 1993–2014. In: *Nature Climate Change*, Jg. 7, 7, 492-495. doi: 10.1038/nclimate3325.
- Church et al. (2013): Sea Level Change. In: STOCKER et al. (Hrsg.): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Church and White (2006): A 20th century acceleration in global sea-level rise. In: *Geophysical Research Letters*, Jg. 33, 1, n/a. doi: 10.1029/2005GL024826.
- Conrad (2013): The solid Earth's influence on sea level. In: *Geological Society of America Bulletin*, Jg. 125, 7-8, 1027-1052. doi: 10.1130/B30764.1.
- Dangendorf et al. (2014): Mean sea level variability in the North Sea: Processes and implications. In: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Jg. 119, 10, n/a. doi: 10.1002/2014JC009901.
- Dangendorf et al. (2017): Reassessment of 20th century global mean sea level rise. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Jg. 114, 23, 5946-5951. doi: 10.1073/pnas.1616007114.
- Gräwe et al. (under review): Decomposing regional mean sea level rise in a semi-enclosed basin, the Baltic Sea. In: *Journal of Climate*.
- Grinsted et al. (2013): Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 ad. In: *Climate Dynamics*, Jg. 34, 4, 461-472. doi: 10.1007/s00382-008-0507-2.

Hay et al. (2015): Probabilistic reanalysis of twentieth-century sea-level rise. In: Nature, Jg. 517, 7535, 481-484. doi: 10.1038/nature14093.

Jensen et al. (2011): Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste (AMSeL). Abschlussbericht.

Jevrekeva et al. (2010): How will sea level respond to changes in natural and anthropogenic forcings by 2100? In: Geophysical Research Letters, Jg. 37, 7, n/a-n/a. doi: 10.1029/2010GL042947.

Nerem et al. (2018): Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. In: Proceedings of the National Academy of Sciences. doi: 10.1073/pnas.1717312115.

Wahl et al. (2011): Improved estimates of mean sea level changes in the German Bight over the last 166 years. In: Ocean Dynamics, Jg. 61, 5, 701-715. doi: 10.1007/s10236-011-0383-x.

## EarlyDike (03G0847A-C)

### Sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem für Seedeiche

Prof. Dr.-Ing. Peter Fröhle

Norman Dreier

Technische Universität Hamburg, Institut für Wasserbau

Sebastian Niehüser

Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu)

Verena Krebs

RWTH Aachen University, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

See- und Ästuardeiche zählen zu den wichtigsten Küstenschutzanlagen in Deutschland. Ein frühzeitiges Erkennen von Gefahren und das rechtzeitige Verhindern eines möglichen Deichversagens sind elementar für einen zuverlässigen Küstenschutz. Bestehende Frühwarnsysteme für Sturmfluten und Hochwasserereignisse berücksichtigen lediglich die Vorhersage von Wasserständen, während zusätzlich wirkende Belastungsgrößen wie Wind- und Wellenangriff sowie der Zustand der Hochwasserschutzanlagen nicht einfließen. Es ist jedoch nicht

auszuschließen, dass es infolge des zeitgleichen Eintretens mehrerer Belastungen oder durch Vorschädigungen des Bauwerks bereits vor Eintritt des Bemessungswasserstandes zu einem frühzeitigen Versagen kommen kann. Vor Gefährdungen infolge eines solchen Ereignisses kann derzeit nicht rechtzeitig gewarnt werden.

Das Projekt EarlyDike soll diese Lücke schließen. Am Beispiel von Seedeichen wird ein sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem entwickelt, welches mehrere Belastungsgrößen (Wasserstand, Wind und Wellen) sowie die Widerstandsfähigkeit des Bauwerks selbst berücksichtigt. Die Integration und Aufbereitung der Daten erfolgt in einem webbasierten GeoPortal, welches potentiellen Endnutzern zur Verfügung gestellt werden kann. Das dreijährige Projekt wurde im Rahmen des Sonderprogramms Geotechnologien des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Insgesamt waren sechs Forschungsinstitute an dem Verbundvorhaben EarlyDike beteiligt.

### Entwicklung einer Methodik zur Wasserstandsvorhersage entlang der gesamten deutschen Nordseeküste

Bestehende Frühwarnsysteme für den Küstenschutz in Deutschland basieren auf Wasserstandsmessungen und -vorhersagen, die durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) (in Kooperation mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD)) zur Verfügung gestellt werden: <http://www.sturmflutwarnungen.de/>

Die Vorhersagen des Wasserstands werden derzeit punktuell für ausgewählte Pegelstandorte bereitgestellt. Dabei setzt sich das für die Nordsee verwendete operationelle Vorhersagesystem aus der Tidevorhersage, numerischen Wettervorhersagemodellen, einem Windstaumodell und dem Model Output Statistics (MOS) System zusammen. Für die spezifischen Pegelstandorte werden schließlich präzise und hochaufgelöste Wasserstandsvorhersagen für bis zu sechs Tage im Voraus bereitgestellt. Aus der punktuellen Wasserstandsvorhersage ergibt sich allerdings ein Defizit. Aus Wasserstandsaufzeichnungen und deren Auswertungen ist bekannt, dass solche punktuellen Wasserstandsdaten nicht repräsentativ für ein größeres Gebiet, z. B. für die Deutsche Bucht oder auch kleinere geografische Einheiten, wie z. B. eine Hallig,



sind. So können aus lokalen Effekten (z. B. nichtlineare Interaktionen, komplexe Bathymetrie mit Prielen und Wattflächen) räumliche Wasserstandsunterschiede im Dezimeterbereich entlang eines einzelnen Küstenabschnitts resultieren. Insbesondere entlang komplexer Küstenlinien, wie die der deutschen Nordsee mit vielen Inseln, Buchten, Ästuaren und dem Watt, ist eine einfache Interpolation zwischen den Pegelstandorten von unzureichender Genauigkeit. Durch die Kombination empirisch-statistischer und numerischer Modelle wurde am Forschungsinstitut Wasser und Umwelt der Universität Siegen (fwu) daher eine Methodik entwickelt, mit deren Hilfe sich die aktuell verfügbaren Punktdaten der Wasserstandsvorhersage auf die gesamte Küstenlinie (einschließlich Inseln und Halligen) hochaufgelöst (Stundenwerte, Punktabstand ~1km) übertragen lassen.

#### **Entwicklung eines Seegang- und Wellenbelastungssimulators für ein Frühwarnsystem für Seedeiche**

Zur Vorhersage des Seegangs und der seegangsinduzierten Belastungen als Grundlage für das im Verbundprojekt entwickelte Frühwarnsystem wurden Schnittstellen zum Bezug operationeller Vorhersagedaten (Wind bzw. Wasserstand) der Behörden (DWD bzw. BSH) sowie projektbezogener Vorhersagedaten (Wasserstand der Universität Siegen) implementiert. Darüber hinaus wurden umfangreiche Langzeitvorhersagedaten (Wind und Wasserstand) sowie Messdaten zu Seegang, Strömungen und Wellenauflauf (BSH und Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein - LKN-SH) während historischer Sturmflutereignisse zusammengestellt und analysiert.

Als zentrales Element für die Vorhersage der seegangsinduzierten Belastungen sowie der lokalen Seegangsverhältnisse wurde mit Beginn 2016, in Kooperation zwischen dem Institut für Wasserbau der TUHH und dem LKN-SH, die "Messkette Hydrodynamik" auf und in der Nähe der Insel Pellworm an der Nordseeküste in Betrieb genommen. Die Messkette dient der Erfassung der lokalen Seegangs- und Strömungsverhältnisse, des lokalen Wasserstands und des örtlichen Wellenaufbaus an einem Seedeich auf der Insel Pellworm. Die Messdaten bilden die Grundlage für die Vorhersage der lokalen Seegangsbedingungen und der seegangsinduzierten Belastungen im Nahezu-Echtzeitmodus sowie für das

Monitoring von Seegang, Strömung und Wellenaufbau zum Zwecke der Validierung des entwickelten Vorhersagesystems.

Zur Vorhersage des Seegangs wurde am Institut für Wasserbau der TUHH ein prä-operationelles numerisches Seegangsvorhersagemodell (SWAN) für die gesamte Nordsee sowie hochaufgelöst für ein Detailgebiet in der Nähe von Pellworm implementiert und in den operationellen Betrieb überführt (Langzeit- bzw. Kurzzeitvorhersage). Sämtliche Vorhersagedaten werden im GeoPortal des entwickelten Frühwarnsystems bereitgestellt.

Mit dem Seegangsvorhersagemodell wurden mehrere Hindcasts der Seegangsbedingungen in der Deutschen Bucht sowie im Deichvorfeld während ausgewählter historischer Sturmflutereignisse (TILO 2007, XAVER 2013, BARBARA-AXEL 2016-2017) auf Basis von Vorhersagen des Windes sowie des lokalen Wasserstands zur Validierung des numerischen Vorhersagemodells im Langzeitvorhersage-Betriebsmodus durchgeführt.

Zur Vorhersage der zu erwartenden seegangsinduzierten Belastungen als Folge des Wellenaufbaus wurde am Institut für Wasserbau der TUHH ein Hybridmodell basierend auf numerischen Simulationen (SWAN) und empirischen Ansätzen (EurOtop 2016) entwickelt, anhand dessen die operationelle Vorhersage der seegangsinduzierten Belastungen in verschiedenen Betriebsmodi (Langzeit- und Kurzzeitvorhersage) erfolgt. Die Nahezu-Echtzeitvorhersage erfolgt im Gegensatz dazu basierend auf den Messdaten der "Messkette Hydrodynamik" in Verbindung mit empirischen Ansätzen. Sämtliche Vorhersagedaten sind über das im Projekt entwickelte GeoPortal abrufbar.

Darüber hinaus erfolgten mehrere Hindcasts der Belastungen aus Wellenaufbau während ausgewählter historischer Sturmflutereignisse (s. o.) auf Basis von Vorhersagen des Windes sowie des lokalen Wasserstands zur Validierung des Hybridmodells im Langzeitvorhersage-Betriebsmodus.

#### **Echtzeitmonitoring von Seedeichen und Erprobung von intelligenten Geotextilien**

Zurzeit erfolgt die Überwachung von Seedeichen während sowie nach Sturmfluten vor allem auf Grundlage visueller Überprüfungen. Um jedoch gemäß dem Ziel des Projekts ein verbessertes Frühwarnsystem für Seedeiche zu entwickeln, ist ein

Deichmonitoring erforderlich, mithilfe dessen kontinuierlich und möglichst entlang der gesamten Deichlinie gleichzeitig, Informationen über den Zustand der Deiche gewonnen werden können. Hierzu wurde ein sensorbasiertes Deichmonitoring entwickelt, welches flächendeckend eingesetzt werden kann und das im Rahmen des Projektes entwickelten GeoPortal Echtzeitdaten zum inneren Zustand der Deiche zur Verfügung stellt.

Ursache oder Auswirkung aller im Schrifttum identifizierten Versagensmechanismen von Seedeichen ist ein erhöhter Wassereintritt in Teile des Deiches, die unter normalen Bedingungen nicht wassergesättigt sind. Sensoren, die einen Wassereintritt im Deich detektieren, können folglich dazu beitragen, Deichverschlechterungen und beschädigte Deichabschnitte, die zu schwach für extreme Belastungen geworden sind, rechtzeitig zu erkennen. Aber auch während einer Sturmflut können solche Sensoren dazu beitragen, besonders gefährdete Deichabschnitte zu identifizieren und im schlimmsten Fall Warnungen für einen drohenden Deichbruch zu generieren und entsprechende Notfallmaßnahmen einzuleiten.

Hierzu wurden in Kooperation zwischen dem Institut für Textiltechnik (ITA) und dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der RWTH Aachen University garnbasierte Sensoren in ein Geotextil integriert, die bei einem Einbau unterhalb der Außendichtung eines Seedeiches in der Lage sind, einen Anstieg der Sickerlinie innerhalb des Deichkörpers sowie eine Wasserinfiltration durch die Deckschicht des Deiches zuverlässig zu erkennen. Dafür wurden Integrationskonzepte in bestehende textile Herstellungsverfahren für Geotextilien untersucht und verschiedene Fügetechnologien für die Sensorfasern hinsichtlich der Verbundfestigkeit charakterisiert. Um ein Auslesen der Sensoren des intelligenten Geotextils zu ermöglichen, wurde eine Messschaltung und -kette entwickelt.

Die neuartigen, intelligenten Geotextilien wurden in der Versuchshalle des IWW in Deichmodellen auf unterschiedlichen Skalen getestet, validiert und in Zusammenarbeit mit dem ITA für den Einbau im Deich optimiert. Hierbei wurde das Sensortextil anhand der Ergebnisse konventioneller Messtechnik validiert und auf Grundlage der gesammelten Daten eine Methodik zur automatischen Analyse der Sensorsignale abgeleitet.

Die in der Versuchshalle des IWW aufgenommenen Sensordaten wurden dabei bereits so verarbeitet, dass sie in die vom Geodätischen Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik und Geoinformationssysteme der RWTH Aachen University (gia) aufgebaute Geo- und Sensordateninfrastruktur eingespeist werden können. Die dort zur Verfügung gestellten Daten werden wiederum von der am IWW entwickelten Auswertemethodik abonniert und analysiert, um sie schließlich über ein Webinterface ("Deichmonitor") online abrufbar zu machen. Hierdurch ist eine Echtzeitüberwachung des aufgebauten Modelldeichs in der Versuchshalle des IWW möglich und damit eine erste Umsetzung des entwickelten Frühwarnsystems realisiert worden.

Das Verbundprojekt EarlyDike wurde vom 01.06.2015 bis zum 31.05.2018 mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Sonderprogramms Geotechnologien gefördert (03G0847A-C). Die Teilprojektleiter und Mitarbeiter bedanken sich für die intensive Betreuung durch den Projektträger Jülich und die fruchtbare Zusammenarbeit mit den Landes- sowie Küstenschutzbehörden.

## ALADYN (03F0576A-C)

### **Analyse der beobachteten Tidedynamik in der Nordsee - Überblick über den Stand des Projektes und die Ergebnisse des internationalen ALADYN-Workshops**

Dr.-Ing. Arne Arns

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen

Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Abteilung Wasserbau und Hydromechanik

Bei der Nordsee und insbesondere der Deutschen Bucht handelt es sich um ein stark tidebeeinflusstes und ebenso komplexes wie sensitives System, das ständigen Veränderungen unterworfen ist. Diese Veränderungen spiegeln sich auch in der Charakteristik der Tide wider, die i. d. R. aus Pegelaufzeichnungen abgeleitet werden können. So zeigen langjährige Pegelaufzeichnungen aus dem Gebiet der südöstlichen Nordsee seit Mitte des



**Abbildung 1:**  
Gruppenbild der Teilnehmer des ALADYN Workshops im Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie.

20. Jahrhunderts signifikante Veränderungen im lokalen Tideregime. Während der mittlere Meeresspiegel über die vergangenen 150 Jahre etwa dem globalen Mittel gefolgt ist, deuten Auswertungen der mittleren Tidehoch- und Tideniedrigwasser auf signifikant abweichende Trends hin. So sind die Tidehochwasser signifikant schneller als der mittlere Meeresspiegel angestiegen, während die Tideniedrigwasser deutlich geringere, stagnierende oder teils negative Trends aufzeigen. Daraus resultiert eine gleichzeitige Zunahme des Tidehubs (die Differenz aus Tidehoch- und Tideniedrigwasser) von ca. 10 % seit 1955. Derartige Veränderungen haben direkte Auswirkungen auf den Küstenschutz. So ergeben sich bei einem Anstieg der mittleren Tidehochwasser z. B. größere Wassertiefen, wodurch u. a. das Wellenklima oder die Morphodynamik im Küstenvorfeld beeinflusst werden. Dies verdeutlicht, dass neben den global wirkenden übergeordneten Veränderungen im mittleren Meeresspiegel offenbar auch regionale Phänomene und Prozesse eine wichtige Rolle für die Ausprägung der Wasserstände spielen. Eine robuste Abschätzung potentiell zukünftiger Wasserstände setzt daher voraus, dass vergangene Entwicklungen und zugrunde liegende Prozesse ausreichend verstanden sind.

Um die beteiligten Prozesse zu identifizieren und beschreiben, wurden in den vergangenen Jahren unterschiedlichste Untersuchungen zur Interaktion zwischen veränderten Randbedingungen (z. B. mittlerer Meeresspiegel, Astronomie und Meteorologie) und der Reaktion des mittleren Tidehubs bzw. der Tide durchgeführt. Keine dieser Untersuchungen

konnte die beobachteten Änderungsraten jedoch vollständig erklären. Eine bisher nicht im Detail untersuchte Erklärung geht auf den Einfluss von größeren Baumaßnahmen (z. B. infolge von Eindeichungen) zurück. Inwieweit die einzelnen Pegel tatsächlich durch Baumaßnahmen und den daraus resultierenden morphologischen Veränderungen im Küstenvorfeld beeinflusst sind, wird aktuell im Rahmen des KFKI-Vorhabens ALADYN-A durch das Forschungsinstitut für Wasser und Umwelt (fwu, 03F0756A) der Universität Siegen untersucht. Darüber hinaus erfolgen modellbasierte Untersuchungen zum Einfluss großskaliger Effekte auf die Tidedynamik am Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG, ALADYN-B: 03F0756B) sowie ebenfalls modellbasierte Betrachtungen zur Tideinteraktion zwischen den Ästuaren und dem Küstenvorfeld am Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLKWN, ALADYN-C: 03F0756C). Das Verbundvorhaben hat eine Laufzeit von drei Jahren und endet im September 2019.

Im Rahmen dieses Vorhabens fand vom 17.-19.10.2018 unter der Leitung des fwu der erste ALADYN-Workshop "on the development of tidal dynamics and its role for coastal protection within the North Sea" in Hamburg statt (Abbildung 1).

Ziel des Workshops war der Austausch von aktuellem Wissen rund um das Thema Tidedynamik sowie die intensive fachliche Diskussion zu zentralen Themen des Küstenschutzes. Neben den Projektpartnern und zahlreichen weiteren Gästen aus Deutschland nahmen daran auch internationale Gäste u. a. aus

Frankreich, Großbritannien, den USA und Dänemark in den Räumlichkeiten des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) teil.

Am ersten Tag des Workshops standen die historischen Änderungen der Tiden im Fokus. Als Auftakt referierten neben anderen Mattias Green, Ivan D. Haigh (via Skype) und Philip L. Woodworth (alle UK) über die physikalischen Grundlagen der Tiden, erdgeschichtliche Tideänderungen sowie zu beobachteten Änderungen über die letzten Jahrhunderte. Auch Mitarbeiter des fwu (Leon Jänicke, Andra Ebener) präsentierten ihre jüngsten Forschungsergebnisse zu Änderungen des Tidehubs in der gesamten Nordsee im 20. Jahrhundert sowie zur Entwicklung innerhalb der Deutschen Bucht. Der zweite Tag bot mit Vorträgen von u. a. David Jay (USA) und Joanne Williams (UK) einen Einblick über die zugrundeliegenden Mechanismen und Ursachen der Tideveränderungen. Neben den angeregten Diskussionen zwischen Publikum und Vortragenden stand am Nachmittag eine Bootstour durch den Hamburger Hafen mit anschließendem gemeinschaftlichem Abendessen auf dem Programm.

Um den Workshop rund um die Veränderungen der Tidedynamik zu vervollständigen, referierten am dritten Tag u. a. Déborah Idier (Frankreich), Sönke Dangendorf (fwu) sowie Jacobus Hofstede (MELUR) über zukünftige Entwicklungen der Tide bzw. des mittleren Meeresspiegels und potentiellen Auswirkungen dieser Veränderungen. Mit einer offenen Diskussionsrunde zwischen allen Teilnehmern fand der ALADYN-Workshop schließlich ein Ende. Die Hauptaussagen der Diskussion lauten wie folgt:

- Beobachtungsdaten zeigen Tideänderungen über die letzten Jahrzehnte und Jahrhunderte. Dabei überlagern sich lokale/regionale (z. B. Baggerungen, Baumaßnahmen) und großskalige (Meeresspiegelanstieg) Effekte. Hierdurch wird die Detektion eindeutiger Muster und Mechanismen erschwert.
- Pegelmessungen sind oft nur eingeschränkt verfügbar (insbesondere für internationale Studien). Ganzheitliche Aussagen sind somit oftmals nicht möglich. Für Forschungszwecke sollten diese Daten (ähnlich wie im GESLA Datensatz, siehe Woodworth et al., 2017) frei zugänglich sein.
- Existierende analoge Pegelschriebe müssen digitalisiert werden, um die Entwicklung in der

Vergangenheit zu rekonstruieren und zu verstehen.

- Es werden langjährige Messungen aus Gebieten mit geringerer Beeinflussung durch Flachwasser- und Reibungseffekte benötigt, d. h. nicht im direkten Küstenvorfeld. Erst hierdurch lassen sich großskalige Effekte belastbar isolieren.
- Existierende Studien weisen häufig starke Unterschiede in der Datenvorbereitung (pre-processing), dem verwendeten Modell, dem Modell Set-up, den Anfangs- und Randbedingungen, den betrachteten Szenarien, der Auflösung und im Fokusgebiet auf. Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird daher ein internationales "inter-comparison" Projekt angestrebt wie z. B. das Coordinated Ocean Wave Climate Project (COWCLIP) (Hemer et al., 2013).

Anknüpfend an den Erfolg und die positive Resonanz des Workshops ist für Mitte 2019 bereits ein zweiter ALADYN-Workshop angedacht. Darüber hinaus wird auf der EGU 2019 in Wien eine gesamte Session das Thema Tide aufgreifen (OS4.2 Tides, Convener: Mattias Green). Das fwu bedankt sich bei allen Vortragenden für die interessanten Einblicke in die verschiedensten Fragestellungen rund um die Tidedynamik, für die zahlreichen Diskussionsbeiträge und die positive Stimmung unter den Teilnehmenden. Die Vorträge und eine Übersicht der Ergebnisse ("ALADYN-Workshop 2018 - Main outcome") des Workshops können unter der Website des fwu <https://www.bau.uni-siegen.de/fwu/wb/> eingesehen bzw. heruntergeladen werden.

## LivingCoastLab (03F0759 A-D)

### Können Halligen wachsen? - Sedimentologische Untersuchungen um die Hallig Langeneß

Dr. Volker Karius  
Ingo Hache  
Prof. Dr. Hilmar von Eynatten

Universität Göttingen, Geowissenschaftliches  
Zentrum, Sedimentologie und Umweltgeologie

#### Einleitung

Die Landoberflächen der nordfriesischen Halligen stehen in einem dynamischen Gleichgewicht mit dem

Meerspiegel, da regelmäßige Überflutungen (Land unter) vornehmlich während der Wintermonate die Landoberfläche durch Sedimentablagerungen aufwachsen lassen. Langjährige Untersuchungen im Projekt ZukunftHallig haben allerdings gezeigt, dass derzeit die Anstiegsrate des mittleren Tide Hochwassers die Rate der durch Sedimentation bedingten Landerhöhung deutlich übersteigt (Schindler et al., 2014).

Im Projekt Living Coast Lab wird der Frage nachgegangen, ob es ein Potential an Trübstoffen gibt, die durch die Küstenschutzbauwerke daran gehindert werden, auf die Hallig zu gelangen.

### Methodik

Es wurde ein autonom operierendes Trübemessnetzwerk entwickelt und installiert, dass seit März 2017 kontinuierlich an sechs Stationen im Watt rund um Hallig Langeneß und an zwei Positionen auf der Hallig Langeneß die Trübstoffkonzentration registriert (Abbildung 1). Um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen, wurden alle 8 Trübesensoren mit vor Ort aus der Wassersäule gesammelten Sedimenten individuell kalibriert. Zusätzlich zu den Trübedaten werden meteorologische Daten bezüglich Windrichtung und Windstärke des Deutschen Wetterdienstes (DWD) sowie Wellengangs- und Pegeldata des Landesbetriebs für Küsten- und Naturschutz des Landes Schleswig-Holstein (LKN-SH) verwendet. Während der Messperiode Sommer 2017 und Winter 2017/18 konnten erste Erkenntnisse gewonnen werden, wie die meteorologischen und hydrodynamischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet die Trübstoffkonzentration beeinflussen.

### Vorläufige Ergebnisse

Zwischen den einzelnen Messstationen bestehen erhebliche und systematische Konzentrationsunterschiede, die von Faktoren wie topographischer Höhe, Nähe zu Prielen oder Lahnungsfeldern aber auch der Exposition der Bühnenfelder, in denen die Messstationen installiert sind. Die mittleren Trübstoffkonzentrationen variieren zwischen 0.04-0.56 g/L. Während Sturmbedingungen steigen die Konzentrationen um Faktor 5-10 gegenüber Schönwetterbedingungen an (Abbildung 2). Ebenfalls besteht ein deutlicher Unterschied zwischen den Sommer und Wintermonaten. Eine alleinige Zunahme der Windgeschwindigkeit reicht allerdings nicht aus, um signifikante Erhöhungen in der Trübstoff-

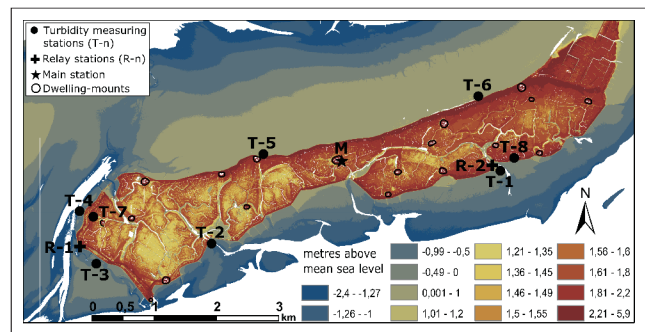


Abbildung 1: Verteilung der Trübemessstationen T1-T8 um und auf Hallig Langeneß, sowie bathymetrische Informationen.

konzentration zu generieren. Vielmehr ist ein Zusammenspiel aus Windgeschwindigkeit und Dauer des Windes sowie der Windrichtung entscheidend. Stationen, die durch Bühnen geschützt werden, zeigen hierbei geringere Trübstoffkonzentrationen als solche, die stärker exponiert sind. Die Nähe zu größeren Prielen lässt den Einfluss von Windgeschwindigkeit und Windrichtung in den Hintergrund treten, hierfür dominiert dann der Einfluss der Gezeitenströmung.

### Ausblick

Parallel zu den Trübemessungen wird die Sedimentakkumulation auf der Hallig nach jedem Land unter Ereignis mit Hilfe von Sedimentfallen gemessen und mit den Trübewerten auf und vor der Hallig korreliert. Eine anschließende numerische Modellierung des Sedimenttransportes soll Maßnahmen für ein optimiertes Küstenschutzkonzept identifizieren. Schon jetzt kann festgestellt werden, dass die Höhe der

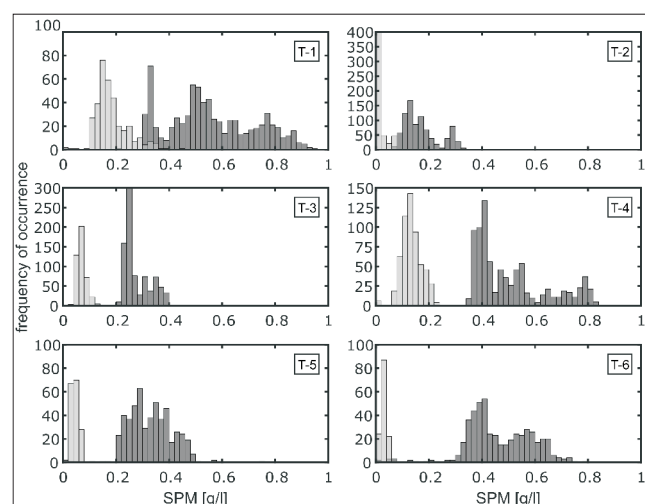


Abbildung 2: SPM Konzentrationen während eines Tidezyklus bei Schönwetter am 30.11.2017 (hellgrau) und einem Land unter am 11.02.2018 (dunkelgrau).

Halligrauhstreifen, die Teil des Küstenschutzkonzeptes sind, die Sedimentakkumulation auf den landeinwärts gelegenen Flächen beeinflussen.

## Referenzen

Schindler, M., Karius, V., Arns, A., Deicke, M., von Eynatten, H. (2014): Measuring sediment deposition and accretion on anthropogenic marshland – Part II: The adaptation capacity of the North Frisian Halligen to sea level rise. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 151 (2014) 246-255.

## MudEstuary (03KIS0112-113)

### Die Beeinflussung der Dynamik der Tideästuare durch Flüssigschlick

Prof. Dr.-Ing. Andreas Malcherek  
Oliver Chmiel

Universität der Bundeswehr München, Institut für Wasserwesen, Professur für Hydromechanik und Wasserbau

LTDirektor Holger Rahlf  
Julia Benndorf  
Marie Naulin

Bundesanstalt für Wasserbau

### Motivation und Zielsetzung

Das Auftreten von Flüssigschlick in Ästuaren und angrenzenden Häfen kann zu hohen Unterhaltungsaufwendungen und einer Veränderung der Tidedynamik führen. In Deutschland ist insbesondere das Emsästuar von hohen Schwebstoffkonzentrationen betroffen, wo Flüssigschlickschichten mit bis zu 50 g/l auftreten, die im Mittel 40 % der Wassersäule umfassen (Becker et al. 2018).

In den klassischen hydrodynamisch-numerischen Modellen ist die Wechselwirkung zwischen Tidedynamik und Flüssigschlick bisher kaum berücksichtigt. Eine Weiterentwicklung der Methoden zur Beschreibung der Flüssigschlickdynamik erfolgte in vorangegangenen KFKI-Projekten: So wurde im Projekt MudSim (Wehr und Malcherek, 2012) ein numerischer Modellansatz entwickelt, der basierend auf einer isopyknischen Darstellung das komplexe nicht-newtonsche Verhalten von Flüssigschlick beschreiben kann (Wehr, 2012). Dafür wurden das scherverdünnende Fließverhalten von Flüssigschlick und die

rheometrische Untersuchung der Fließgrenze untersucht (Malcherek und Cha, 2011). Dieses Modell beschreibt die komplexen rheologischen Eigenschaften der Schlicke, jedoch nicht die vertikale Interaktion einzelner Schichten.

Das Ziel des Forschungsprojekts MudEstuary ist nun eine Methode zur Beschreibung der Interaktion von Tide und Flüssigschlick zu entwickeln.

### Methode

Um die Dynamik in Tideästuaren mit Flüssigschlick beschreiben zu können, wird ein Modellansatz entwickelt und implementiert, der einen kontinuierlichen Übergang von Flüssigschlick zu geringeren Schwebstoffkonzentrationen berücksichtigt. Dabei wird das viskose Verhalten von Wasser durch Turbulenzmodelle und das visko-elastische Verhalten von Flüssigschlick durch rheologische Modelle simuliert.

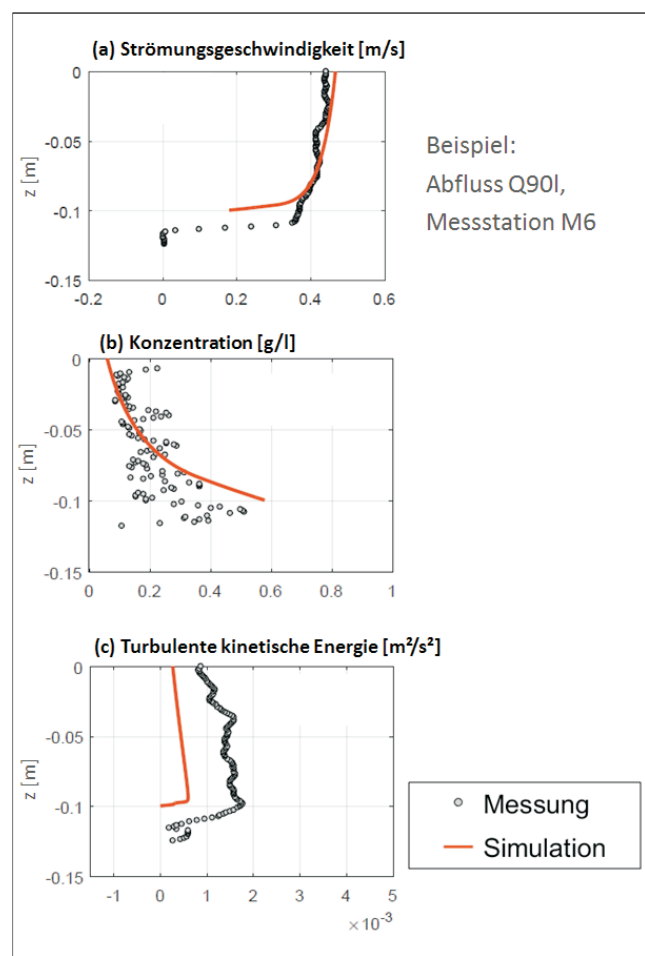


Abbildung 1: Vergleich Labormessungen und Simulation am Beispiel einer Messposition (a) Strömungsgeschwindigkeit, (b) Konzentration, (c) Turbulente kinetische Energie.

Basierend auf einem kontinuierlichen Modellansatz wird zunächst ein linearer Zusammenhang der turbulenten und rheologischen Viskosität angenommen (Le Hir et al., 2001). So kann die effektive Viskosität  $V_{eff}$  eingeführt werden, die sowohl die turbulente ( $V_t$ ) als auch die rheologische Viskosität ( $V_{rh}$ ) beinhaltet. Der Modellansatz wurde zunächst in einem numerischen 1DV-Modell weiter entwickelt und anschließend in ein numerisches 3D-Modell implementiert. Für eine Verifizierung des Modellansatzes werden Laborversuche zur Analyse des Übergangsbereichs zwischen Turbulenz und Rheologie durchgeführt.

## Ergebnisse

Im wasserbaulichen Labor des Instituts für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München wurden Untersuchungen an der Grenzschicht zwischen turbulenten und rheologischen Fließbedingungen durchgeführt. In einem 30 m langen Laborgerinne wurden dazu Quarzmehlsuspensionen unterschiedlicher Konzentration hergestellt.

Mit moderner ADV-Messtechnik wurden zeit- und ortsgleich vertikale Geschwindigkeits-, Konzentrations- und Turbulenzprofile gemessen (Abbildung 1). Insbesondere die dafür entwickelte akustische Konzentrationsmessung ermöglicht es, den Einfluss der Konzentration auf die Entwicklung der Fließgeschwindigkeit und der Turbulenz, ohne zeitliche oder räumliche Verzerrung zu untersuchen.

Die Messergebnisse lassen die Auswertung der turbulenten Viskosität nur unter der Annahme eines logarithmischen Geschwindigkeitsprofils zu. Tatsächlich zeigen die Messungen abweichende Geschwindigkeitsprofile, sodass vorgeschlagen wird, die turbulente Viskosität über die neu eingeführten

Modell-Reynoldsspannungen auszuwerten.

Des Weiteren weisen die Versuchsergebnisse komplexes turbulentes Verhalten nach. Im Verlauf der Versuchsrinne konnte sowohl eine Turbulenzdämpfung, wie auch eine Turbulenzerhöhung nachgewiesen werden. Im Fall der Turbulenzdämpfung ist von einer Verdickung der viskosen Grenzschicht auszugehen, wie es auch an einer Lutokline im Emsästuar der Fall ist. Eine Turbulenzerhöhung ist die Folge instationärer Sohlformen (Riffel und Dünen), die sich während der Versuche in der Rinne gebildet haben.

Die Versuchsergebnisse der Laborversuche, insbesondere die der Turbulenz, helfen dabei den kontinuierlichen Übergang von turbulentem zu laminarem Fließen in der Übergangsschicht zu Flüssigschlick numerisch nachbilden zu können.

An der Bundesanstalt für Wasserbau wird der entwickelte Modellansatz in ein numerisches 3D Modell implementiert. Hierfür werden folgende Komponenten berücksichtigt:

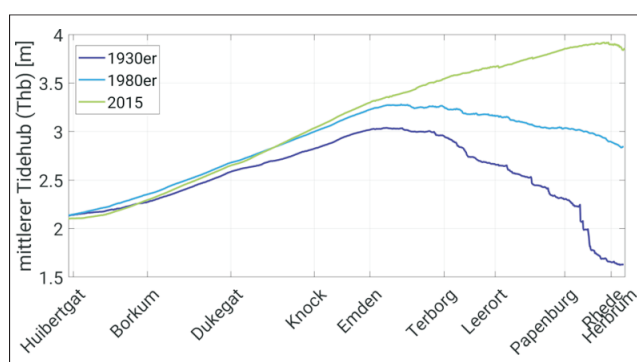
- vertikale rheologische Viskosität
- Hindered Settling
- k-omega-Turbulenzmodell mit angepassten Randbedingungen

Der erweiterte Modellansatz wurde zur Simulation der Laborversuche angewandt. Beispielhafte Ergebnisse für den Vergleich zwischen Labormessung und Simulation zeigt Abbildung 1. Eine detaillierte Analyse des Vergleichs zur Verifizierung des Modellansatzes ist in Bearbeitung.

Weiterhin wurden für die Simulation des Emsästuars historische Szenarien erstellt, um die Ursachen der Verschlickung zu untersuchen. Hierfür wurden umfangreiche Recherchen und Aufbereitungen von historischen Daten durchgeführt. Abbildung 2 zeigt beispielhaft ein Ergebnis für den Tidehub. Es verdeutlicht, dass sich die Ems von einem hyposynchronen (1930er, 1980er) zu einem hypersynchronen (2015) System entwickelt hat. Anhand der Simulation historischer Szenarien werden der Einfluss von Änderungen der Bathymetrie, Rauigkeit und Meeresspiegelanstieg untersucht.

## Danksagung

Das Projektteam dankt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung (03KIS0112-113) und dem KFKI für die fachliche Begleitung des Projektes MudEstuary.



**Abbildung 2:**  
Historische Szenarien des Emsästuars: Ergebnisse  
Simulation Tidehub für "1930er", "1980er" und 2015.

## Literatur

Becker, M., Maushake, C., and Winter, C. (2018): Observations of mud-induced periodic stratification in a hyperturbid estuary. *Geophysical Research Letters*, 45. <https://doi.org/10.1029/2018GL077966>

Malcherek, A. und Cha, H (2011): Zur Rheologie von Flüssigschlick: Experimentelle Untersuchungen und theoretische Ansätze. Projektbericht, Universität der Bundeswehr München, Institut für Wasserwesen.

Le Hir, P. et al. (2001): Application of the continuous modelling concept to simulate high-concentrated suspended sediment in a macrotidal estuary. In: McAnally W.H. and A.J. Mehta (Hg.): *Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes*, 3: Elsevier Science, 229-247.

Wehr, D (2012): An Isopycnal Numerical Model for the Simulation of Fluid Mud Dynamics. PhD Thesis. Universität der Bundeswehr München, Institut für Wasserwesen.

Wehr, D. and Malcherek, A. (2012): Numerical Simulation of Fluid Mud Dynamics – The isopycnal Model MudSim. *Die Küste*, 79, 1-52.

## Mitteilungen aus der Geschäftsstelle

Die Geschäftsstelle des KFKI ist seit dem 01.05.2018 in das Referat K1 Küsteningenieurwesen der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) integriert. Zum 01.01.2019 hat Frau Dr. Ingrid Holzwarth die Leitung des Referates Küsteningenieurwesen und die Geschäftsführung des KFKI übernommen.

Ingrid Holzwarth studierte Bauingenieurwesen an der Technischen Universität Hamburg. Sie war fast 10 Jahre als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der BAW tätig und hat während dieser Zeit in Zusammenarbeit mit dem Helmholtz-Zentrum Geestacht an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel promoviert. Ihr bisheriger Schwerpunkt lag auf der numerischen Simulation von physikalischen und biogeochemischen Prozessen in Ästuaren.

### Die Küste - EAK 2002 - Korrekturen

Ein aktuelles Korrekturblatt zur EAK2002 finden Sie auf der KFKI-Webseite unter <http://www.kfki.de/de/die-kueste>. Ein korrigierter Nachdruck

der EAK 2002 wird in Kürze erscheinen. Für Bestellungen wenden Sie sich bitte an die KFKI-Geschäftsstelle ([kfki-sekretariat@baw.de](mailto:kfki-sekretariat@baw.de)).

## Husum Coast & Prevention – Internationale Fachkonferenz für Küsten- und Naturschutz

Vom 28.–29.10.2019 findet erstmals die Husum Coast & Prevention statt. Zwei Tage, eine Plattform: Die Fachkonferenz richtet sich an alle Akteure im Küstenschutz, Deichbau, Binnenwasser- und Hochwasserschutz. Der interdisziplinäre Austausch steht im Vordergrund, wenn hochkarätige Referenten neue Klimaschutz-Strategien vorstellen und Fachleute und Wissenschaftler die Gelegenheit nutzen, sich zu vernetzen und gemeinsam für den Schutz unserer Küsten, Deiche und Binnengewässer einzustehen.

Mona Jacobsen | [jacobsen@messehusum.de](mailto:jacobsen@messehusum.de)

Weitere Informationen: [www.coast-prevention.de](http://www.coast-prevention.de)

## Coastal Structures Conference 2019 in Hannover

Vom 30. September bis 02. Oktober 2019 richtet das Forschungszentrum Küste als gemeinsame Einrichtung der Universitäten in Hannover und Braunschweig (Konferenzvorsitz: Prof. Goseberg, LWI und Prof. Schlurmann, LuFI) die internationale Konferenz Coastal Structures 2019 in Hannover aus. Teilnehmer aus der ganzen Welt werden neue Entwicklungen aus dem Bereich der Küstenbauwerke und des Küstenschutzes diskutieren.

Übergeordnete Themen sind Küstenschutz, Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels und Extremereignisse. Die präsentierten Beiträge werden neue Forschungsergebnisse, technische Innovationen oder interessante Anwendungsfälle aus den Bereichen Hydrodynamik der Küsten, Küsten- und Meeresbauwerke sowie Methoden und Techniken enthalten. Weitere Informationen und die Möglichkeit zur Anmeldung finden Sie unter:

<http://www.coastalstructures2019.com/>

## Impressum

### Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen

c/o Bundesanstalt für Wasserbau | Wedeler Landstraße 157 | 22559 Hamburg

**KFKI-Geschäftsstelle** | t +49 (0) 40-81908-392 | f +49 (0) 40-81908-373 | [kfki-sekretariat@baw.de](mailto:kfki-sekretariat@baw.de) | [www.kfki.de](http://www.kfki.de)

**KFKI-Bibliothek** | t +49 (0) 40-81908-378 | [kfki-bibliothek@baw.de](mailto:kfki-bibliothek@baw.de) | webOPAC <http://vzb.baw.de>