Heft 89 Jahr 2021

# Die Küste

ARCHIV FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK AN DER NORD- UND OSTSEE

ARCHIVE FOR RESEARCH AND TECHNOLOGY ON THE NORTH SEA AND BALTIC COAST

89 2021

**Die Küste** 

# Die Küste

ARCHIV FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK AN DER NORD- UND OSTSEE

ARCHIVE FOR RESEARCH AND TECHNOLOGY ON THE NORTH SEA AND BALTIC COAST

Heft 89 · Jahr 2021

Herausgeber: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen Editor: German Coastal Engineering Research Council

> Verlag: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe Postfach 21 02 53, 76152 Karlsruhe Telefon: 0721 9726-3380 Telefax: 0721 9726-5320 E-Mail: izw@baw.de, www.baw.de Druck: BSH Druckerei, Rostock

#### ISSN 0452-7739 ISBN 978-3-939230-72-4

Die Verfasser sind für den Inhalt der Aufsätze allein verantwortlich. Ein Nachdruck aus dem Inhalt ist nur mit Genehmigung des Herausgebers gestattet: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, Geschäftsstelle, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg Vorsitzender: Dr.-Ing. Frank Weichbrodt, Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern, Paulshöher Weg 1, 19061 Schwerin Geschäftsführerin: Dr. Ingrid Holzwarth, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg Forschungsleiter Küste: Prof. Frank Thorenz, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Jahnstraße 1, 26506 Norden Redaktionsleitung: Dr.-Ing. Annika Schüttrumpf

#### Inhaltsverzeichnis

Oliver Chmiel, Marie Naulin and Andreas Malcherek Combining Turbulence and Mud Rheology in a Conceptual 1DV Model – An advanced continuous modeling concept for fluid mud dynamics	1
Gregor Melling, Hanne Jansch, Bernhard Kondziella, Klemens Uliczka and Bettina Gätje Evaluation of optimised groyne designs in response to long-period ship wave loads at Juelssand in the Lower Elbe Estuary	29
Holger Weilbeer, Axel Winterscheid, Thomas Strotmann, Ingo Entelmann, Suleman Shaikh und Bernd Vaessen Analyse der hydrologischen und morphologischen Entwicklung in der Tideelbe für den Zeitraum von 2013 bis 2018	57
Jürgen Jensen, Andra Ebener, Leon Jänicke, Arne Arns, Krischan Hubert, Andreas Wurpts, Cordula Berkenbrink, Ralf Weisse, Xing Yi und Elke Meyer Untersuchungen zur Entwicklung der Tidedynamik an der deutschen Nordseeküste (ALADYN)	131
Andra Ebener, Leon Jänicke, Arne Arns und Jürgen Jensen Untersuchungen zur Entwicklung der Tidedynamik an der deutschen Nordseeküste – Ein Ansatz zur Identifizierung und Quantifizierung von Tideveränderungen durch lokale Systemänderungen	143
Xing Yi und Ralf Weisse Modellgestützte Untersuchungen zum Einfluss großräumiger Faktoren auf die Tidedynamik in der Deutschen Bucht	173
Krischan Hubert, Andreas Wurpts and Cordula Berkenbrink Interaction of Estuarine Morphology and adjacent Coastal Water Tidal Dynamics (ALADYN-C)	193
Jürgen Jensen, Arne Arns, Sebastian Niehüser, Holger Schüttrumpf, Verena Krebs, Theide Wöffler, Roger Häußling, Nenja Ziesen, Michael Kleyer, Julia Bass, Hilmar von Eynatten, Volker Karius und Ingo Hache Praxisnahes Küstenlabor zur Entwicklung von kurz- und langfristigen Strategien zum Schutz und zur Bewahrung der schleswig-holsteinischen Halligen (Living CoastLab Halligen)	219
Sebastian Niehüser, Martin Klein, Arne Arns und Jürgen Jensen Analysen zum langfristigen Schutz der Halligen – Wechselwirkung zwischen Hydrodynamik und Sedimenttransport	233

Verena Krebs, Nenja Ziesen, Theide Wöffler, Roger Häußling und Holger Schüttrumpf Teilstationäre Hochwasserschutzmaßnahmen als kurzfristige Strategie zum Schutz der nordfriesischen Halligen – Einsatztests unter praxisnahen Bedingungen und Berücksichtigung sozialer Bedürfnisse der Bewohner*innen	263
Ingo Hache, Volker Karius und Hilmar von Eynatten	
Messung, Bewertung und Einflussfaktoren der Trübung in der Wassersäule – Schlussfolgerungen für einen die Sedimentakkumulation optimierenden Küstenschutz auf Hallig Langeneß	297
Julia Bass und Michael Kleyer	
Bestimmung biogeomorphologischer Rückkopplung zwischen Pflanzen und Sedimentation	323
Franziska Staudt, Johanna Wolbring, David Schürenkamp, Benedikt Bratz, Rik Gijsman, Jan Visscher, Huichen Zhang, Finn Mielck, H. Christian Hass, Caroline Ganal, Björn Deutschmann, Stefan Schimmels, Torsten Schlurmann, Nils Goseberg, Holger Schüttrumpf, Henner Hollert and Karen Wiltshire	
Tools for the Improvement of the Efficiency and Sustainability of Shore Nourishments – Results of the research project STENCIL	337
Mike Lieske, Torsten Schlurmann und Nils B. Kerpen	
Seegangsbelastungen (SEELE) – Prozesse der Hydrodynamik bei Interaktion von Richtungsseegang mit Strömung	379

## Combining Turbulence and Mud Rheology in a Conceptual 1DV Model – An advanced continuous modeling concept for fluid mud dynamics

Oliver Chmiel<sup>1</sup>, Marie Naulin<sup>2</sup> and Andreas Malcherek<sup>1</sup>

<sup>1</sup> University of the German Armed Forces, Institute of Hydromechanics and Hydraulic Engineering, Munich, oliver.chmiel@lfu.bayern.de

<sup>2</sup> Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW), Hamburg

#### Summary

Fluid mud influences the tidal dynamics of estuaries. Predictive engineering tools are required for maintenance strategies of estuaries to minimize siltation and lower the economic and ecological costs. Therefore, the non-Newtonian flow behavior of fluid mud has to be considered in numerical models. In this paper, an advanced modeling method is presented in order to simulate the entire depth in an estuary (from clear water to immobile bed) with one model. Within this modeling concept the momentum and the concentration balance equations are solved together with a k- $\omega$ -turbulence model continuously over the entire water column including the fluid mud bottom. In order to achieve this objective, the effective viscosity in the momentum equation has to represent turbulence in the water column and the rheology of mud in the fluid mud bottom. The k- $\omega$  turbulence model is interpreted in a new way, so that it could be applied for fluid mud layers where no turbulence is produced. The viscoplastic, shear thinning behavior of fluid mud is represented by the rheological model of Malcherek and Cha (2011). The rheological viscosity was parameterized for varying shear rate, grain size, and volume solid content. The rheological formulation accounts for a yield stress dependency on the volume solid content and for flocculation. Modeling results of a vertical 1D model are presented describing turbulent and rheological flow equally for the fluid and the solid phase. The formation of a fluid mud layer is shown by vertical velocity and concentration profiles.

#### Keywords

fluid mud, mud rheology, effective viscosity, suspended solids concentration, turbulence damping

#### Zusammenfassung

Flüssigschlick beeinflusst die Tidedynamik der Ästuare. Für die Entwicklung von Unterhaltungsstrategien an Ästuaren werden vorausschauende Methoden und Werkzeuge benötigt, um die Verschlickung zu minimieren und die ökonomischen und ökologischen Kosten zu reduzieren. Hierfür ist es erforderlich, dass das nicht-Newtonsche Fließverhalten von Flüssigschlick in den numerischen Modellen berücksichtigt wird. In dieser Veröffentlichung wird ein neuer Modellansatz präsentiert, der es ermöglicht die gesamte Tiefe in einem Ästuar (vom klaren Wasser bis zum unbeweglichen Boden) mit einem Modell zu simulieren. In diesem Modellkonzept wird die Impulsgleichung und die Transportgleichung zusammen mit einem k- $\omega$ -Turbulenzmodell kontinuierlich über die gesamte Wassersäule bis hin zum Flüssigschlickboden gelöst. Um dieses Ziel zu erreichen, wird eine effektive Viskosität in der Impulsgleichung eingeführt, die sowohl die Wirkung von Turbulenz im freien Wasser als auch die Rheologie von Flüssigschlick am Boden wiedergibt. Das k- $\omega$ -Turbulenzmodell wird neu interpretiert, so dass es auch im Flüssigschlick, in dem keine Turbulenz produziert wird, angewandt werden kann. Das viskoplastische, scherverflüssigende Verhalten von Flüssigschlick wird durch das rheologische Modell von Malcherek und Cha (2011) beschrieben. Die rheologische Viskosität wird dabei durch die Scherrate, den Korndurchmesser und den Feststoffgehalt parametrisiert. Dieses rheologische Modell berücksichtigt eine Fließgrenze, die vom Feststoffgehalt abhängig ist, sowie Flockulation. Die Simulationsergebnisse eines vertikalen 1D-Modells beschreiben die turbulente und rheologische Strömung gleichermaßen für die flüssige wie für die feste Phase. Die Bildung einer Flüssigschlickschicht wird durch vertikale Geschwindigkeits- und Konzentrationsprofile nachgewiesen.

#### Schlagwörter

Flüssigschlick, Rheologie, Effektive Viskosität, Schwebstoffgehalt, Turbulenzdämpfung

#### 1 Introduction

Fluid mud is a high concentrated aqueous suspension of fine-grained sediment and organic matter. It is often associated with a lutocline, a sudden change in sediment concentration with depth. Fluid mud typically forms in near-bottom layers in lakes and estuaries, but it can occur in any water body with sufficient fine-sediment supply and periods of low intensity flow.

The occurrence of fluid mud is often leading to high maintenance costs of waterways such as estuaries, e. g. for dredging, prevention of pollutant propagation and nature conservation. In Germany in particular, the Ems Estuary is affected by fluid mud: fine-sediment concentrations up to 300 kg/m<sup>3</sup> and fluid mud layers up to a thickness of 2 m were measured (Schrottke 2006). Additionally, the occurrence of high concentrated suspended solids may lead to ecological problems in the estuary, such as increased oxygen demand due to absorbed organic matter. Especially during summer time, the minimal oxygen demand for fish is not preserved (Claus and Konermann 2014). Improved predictive methods are needed to reduce future ecological and economical costs.

The flow behavior of high-concentrated fine sediment suspensions is non-Newtonian and highly dependent on the shear rate, the grain size and the volume solid content. As a consequence, in classical hydrodynamic numerical models the applied Reynolds equations for Newtonian flow behavior are not suitable to model the fluid mud dynamics.

In hydrodynamic numerical models for large-scale applications, e. g. coastal engineering, the interaction between turbulent flow behavior and fluid mud are considered in different ways. Within the framework of the European project MAST2-CT92-0013, a threedimensional hydrodynamic free surface flow model was developed, including a sediment module to simulate cohesive sediment problems (Le Normant et al. 1993). The fluid mud dynamics were modeled by a depth-averaged approach, where fluid mud was represented by a constant high viscosity (Malcherek et al. 1996). This model was applied for the Loire Estuary under combination of a fluid mud module, erosion and deposition and a vertical 1D bed consolidation module (Le Normant 2000).

Another numerical solution was developed by H. R. Wallingford (Crapper and Ali 1997). However, their two-dimensional model is not suitable for the simulation of fluid mud, since the rheological shear-thinning behavior of mud as a function of the shear rate and the solid content is not considered. Furthermore, in the Delft3D software package a module for the simulation of fluid mud has been integrated by Winterwerp (2002). This module describes a depth-averaged fluid mud layer which is decoupled with the fluid layer above. The interaction of both layers is described by the interfacial shear stress. van Kessel et al. (2011) extended this approach by a dimensionless fluff layer exchange model which later was implemented into a three-dimensional model. Herein an additional layer was introduced where fine sediments were stored between the fluid and the mud layer. However, these models are not applicable for the simulation of the rheological behavior of fluid mud since they do not account for the rheology variation with solid content.

A new method was developed to simulate fluid mud dynamics in Knoch and Malcherek (2011) and Wehr (2012). The complex non-Newtonian behavior of fluid mud was simulated by an isopycnal numerical model. Within this approach, the fluid mud layer was discretized in layers of same bulk density, so-called isopycnals. The numerical solution of the isopycnal fluid mud layer is based on a three-dimensional hydrodynamic model in isopycnal coordinates (Casulli 1997). In this context, the shear-thinning flow behavior of fluid mud and the rheometric investigation of the yield stress were analyzed. Rheometrical measurements with different volume solid contents were performed so that for the first time a formulation was found for the rheological fluid mud viscosity, which accounts for the shear rate and the solid volume content simultaneously (Malcherek 2010; Malcherek and Cha 2011). However, within the isopycnal fluid mud approach the vertical interaction of individual layers under consideration of turbulence could not been realized.

In contrast to simulate mud dynamics by separating fluid mud and fluid layers, a continuous modeling approach was presented by Le Hir et al. (2000). Within this technique, water and soft sediment are regarded as a whole, so that vertical momentum diffusion is accounted for. The viscosity of the continuous phase was described in that case as the sum of the eddy viscosity and the rheological viscosity. The mud viscosity was parameterized according to a Bingham fluid, the computation of the eddy viscosity followed the mixing length concept. Nevertheless, Le Hir and Cayocca expanded their continuous model into 3D in order to simulate oceanic gravity flows (Le Hir and Cayocca 2002).

Another continuous approach to simulate the dynamics of fluid mud was developed by Roland et al. (2012): The so-called FLMUD module is based on Cartesian coordinates. The module was validated qualitatively by numerical experiments. However, a detailed validation and application to an estuary are still needed.

The application of a two-equation turbulence model was investigated by Toorman (2002) for concentrated suspension flows. He presented modifications within the classical k- $\varepsilon$ -turbulence model while fluid mud is apparent. With increasing suspended solid concentrations towards the bottom, the flow is regarded to become more and more laminar, turbulence is destructed. The damping of turbulence was investigated in case of suspended solid concentrations and a reconstruction of the boundary conditions was explained as well as additional damping parameters were introduced. Modifications of the bottom boundary conditions were mentioned to be valid only for low concentrated suspensions,

since for higher concentrations and laminar flow the shear stress velocity is overestimated. This was corrected by the introduction of additional empirical damping functions (Toorman 2002). Summing up, the k- $\varepsilon$ -turbulence model is not applicable for fluid mud dynamics. As the lutocline and the fluid mud region are characterized by laminar flow conditions (k = 0), the k- $\varepsilon$ -model will always be unstable in that case, since there is no laminar flow solution for  $\varepsilon$ . In order to apply a two-equation turbulence model within the continuous modelling approach a turbulence model is needed which guarantees numerical stability in laminar flow conditions. This can be achieved with the k- $\omega$ -turbulence model.

The objective of this paper is to present a numerical modeling concept which is called the advanced continuous modeling approach. The concept is presented by means of a continuous vertical 1D model including a k- $\omega$ -turbulence model and fluid mud rheology of the Ems Estuary. The model is applicable for turbulent flow in low concentrated suspensions as well as for laminar flow in high concentrated suspensions. The formation of river bed and a fluid mud layer is shown by applying the continuous modeling approach where turbulence is automatically turned off and rheological behavior becomes dominant. The turbulent eddy viscosity and the rheological viscosity are combined into an effective viscosity. The rheological viscosity, which was parameterized for Ems and Weser muds by Malcherek and Cha (2011) was implemented to account for the complex variations of the rheological viscosity. The computation of turbulence follows a k- $\omega$ -turbulence model, which was adopted to model also zero turbulence inside high concentrated mud. Additionally, the distribution of sediments is calculated by the transport equation for suspended solids.

The results of this modeling method are presented and improvements are discussed for future modeling techniques.

#### 2 Methodology

During the transport of suspended cohesive sediments, a density driven stratification of the vertical water column occurs. Different layers can be defined over the water depth, such as the low concentrated suspension layer, the high concentrated suspension layer, and the fluid mud layer.

Knowing that velocity fluctuations can have relevant influence on the settling resistance of a particle, the turbulent effects in granular suspensions have to be investigated. Since turbulent velocity fluctuations interact with sediment particles within the flow, an overall decrease of turbulence with increasing density can be observed and leads to a laminarization of the flow (Malcherek and Cha 2011). In comparison to low concentrated suspensions which are driven by turbulent effects, the laminar flow of the fluid mud layer depends on its rheological properties. A query-based distinction between turbulent and laminar flow regimes should be prevented, since the vertical stratification and the height of the fluid mud layer changes during different flow situations, as recent field measurements of Becker et al. (2018) showed. This leads to the argument that in a numerical model the transition from turbulent to rheological flow cannot be predicted in advance; it has to be a result of the numerical model itself. Therefore, it is necessary to investigate the continuous modeling approach for future modeling of fluid mud dynamics. Within this approach, the suspension is regarded as a continuum, where particle-particle interaction like flocculation and hindered settling are considered by empirical functions. Furthermore, this concept is characterized by a continuous transition between the water and the solid phase. Sharp changes of the modeling regime will be prevented, as it would have been the case for query-based fluid mud models.

In order to couple flow dynamics of Newtonian and non-Newtonian behavior, the viscosity in the momentum equations is regarded as an effective viscosity  $v_{eff}$ , namely the ratio of the shear stress to shear rate. This effective viscosity is equivalent to the turbulent viscosity  $v_t$  for the water column when there is no suspended matter present. With increasing suspended matter concentration, turbulence is damped and rheological flow behavior becomes more important so that  $v_{eff}$  turns into the rheological viscosity  $v_{rh}$ , see Figure 1.

Using the effective viscosity as the only material parameter the three-dimensional momentum balance is written as:



Figure 1: The schematic vertical profiles of the turbulent, rheological and effective viscosity and the resulting velocity profile are shown over total water depth, including the consolidated bottom and fluid mud.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + f_i, \tag{1}$$

with u and p being time averaged quantities for the flow velocity and pressure and  $f_i$  describing the influence of external forces.

The advanced continuous modeling concept which is presented in this paper consists of the following main characteristics:

- 1. Mud rheology as a function of the solid content.
- 2. Modified k- $\omega$ -turbulence model for stable laminar flow solutions.
- 3. Introduction of the effective viscosity as a transitional function from turbulent to rheological flow and vice versa.
- 4. Hindered settling within the sediment transport equation.

The numerical implementation of the mentioned aspects is described in the following sections.

#### 2.1 Rheological properties of fluid mud in the Ems Estuary

Fluid mud is characterized as an aqueous mixture of clay and silt particles combined with organic matter. Mud samples show bulk densities of  $\rho_b = 1080-1200 \text{ kg/m}^3$  with

corresponding bulk solid concentrations  $c_b = 10-250 \text{ g/l}$  (McAnally et al. 2007). Papenmeier et al. (2012) distinguished low-viscosity (20–200 g/l) and high-viscosity (200–500 g/l) muds. In literature different typical mean particle diameters were measured for fluid mud, reaching from 4.3  $\mu$ m to >10  $\mu$ m (Mitchell and West 2002; Wells and Coleman 1981). Fluid mud samples from the lower Ems show particle size distributions in the same range with  $d_m = 10-20 \ \mu$ m, see Figure 2.

Fluid mud behaves as a viscoplastic fluid with a true yield stress. Its flow behavior is characterized by a non-linear increase of the shear stress for low-deformation rates and Bingham flow behavior for higher shear rates (Toorman 1995). The viscosity decreases with increasing shear rates thus fluid mud is a shear thinning fluid (Malcherek and Cha 2011). Shear thinning behavior in fluid mud can be explained by flocculation and floc break-up processes induced by organic material (Faas and Wartel 2006).



Figure 2: The particle size distribution is shown as a frequency distribution (upper figure) and as cumulative grading curves (lower figure) of fluid mud samples from the lower Ems between Leerort (WP3) and Weener (WP22). They were measured with a Horiba Particle Sizer. The evaluation results in a median particle diameter 10  $\mu$ m < d<sub>m</sub> < 20  $\mu$ m. According to the Wentworth scale, the sample can be described as fine silt (Wentworth 1922).

It is suggested in the Bingham model that mud has a Newtonian flow behavior when exceeding the critical yield stress  $\tau_y$  (Coussot 1997). In fact, rheometrical measurements do not show such behavior, e.g. Malcherek (2010). The Worrall-Tuliani model which is based on structural kinetics theory describes the low shear rate region in an additional term, and includes formulations for flocculation and floc break-up (Worrall and Tuliani

1964). The Worrall-Tuliani model was extended by Malcherek and Cha for the dependency on the volumetric solid content  $\phi$  (Malcherek 2010):

$$\tau(\dot{\gamma}, \phi) = \tau_{\gamma}(\phi) + \mu_{\infty}(\phi)\dot{\gamma} + \frac{c_{floc}(\phi)\Delta\mu(\phi)\dot{\gamma}}{c_{break}\dot{\gamma} + c_{floc}(\phi)},$$
(2)

where  $\tau_y$  is the yield stress,  $\mu_{\infty}$  is the appearing viscosity when all floc bonding is destroyed,  $\dot{\gamma}$  is the shear rate,  $\Delta\mu$  is the appearing viscosity when all floc bonding is intact and  $c_{floc}$  and  $c_{break}$  are parameters for growth and destruction of flocs. Here, floc growth has to be understood as shear induced growing of flocs. In this context shearing can also be responsible for the opposite, namely floc destruction. Both processes occur simultaneously, as documented in Spicer and Pratsinis (1996).

Within the MudSim project, fluid mud samples were analyzed from the Ems and Weser estuaries due to their rheological behavior. The mud samples were prepared for different solid contents  $\phi$  and measured with an Anton Paar rotational rheometer. Different rheological models were applied for parameter estimation. Here we present the application of an extended Worall-Tuliani model. According to Eq. (2), five parameters had to be approximated in dependency of  $\phi$ :  $\tau_{\nu}$ ,  $\mu_{\infty}$ ,  $\Delta u$ ,  $c_{floc}$  and  $c_{break}$ .



Figure 3: Performed yield stress measurements during the project MudSim for different solid contents  $\phi = 0.055, 0.07, 0.085, 0.1$  and a corresponding fitting curve which applies the Bingham relation between yield stress and solid content (modified after (Malcherek and Cha 2011). Measurements were conducted in CSS mode and plate-plate configuration under a constant temperature  $T = 20^{\circ}$ C.

First, the relation between the yield stress  $\tau_y$  and  $\phi$  was investigated. Figure 3 shows the results of the rheometrical yield stress measurements. Samples with four different volume solid contents ( $\phi = 0.055, 0.07, 0.085, 0.1$ ) were investigated in CSS (controlled shear stress) mode and plate-plate configuration to detect the initiation of movement. A

constant temperature of  $T = 20^{\circ}$ C was set during the measurements, see Malcherek (2010) for more details of the conducted measurements. The yield stress increases nonlinearly with solid content. Similar behavior is presented in Kotzé et al. (2015) for the relation of yield stress and solid content for waste water sludge. Here the scattering of the measured data can be explained by variations in the grain and floc composition of single samples.

For numerical simulations the yield stress was fitted using the formulation:

$$\tau_y = \tau_{y0} \phi^n \tag{3}$$

The fitting parameters  $\tau_{y0} = 6980$  Pa and n = 3.638 verified the data obtained by Migniot (1968), stating that n is close to 4.

In case of very high shear rates, it can be assumed that all floc bondings are destroyed, the resulting viscosity is described by  $\mu_{\infty}$ . Further it is assumed that in case of  $\phi = 0$ ,  $\mu_{\infty}$  should be equal to the dynamic viscosity of water  $\mu_0 = 0.001$  Pa s. This leads to following formulation (Eq. 4):

$$\mu_{\infty} = \mu_0 \exp(a_1 \phi), \tag{4}$$

with  $a_1 = 20.92$ . The viscosity  $\Delta \mu$  for intact floc bondings was parameterized by following a linear relation, where  $b_2 = 8.439$  Pa·s (Eq. 5).

$$\Delta \mu = b_2 \phi \tag{5}$$

Finally, the process of floc growth  $c_{floc}$  is expected to be a function of solid content as well, which is parametrized by  $a_2 = 88.1$  Hz and  $b_3 = 1.403$  (Eq. 6)

$$c_{floc} = a_2 \phi^{b_3},\tag{6}$$

and  $c_{break} = 0.2619$  is describing the destruction of flocs due to shearing. Eq. 3–Eq. 6 were included in Eq. (2) in order to obtain the necessary parameters via surface fitting (Malcherek 2010).

For the implementation of the rheological viscosity into the continuous modeling approach the kinematic rheological viscosity is calculated as

$$\nu_{rh} = \frac{\mu_{rh}}{\rho_b} = \frac{1}{\rho_b} \left( \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} + \mu_0 \exp(a_1 \phi) + \frac{c_{floc} \Delta \mu}{c_{break} \dot{\gamma} + c_{floc}} \right). \tag{7}$$

As this parametrization shows, the rheological model depends on the solid volume content, among others. As a consequence, the rheological model covers the entire water column from fluid mud and high concentrated suspensions to low concentrated suspensions, e. g. in case of low or zero concentrations, the yield stress decreases and the rheological viscosity is reduced to the dynamic viscosity  $\mu_0$  of water. Therefore, we claim that this approach can be applied to fluid mud as well as to clear water when turbulence is considered adequately. Hence, the rheological model is able to represent Newtonian fluids as well as non-Newtonian fluids.

#### 2.2 The turbulence model

Within this work the k- $\omega$ -turbulence model (Wilcox 1994) is applied for a continuous stratified suspension in a homogeneous boundary layer approach. The fundamental equations read:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (v_{rh} + v_t \sigma_*) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k + G - \beta^* k \omega \tag{8}$$

$$\frac{\partial\omega}{\partial t} + u_j \frac{\partial\omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\nu_{rh} + \nu_t \sigma_\omega) \frac{\partial\omega}{\partial x_j} \right) + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \omega^2 \tag{9}$$

The turbulence model includes the creation of turbulence due to shear  $P_k = v_t \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2$ , transport of turbulent kinetic energy k, turbulence damping G due to density stratification and  $\omega$  as the dissipation rate of turbulent kinetic energy. Classical constants are applied in the k- $\omega$ -model,  $\gamma^* = 1$ ,  $\alpha = 5/9$ ,  $\beta^* = 0.09$ ,  $\beta = 3/40$ ,  $\sigma_* = 0.5$  and  $\sigma_{\omega} = 0.5$  (Wilcox 1994). Stable stratification is assumed, so that the buoyancy term is not considered for the scale where dissipation occurs (Uittenbogaard et al. 1992). G describes the destruction of turbulence due to stratification effects (Eq. 10), with Sc as the turbulent Schmidt number (Violet 1988). Here, stratification occurs due to density gradients, with  $\rho_b$  as the bulk density of the suspension.

$$G = \frac{g}{\rho_b} \frac{\nu_t}{sc} \frac{\partial \rho_b}{\partial z} \tag{10}$$

The turbulent viscosity is calculated by means of the turbulent kinetic energy k and the dissipation rate  $\omega$  (Eq. 11).

$$\nu_t = \gamma^* \frac{k}{\omega} \tag{11}$$

In contrast to the k- $\varepsilon$ -turbulence model, for instance, the k- $\omega$ -turbulence model is applicable for low-Reynolds flows and for modeling the viscous sublayer without introducing additional damping functions. Within the viscous sublayer the condition k = 0 has to be full filled, which does not produce numerical instabilities in the  $\omega$ -equation. The transport equation for  $\omega$  can be rewritten by simple mathematical substitution of  $P_k$  and  $v_t$ , according to:

$$\frac{\partial\omega}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\nu_{rh} + \nu_t \sigma_\omega) \frac{\partial\omega}{\partial x_j} \right) + \alpha_\omega \gamma^* \omega^2 \left( \frac{\partial u}{\partial z}_{\omega} \right)^2 - \beta \omega^2$$
(12)

With that form it is evident that the  $\omega$ -equation is being decoupled of the k-equation. Therefore the  $k-\omega$  model is able to provide a stable solution for laminar flow, even when the turbulent kinetic energy is zero.

The bottom boundary conditions are set to  $k_b = 0$  and  $\omega_b = S_r \frac{u_*^2}{v_0}$ , with  $u_* = \sqrt{gJh}$ being an estimate of the shear stress velocity, J the slope of the bed,  $S_r = \frac{2500}{(k_s^+)^2}$ ,  $k_s^+ = \frac{u_*k_s}{v_0}$  and  $k_s = 3 \ d_m$ . This boundary condition is applied at the bottom boundary of the numerical model which could be below a fluid mud layer. The turbulent kinetic energy at the surface boundary is described by a homogeneous Neumann condition, whereas a Dirichlet boundary condition is assumed for  $\omega$  at the free surface.

In order to extend the k- $\omega$ -model to the whole simulation domain, i.e. also into a fluid mud bottom, the behavior in mud has to be analyzed: When a high concentration mud is formed and the flow does not exceed the yield stress, the shear rate is zero and turbulence production  $P_k$  is also zero: The k- $\omega$  as well as the k- $\epsilon$ -model do not predict any turbulence which is absolutely correct. However, the k- $\epsilon$ -turbulence model was originally developed for fully turbulent conditions and it is not valid for low-Reynolds flows or the viscous layer near the immobile bed. This behavior of the k- $\epsilon$ -model is controlled by the bottom boundary condition  $\epsilon_b = \frac{u_s^3}{\kappa z_0}$ , where  $z_0$  describes the modeling boundary and  $\kappa = 0.41$  the Kármán constant. The application of the turbulence model for a continuous phase, including immobile conditions, makes a model necessary which is able to overcome the disadvantage of the k- $\epsilon$ -model.

The advantage of the k- $\omega$ -turbulence model is the ability to consider the Stokes' wall condition ( $u_b = 0, k_b = 0$ ) in the bottom boundary conditions for  $\omega$ . Doing so, the k- $\omega$ -model is able to resolve the viscous layer near the immobile bed. In case of an immobile bed, i.e. no shear rate and no turbulence production at the bed,  $\omega$  will be constant and equal to its lower boundary value  $\omega_b$ .

Hence, the k- $\omega$ -model is capable to reproduce the transient behavior from laminar to turbulent flows. Here the turbulent kinetic energy is zero and therefore  $v_t$  is zero. In this case the viscosity reduces to its laminar value. There remains the question what is  $\omega$  in that case. Since the introduction of the k- $\omega$ -model there is a discussion, what  $\omega$  really represents. Because it has a finite value at closed boundaries where the turbulent kinetic energy is zero, it cannot be interpreted as a dissipation rate. Within this modeling concept  $\omega$  is rather the potential of a dissipation rate. It describes the ability of turbulence destruction due to the solid content and not the actually destroyed turbulent energy.

The modeling approach presented here does not need the distinction of mud and water column by a lutocline anymore. Therefore, we do not need artificial boundary conditions at this artificial boundary any more. Here a lot of work was done in the past: Toorman for example proposed to include the destructive term into the bottom boundary conditions of the k- $\epsilon$  turbulence model, which was done by the flux Richardson number  $Ri_f$  (Toorman 2002). This procedure prevents the bottom boundary condition from being set to zero for turbulent kinetic energy, which has to be the case in fluid mud. Setting k = 0 at the bottom, would have provided an unstable numerical scheme, since the dissipation equation includes division by k. Additionally, while reducing the bottom boundary conditions, empirical reduction parameters for the turbulence production term  $P_k$  would have been needed to prevent the model from producing turbulence inside the mud layer. Therefore, such an approach is only valid when a pronounced lutocline is formed. In reality, all kinds of concentration distributions can occur. This can only be described by a continuous modeling approach in combination with a suitable turbulence model. This new development of the continuous approach is proposed in this paper.

#### 2.3 The effective viscosity

The turbulent viscosity has to become zero in a resting mud bottom on the one hand, and on the other hand, the rheological viscosity has to vanish if no suspended matter is present.

Therefore, we assume the effective viscosity to be the sum of both parts (Figure 1), i.e. the turbulent eddy viscosity  $v_t$  and the rheological viscosity  $v_{rh}$ .

$$\nu_{eff} = \nu_t + \nu_{rh} \tag{13}$$

It has to be mentioned that both viscosities have different physical meanings. As an increase of turbulent viscosity is interpreted as an increase of turbulence, the rheological viscosity goes with an increase of the solid content and therefore with a decrease of turbulence. In a resting sediment bottom the turbulent kinetic energy is zero and therefore the turbulent viscosity also vanishes. On the other hand, in a clear water column the rheological viscosity transforms into the molecular viscosity of water.

#### 2.4 Transport equation

The transport of suspended material is described by the time averaged transport equation for suspended solids, including the concentration flux  $\Phi_c = u_{i,s}c - K_t \operatorname{grad}(c)$ , where  $K_t$  is the eddy diffusivity (Malcherek 2016).

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \operatorname{div}\left(u_i c - K_t \operatorname{grad}(c)\right) + \frac{\partial w_s c}{\partial z} = 0$$
(14)

where  $w_s$  is the particle settling velocity.  $K_t$  is expressed by the turbulent Schmidt number  $Sc = \frac{v_t}{\kappa_t}$ . It is shown in Absi et al. (2011) that  $Sc \approx 1$  for turbulent diffusion of small particles. Both, the boundary conditions at the water surface and at the bottom are implemented as zero-flux Neumann conditions.

As it is elaborated in Whitehouse et al. (2000), the settling velocity  $w_s$  is difficult to approximate since it depends on a variety of different parameters like density variations, flocculation ability, salinity and hindered settling amongst others. Furthermore, the settling velocity for cohesive sediments is always site-specific. A common approach is based on the equilibrium of gravitational and drag forces, which results in the Stokes' formula (Eq. 15) for stationary settling of a single particle, with d being the particle diameter,  $\mu$ being the dynamic viscosity of the surrounding fluid, g the gravity acceleration and  $\rho_s$ ,  $\rho_f$ the solid and fluid density, respectively (Malcherek 2016).

$$w_{s,0} = -\frac{(\rho_s - \rho_f)gd^2}{18\mu}$$
(15)

Takács et al. (1991) divide the settling of particles into four regimes defined by their concentration: (i) discrete particle settling, (ii) flocculent particle settling, (iii) hindered settling, and (iv) compression settling. The hindered settling regime begins at concentrations greater than 2 g/l, according to them. Furthermore, Winterwerp (2002) explains that hindered settling occurs until the gelling concentration  $c_{gel}$  of mud is reached. For three evaluated experimental data sets, he identifies the gelling concentration between 40 g/l and 120 g/l. In the present model the effect of hindered settling is taken into account by a concentration dependent reduction of Stokes' settling velocity:

$$w_{s,HS} = \frac{1}{2} w_{s,0} \left( 1 - \tanh\left(\gamma_1 \left(\frac{c}{c_{gel}} - 1\right) + \gamma_2\right) \right). \tag{16}$$

The parameters  $\gamma_1$  and  $\gamma_2$  are shape parameters, describing the sharpness and the horizontal translation of the function. Both parameters depend on the type of sediment.

In literature several approaches exist to account for hindered settling. Figure 4 gives a graphical comparison of the dimensionless settling velocities computed by the approaches of Richardson and Zaki (1954), Takács et al. (1991), van Rijn (1993), Winterwerp (2002) and Eq. 16. Since the approach of Winterwerp was evaluated for the Ems estuary, it is regarded as reference. Therefore the parameters were set to  $c_{gel} = 100 \text{ g/l}$ ,  $\gamma_1 = 4.8$  and  $\gamma_2 = 2.7$ .

This settling velocity approach does not take into account flocculation because  $W_{s,0}$  is calculated according to the classical Stokes' formulation. However this approach could also be valid to describe flocculation when settling velocity formulations are applied including floc dynamics. Here, for example, the approach of Dyer and Manning (1999) could be used, who describe a settling velocity formulation based on fractal floc dimensions, which is applicable for flocculation processes.

The hyperbolic tangent function is well suited for the description of the settling velocity. The parameters of this function can easily be adopted to experimental data sets for hindered settling.



Figure 4: Comparison of different hindered settling approaches to calculate the settling velocity of sediments for  $c_{gel} = 100 \text{ g/l}$  and  $d_m = 20 \mu \text{m}$ .

#### 2.5 Description of the numerical model

In order to investigate the continuous transition of the processes in vertical direction, the three-dimensional estuarine system is reduced to a vertical one-dimensional turbulent boundary layer flow. To describe the formation of fluid mud, the momentum equation including the effective viscosity  $v_{eff}$  (Eq. 13) is coupled with the transport equation (Eq. 14) and the turbulence model.

For homogeneous boundary layer problems in an open channel, Eq. (1) can be rewritten as

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + Jg \tag{17}$$

with  $\frac{\partial u}{\partial t}$  describing the unsteady evolution of the mean flow velocity in x-direction over depth (z-direction) and Jg accounting for external forces due to the bed slope J. The velocity boundary condition at the bottom reads a no-slip condition,  $u_b = 0$ , whereas the surface boundary is described by a homogeneous Neumann condition.

For a homogeneous boundary layer problem, the transport equation for mean concentration c is written as:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_t \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial w_s c}{\partial z},\tag{18}$$

while the k- $\omega$ -model reads:

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( (\nu_{rh} + \nu_t \sigma_*) \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P_k + G - \beta^* k \omega$$
<sup>(19)</sup>

$$\frac{\partial\omega}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( (\nu_{rh} + \nu_t \sigma_\omega) \frac{\partial\omega}{\partial z} \right) + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \omega^2$$
(20)

Due to the rheological viscosity and the yield stress  $\tau_y$ , the model is able to simulate the bottom, even for bottom velocities u = 0. In that case, there is no vertical velocity gradient, so that turbulence production and the turbulent viscosity is also zero.

This approach allows to define  $k_b = 0$ , as the bottom boundary condition for turbulent kinetic energy.

Inside high concentrated mud, turbulence is supposed to be destructed and is expected to reach very small values or even zero. In turn, the potential of the dissipation should be constantly high inside the mud.

In addition with the implemented rheological viscosity, the model is able to switch automatically between no-flow, rheological flow and turbulent flow.

#### 3 Results of the 1DV model

Before showing the qualitative behavior of fluid mud formation, modeling results are compared with results of existing 1DV models in case of low and intermediate concentrations. Afterwards, the formation of a fluid mud layer and the retroactive effect on the velocity, the turbulent kinetic energy and the turbulent viscosity are described. Additionally, the resulting effective viscosity is presented. The model is based on a semi-implicit finite differences Crank-Nicolson scheme with a grid resolution  $\Delta z = 0.05$  m and a time step  $\Delta t = 0.05$  s.

#### 3.1 Comparison to related studies

As one of the results of the COSINUS-project within the MAST3 research programme, Winterwerp et al. (2002) presented a 1DV model to study the behavior of concentrated benthic suspension flows. Turbulence was modeled by the k- $\epsilon$  turbulence model, including Munk-Anderson damping functions to consider stratification effects. In this study, the rheological viscosity was not considered. Such simplification is reasonable for low concentrations but not for high concentrated flows any more. Modeling results were presented for  $c_0 = 37$  mg/l as homogeneously distributed initial concentration and for different shear stress velocities. Furthermore, constant water depth h = 16 m and constant settling velocity  $w_s = -0.5$  mm/s were assumed. Figure 5 describes vertical steady state concentration profiles for mentioned settings. On the left hand side the results of the modeling approach presented here and on the right hand side) the COSINUS results are shown.



Figure 5: Comparison of the (left) simulated concentration profiles with (right) earlier results of Winterwerp et al. (2002) for low concentrations. The settings were kept similar: h = 16 m, constant  $w_s = -0.5$  mm/s,  $c_0 = 37$  mg/l and varying shear velocities. Here,  $u_* = 11.4$  mm/s, 10.0 mm/s, 8.7 mm/s and 7.7 mm/s are chosen.

The shape of the concentration profiles depends on the shear velocity  $u_*$ . With increasing shear velocity turbulence increases, which counteracts the settling of particles. The concentration profiles are regarded to be qualitatively comparable for both 1DV models, however within the COSINUS results particles tend to settle quicker. This behavior is explained when observing the modeled turbulent viscosity profiles, shown in Figure 6 (left). Additionally, the analytical solution  $v_t = \kappa u_* z \left(1 - \frac{z}{h}\right)$  is given. Differences between the analytical and the numerical solutions are due to the turbulence damping term (Eq. 10), which reduces the turbulent kinetic energy when density gradients occur. While regarding maximum dimensionless values for turbulent viscosity in the range  $v_t^+ = 0.07 - 0.078$ , the COSINUS model predicts values in the range  $v_t^+ = 0.017 - 0.048$ . The differences are due to the added Munk-Anderson damping functions within the COSINUS

model. However, greater turbulence is responsible for the steeper concentration profiles in comparison to the results of Winterwerp et al. (2002).

While describing the continuous transition from turbulent to rheological flow, the rheological viscosity must be regarded in case of low concentrations. Figure 6 (right) presents the corresponding vertical profiles of the dimensionless rheological viscosity  $v_{rh}^+$ . Since the particle concentration is low in this case, the rheological viscosity is low, as well. It can be seen that the rheological viscosity has minor influence in comparison to the turbulent viscosity. This will change when higher concentrations are considered.

It was shown, that the modeling approach presented here can be applied for low concentrations providing comparable results to earlier studies without changing any model parameters. At low concentrations, the influence of  $v_{rh}$  is low, as well and the flow is modeled to be fully turbulent; at high concentrations only the rheological viscosity is taken into account.



Figure 6: Comparison of the simulated dimensionless (left) turbulent and (right) rheological viscosity profiles. Additionally, the analytical solution is shown for the parabolic turbulent viscosity profile. Numerical settings were set to: h = 16 m, constant  $w_s = -0.5$  mm/s,  $c_0 = 37$  mg/l and varying shear velocities. Here,  $u_* = 11.4$  mm/s, 10.0 mm/s, 8.7 mm/s and 7.7 mm/s are chosen.

Le Hir and Cayocca presented another 1DV model, which is based on a continuous modeling approach (Le Hir and Cayocca 2002). They evaluated their model for initial concentrations  $c_0 = 0.1$ , 1, 10 and 30 g/l. The turbulence closure is achieved by a simple mixing-length approach, including the gradient Richardson number and empirical parameters to account for turbulence damping. Transport of turbulence was not taken into account. The so-called generalized viscosity was introduced, including the turbulent viscosity and the rheological viscosity according to Bingham's law.

Their model is based on a homogeneous initial concentration, a constant settling velocity  $w_s = -1 \text{ mm/s}$ , h = 10 m and  $u_* = 0.01 \text{ m/s}$ , while the results represent the final stationary distribution.



Figure 7: Comparison of the (left) simulated concentration profiles with (right) earlier results of Le Hir and Cayocca (2002) for initial concentrations  $c_0 = 0.1$ , 1, 10 and 30 g/l. Numerical settings were kept the same: h = 10 m, constant  $w_s = -1$  mm/s and  $u_* = 0.01$  m/s.

Figure 7 presents a comparison of vertical concentration profiles for both, the model of Le Hir and Cayocca and the new model presented in this paper. Initial concentrations  $c_0 = 0.1$ , 1, 10 and 30 g/l were chosen. The steady state concentration profiles show a comparable behavior, however differences in the shape are explained by differing turbulence, rheological and hindered settling models. Regarding the concentration profiles for  $c_0 = 10$  g/l and 30 g/l in 7 (left), the creation of a concentrated mud layer can be observed.

Figure 8 presents the corresponding dimensionless turbulent and rheological viscosity profiles. The results for turbulent viscosity show the known parabolic shape, being zero at the bottom and the water surface. However, for  $c_0 = 10$  g/l and 30 g/l turbulent viscosity becomes zero above the bottom at z/h = 0.05 and z/h = 0.1, respectively. In this layer no turbulence occurs, which means that there is laminar or no-flow at this position. The corresponding behavior for the rheological viscosity is shown in Figure 8 (right). An increase of rheological viscosity is visible below z/h = 0.05 and z/h = 0.1 for  $c_0 = 10$  g/l and 30 g/l.



Figure 8: Steady-state solutions of the simulated dimensionless (left) turbulent and (right) rheological viscosity profiles for initial concentrations  $c_0 = 0.1$ , 1, 10 and 30 g/l concentrations. Numerical settings were set to: h = 10 m, constant  $w_s = -1$  mm/s and  $u_* = 0.01$  m/s.

It is shown that this modeling approach is capable of simulating low and intermediate concentrated flows without changing parameters. Results of the new model are qualitatively comparable with the results of Le Hir and Cayocca (2002). The model automatically recognizes laminar and no-flow regimes, which can be seen in the velocity profiles. The creation of immobile bed and the corresponding velocity profiles are presented in section 3.2.

#### 3.2 Application for high concentrations

In order to enforce the creation of a high concentrated bottom layer within the model, two possible strategies can be followed. (i) The initiation of a high concentrated bottom and a lower concentration above. (ii) The initiation of a homogeneously distributed high concentration over the entire water depth. The second was applied within this model, with an initial concentration  $c_0 = 30$  g/l. The initial conditions for velocity, turbulent kinetic energy, dissipation rate and turbulent viscosity were set to zero.

Following parameters had been applied: h = 10 m, as constant water depth,  $J = 2 \cdot 10^{-5}$  and  $z_0 = 6.8 \cdot 10^{-5}$  m.

#### 3.2.1 Formation of a concentrated mud layer

The formation of a fluid mud layer is shown in Figure 9 for different mean particle diameters, whereas the initial concentration is  $c_0 = 30$  g/l. First, results are presented for vertical steady state velocity and concentration profiles. Velocity profiles were made dimensionless due to division by  $u_*$ . Different mean particle diameters  $d_m = 15 \,\mu\text{m}$ ,  $30 \,\mu\text{m}$ ,  $63 \,\mu\text{m}$  were chosen to show the different settling behavior.

The creation of high concentrated mud (c > 250 g/l) at the bottom is visualized by the sudden jump in the concentration profile. The fluid mud layer is indicated by the lutocline layer, which describes the region of rapid change in density or concentration gradient by depth (Dronkers and van Leussen 2012). Furthermore, the lutocline layer describes the transition of the mobile fluid mud to the stationary fluid mud layer. This transition is characterized by a steep velocity gradient and therefore high shear rates  $\dot{\gamma} = \frac{\partial u}{\partial z}$ . A smaller mean particle diameter results in lower settling velocities, therefore the concentration profile for  $d_m = 63 \,\mu$ m presents the sharpest jump in the velocity and concentration profiles. In this case, there is no flow velocity at the bottom, whereas for  $d_m = 15 \,\mu$ m and 30  $\mu$ m it shows mobile mud layers. This corresponds to the concentration profiles, since the concentration profile for  $d_m = 15 \,\mu$ m, for instance, is more distributed over depth and therefore a lower concentrated bottom is formed as it is the case for greater  $d_m$ . Zero movement of concentrated mud is explained by the yield stress  $\tau_y$ , which is a function of the solid content Eq. (3) and which is not exceeded by the shear stress  $\tau = \rho gh J$ .



Figure 9: The numerical results of the vertical profiles for flow velocity and concentration are shown, while h = 10 m,  $J = 2 \cdot 10^{-5}$ ,  $c_0 = 30$  g/l and the mean particle diameter is varied ( $d_m = 15 \ \mu$ m,  $30 \ \mu$ m,  $63 \ \mu$ m). The results are presented for steady state. Transitional behavior of no flow, rheological flow and turbulent flow is shown.

#### 3.2.2 Turbulence production in mud

Furthermore, the simulated turbulent kinetic energy k and the dissipation rate are shown for this scenario (Figure 10). Turbulence is zero when no flow is computed. The maximum of turbulent kinetic energy is always at the lutocline, since the shear rate reaches maximum values at the lutocline. Turbulence seems to be affected by the concentration. Greatest turbulent kinetic energy is observed for  $d_m = 63 \mu m$  due to reduced water depth in case of bottom formation. The effect of turbulence damping due to stratified concentration profiles is shown within the profiles of turbulent viscosity in Figure 11 (left). Inside the mud layer turbulent kinetic energy is zero, which corresponds to immobile flow conditions shown in Figure 9 (left). This effect of laminarization emphasizes the significance of modeling fluid mud dynamics, since it has important effects on the flow velocity.



Figure 10: The numerical results of the vertical profiles for turbulent kinetic energy and the dissipation rate are shown, while h=10 m,  $J=2\cdot10^{-5}$ ,  $c_0=30$  g/l and the mean particle diameter is varied ( $d_m=15 \ \mu$ m, 30  $\mu$ m, 63  $\mu$ m). The results are presented for steady state. Maximum values of turbulent kinetic energy appear at the lutocline, where the shear rate is the greatest.

Inside the immobile mud, where the turbulent kinetic energy is zero, no artificial turbulence is produced, which would lead to diffusion of the sediment. Likewise the dissipation rate is expected to be high over the entire depth of the immobile mud. Especially in case of  $d_m = 63 \,\mu$ m this behavior is visible. Here, the created mud layer reaches until z/h = 0.08, this can be recognized in constant high values for  $\omega$ .

As the greater particles ( $d_m = 30 \ \mu m$  and  $63 \ \mu m$ ) settle faster towards the bottom and create a rigid bed, the finer particles ( $d_m = 15 \ \mu m$ ) are more distributed over the entire water depth. In this case the yield stress is exceeded by the acting shear stress and the suspension is flowing. Turbulence production reaches further downwards and acts as a diffusive mechanism, which hinders the particles from settling.

#### 3.2.3 The turbulent and effective viscosity

The corresponding steady state viscosity profiles for  $J = 2 \cdot 10^{-5}$  (Figure 11) are presented. They are shown in dimensionless form through division by h and  $u_*$ . It is shown that the turbulent viscosity automatically vanishes when the concentration is sufficiently high and that in turn, the rheological viscosity increases. The effective viscosity as the combination and transition of turbulent to rheological viscosity is described in semi-logarithmic scale. Further, the shear thinning behavior of fluid mud is visible, as the shear rate increases at the lutocline and at the bottom. This is shown for effective viscosity results of  $d_m = 63 \ \mu m$  at z/h = 0.07,  $d_m = 30 \ \mu m$  at z/h = 0.05, and  $d_m = 15 \ \mu m$  at z/h = 0.



Figure 11: The numerical results of the vertical profiles for turbulent and effective viscosity are shown, while h = 10 m,  $J = 2 \cdot 10^{-5}$ ,  $c_0 = 30$  g/l and the mean particle diameter is varied ( $d_m = 15 \ \mu$ m, 30  $\ \mu$ m, 63  $\ \mu$ m). The results are presented for steady state. Maximum values of turbulent viscosity appear at half of the flow depth and show parabolic profiles. The rheological behavior of the created mud is described by the effective viscosity.

In case of  $d_m = 30 \ \mu m$  and  $d_m = 63 \ \mu m$ , the profiles for turbulent viscosity (Figure 11) show a clear distinction between turbulent regime in the upper part and rheological regime in the lower part, beneath z/h = 0.05 and z/h = 0.07. The turbulent region is described by a parabolic distribution of  $v_t$ , maximum values are reached approximately in the middle of the turbulent region.

Turbulent viscosity as for  $d_m = 15 \,\mu\text{m}$  is higher than for  $d_m = 30 \,\mu\text{m}$  and  $d_m = 63 \,\mu\text{m}$ , whereby the turbulent viscosity for  $d_m = 63 \,\mu\text{m}$  is the lowest. This is explained by the different settling behavior of the particles, the height of the available water column to produce turbulence and turbulence damping due to concentration gradients. Finer particles are distributed more over the entire water column, the greater and heavier particles are concentrated at the bottom, see Figure 9. This leads to less turbulence damping in the upper region above z/h = 0.05 for  $d_m = 30 \,\mu\text{m}$  and z/h = 0.07 for  $d_m = 63 \,\mu\text{m}$ .

As bottom mud in the simulation with  $d_m = 15 \,\mu$ m is lower concentrated than for greater particles, the effective viscosity shows lower values. For the fine material a decrease of effective viscosity is modeled directly at the bed which is due to shear thinning because of high shear rates. In case of coarser material ( $d_m = 30 \,\mu$ m and  $d_m = 63 \,\mu$ m) the mud layer does not show gradients in the velocity profile and therefore a constant effective viscosity is simulated inside the mud. Since fluid mud shows shear thinning flow behavior, the decrease of effective viscosity at the height of the lutocline seems to be reasonable.

#### 3.2.4 Unsteady model performance

Figure 12, Figure 13 and Figure 14 visualize the temporal development of the vertical velocity, the concentration, the turbulent kinetic energy, the dissipation rate, the turbulent and the effective viscosity profiles for  $J = 2 \cdot 10^{-5}$ ,  $c_0 = 30$  g/l and  $d_m = 35 \,\mu$ m. Results for different simulation times t = 2000 s, 3000 s, 5000 s, 12000 s, 20000 s are shown. Initial conditions were chosen as  $u_0 = 0$ ,  $c_0$  is distributed homogeneously over depth,  $k_0 = 0$ ,  $\omega_0 = 0$  and  $v_{t,0} = 0$ .

The concentration shows a sharp transition to high concentrated mud at the bottom, which can be recognized in the velocity profiles (Figure 12), as well. The velocity profiles show no movement of the high concentrated mud layer at the bottom, while the flow is still accelerating. At this stage, the yield stress at the bottom is not exceeded, which would be the condition for flow. The lower concentrated mud above the lutocline starts to flow while forming a non-linear velocity profile. Since the flow is accelerating with time, the mud at the bottom also starts to flow. Starting after t = 5000 s, the flow velocity and therefore the sediment diffusion is sufficiently high, so that sediment is resuspended over the whole water depth. This results in a more homogeneous sediment diffusion over depth for 12000 s and 20000 s as for earlier simulation times. Upwards diffusion of settled sediment results in a smoothing of the concentration profile.

The corresponding profiles for the turbulent kinetic energy and the dissipation rate  $\omega$  are given in Figure 13. The turbulent kinetic energy is zero, when flow velocity is computed to be zero. Immediately over the stationary mud, maximum k is simulated. Greatest values for k are computed when the gradient of the velocity profile is maximum. Since the velocity profile evolves in upward direction with time, a linear distribution of k is only given for steady state (t = 20000 s). Peak values of k close to the lutocline explain the erosion of sediment. In this context, sediment transport can be interpreted differently than by exceeding of a critical shear stress. It occurs when chaotic eddies have enough turbulent energy to initiate particle movement. The dissipation rate  $\omega$  describes the transformation of smallest eddies into heat. This occurs close to a rigid bottom, when friction is high.



Figure 12: The temporal development of the simulated vertical velocity and concentration profiles are shown. Results are given for  $J = 2 \cdot 10^{-5}$ ,  $c_0 = 30$  g/l and  $d_m = 35 \,\mu\text{m}$  after different simulation times t = 2000 s, 3000 s, 5000 s, 12000 s, 20000 s. The acceleration of the flow, the formation of bottom and the resuspension of suspended sediment can be regarded.



Figure 13: The temporal development of the simulated turbulent kinetic energy and dissipation rate profiles are shown. Results are given for  $J = 2 \cdot 10^{-5}$ ,  $c_0 = 30$  g/l and  $d_m = 35 \ \mu m$  after different simulation times t = 2000 s, 3000 s, 5000 s, 12000 s, 20000 s. It is shown the evolution of the linear turbulent kinetic energy profiles and the resulting dissipation rate profiles.

Figure 14 describes the temporal development of the turbulent and effective viscosities. Turbulent viscosity profiles show the growth of diffusion, dependent on the evolving velocity and shear rate. The increasing turbulent viscosity is interpreted as an increase of turbulent diffusivity and leads to a smoothing of the concentration profile. Again, the evolution of the profiles starts to develop in upward direction, dependent on the formation of the velocity profile. For zero velocity,  $v_t$  is zero, as well, as it is shown for z/h = 0 - 0.08. At steady state, a parabolic turbulent viscosity profile is simulated, as it is described in literature (Nezu and Nakagawa 1994).

Different formation stages of mobilized and rigid mud are recognized in the effective viscosity. Rigid mud shows high constant rheological viscosities, as the concentration is constant in the formed bottom. While the mud starts to move, the rheological viscosity decreases due to shear thinning. This behavior is dominant at the lutocline which is rising with simulation time. At t = 20000 s the lutocline occurs at z/h = 0.07 and is described by a minimum peak in  $v_{eff}$ . At t = 2000 s and t = 3000 s the effective viscosity is greater in the water column than in vicinity to the bottom. At these simulation times turbulence is zero in the water column due to no shearing, whereby deeper layers start to flow and are forcing a reduction of the effective viscosity close to the bottom. This behavior changes when the velocity profile is developed over the entire water depth and immobile bottom is formed (t = 20000 s).



Figure 14: The temporal development of the simulated vertical turbulent viscosity and effective viscosity profiles are shown. Results are given for  $J = 2 \cdot 10^{-5}$ ,  $d_m = 30$  g/l and  $d_m = 35 \ \mu m$  after different simulation times t = 2000 s, 3000 s, 5000 s, 12000 s, 20000 s.

#### 4 Conclusions

In this paper a modeling approach is presented, which simulates the water column as well as the fluid mud layer with one set of momentum, transport and turbulence model equations. The model is able to recognize automatically whether the flow is turbulent, laminar or motionless due to high concentrations of suspended matter. In contrast to approaches, which are only valid for the fluid phase, this model is able to consider the fluid and solid phase equally, without distinguishing between different models.

Turbulence is modeled by a modified and new interpreted k- $\omega$ -turbulence model. Turbulence vanishes automatically inside the mud when no shear rates are present and the turbulence production is zero. Consequently, the turbulence model does not need to be turned off when laminar flow conditions are expected and the turbulent energy equation does not need any changes when mud is formed. In this way a real continuous simulation of water and mud is achieved.

It was found that high mud concentrations lead to a deviation of the logarithmic velocity profile, which was explained by a laminarization of the flow. Furthermore, the creation of a fluid mud layer with a lutocline was reasonably well represented in the model. In the case of highly concentrated mud, the yield stress is not always exceeded, which was shown by simulated zero-velocities.

Nevertheless, a fine spatial discretization is needed, which will affect computational costs when estuarine systems are simulated three-dimensionally. However, the continuous modeling approach is beneficial, since sharp distinctions do not exist between the different processes in river systems. Since the processes are continuously modeled and not separated by coupling different modules for simulating different processes, this approach reduces the influence of empirical uncertainty. The presented model is to be regarded as an improved modeling technique to describe the vertical processes in one set of equations.

Nevertheless, empirical parameters remain such as for the calculation of the settling velocity. The settling velocity appears to be highly sensitive for the formation of fluid mud. Especially when describing hindered settling in high concentrated suspensions parameters need to be validated experimentally.

Future work to improve the computation of turbulence in concentrated mud suspensions is addressed on experimental data for calibration and validation of numerical models. Especially highly resolved measurements of velocity, turbulence and concentration are needed. A verification of cause-effect links is of fundamental importance. Since it is very difficult to achieve natural conditions in the laboratory, there is a clear demand also for further in-situ observations in the field, e.g. estimating turbulent kinetic energy.

#### 5 Acknowledgements

The work presented in this paper was part of a joint research project MudEstuary. The MudEstuary project was funded by the German Coastal Engineering Research Council (KFKI) within the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) through the project management of Projektträger Jülich (PTJ) under the grant numbers 03KIS112 and 03KIS113. The funding is gratefully acknowledged.

#### 6 Literature

Absi, Rafik; Marchandon, Stéphane; Lavarde, Marc: Turbulent Diffusion of Suspended Particles. Analysis of the Turbulent Schmidt Number. In: DDF, 312-315, 794–799, 2011.

Becker, Marius; Maushake, Christian; Winter, Christian: Observations of Mud-Induced Periodic Stratification in a Hyperturbid Estuary. In: Geophysical Research Letters, 45, 11, 5461–5469. https://doi.org/10.1029/2018gl077966, 2018.

Casulli, Vincenzo: Numerical simulation of three-dimensional free surface flow in isopycnal coordinates. In: International Journal for Numerical Methods in Fluids, 25, 6, 645– 658, 1997.

Claus, Betrice; Konermann, Vera: Ems-Ästuar 2030 - Ein Masterplan für die Ems. WWF, 2014.

Coussot, Philippe: Mudflow Rheology and Dynamics: Balkema, 1997.

Crapper, M.; Ali, K.H.M.: A laboratory study of cohesive sediment transport. In: Burt, Neville; Parker, Reg; Watts, Jacqueline (Eds.): Cohesive Sediments: John Wiley Chichester, UK, 197–211, 1997.

Dronkers, Job; van Leussen, Wim: Physical Processes in Estuaries: Springer Science & Business Media, 2012.

Dyer, K. R.; Manning, A. J.: Observation of the size, settling velocity and effective density of flocs, and their fractal dimensions. In: Journal of sea research, 41, 1, 87–95, 1999.

Faas, Richard W.; Wartel, Stanislas I.: Rheological properties of sediment suspensions from Eckernforde and Kieler Forde Bays, Western Baltic Sea. In: International Journal of Sediment Research, 21, 1, 24, 2006.

Knoch, Denise; Malcherek, Andreast: A numerical model for simulation of fluid mud with different rheological behaviors. In: Ocean Dynamics, 61, 2-3, 245–256, 2011.

Kotzé, R.; Haldenwang, R.; Fester, V.; Rossle, W.: In-line rheological characterisation of wastewater sludges using non-invasive ultrasound sensor technology. In: Water SA, 41, 5, 683–690, 2015.

Le Hir, P.; Bassoullet, Ph.; Jestin, H.: Application of the continuous modeling concept to simulate high-concentration suspended sediment in a macrotidal estuary. In: Proceedings in Marine Science, 3, 229–247, 2000.

Le Hir, P.; Cayocca, F.: 3D application of the continuous modelling concept to mud slides in open seas. In: Winterwerp, Johan C.; Kranenburg, Cees (Eds.): Fine Sediment Dynamics in the Marine Environment: Elsevier (Proceedings in Marine Science), 545–562, 2002.

Le Normant, C.: Three-dimensional modelling of cohesive sediment transport in the Loire estuary. In: Hydrological Processes, 14, 13, 2231–2243, 2000.

Le Normant, C.; Lepeintre, F.; Teisson, C.; Malcherek, A.; Markofsky, M.; Zielke, W.: Three dimensional modelling of estuarine processes, MAST Days and Euromar Market. In: Proj. Rep, 1, 1993. Malcherek, A.; Cha, H.: Zur Rheologie von Flüssigschlicken. Experimentelle Untersuchungen und theoretische Ansätze - Projektbericht. Universität der Bundeswehr München, Institut für Wasserwesen, 2011.

Malcherek, A.; Markofsky, M.; Zielke, W.; Peltier, E.; Le Normant, C.; Teisson, C. et al.: Three Dimensional Numerical Modelling of Cohesive Sediment Transport Processes in Estuarine Environments. Final Report to the EC Contract MAS2-CT92-0013, 1996.

Malcherek, Andreas: Zur Beschreibung der rheologischen Eigenschaften von Flüssigschlicken. In: Die Küste, 77, 135–178, 2010.

Malcherek, Andreas: Sedimenttransport und Morphodynamik. Scriptum – Version 2. Institute of Hydro Sciences, Universität der Bundeswehr München; Universität der Bundeswehr München. Neubiberg, 2016.

McAnally, William H.; Friedrichs, Carl; Hamilton, Douglas; Hayter, Earl; Shrestha, Parmeshwar; Rodriguez, Hugo et al.: Management of Fluid Mud in Estuaries, Bays, and Lakes. I. Present State of Understanding on Character and Behavior. In: J. Hydraul. Eng., 133, 1, 9–22. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2007)133:1(9), 2007.

Migniot, Claude: A study of the physical properties of various very fine sediments and their behaviour under hydrodynamic action, 1968.

Mitchell, S. B.; West, JR: Particle size distribution in an estuarine turbidity maximum region. In: Proceedings in Marine Science, 5, 251–263, 2002.

Nezu, I.; Nakagawa, H.: Turbulence in Open-Channel Flows. In: Journal of Fluid Mechanics, 269, 1994.

Papenmeier, Svenja; Schrottke, Kerstin; Bartholomä, Alexander; Flemming, Burghard W.: Sedimentological and rheological properties of the water-solid bed interface in the Weser and Ems estuaries, North Sea, Germany. Implications for fluid mud classification. In: Journal of Coastal Research, 29, 4, 797–808, 2012.

Richardson, J. F.; Zaki, W. N.: Sedimentation and Fluidization, Part I. In: Trans. Inst. Chem. Eng, 32, 35–53, 1954.

Roland, Aron; Ferrarin, Christian; Bellafiore, Debora; Zhang, Yinglong Joseph; Sikric, Mathieu Dutour; Zanke, Ulrich; Umgiesser, Georg: Über Strömungsmodelle auf unstrukturierten Gitternetzen zur Simulation der Dynamik von Flüssigschlick. In: Die Küste, 79, 2012.

Schrottke, K.: Dynamik fluider Schlicke im Weser und Ems-Ästuar - Untersuchung und Analysen zum Prozessverständnis. In: BAW/BfG Kolloqium, 2006.

Spicer, Patrick T.; Pratsinis, Sotiris E.: Shear-induced flocculation. The evolution of floc structure and the shape of the size distribution at steady state. In: Water Research, 30, 5, 1049–1056, 1996.

Takács, Imre; Patry, Gilles G.; Nolasco, Daniel: A dynamic model of the clarificationthickening process. In: Water Research, 25, 10, 1263–1271, 1991.

Toorman, Erik: Controlled rate concentric cylinder rheometry of estuarine mud suspensions. In: MAST G8M Coastal Morphodynamics Research Project Report (HYD148), 1995. Toorman, Erik A.: Modelling of turbulent flow with suspended cohesive sediment. In: Winterwerp, Johan C.; Kranenburg, Cees (Eds.): Fine Sediment Dynamics in the Marine Environment, vol. 5: Elsevier (Proceedings in Marine Science), 155–169, 2002.

Uittenbogaard, Robert Eduard; van Kester, J. Th MA; Stelling, Gustaaf Sjoerd: Implementation of Three Turbulence Models in TRISULA for Rectangular Horizontal Grids. Including 2DV-testcases: Delft Hydraulics, 1992.

van Kessel, Thijs; Winterwerp, Han; van Prooijen, Bram; van Ledden, Mathijs; Borst, Wil: 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, 124–134, 2011.

van Rijn, Leo C.: Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Edited by AQUA Publications, 1993.

Violet, P. L.: On the Numerical Modelling of Stratified Flows. In: Physical Processes in Estuaries, 1988.

Wehr, Denise: An Isopycnal Numerical Model for the Simulation of Fluid Mud Dynamics. Universität der Bundeswehr München - Institut für Wasserwesen, 2012.

Wells, John T.; Coleman, James M.: Physical processes and fine-grained sediment dynamics, coast of Surinam, South America. In: Journal of Sedimentary Research, 51, 4, 1981.

Wentworth, Chester K.: A scale of grade and class terms for clastic sediments. In: The Journal of Geology, 377–392, 1922.

Whitehouse, Richard; Soulsby, Richard; Roberts, William; Mitchener, Helen: Dynamics of Estuarine Muds: Thomas Telford, 2000.

Wilcox, David C.: Turbulence Modeling for CFD: DCW Industries, Inc., 1994.

Winterwerp, J. C.: On the flocculation and settling velocity of estuarine mud. In: Continental Shelf Research, 22, 9, 1339–1360, 2002.

Winterwerp, J. C.; Bruens, A. W.; Gratiot, Nicolas; Kranenburg, C.; Mory, M.; Toorman, E. A.: Dynamics of concentrated benthic suspension layers. In: Proceedings in Marine Science, 5, 41–55, 2002.

Worrall, W. E.; Tuliani, S.: Viscosity changes during the ageing of clay-water suspensions. In: Trans Brit Ceramic Soc, 63, 167–185, 1964.

### Evaluation of optimised groyne designs in response to long-period ship wave loads at Juelssand in the Lower Elbe Estuary

Gregor Melling<sup>1</sup>, Hanne Jansch<sup>2</sup>, Bernhard Kondziella<sup>2</sup>, Klemens Uliczka<sup>2</sup> and Bettina Gätje<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW), gregor.melling@baw.de

<sup>2</sup> Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW)

<sup>3</sup> Federal Waterways and Shipping Administration Hamburg (WSA)

#### Summary

In the past 15 years, increased severity of damages to rock structures such as groynes, training walls and revetments have been observed across the major German estuaries. Investigations into the cause of the damages concluded that structure deterioration could be attributed to long-period primary ship wave loading. Owing to changes in the shipping fleet, in particular the ever-increasing dimensions of container vessels, the intensity of ship-induced loads has increased significantly. As a result, existing rock structures are, in certain parts, under-dimensioned for the presently prevalent load intensities. To evaluate the performance of two new groyne designs, optimised with a view to increase structure resistance to long-period wave loads, a prototype study was undertaken. Two groynes in the tidal Lower Elbe were rebuilt, one with a large-radius root and one with a recessed root. During the field experiment the incident ship-induced wave loading and the armour layer deformation was recorded. The field experiment and some fundamental findings with regard to the wave-structure-interaction at prototype scale and the performance of the optimised groyne designs are documented here. Furthermore, insights into mitigation measures are given, based on analyses of the collected data.

#### Keywords

rock groyne, recessed groyne, ship wave, long-period wave, wave-structure interaction, overtopping, Juelssand, Elbe

#### Zusammenfassung

Über die vergangenen 15 Jahre wurden in deutschen Ästuaren zunehmend Schäden an Schüttsteinbauwerken beobachtet. Als Ursache konnte die langperiodische Schiffswellenbelastung ausgemacht werden, die aufgrund der zunehmenden Schiffsgröße in den letzten Jahrzehnten deutlich stärker wirkt. Als Folge sind (Ufer-)Bauwerke mancherorts für die vorherrschenden Belastungsintensitäten unterdimensioniert. Im Rahmen einer Pilotstudie wurden zwei, hinsichtlich der Stabilität der Deckschicht optimierte, Buhnenkonstruktionen untersucht. Dabei wurden zwei Buhnen in der tidebeeinflussten Unteren Elbe neu aufgebaut, eine Buhne mit ausgerundeter Wurzel und eine mit hinterströmten Bereich. Während des Feldversuchs wurden die auflaufenden schiffsbedingten Belastungen und die Entwicklung der Buhnendeckschicht aufgezeichnet. Die Durchführung des Feldversuchs sowie einige grundlegende Ergebnisse hinsichtlich der SchiffswellenStruktur-Interaktion im Naturmaßstab und die Eigenschaften der optimierten Buhnenkonstruktionen werden hier dokumentiert. Des Weiteren werden, basierend auf Auswertungen der erhobenen Daten, Hinweise hinsichtlich der Möglichkeiten zur Reduzierung von Schäden an Schüttsteinbuhnen gegeben.

#### Schlagwörter

Buhne, hinterströmte Buhne, Schiffswelle, lang-periodische Welle, Wellen-Struktur-Interaktion, Überströmen, Juelssand, Tideelbe

#### 1 Background

#### 1.1 Engineering issue

In the past 15–20 years, increased severity of damages to rock structures such as groynes, training walls and revetments have been observed across the major German estuaries (e.g. Ohle and Zimmermann 2003, WSA Bhv 2009, BAW 2010, WSA HH 2010, BAW 2012). In response, using practical engineering judgement, different measures to increase the stability of training walls and groynes were undertaken. These included shallower slope angles, reduced crest widths as well as wider groyne root areas and smoother revetments transitions (WSA Bhv 2009, WSA Cux 2012). While mitigation measures were taken, the processes and mechanisms underlying these damages remained poorly understood. Investigations into the cause of the damages were subsequently carried out by BAW (2010) which confirmed that structure deterioration could in large part be attributed to long-period ship wave loading. Owing to changes in the shipping fleet, in particular the ever-increasing dimensions of container vessels, the intensity of ship-induced loads on estuary infrastructure has increased significantly. Ship-induced loads have over the recent years become the most relevant hydraulic loading in German estuaries with major shipping lanes. As a result, existing rock structures are, in parts, under-dimensioned for the presently prevalent load intensities. Looking into the future it is expected that ship-induced loading will further increase with continuing trends towards greater vessel sizes and increased traffic density. Also, the percentage of all waterway traffic associated with ultra large container vessels (ULCV) of the "New Panamax" and "Triple E" categories is likely to increase.

#### 1.2 State of the research

While the described engineering problem is becoming increasingly common in German waterways, interestingly, a survey of European and international coastal/waterway engineering bodies and research institutes in 2012 resulted in the feedback that structural damage in response to long-period ship waves is not currently seen as a significant problem and is mitigated either by vessel speed restrictions or implicitly accounted for in structure design (cf. BAW 2012). Nevertheless, in recent years various impacts associated with the long-period wave, alternatively termed "Bernoulli wake", "depression wake" or "hull displacement wave" by other authors, have become increasingly apparent in other countries (e.g. Ravens and Thomas 2008, Rapaglia et al. 2011, Gelinas et al. 2013, Göransson et al. 2014, Zaggia et al. 2017). While these studies have been primarily concerned with the impact of long-period ship waves on sediment transport, morphodynamic effects and bank erosion,
none have been focussed explicitly on the stability of with rock structures. Nevertheless, existing studies contribute to the understanding of the behaviour of long-period waves in shallow and confined waterways as well as demonstrating their erosive capacity.

Rapaglia et al. (2011) investigated the drawdown-related resuspension of sediments in Venice Lagoon and reported flow velocities greater than 2 m/s associated with the trough of the primary wave. Sediments are transported in the direction of the shipping channel, with channel maintenance implications. Similarly, in Venice Lagoon, Scarpa et al. (2019) describe the erosive effects of the depression wave in tidal flats. High rates of shoreline retreat were also associated with the action of the long-period depression wave. As very large depressions of up to 2.45 m were recorded, the authors posit that the drawdown depression wave can be amplified by shoaling and wave transformation effects in the channel margins, eventually transforming into a sharp-crested travelling solitary depression wave, with significant vertical velocity components. The height of the drawdown was linked to Froude-Number and displaced water volume. As mitigation measures, speed restrictions and the optimisation of ship hull shapes are discussed. The transformation of the depression wave in shallow areas into a bore-like feature resembling a non-linear solitary Riemann wave is also described by Parnell et al. (2015). Göransson et al. (2014) report that in Göta Älv, the measured turbidity maximum was dependent on drawdown height, but that both primary and secondary ship waves are responsible for shoreline steepening and erosion effects. Measurements in the Kiel canal revealed that while there are strong dependencies between hull geometry the primary wave and associated near-bottom return-flow velocities, the turbidity maximum was correlated most nautical parameters, but only weakly (Niehüser et al. 2016). Based on these measurements Ulm et al. (2020) concluded that approx. 10 % of the total sediment transport can be attributed to vessel traffic, indicating that morphological effects of shipping can play a relevant role in the maintenance cost of waterways. In a similar vein, Zaggia et al.'s (2017) analysis of survey and remote sensing data showed that in relatively sheltered settings such as estuaries and lagoons with heavy vessel traffic the morphological evolution can be dominated by shipping-related effects, surpassing natural erosive agents such as storms. The authors note not only the shear-stresses induced from the drawdown but also the erosive effects of the trailing primary wave on adjacent beaches and erosion scarps. Regression rates of up to 4 m/year are reportedly associated with shipping effects.

With increasing vessel dimensions and draughts as well as increasing traffic density, it is not unlikely that adverse effects from primary ship waves will become more widespread and prevalent in tidal waterways in the future, affecting the function and condition of manmade shoreline infrastructure, such as sluice gates, embankments, training walls and groynes, which are the focus of this study. With a view to developing guidance and methods for rock groyne design, BAW, in cooperation with several university partners, devised a multi-faceted research framework in which the wave-structure interaction was investigated in significant detail. The research reflects the current state-of-the-art for groyne design with respect to long-period wave loading. A detailed summary of the individual work packages and their respective findings is available in BAW (2018). Here, only a brief overview of the conducted research shall be given in order to provide the necessary context for the presented work.

The early research from BAW (2010) and BAW (2012) focused on descriptions of the observed damage patterns for different rock structures in German estuaries and a processbased understanding of the load cases and damage mechanisms. Conceptual models of the loading and failure mechanisms were proposed and in-situ pressure measurements at Langlütjen training wall in the Outer Weser were undertaken to validate the theoretical models. A detailed assessment and description of the wave-structure interaction and damage mechanisms was conducted by Gier and Schüttrumpf (2012) and a freeboard-dependent classification of the various load cases was developed. An investigation into available design equations for the most damaging load case concluded that the stability of existing groynes could not be confirmed. Furthermore, it was concluded that guidance for structure design in response to (wind) wave loading (e.g. Hansen 1985, EAK 2002, CIRIA et al. 2007), while applicable for secondary ship waves, does not adequately account for the processes associated with long-period wave loading, in particular highly turbulent overtopping flows, and is thus not applicable. In fact, the relevant processes resemble more closely those found at rockfill dams, spillways and overtopped embankments as will be explained in more detail below.

Oumeraci and Brühl (2013) investigated field and lab measurements of ship waves in an attempt to develop an analytical model for wave generation and propagation. This included the classification of different wave types and generalised wave characteristics based on ship type, speed and channel geometry. Frequency analysis is used to determine the spectral characteristics of the long-period wave component and identify wave parameters that are relevant for structure design. Small-scale 2D flume tests were carried out with the aim of determining the overtopping volumes for stationary flow, short-period waves (Wöffler et al. 2015) and long-period waves (Oetjen et al. 2017) for model bodies with different cross-sections and porosities. For the stationary overflow load case, using the measured overflow volumes on different cross-sections, weir coefficients for the Poleniformula were derived. For short-period wave loading, the overtopping volumes as a function of freeboard height, armour layer porosity and surf similarity parameter for different model geometries were determined. At very long wave periods the overtopping flow can temporarily resemble the previously examined (quasi-)stationary flow situation and modified weir coefficients were determined. For the long-period load case, armour layer stability in response to a single surge-like wave was investigated. An attempt was also made to replicate the stationary flow tests in a numerical model with the aim of carrying out armour layer stability assessments by means of coupling a detailed flow model (CFD) with a model of structural dynamics of the rock armour layer (CSD); the efforts are documented in Oumeraci et al. (2014).

Based on an understanding of the structural response to the most relevant load cases and taking cues from the characteristic patterns of damage observed in the field as well as existing experiences with profile optimisation (WSA Bhv 2009, WSA Cux 2012) groyne designs with an expected greater structural stability to long-period wave loading were developed. Compared to the conventional groyne design, the modifications resulted in shallower slope angles on the sides and head area as well as two different configurations of the root area, i.e. where the groyne attaches to the existing revetment. The hydraulic performance of these innovative geometries was evaluated in 3D physical model tests in a wave basin by BAW (2015) at 1:40 scale. Apart from the measurement of waves and currents in the near-field of the structures and the groyne fields, the depth of the overtopping flow on the groyne crest was recorded. No investigations of armour layer stability were conducted. The research programme culminated in a prototype-scale field study of two groyne designs, facilitated by close cooperation with the Federal Waterways and Shipping Office Hamburg (WSA). Following the findings of the aforementioned physical model tests, one groyne with a large-radius root and one with a recessed root were built. To record the incident wave loading and document the structural response an elaborate monitoring programme was implemented which has resulted in a unique dataset of load and resistance information. This dataset allows for detailed examination of the wave-structure-interaction at prototype scale and can also be used in the development of design guidance for the sizing of rock armour layers on groynes. The aim of this paper is to document the set-up and execution of this field experiment as well as some primary results and findings.

#### 2 Wave-structure-interaction

#### 2.1 Long-period primary ship waves

For large vessels in relatively narrow waterways, the long-period ship wave can present the most relevant load with respect to shoreline infrastructure stability. Figure 1 illustrates the primary and secondary wave systems associated with a ship travelling in confined and shallow water. The primary wave system consists of a bow wave followed by a water level depression caused by a pressure drop around the vessel hull, and a transverse stern wave. This long-period wave system is hydraulically bound to the ship hull and thus travels along the shoreline at a rate equal to the vessel speed. Following the passing of the stern wave, the water level drawdown is compensated with the slope supply flow which works to restore the ambient water level. The period  $T_{Hp}$  of the primary wave is determined by vessel length and its speed over ground (*SOG*); for the current vessel fleet structure in the Elbe Estuary values of approx. 60 s <  $T_{Hp}$  < 120 s are typical.



Figure 1: Schematic illustration of the ship-generated wave system in confined shallow water with idealised ship wave record and definition of characteristic parameters.

The interaction of a primary wave ( $T_{Hp} = 95$  s) with a groyne at approximately mean water level (freeboard  $R_c \approx 0$ ) is illustrated by a series of time-lapse photographs in Figure 2. The interaction begins with the bow wave (Figure 2a), typically small with negligible impact (here  $s_B = 0.1$  m), followed by the drawdown ( $z_A = 0.7$  m) which causes a water level drop in the upstream groyne field. The resulting water level gradient results in compensatory flow over the groyne opposite to the direction of travel (Figure 2b, c). This flow situation weakens as the vessel, and the drawdown, gradually moves into the downstream groyne field and the original water level in the upstream groyne field begins to be restored (Figure 2d). This is associated with the arrival of the transverse stern wave and the water-levelrestoring slope supply flow. The drawdown in the downstream groyne field now acts to reverse the water level gradient and results in a flow over the groyne in the direction of travel (Figure 2e).



Figure 2: Interaction of long-period ship wave with groyne at Juelssand (Lower Elbe Estuary) during passage of seaward-travelling ULCV (length 368 m, breadth 51 m) at approx. mean water level. Passage with draught of 12.5 m, 13 kn STW and passing distance d of 228 m.

Due to wave focussing effects, which lead to a concentration of energy in the root area, the overflow typically initiates here and subsequently spreads along the groyne towards the head. The large gradient and the surge-like action of the transverse stern wave  $(H_p = 0.71 \text{ m})$  results in a relatively shallow-depth (depending on tidal water level) overflow

that is characterised by high velocities and strong turbulence; flow aeration on the lee side is also common, the extent varies with the hydraulic configuration of the overflow and boundary effects (Figure 2f). The described processes are representative of the load case for freeboards in the approximate range  $R_c \leq 0$ . For positive freeboard heights overflow phenomena may be weaker, restricted to lower parts of the groyne or replaced by stronger flows around the head of the groyne; in this case wave run-up, wave breaking and overtopping processes are dominant.

## 2.2 Structure response

The structural response of groynes under long-period ship wave action is described in detail in BAW (2010) and BAW (2012). At the study site, the groynes exhibit a characteristic pattern of damage that features the deterioration of the groyne root to the point of complete destruction and deformation of the crest, particularly on the lee side, w.r.t. the incident wave (cf. Figure 3).



Figure 3: Characteristic damage to groynes at Juelssand (Lower Elbe Estuary) caused by longperiod ship wave action. Destruction of the groyne root (left) and erosion of the crest and lee side slope (right).

Different load cases are relevant depending on water level and freeboard height. A differentiation of the load cases  $R_c > 0$  and  $R_c \leq 0$  is useful, as the processes and damage mechanisms are distinct and typically also affect different areas of the groyne, as illustrated conceptually in Figure 4.



Figure 4: Conceptual model of load cases and associated damage due to long-period primary ship waves in relation to freeboard R<sub>c</sub>. Modified from Gier and Schüttrumpf (2012).

For positive  $R_c$ , wave impact processes are prevalent, affecting mostly the wave-facing slope (in this publication "wave-facing" is used with respect to stern waves from outgoing ships), although some overtopping and wave run-down on the lee side is possible, de-pending on structure parameters such as crest height and permeability. For  $R_c \leq 0$  the forces on the armour layer are related primarily to overflowing of the groyne. In this case, the structural response to supercritical loading is expected in the lee portion of the root and crest areas. Gier and Schüttrumpf (2012) conclude that the long-period wave is particularly damaging due to the fast-flowing and highly-turbulent overflow of the groyne.

# 3 Prototype field study

## 3.1 Site description and loading factors

Juelssand is located on the northern bank of the Lower Elbe Estuary, along the main access channel to the Port of Hamburg, between chainage km 651–653 (Figure 5). The groynes here are already experiencing significant structural deterioration from ship waves (cf. Figure 3); the site is thus an ideal site for the pilot study. For this purpose, groynes B29 and B31 were rebuilt using optimised designs. Mutual interferences stemming from changes to the loading regime as a result of the rebuilding of the groynes are eliminated by keeping the intermediary groyne B30 in its current state.



Figure 5: Location of study site at Juelssand with pilot study groynes, indicative bathymetry, location of navigational channel and chainage.

## 3.1.1 Fairway characteristics

Owing to the proximity of the shipping channel to the shoreline, this area is characterized by close passing distances and significant ship wave energy, especially in the case of seaward travelling vessels. The distance from groyne tip to the edge of the fairway can be as short as 65 m. The channel side is very steep with slopes of approx. 1:5 (cf. Figure 5).

## 3.1.2 Vessel fleet structure

Based on an examination of Automatic Identification System (AIS) data, the distribution of vessel sizes for which wave events were registered during the monitoring period is shown in Figure 6. The vessel sizes are relatively evenly distributed, although vessels of the New Panamax type (on average 366 m length, 49 m breadth) constitute the dominant ship in terms of loading frequency with over 12.5 % of recorded wave events attributable to this class. Approximately 4 % of recorded wave heights originated from the currently largest ULCVs (length > 395 m, breadth > 53 m) sailing on the Elbe Estuary.



Figure 6: Distribution of vessel length for wave events registered at position 1 at B29 (red) and B31 (blue).

# 3.1.3 Speed restriction

In January 2018, a speed restriction of 12 kn *STW* for vessels with lengths greater 90 m was instated in this part of the Elbe Estuary. In response, the statistical distribution of ship speeds has changed significantly as shown in Figure 7. The median speed shows a reduction from 13.8 and 13.5 for B29 and B31, respectively to 12.5 kn. Crucially, the occurrence of large velocities above 15 kn is significantly reduced.

The speed restriction falls within the monitoring period and must be taken into account when interpreting rock armour stability. Since AIS data only provides the speed over ground (*SOG*), current velocity data from an operational model (see Section 3.3.3) was used to derive the corresponding *STW* for each vessel.



Figure 7: Change of *STW* with time (left) and distribution of speeds before and after introduction of speed limit (right).

#### 3.2 Groyne designs

#### 3.2.1 Conventional design

The conventional design follows a two-layered approach. However, the core material is often pre-determined by the remnants of historical groyne construction. The armour layer in this area consists of CP<sub>90/250</sub> rock grading, typically with high-density iron-silicate rock with a specific density of approx. 3.4t/m<sup>3</sup>. The cross-sectional geometry is characterised by a crest width of 2.0 m and side and head slopes of 1:3 and 1:4, respectively.

#### 3.2.2 Optimised groyne designs

For the new groyne types, shallower slope angles were used, as well as a higher crest level (Figure 8). The crest width was reduced and rounded to produce a "chevron"-shaped crest. The difference between B29 and B31 is related to the configuration of the groyne root and revetment transition. The characteristic pattern of damage (cf. Figure 3) and the understanding of wave-structure-interaction point to the fact that the most vulnerable part of the groyne is the root area due to the focussing of wave energy. Hence, two design solutions were implemented in this area with the aim of increasing rock armour stability by reducing loading in vulnerable areas of the groynes. At B29 the transition area from groyne body to revetment was fashioned as a 25 m wide recess (at its narrowest point) with scour protection (Figure 8, Figure 9). The intention is to allow wave energy to bypass the structure thus minimising focussing effects in the root area which lead to overtopping flows on the groyne body. At B31, the transition to the revetment was profiled to a larger diameter radius of 25 m with the intention of reducing wave focusing and strengthening the groyne in the root area.

Initially, both groynes were reconstructed using the original rock grading of CP<sub>90/250</sub> in order to assess the efficiency of the geometrical optimisations for increased erosion resistance of the armour layer. These structure variants are referred to as B29v1 and B31v1, respectively. During the study, groyne B29 was later re-profiled using larger rock grading LMB<sub>5/40</sub> (high-density rock) and monitored for a further 1.5 years. This variant is referred to as B29v2. The existing revetment in the study area was not changed.

# cross section 🗕 2.0 m 🔸 $\bigtriangledown$ variable crest level 1 3 longitudinal sections root area B31 +1.8+1.55 +1.82 MHW +0.55·1:77 +0.27 -1.29 MLW root area B29 +2 50 +1.84+1.55 25 m

Figure 8: Comparison of conventional groyne profile (grey dashed) and optimised design profile in pilot study (black). All levels in mNHN. Not to scale.



Figure 9: Photographs of the optimised groyne root designs taken from the crest of the revetment: recessed root (B29, left) and large radius root (B31, right).

# 3.3 Monitoring

The scope of the monitoring programme was defined with the intention of:

- capturing the processes relevant to the wave-structure interaction
- validating the conceptual failure models at prototype scale
- carrying out analyses of the relationships between loading, resistance variables and influencing factors such as nautical (ship and waterway) parameters
- gathering the data required for the development of design methodology

With these aims in mind, it was necessary to gather sufficiently long time-series of loading and resistance parameters. Due to the protected nature of the site as a designated nature conservation area as well as reduced accessibility of the site, it was necessary to ensure a high degree of autonomy of the measuring systems in terms of power supply, data storage, data transfer and troubleshooting. Still maintenance intervals of 2–4 weeks were required to ensure continued operation of the instruments. The necessary infrastructure for the deployment of the instruments was installed in 2014 and a trial phase was initialised in order to test and validate the systems. The official monitoring programme began in July 2015 and ran through until February 2019. The dataset generated by the monitoring programme contains over 2000 records of groyne topography recorded at low tides and between 5000– 26000 ship-related wave events, depending on groyne and exact measurement location.

#### 3.3.1 Structure response

To document the spatial and temporal groyne damage development, the topography of the armour layer was recorded by means of a stationary land-based 3D geodetic monitoring system developed and operated by BAW in cooperation with the HafenCity University Hamburg. The technical details of the monitoring set-up are documented in detail in Tschirschwitz et al. (2016, 2017); here, only a brief description of the most important features is given.

The geodetic monitoring system for each groyne consists of a terrestrial laser scanner (Zoller+Fröhlich IMAGER 5010) as shown in Figure 10 encased in a custom-built secure weather-proof housing and mounted on a monitoring platform at a height of 12 m above ground. The masts which elevate the monitoring platforms were installed by the WSA Hamburg and secured in position by four steel cables to reduce lateral movement and leaning due to wind and movements in the marshy subsoil. Power to the equipment is supplied by a solar panel, a small wind turbine and a fuel cell.

Terrestrial laser scanning was chosen due to the requirements for automation and sufficient areal coverage. Furthermore, a high resolution is required to detect the smallest changes in groyne topography; this allows even small movement of rocks in the armour layer to be identified and associated to loading conditions. The theoretical spatial resolution achievable with the described system at the groyne tip, determined by the angle of ray incidence and angle resolution, is given as 1 cm (Tschirschwitz et al. 2016). However, this theoretical value is significantly reduced as the result of the particular challenges of this application and operating environment. Shallow survey angles of as low as 5°, particularly towards the groyne tip, give rise to shadowing effects owing to the rough and undulating surface of the armour layer. Not limited to shallow survey angles, the strength of the optical return signal can be significantly weakened by absorption and scattering on the dark, irregular and often wet surface. This can be exacerbated by weather and meteorological effects. Measurements can have a degree of ambiguity due to artefacts, spurious measurements or real obstructions, such as seagulls sitting on the structure. As a result, measurement errors can accumulate and not all scans are viable. Nevertheless, by means of diligent post-processing the plausibility, viability and accuracy of the scans can be ensured; ambiguous scans that cannot be sufficiently corrected are removed to ensure coherence of the dataset used for further analysis.



Figure 10: Set-up for monitoring of groyne topography at low tide levels with pile-mounted laser scanners. Close-up of the monitoring platform with laser scanner housing.

The damage development is calculated in post-processing by a comparison of the measured point cloud with the reference measurement. For this purpose, the cloud-to-cloud distance function of Cloud Compare, an open-source software, is utilized. This function calculates for each point of the measured cloud a horizontal and vertical distance to the reference cloud using the nearest neighbour distance, a kind of Hausdorff distance algorithm. The vertical distance to the reference model determines the deformation of the rock armour layer. The difference plot is presented as a grid of 1 m, 0.5 m and 0.25 m resolution where the centroid values are given by the mean of the measured elevations in this raster cell. This raster is used in the interpretation of damage.

## 3.3.2 Hydraulic loading

The changes to the water surface level at the structure were measured with pressure sensors positioned at various locations in the head, foot, root and crest areas of the groynes (cf. Figure 11). Pressure sensors by Driesen & Kern and RBR were used with a sampling rate of 1 Hz. The data loggers were installed in the rock armour layer in order to measure pressure fluctuations at the structure level. For this purpose, metal tubing, in which the instruments were housed, were driven into the armour layer as illustrated in Figure 11. The data loggers were exchanged on an approximately three-weekly rotation in order recharge the batteries and download the data before the internal data memory was exceeded. Post-processing of the raw measurements includes:

- correction for time drift of the internal clocks
- conversion of pressure to water depth, applying the barometric pressure of a nearby weather station

- filtering the data with a high-pass filter with cut-off frequency of 1/1800 Hz (30 min) in order to separate ship-induced and tidal contributions to the pressure signal
- filtering the ship-induced components with a low-pass filter at a cut-off frequency of 1/10 Hz (10 s) to derive a clear signal of the long-period ship waves
- extracting wave events and determining the relevant parameters of the long-period ship wave (cf. Figure 1)
- correlating the wave events with AIS data

The wave measurements used here encompass the time period of the experiment from 07/2015 to 12/2018 for B31 and 02/2019 for B29. Due to maintenance intervals, failures and seasonally reduced number of monitoring positions, the record length can vary strongly between individual sensor locations. Nevertheless, typically a record length of at least 10,000 wave events is available, bar at position 6, where due to the location on the crest fewer events are recorded.



Figure 11: Distribution of pressure sensors (yellow) and current meter (red) (left). Current meter only deployed at B29. Set-up and housing of current meter and pressure sensors (right).

Coinciding with the strengthening of groyne B29v2 and recognizing the significance of overtopping loads, a Nortek Vector single-point acoustic-doppler-velocimeter (ADV) was installed on the crest to measure overflow velocities. Similarly to the pressure sensors, the instrument was encased in a plastic tube and installed in the rock armour, approximately 0.2 m above crest level (cf. Figure 11); this puts the point at which the velocities are measured at roughly 0.35 m above crest level. The orientation of the device was set to align the x-axis parallel to the expected flow. The sampling rate was 32 Hz. Post-processing consists of:

- correction for time drift of the internal clocks
- high-pass filter to separate ship induced current from tidal current
- detecting overflow events
- determining the relevant parameters of the ship-induced currents and overflow event
- correlating the wave events with AIS data

The measurement of flow velocities on the groyne crest was undertaken for approx. eleven months (net) between 11/2017-12/2018. Monitoring of primary wave loads at groyne B29 is ongoing – in a much reduced scope – with pressure measurements at positions 1 and 5 and regular visual and photographic assessments of groyne development.

# 3.3.3 Other data

Other data sources include AIS data of vessel traffic which contains information on nautical parameters (e.g. vessel dimensions, draught, speed through water and passing distance). Trimonthly profile surveys of topography in the groyne fields are also available from WSA Hamburg, allowing the influence of the designs on the adjacent beach levels to be examined. Meteorological data was sourced from a nearby weather station run by the DWD (Deutscher Wetterdienst). Where needed, current velocity data was extracted from an operational hydrodynamic model of the Elbe Estuary (PROPTEL), as described in Sehili et al. (2014).

## 4 Analysis of prototype observations

## 4.1 Hydraulic loading

The loading regime is described by means of statistical analyses of the pressure and flow velocity measurements. For this, the available record length in the time period 07/2015 to 12/2018 (B31) or 02/2019 (B29), minus obvious errors and outliers, is typically used unless stated otherwise. As mentioned above, the sample size varies at each sensor location. For the purpose of documenting preliminary results, statistics for the entire monitoring period are given. Some caveats to the interpretation of results associated with this approach will be discussed in section 5.1.

# 4.1.1 Long-period wave heights

The statistical distribution of wave heights at the measurement locations is shown in Figure 12. Comparing the wave heights at the groyne heads which are mostly undisturbed from the effects of wave-structure interaction a similar distribution of  $H_p$  magnitudes is observed. Over 90 % of incident primary wave heights are below 0.5 m. Differences in the wave regime at this location appear marginal, with a slightly higher median wave height at B31. The measurements at the other locations are more strongly influenced by the specific structure geometry. At B29 the maximum  $H_p$  was recorded at position 5, however, on average, larger waves are encountered further toward the root area at positions 2, 3 and 4.

In terms of large wave heights, arbitrarily defined here as  $H_p > 1.0$  m, only 5.6 % of observations satisfy this condition at position 4. At B31, the largest waves are also experienced in the root area, however the heights are greater. At position 4 over 10 % of the wave heights exceed 1.0 m and just over 3 % exceed 1.5 m. The comparison of wave heights at the groyne crests (pos. 6) suggests that somewhat higher loads are experienced at B31 and a larger number of events exceeding 1.0 m.



Figure 12: Histograms of wave heights at measurement locations (top). Hp,max / Hp,med / % Hp > 1.0 m given for each measurement location (bottom).

#### 4.1.2 Overtopping flows

The occurrence and nature of overflow phenomena over the groyne crest are a function of the water level, the incident primary ship wave height and wave-structure-interaction effects. As such, overflow can be complete, partial or absent. Velocity measurements are only possible for flows that achieve a certain minimum inundation depth of the instrument. Thus overflow was typically only measured for water levels greater than +1.0 mNHN. The results presented here are based on overtopping flow velocities for 1850 primary wave events. Values presented here are derived from curves fitted through the high-frequency measurements and thus do not account for instantaneous velocity spikes due to turbulence occurring at timescales shorter than 1 Hz.

To characterise loads originating from overflow phenomena the velocity parallel to the structure cross-section, which corresponds to the velocity along the x-axis  $V_x$ , is examined. The directionality of the load is given by the sign of  $\pm V_x$ ; positive values describe flow in downstream, seaward direction, and negative values denote flow in upstream direction (see Figure 13). Thus, for this study, positive (downstream) velocities are relevant for hydraulic loading of the lee side slope.

The statistical distribution of the flow velocities  $|V_x|$  over the groyne crest is shown in Figure 13. Tidal flow effects have not been removed here. Although the most common values are below 0.5 m/s, velocities in the downstream direction show a significantly larger proportion of higher values, indicating the higher loading caused by seaward travelling ships. Approx. 27 % of flows in downstream direction are over 1.0 m/s, whereas less than 13 % exceed this threshold in the opposite direction. The maximum flow velocities commonly exceed 2.0 m/s, in rare cases overflow velocities exceeding 3.0 m/s have been recorded.



Figure 13: Frequency of occurrence of overtopping flow velocities at groyne B29 (left). Relationship between Hp and Vx (right).

The overflow process, as described by the event-associated parameter  $V_x$  is dependent on ship wave celerity, ambient (tidal) flow and modified by its interaction with and transformation over the structure. The relationship between the overflow velocity and the primary wave height at the groyne crest shows that flow velocities, in general, tend to scale with H<sub>p</sub>.

#### 4.2 Damage development

The damage to the armour layer is assessed by means of changes to the surface elevation between two surveys, as given by difference plots of the survey data. Figure 14 shows the deformation of the rock armour layer in the first groyne variants (B29v1, B31v1) and supporting photographic evidence taken on or close to the date of the survey. The difference plots represent the damage observed between the reference survey in July 2015 and another survey in April 2017, corresponding to a period of 645 days (~1.75 years). Over 6000 ship-induced long-period wave events were registered in this time period. For B29v1 some deformation of the crest and lee side slope area are observed; up to approx. 0.7 m of erosion are recorded here, with greater displacement of rock armour toward the groyne head. The wave-facing slope and the scour protection have remained stable. In contrast, groyne B31v1 displays much more severe deformation of the rock armour layer. The crest is

destroyed over nearly the entire length of the structure and erosion of 1.0–2.0 m, locally exceeding 2.0 m are observed. This has resulted in the exposure of historic groyne construction efforts, which form the core of the structure. The displaced rocks have been redeposited, predominantly at the groyne foot on the lee side, as a result of the asymmetric loading from overflow events, leading to a flattened and widened appearance. The root area has remained remarkably stable.



Figure 14: Damage development at B29v1 and B31v1 visualised as difference plots between 07/2015 and 04/2017. Crosses indicate exceedance of scale. Photographs of the groyne condition at or near time of survey.

The analysis of difference plots suggests that individual events, or the grouping of one or more relatively high-energy events can effect significant damages in the short period of time between consecutive low waters. One such example is illustrated in Figure 15 which shows the damage incurred at B31v1 between low water on the 4<sup>th</sup> and 5<sup>th</sup> of August 2015. A crest-parallel deformation of the lee side slope in the order of  $\pm 0.2$  m (average value for a 1 x 1 m raster cell) is observed, suggesting erosion on the order of approx. one layer of rock. Also shown are the wave events registered in this time. One extreme event with  $H_p = 2.3$  m, among other events of up to 1.0 m, was recorded. The largest event was associated with a vessel of 363 m length and 46 m breadth travelling seaward with 13.7 kn *STW* and 11.5 m draught at approximately mean water level. The vessel passed the groynes at a distance of 187 m.



Figure 15: Damage development at B31v1 between two consecutive scans and measured wave heights at the groyne (pos. 5). Crosses indicate exceedance of scale.

Although B29v1 shows significantly enhanced rock armour stability compared to B31v1 despite the same rock grading, the observed damage after only 1.75 years did not satisfy the objectives of sufficiently increased armour layer stability. Subsequently, the groyne was rebuilt with a coarser grading of LMB<sub>5/40</sub> and a reference condition for variant B29v2 was scanned in November 2018. The changes to the rock armour over the time period of 442 days (~1.5 years) to the last scan in February 2019 shows only minor local deformation of typically less than 0.05 m on the wave-facing side and 0.1 m on the lee side (Figure 16) This can be attributed to an initial rearrangement and self-armouring of stones into a more stable position. The deformation pattern follows the previously described crest-parallel pattern, indicating the areas most affected by overflow events. The improved stability and condition of the rock armour layer was confirmed in recent manually conducted scan in December 2019 (Figure 16). It shows that after approximately two years, still very limited damage to the crest and lee side slope in the order of  $\pm 0.1$  m is recorded.



Figure 16: Damage development at B29v2 with larger rock size LMB<sub>5/40</sub> visualised as difference plot between 11/2017 and 02/2019 (left) and 12/2019 (right).

#### 5 Discussion of findings

## 5.1 Interpreting measured wave heights

The wave heights presented in section 4.1.1 were derived from statistics calculated over the entire monitoring period. While this is justifiable in order to present a simple first overview of loads, a more differentiated examination of the measurements is required to understand the important nuances of wave-structure interaction and groyne performance. As is the nature of prototype field studies, a large number of environmental variables remain uncontrolled, which poses some additional challenges in the correct interpretation of the measurements. Accounting for, as far as possible, the isolated and combined effects of these influencing factors is necessary for a true understanding of the measured wave loads. The major factors in this study are the deteriorating groyne condition, the vessel speed restriction and changes in groyne field morphology.

As shown in section 4.1, groyne damage typically manifests as a reduction in the crest level which in turn directly affects the wave-structure interaction, typically leading to lesser resistance to the wave. The measurements at B31, in particular, are strongly affected by this. As a result, wave heights at positions 4 and 5 tend to diminish with time. In contrast, the measured wave height at position 6 tends to increase with time, as the instrument is lowered with the deteriorating crest level. When examining the wave-structure interaction of a specific groyne design, only the measurements up to a certain damage condition will be representative of the performance. With respect to B31, the implication is that the actual hydraulic performance of the groyne design is somewhat misrepresented by a statistic over the entire period as presented here.

While the true impact of the speed restriction is yet to be examined, an analysis of the wave records at the groyne head has shown that the median wave height is reduced by approx. 1-2 cm, whereas more pronounced reductions are suggested at the other probe locations. This poses a challenge to the comparability of wave loads throughout the study period and implies that these two periods should be considered separately, when determining the stability of the rock armour to a certain load.

Further complication is given by the fact that groyne fields are subject to erosion and sedimentation through the monitoring period which in turn modulates wave transformation and energy dissipation in the nearshore area. Morphological changes were monitored in trimonthly profile surveys and analyses of this topographical data suggests that the beach levels display an average variability of approx.  $\pm 0.2$  to  $\pm 0.4$  m throughout the experiment.

Despite the mentioned caveats, the simple presentation of results chosen here allows a discussion of the general trends in wave-structure interaction and groyne performance. Further more detailed examination of the field data is currently being carried out to account for and untangle the contribution of the individual factors for the interpretation of wave heights. This will be required when conducting detailed investigations into the stability of the armour layer or secondary research questions such as e.g. the efficacy of the speed restriction in reducing wave heights on shoreline infrastructure and the understanding of groyne field morphological in the light of ship-borne loads, dredging activities and other environmental parameters.

#### 5.2 Performance of optimised groyne designs

The key to increasing the stability of the armour layer that is subject to long-period ship waves is to reduce as far as possible the magnitude of flows over the groyne root and crest areas. In practice, this can be achieved by reducing wave focussing in the root area and increasing the dissipation of wave energy in the groyne field and at the structure. The latter can be achieved by reducing slope angles and increasing porosity of the structure slopes. While overflow cannot be practicably avoided in tidal waters, this study proves that the flow magnitudes can be reduced by means of design modifications.

While the wave height at the groyne head is largely independent of groyne design, the wave heights at locations around the groyne body reflect the wave's characteristic interaction with the structure (and nearshore) as it experiences dissipation, shoaling, reflection and refraction effects, thus allows the hydraulic performance of the groyne to be described and assessed with respect to reducing loads on the rock armour layer. One commonality of the two designs is that the wave-facing side experience the largest wave heights as can be explained by the closer passing distances of seaward travelling ships. Wave heights increase toward the root area at both groynes due to wave shoaling, but also focussing and reflection effects. While this effect is quite pronounced at B31, it is much more subtle at B29 as the recess allows bypassing of wave energy through the root area. The smaller wave heights recorded at the crest of B29 in conjunction with the observation of much reduced damage suggests that fewer and less severe overflow events are experienced at the recessed groyne, despite the fact that no overflow was measured. At B31, arguably, the objective of improving the groyne root stability is achieved; however, this comes at the cost of an unfavourable increase in overflow loads over the groyne crest and body. At both groynes little to no damage is observed on the wave-facing side, leading to the conclusion that wave height alone is not the decisive factor in the structure deterioration and the load case  $R_c > 0$  is typically not problematic. It also implies that the overflow due to primary waves produced by ingoing vessels is also subcritical at this location.

In terms of forces acting on the crest and lee side slope, it has been shown that high velocities of up to 2.5 m/s are possible. When high-frequency turbulent velocity fluctuations (> 1Hz) are considered the data shows that intermittently acting velocities can be significantly higher than the values quoted in section 4.1.2, with implications for additional lift and drag forces on the rocks in the armour layer. It is not surprising then to see the bulk of the damage occur at the crest and in particular at the lee side slope. It follows that the design conditions for the dimensioning of rock armour with respect to long-period waves is given by the load case  $R_c \leq 0$ , as hypothesized by BAW (2010) and Gier and Schüttrumpf (2012). Analysis of the relationship between the measured overflow velocities and corresponding wave heights at B29 have shown that  $V_x$  appears to scale with the wave height; thus an increase in wave energy at the crest will tend to increase the flow velocities and shear stresses on the crest and lee side slope. Further, the most damaging situation will arise when a large stern wave coincides with a large drawdown and a tidal water level which is conducive to maximising the length of exposed lee slope, assumed to typically occur around  $R_{\epsilon} \approx 0$ . With decreasing freeboard ( $R_{\epsilon} < 0$ ), the potential for higher flow volumes increases whereas the exposed length of slope is reduced, the exact configuration of these two parameters being specific to each ship passage. While flow velocities are an indication of destabilising forces, typically the overflow volume will be more relevant in determining rock armour stability. Ways of determining overflow volumes from this field data set with a view to estimating critical discharge values are currently being evaluated.

The intended function of the groynes, concentrating the flow in the main channel and supporting water levels during low water, is not forfeited by the recessed design. The groyne acts as a conventional groyne during low water as the recess is above the dischargerelevant wetted perimeter. The morphological developments in the groyne fields show that no erosion effects arise from the recessed root. Adverse array effects on morphodynamics arising from multiple recessed groynes seem unlikely, however should be considered in any scheme implementation. Negative impacts on the stability of the adjoining revetment was also not observed.

#### 5.3 Increasing the stability of rock armour layers

A number of different approaches can be adopted to increase the stability of rocks in the armour layer. This includes e.g. the use of a larger rock size or higher density rock (in conventional or optimised design), geometry optimisation for improved wave-structure-interaction as attempted in this study or management options to reduce ship-borne wave heights.

In the case of structural damage, using a larger rock grading or higher density rock is always a potential remedy. The damage pattern suggests that an increase in rock grading on the crest and lee side slope only could also be a viable solution. To date there is no valid method to determine the adequate rock size for groyne overflow from long-period waves, thus the choice of rock grading has to be based on engineering expertise, knowledge of local conditions or, in the worst case, trial and error. The prototype observations have confirmed the dominance of overflow processes for the deterioration of the groyne rock armour. In this sense, there are parallels with phenomena in the field of hydraulic engineering such as weir flow and critical flow on riprap-armoured embankments and spillways with their respective empirical formulae (e.g. Isbash 1935, Abt et al. 2013). However, there are also important distinctions which are characteristic to long-period ship waves such as the influence of the dynamics and momentum of the wave on the destabilisation of rocks. Further it has to be considered whether spillway flow can develop in a meaningful way considering the wave dynamics and the exposure time of the lee side slope to the overflow (Gier and Schüttrumpf 2012). Work is currently ongoing to determine the suitability of these methods for rock sizing.

This study has shown that structural resilience can be increased by improving the wavestructure-interaction. The recess has shown to be effective in reducing hydraulic loads. Further optimisation should be explored, e.g. by assessing the performance of the recess as a singular measure, i.e. retaining the conventional groyne profile without changing side and head slope angles. A beneficial side effect of the recessed groyne can be in the promotion of aquatic habitats. Varying flow patterns in groyne fields with implications for their morphological and sedimentological make-up has been shown to increase the diversity of aquatic habitats in non-tidal rivers in Kleinwächter et al. 2017. Similar diversifying effects can be expected in estuaries.

Mitigating the wave loads at the source is also possible, but requires an understanding of how the nautical factors, in particular those that can be managed by vessel traffic regulations, influence the height of the near-shore wave at a specific site. Although the physics indicate the expected correlations between nautical parameters and incident primary wave heights, examination of the relationships in the field data set shows significant scatter, as would reasonably be expected. Nevertheless, certain parameter constellations can be identified which appear to favour the occurrence of large waves. At the study site for example the largest waves appear to be facilitated by conditions of highest vessel speed and channel blockage. Channel blockage is given by the blockage factor  $S=A_C/A_S$ , the ratio of the cross-sectional area of the waterway A<sub>C</sub> and the ship's immersed midship-section A<sub>S</sub>. It follows, that the blockage factor in a certain waterway cross-section is a function of ship breadth, draught and water level. To also account for the passing distance, the partial channel blockage factor  $S_P = A_{C,p}/A_{S,p}$  is introduced. Hereby only the part of the waterway cross-section and immersed midship-section comprising the area between vessel centreline and the relevant shoreline is used as illustrated in Figure 17. The largest waves occur at high blockage, i.e.  $S_p$  ratios of approx. 5–10 (see Figure 18).



Figure 17: Definition of partial channel blockage factor Sp with immersed partial midship-section AS,p, partial waterway cross-section Ac,p, passing distance d, water depth h and draught t.



Figure 18: Influence of partial channel blockage factor Sp on primary ship wave height Hp at the heads of groynes B29 and B31. Sample count in red.

Figure 19 also shows the vessel speed through water in relation to the long-period wave heights. It can be observed that the maximum wave heights increase with speed until approx. 15 kn. Beyond that greater scatter and reduced sample size is observed. One factor contributing to the scatter is the fact that high-speed passages are often associated with smaller feeder ships, which despite the higher *STW* tend to produce smaller waves than ULCVs due to the lower partial channel blockage (high  $S_p$  value).

Quantifying the relative contribution of individual factors amongst other nautical and environmental parameters requires a more detailed examination. It is clear that while all these relationships have implications for the efficacy of wave height reduction, vessel speeds is the factor most readily accessible for regulation. Work is ongoing to determine in more detail the influence of a vessel speed on wave heights at the shore.



Figure 19: Influence of vessel STW on primary ship wave height Hp at the heads of groynes B29 and B31. Sample count in red.

#### 6 Conclusions and further work

The conducted research programme has increased the understanding of the interaction between long-period ship waves and groynes. The measured hydraulic loads and damage development offer valuable insights into the mechanisms and processes leading to damage, but also leads for mitigation strategies.

Rock armour structures in German estuaries, designed decades ago in accordance with existing engineering guidance, are in some cases under-dimensioned to withstand the present-day ship-induced long-period waves, especially where waterway and nautical characteristics exacerbate the loading situation. While the highest wave impact is experienced on the wave-facing side, no damage is typically experienced here. The structural damage to groynes is related to high-velocity turbulent overflow phenomena to which the root, crest and lee side slope are particularly vulnerable. The most critical load case likely occurs when the ship wave with large drawdown and stern wave coincides with a relative water level that facilitates large volumes of flow over the groyne root and body. Modifications to structure geometry are shown to be effective in reducing loads by improving wave focussing and reflection performance. In particular, creating a recess in the groyne root offers these advantages as demonstrated in the measurably increased armour layer stability. The intended functionality of the groyne is not forfeited. Long term performance will be continually monitored, albeit in a much reduced scope, with wave height measurements at positions 1 and 5 of groyne B29 and visual assessments of structure condition.

To date, no validated engineering approach for the dimensioning of the rock armour layer in response to long-period ship waves is available. This dataset offers an opportunity to work towards a design methodology based on real prototype observations, as opposed to physical model tests. As such, further efforts are being directed towards evaluating and developing design methods. This includes exploring the applicability of design methods for weir flow and spillway erosion protection. The data will also be used in an attempt to develop a probabilistic design method.

While further optimisation of the groyne design is proposed, it is also important to consider the life cycle cost which considers construction as well as long-term maintenance frequency in comparison to conventional design with a larger rock size.

The data, although not collected specifically for this purpose, will also be used to shed light on questions of estuary management, e.g. examining the pattern and drivers of morphological change in the groyne fields and a more in depth evaluation of the efficacy of the speed restriction in reducing wave heights at the shoreline.

## 7 References

Abt, S. R.; Thornton, C. I.; Scholl, B. A.; Bender, T. R.: Evaluation of overtopping riprap design relationships. In: Journal of the American Water Resources Association, 49 (4), 2013.

BAW: Bemessung der Strombauwerke in der Außenweser unter Berücksichtigung von Schiffswellenbelastungen (BAW-Gutachten, A39550210120), Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg, 2010.

BAW: Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschifffahrtsstraßen, AP1 – Schadensanalyse (BAW-Gutachten, A39550270141), Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg, 2012.

BAW: Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschifffahrtsstraßen, Arbeitspaket 4b, Kleinmaßstäbliche 3D-Untersuchungen zu alternativen Buhnensystemen (BAW-Gutachten, A39550270141), Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg, 2015.

BAW: FuE-Abschlussbericht, Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschifffahrtsstraßen, B3955020470141, Bundesanstalt für Wasserbau, 2018.

CIRIA, CUR and CETMEF: The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering, 2nd edition. C683, CIRIA, London, 2007.

EAK: Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken durch den Ausschuss für Küstenschutzwerke der DGG e. V. und der HTG e. V. Die Küste, 65, 2002.

Gelinas, M. Bokuniewicz; H., Rapaglia, J.; Lwiza K. M. M.: Sediment resuspension by ship wakes in the Venice Lagoon. In: Journal of Coastal Research, 29, 8–17, 2013.

Gier, F.; Schüttrumpf, H.: Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken and Seeschifffahrtsstraßen, Arbeitspaket 2: Wissensstandsanalyse der an der Wellen-Strombauwerk-Interaktion beteiligten Belastungsprozesse, Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen, 2012.

Göransson, G.; Larson, M.; Althage, J.: Ship-generated waves and induced turbidity in the Göta Älv River in Sweden. In: Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 140, 3, 2014.

Hansen, U.: Wasserbausteine im Deckwerksbau, Bemessung und Konstruktion, Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co, Heide, 1985.

Isbash, S.: Construction of dams by dumping stones into flowing water. War department, United States Engineer Office, Engineering Division, Eastport, Maine, 1935.

Kleinwächter, M.; Schröder, U.; Rödiger, S.; Hentschel, B.; Anlauf, A. (Hg.): Alternative Buhnenformen in der Elbe – hydraulische und ökologische Wirkungen. Konzepte für die

nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft, Bd. 11. Schweizerbart Verlag, Stuttgart, 2017.

Niehüser, S.; Ulm, M.; Arns, A.; Jensen, J.; Kelln, V.; Uliczka, K.; Kondziella, B.: Interaction between ship-induced stress and associated characteristics of turbidity records. In: Uliczka, K.; Böttner, C.-U.; Kastens, M. et al. (Hg.): Proceedings of the 4th MASHCON 2016, Hamburg. International Conference on Ship Manoevering in Shallow and Confined Water with Special Focus on Ship Bottom Interaction, 2016.

Oetjen, J.; Lechthaler, S.; Schüttrumpf, H.: Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken and Seeschifffahrtsstraßen, AP4-3 – Modellphase 3, Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen, 2017.

Ohle, N.; Zimmermann, C.: Untersuchungen zu den Ursachen von Deckwerksverwerfungen am Nordufer der Elbe. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, 89, 155–198, 2003.

Oumeraci, H.; Kortenhaus, A.; Allsop, N. W. H.; de Groot, M. B.; Crouch, R. S.; Vrijling, J. K.: Probabilistic Design of Caisson Breakwaters and Sea Walls – Present Status and Perspectives. Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering, Sydney, Australia, 2000.

Oumeraci, H.; Brühl, M.: Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken and Seeschifffahrtsstraßen, Arbeitspaket AP3: Bestimmung der bemessungsrelevanten Parameter schiffserzeugter Wellen in Seeschifffahrtsstraßen (Parametrisierung der Schiffswellen), Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, 2013.

Oumeraci, H.; Brühl, M.; Neuert, N.: Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken and Seeschifffahrtsstraßen – Arbeitspaket AP5: Entwicklung eines 3D-CFD/CSD-Modells und numerische Stabilitätsuntersuchungen (Numerische Simulation). Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, 2014.

Parnell, K.; Soomere, T.; Zaggia, L.; Rodin, A.; Lorenzetti, G.; Rapaglia, J.; Scarpa, G.-M.: Ship-induced solitary Riemann waves of depression in Venice Lagoon. Physics Letters A, 379, 6, 555–559, 2015.

Rapaglia, J.; Zaggia, L.; Ricklefs, K.; Gelinas, M.; Bokuniewicz, H.: Characteristics of ships' depression waves and associated sediment resuspension in Venice Lagoon, Italy. In: Journal of Marine Systems, 85, 45–56, 2011.

Ravens, T. M.; Thomas, R. C.: Ship wave-induced sedimentation of a tidal creek in Galveston bay. In: Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 134, 21–29, 2008.

Scarpa, G.-M.; Zaggia, L.; Manfè, G.; Lorenzetti, G.; Parnell, K.; Soomere, T.; Rapaglia, J.; Molinaroli, E.: The effects of ship wakes in the Venice Lagoon and implications for the sustainability of shipping in coastal waters. Scientific Reports 9, Article number 19014, 2019.

Sehili, A.; Lang, G.; Lippert, C.: High-resolution subgrid models: background, grid generation and implementation. In: Ocean Dynamics, 64, 519–535, 2014. Tschirschwitz, F.; Mechelke, K.; Jansch, H.; Uliczka, K.; Kersten, T.: Ein automatisches Monitoringsystem für Buhnen an der Elbe durch terrestrisches Laserscanning. In: ZFV – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 141, 297–305, doi: 10.12902/zfv-0132-2016, 2016.

Tschirschwitz, F.; Mechelke, K.; Kersten, T.: Automatisches geodätisches Monitoring von Strombauwerken an der Tideelbe bei Juelssand im Zeitraum Februar 2015 bis Januar 2017. HafenCity Universität Hamburg, Labor für Geomatik, 2017.

Ulm, M.; Niehüser, S.; Kondziella, B.; Arns, A.; Jensen, J.; Uliczka, K.: Field measurements in the Kiel Canal, Germany: Ship waves, drawdown and sediment transport. In: Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 146, 4, 04020020, 2020

Wöffler, T.; Oetjen, J.; Krebs, V.; Schüttrumpf, H.: Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken and Seeschifffahrtsstraßen, AP4a – Vorversuche zur Modellphase 3, Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen, 2015.

WSA Bhv: Strombaulicher Bericht über den derzeitigen Stand der Bauwerksunterhaltung an den Buhnen und Leitwerken in der Außenweser, WSA Bremerhaven, 2009.

WSA Cux: Strombaulicher Bericht zur Bauwerksunterhaltung und zum Ufersicherungskonzept am Niedersächischen Ufer, WSA Cuxhaven, 2012.

WSA HH: Buhnen Juelssand Dokumentation, WSA Hamburg, 2010.

Zaggia, L.; Lorenzetti, G.; Manfé, G.; Scarpa, G. M.; Molinaroli, E.; Parnell, K. E.; Rapaglia, J. P.; Gionta, M.; Soomere, T.: Fast shoreline erosion induced by ship wakes in a coastal lagoon: Field evidence and remote sensing analysis. PLoS One, 12, 10, e0187210, 2017.

# Analyse der hydrologischen und morphologischen Entwicklung in der Tideelbe für den Zeitraum von 2013 bis 2018

Holger Weilbeer<sup>1</sup>, Axel Winterscheid<sup>2</sup>, Thomas Strotmann<sup>3</sup>, Ingo Entelmann<sup>4</sup>, Suleman Shaikh<sup>3</sup> und Bernd Vaessen<sup>4</sup>

- <sup>1</sup> Bundesanstalt für Wasserbau, holger.weilbeer@baw.de
- <sup>2</sup> Bundesanstalt für Gewässerkunde

<sup>3</sup> Hamburg Port Authority

<sup>4</sup> Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe-Nordsee

#### Zusammenfassung

In den Jahren von 2013 bis 2018 gab es in der Tideelbe verschiedene auffällige hydrologische und morphologische Veränderungen. Im Hamburger Hafen aber auch im Fahrrinnenabschnitt von Wedel bis Juelssand sowie in den Nebenbereichen und Häfen entlang der Tideelbe stiegen die Unterhaltungsbaggermengen an feinkörnigen Sedimenten ungewöhnlich stark an. Beobachtet wurden zudem deutlich erhöhte Sedimentationsraten sowie in einzelnen Gewässerbereichen ein Wandel im Sedimentinventar, verbunden mit einer Glättung morphologischer Sohlstrukturen. Gleichzeitig waren Veränderungen im Wasserstands- und Strömungsgeschehen auffällig. Der Tidehub stieg insbesondere im inneren Ästuar ungewöhnlich stark an und die Messstationen registrierten einen Anstieg der Strömungsgeschwindigkeiten und eine Erhöhung der Trübung. Für die beschriebenen Veränderungen im Tideelbesystem sind nach derzeitigen Erkenntnissen morphologische Veränderungen – insbesondere im Mündungstrichter – ursächlich, die durch die Folgen der seit Sommer 2013 anhaltenden Phase unterdurchschnittlich niedriger Oberwasserzuflüsse überlagert und durch ein auf diese Entwicklung unzureichend angepasstes Sedimentmanagement verstärkt werden. Wie sich die Verhältnisse in der Tideelbe nach Ende der aktuellen Niedrigwasserphase entwickeln, ist in den kommenden Jahren genau zu beobachten. Gleichzeitig sind die organisatorischen und politischen Rahmenbedingungen für ein adaptives und flexibles Sedimentmanagement zu verbessern.

#### Schlagwörter

Tideelbe, Tidehub, Oberwasserzufluss, Schwebstoffgehalt, Unterhaltungsbaggermengen

#### Summary

During the period 2013–2018, several striking hydrological and morphological changes took place in the tidal Elbe. Significant increases of maintenance dredging quantities for fine grained sediments occurred in the Port of Hamburg, in fairway sections between Wedel and Juelssand as well as in the ancillary areas and ports along the tidal Elbe. Comparably, sedimentation rates have also increased. In some sections, a strong fining of sediments in combination with a smoothing of the river bed could be observed.

Simultaneously, changes in water levels and currents were noticeable. The amplification of the tidal range was unusually large especially in the inner estuary, where measuring stations registered an increase in flow velocities and higher levels of turbidity. Morphological changes, especially in the outer part of the estuary, are considered as responsible for the described changes in the tidal Elbe system. These changes are superimposed by the consequences of an inflowing discharge of fresh water, which remained below-average since summer 2013, and are very likely to be amplified by a sediment management scheme not adapted to these recent developments. Conditions in the tidal Elbe need to be observed during the upcoming years beyond the current period of low fresh water discharge. At the same time, the organizational and political framework for adaptive and flexible sediment management should be improved.

## Keywords

Elbe, tidal river, tidal water level, fresh water inflow, suspended sediment concentration, maintenance dredging

## 1 Einleitung

Im Bereich der Tideelbe sind die Jahre seit 2013 durch eine äußerst angespannte Unterhaltungssituation geprägt. Insbesondere im Hamburger Hafen, aber auch im Fahrrinnenabschnitt von Wedel bis Juelssand sowie in den Nebenbereichen und Häfen entlang der Tideelbe, stiegen die Unterhaltungsbaggermengen an feinkörnigem Baggergut ungewöhnlich stark an. Beobachtet wurden zudem deutlich erhöhte Sedimentationsraten sowie in einzelnen Gewässerbereichen ein Wandel im Sedimentinventar, verbunden mit einer Glättung morphologischer Sohlstrukturen. Gleichzeitig waren Veränderungen im Wasserstands- und Strömungsgeschehen auffällig.

Dies war der Anlass eine gewässerkundliche Analyse der beobachteten Veränderungen vorzunehmen. Eine Arbeitsgruppe, bestehend aus Mitarbeitern der Wasser- und Schifffahrtsstraßenverwaltung (WSV), der Hamburg Port Authority (HPA), der Bundeanstalt für Gewässerkunde (BfG) und der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), nahm dazu 2017 die Arbeit auf. Dabei wurde nicht nur der aktuelle hydrologische und morphologische Zustand der Tideelbe mitsamt der seit 2013 eingetretenen Veränderungen dokumentiert, sondern auch ein gemeinsamer, institutionsübergreifender Beitrag zur Weiterentwicklung des Prozess- und Systemverständnisses und der fachlichen Grundlagen für das Sedimentmanagement geleistet. Für eine Vielzahl der nachfolgend dargestellten Ergebnisse konnten im Rahmen dieser Arbeitsgruppe erstmals auch revierübergreifende und vereinheitlichte Auswertungen durchgeführt werden, was den Gedanken einer Betrachtung der Tideelbe als ein naturräumliches Gesamtsystem unterstreicht.

Die Arbeit der AG Sedimentmanagement wurde mit einem gewässerkundlichen Bericht dokumentiert (Entelmann et al. 2018). Der vorliegende Beitrag wurde aus diesem Bericht entwickelt und mit aktuellen Daten und Erkenntnissen ergänzt. Er ist folgendermaßen strukturiert:





Abbildung 1: Übersicht der betrachteten gewässerkundlichen Messstationen in der Tideelbe sowie WSV-Baggerabschnitte, Hamburger Hauptbaggerabschnitte und behördlichen Zuständigkeitsgrenzen (Stand 2019). Die Höhen- und Tiefenangaben basieren auf dem DGM-W 2016. In Kapitel 2 werden die in der Tideelbe beobachteten hydrologischen, hydrodynamischen und morphologischen Veränderungen der letzten Jahre aufgezeigt und zu den Entwicklungen der vergangenen Jahrzehnte in Beziehung gesetzt. Dabei werden zunächst gemessene hydrologische Größen wie der Oberwasserzufluss (Kapitel 2.1), die Tidewasserstände (Kapitel 2.2) und die Strömungsgeschwindigkeiten (Kapitel 2.3) ausgewertet. Die sprunghaften Veränderungen der Trübungsverhältnisse bzw. Schwebstoffgehalte (Kapitel 2.4) geben weitere Hinweise zur Entwicklung der Baggergutmengen (Kapitel 2.5) und der Sedimentationsraten (Kapitel 2.7). Darüber hinaus werden in Kapitel 2.6 unter Verwendung digitaler Geländemodelle morphologische Veränderungen zwischen den Jahren 2010 und 2016 dargestellt. Die dabei aufkommenden Fragen nach dem Einfluss der Topographie im Mündungsgebiet oder einer Glättung von Sohlstrukturen im Bereich Hamburg auf die Tidedynamik werden in Kapitel 3 mit Hilfe wasserbaulicher Modellstudien beantwortet. Weitere Wirkzusammenhänge, welche die Baggergutmengen in Hamburg beeinflussen, werden durch die Anwendung eines Datenmodells (Kapitel 4) identifiziert und quantifiziert. Nach einer Zusammenfassung der beobachteten Veränderungen und Systemstudien in Kapitel 5 werden schließlich die beobachteten Veränderungen erklärt (Kapitel 6) und Handlungsempfehlungen formuliert (Kapitel 7).

Abbildung 1 gibt eine Übersicht über die betrachteten gewässerkundlichen Messstationen sowie die Baggerabschnitte der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, die Hamburger Hauptbaggerabschnitte und behördlichen Zuständigkeitsgrenzen. Die eingezeichneten Pfeile weisen auf die derzeitigen Umlagerungsbereiche für Baggergut. Wichtigste im weiteren genannte Verbringstellen sind der Bereich Neßsand (Elbe-km 638) an der Hamburger Landesgrenze (Verbringung von HPA-Baggergut), das Gebiet St. Margarethen (Elbe-km 686 bis 690) zwischen Störbogen und Brunsbüttel (Hauptverbringstelle für WSV-Baggergut aus den Sedimentationsbereichen Wedel bis Juelssand nahe Hamburg) sowie der Neuer Luechtergrund im Mündungstrichter (Elbe-km 730 bis 740). Weitergehende Informationen zu den Umlagerungsbereichen sowie Kartendarstellungen finden sich unter anderem in BfG (2014).

## 2 Beobachtete Veränderungen

#### 2.1 Oberwasserzufluss in die Tideelbe

Seit dem höchsten gemessenen Abfluss HQ von 4070 m<sup>3</sup>/s am 13.06.2013, bewegt sich der Oberwasserzufluss der Elbe auf einem in Relation zum langjährigen statistischen Mittel sehr niedrigen Niveau. Abbildung 2 zeigt die mittleren Jahresabflüsse am Pegel Neu Darchau von 1987 bis 2019 im Vergleich zum rückblickenden 30-jährigen Mittelwert MQ30. Der Mittelwert dieser für klimatologische Betrachtungen repräsentativen Periode lag bis einschließlich 2013 noch bei knapp 700 m<sup>3</sup>/s. Durch die um durchschnittlich 200 m<sup>3</sup>/s geringere Abflussmenge der vergangenen sechs Abflussjahre liegt das aktuelle MQ30 mittlerweile nur noch bei 649 m<sup>3</sup>/s. Die Abbildung 2 zeigt, dass auch in der Vergangenheit bereits mehrjährige Niedrigwasserperioden aufgetreten sind. Bereits in den Jahren 1989 bis 1993 gab es in fünf aufeinanderfolgenden Jahren Minderabflüsse, die zu einem MQ5 von nur 478 m<sup>3</sup>/s führten. Weitere hier nicht dargestellte Perioden mit länger anhaltender Trockenheit im Einzugsgebiet der Elbe gab es in der Vergangenheit auch schon von

1949 bis 1952 (MQ4 = 517 m<sup>3</sup>/s) sowie von 1971 bis 1974 (MQ4 = 542 m<sup>3</sup>/s) und von Juni 1982 bis Dez. 1985 (MQ3<sup>1</sup>/<sub>2</sub> = 552 m<sup>3</sup>/s).



Abbildung 2: Mittlerer Abfluss Neu Darchau in [m<sup>3</sup>/s] 1987–2019 (Gewässerkundliche Jahre vom 01.11. bis 31.10.).

Die geringen Abflüsse der vergangenen Jahre traten sowohl in den Sommer- wie auch in den Wintermonaten auf. Abbildung 3 zeigt die mittleren Abflussmengen jeweils differenziert für die Zeitspannen November bis April in grün (Zeitraum mit den größten Oberwasserzuflüssen eines Jahres, in denen die HPA bis Ende März den größten Teil ihrer Unterhaltungsbaggermengen bei Neßsand umlagert) und Mai bis Oktober in orange.

Während das MQ<sup>WI</sup> (mittlerer Abfluss im Winterhalbjahr November–April) im langzeitstatistischen Mittel bis zum Jahr 2013 867 m<sup>3</sup>/s betrug, lagen die Abflussmengen in den letzten 6 Jahren lediglich bei 536 m<sup>3</sup>/s (2018/19) bis 833 m<sup>3</sup>/s (2017/18). Die ebenfalls zu trockenen Sommermonate erreichten mit 240 m<sup>3</sup>/s als Mittelwert für die Monate Mai bis Oktober 2018 rd. 44 % des langzeitstatistischen Mittelwertes (MQ<sup>SO</sup> = 547 m<sup>3</sup>/s) und unterboten damit das bisherige Sommer-Abflussminimum aus dem Jahr 1976 (280 m<sup>3</sup>/s).

Der maximale Tageswert in den vergangenen 6 Jahren lag bei 1360 m<sup>3</sup>/s am 20.01.2015. Seit Mitte Juli 2013 konnte lediglich durchschnittlich 14 Tagen pro Jahr ein Abfluss größer 1.000 m<sup>3</sup>/s registriert werden. Im 30-jährigen Mittel bis zum Juni-Hochwasser 2013 wurde dieser Wert in der Regel an knapp 70 Tagen pro Jahr überschritten. Dagegen hat sich die Anzahl der Tage mit extrem niedrigen Abflusswerten <200 m<sup>3</sup>/s für diese Periode auf 195 summiert. In den 30 Jahren zuvor wurden derart niedrige Abflussmengen nur an insgesamt 50 Tagen beobachtet.



Abbildung 3: Oberwasserzufluss Neu Darchau seit Juli 2013 in der abflussreichsten Jahreszeit (grün hinterlegt) und in den Sommermonaten (orange hinterlegt).

#### 2.2 Tidewasserstände

#### 2.2.1 Entwicklung des Tidehubs

An den Pegeln der Tideelbe zwischen Brokdorf und dem Wehr bei Geesthacht wird seit Jahrzehnten tendenziell ein Anstieg des Tidehubs registriert. Während der Tidehub in Hamburg in den ersten 10 Jahren nach Fertigstellung der Fahrrinnenanpassung von Unterund Außenelbe (1999) mit durchschnittlich rd. 0,75 cm/a etwa in der gleichen Geschwindigkeit wie vor dem Ausbau anstieg, hat sich der jährliche Anstieg des Tidehubs, gemessen am Pegel St. Pauli, zwischen 2011/12 bis 2017 um den Faktor 4 auf 2,8 cm/a beschleunigt (Abbildung 4). Seit 2017 sinkt der Tidehub wieder.

Bemerkenswert ist eine vergleichbare Entwicklung des Tidehubs Anfang der 1990er Jahre, als sich ebenfalls während einer Niedrigwasserphase der Elbe von 1989 bis 1993 (Abbildung 2) über die Dauer von 5 Jahren der Tidehub in Hamburg um rund 10 cm erhöht hat. Hier zeigt sich erstmals eine Duplizität der Ereignisse. Dieser Umstand sorgte auch damals für Aufsehen und führte zu einer gemeinsamen Untersuchung der Gewässerkundler des WSA Hamburg und dem damaligen Amt Strom- und Hafenbau Hamburg. Die Untersuchungen wurden in einer Studie zusammengefasst, die zu dem Ergebnis kam, dass "natürliche morphologische Umlagerungsvorgänge (...) an dieser Entwicklung (Anm.: der Tnw-Absenkung) wesentlich beteiligt waren. Hierbei handelt es sich um umfangreiche Umlagerungsvorgänge im Bereich Medemsand und Medemrinne, zwischen den Pegeln Cuxhaven und Osteriff (...)" (Strom- und Hafenbau Hamburg und WSA Hamburg 1996).

Eine tendenziell vergleichbare Entwicklung des Tidehubs, allerdings mit deutlich abnehmender Ausprägung Richtung Nordsee, ist auch an den Pegeln unterhalb Hamburgs zu beobachten, in Abbildung 5 in Relation zum Pegel Helgoland dargestellt. Die beobachteten Veränderungen im Tidehub sind etwa ab Brokdorf und weiter stromauf erkennbar. Schreibt man den im oberen Ästuar etwas niedrigeren Tidehub des Jahres 2013 den hydrologischen (erhöhter Oberwasserzufluss) und meteorologischen Randbedingungen (häufige Ostwindlagen) in diesem Jahr zu Gute, so lässt sich der Beginn des beschleunigten Tidehubanstiegs an den Pegeln unterhalb Hamburgs auf den Zeitraum 2011/12 datieren.



Abbildung 4: Entwicklung des Tidehubs am Pegel St. Pauli sowie Abweichungen des jährlichen mittleren Abflusses MQ1 am Pegel Neu Darchau vom langjährigen Mittelwert MQ30.



Abbildung 5: Tidehubentwicklung von Brokdorf bis Hamburg in Relation zum Pegel Helgoland.

Die Differenzen des 5-jährigen Mittels des Tidehubs (2013/2017) zum 10-Jahresmittel 2003/2012 (Referenz) an den Pegeln oberhalb des Pegels Brunsbüttel (Elbe-km 696) in Abbildung 6 verdeutlichen, dass die größten Veränderungen an den weiter stromauf gelegenen Pegeln zwischen Hetlingen (Elbe-km 651) und St. Pauli (Elbe-km 623) aufgetreten

sind. Gegenüber dem Referenzzeitraum ist der MThb (5-Jahresmittel 2013/2017) um 12 cm am Pegel Stadersand (Elbe-km 655) und ca. 16 cm an den Pegeln Schulau (Elbe-km 640) und St. Pauli gestiegen, während er am Pegel Helgoland in diesen Zeiträumen nahezu identisch war.



Abbildung 6: Anstieg des MThb 2013-2017 gegenüber dem MThb 2003-2012 von Brunsbüttel (Elbe-km 696) bis Hamburg (Elbe-km 623).

#### 2.2.2 Entwicklung des Tideniedrigwassers

Auch die Entwicklung des Tideniedrigwassers zeigt die größten Veränderungen an den weiter stromauf gelegenen Pegeln Schulau (Elbe-km 640) bis St. Pauli (Elbe-km 623) (Abbildung 7). Die Differenz zum Pegel Helgoland steigt in diesen Jahren um 10–15 cm an. In dem Jahr 2018 steigt das Tideniedrigwasser jedoch wieder deutlich an und verbleibt 2019 im Vergleich zum Pegel Helgoland auf dem erreichten Niveau.

Gegenüber dem 10-Jahresmittel 2003/2012 ist das MTnw 2013/2017 (5-Jahresmittel) um 8 cm am Pegel Stadersand (Elbe-km 655), 10 cm am Pegel Schulau (Elbe-km 640) und 12 cm am Pegel St. Pauli (Elbe-km 623) gefallen, während es am Pegel Helgoland und Brokdorf in diesen Zeiträumen nahezu unverändert war (Abbildung 8).

Das im Vergleich zum Referenzzeitraum deutlich niedrigere Oberwasser im 5-jährigen Vergleichszeitraum (2013–2017) hat unterhalb der Elbbrücken aufgrund der Querschnittsaufweitung nur noch geringen Einfluss auf die Tidewasserstände. Im Raum Hamburg kann das gegenüber dem langzeitstatistischen Mittel um rd. 200 m<sup>3</sup>/s geringere Oberwasser dennoch für etwa 3 bis 4 cm (25–30 %) der MTnw-Absenkung verantwortlich gemacht werden. Oberhalb der Elbbrücken (hier nicht dargestellt) ist der Einfluss jedoch deutlich größer, was bei den Pegeln Bunthaus (–15 cm), Over (–19 cm), Zollenspieker (–26 cm) und Geesthacht (–29 cm) zu einer deutlich stärkeren Absenkung des MTnw geführt hat.



Abbildung 7: Entwicklung des Tideniedrigwassers zwischen Brokdorf und Hamburg als Differenz zum Pegel Helgoland.



Abbildung 8: Absenkung des MTnw 2013-2017 gegenüber dem MTnw 2003-2012 von Brunsbüttel (Elbe-km 696) bis Hamburg (Elbe-km 623).

#### 2.2.3 Entwicklung des Tidehochwassers

Die Entwicklung des Tidehochwassers an den Pegeln zwischen Brokdorf und Hamburg ist im Vergleich zur Tideniedrigwasserentwicklung deutlich schwächer ausgeprägt. Die Abbildung 9 zeigt das mittlere Tidehochwasser als Differenz zum Pegel Helgoland. In Brokdorf ist in den Jahren ab 2013 ein schwacher Abwärtstrend zu beobachten, an den Pegeln weiter oberhalb zwischen Stadersand und Schulau ist hingegen eine schwache Zunahme zu erkennen, während die Hamburger Pegel kaum einen Trend zeigen.



Abbildung 9: Entwicklung des Tidehochwassers zwischen Brokdorf und Hamburg als Differenz zum Pegel Helgoland.

Bei Betrachtung der lokalen absoluten Werte liegt der Anstieg des mittleren Tidehochwassers in den Jahren von 2013 bis 2017 gegenüber dem MThw 2003-2012 maximal bei rd. +4,5 cm an den Pegeln Hetlingen (Elbe-km 651) sowie Lühort (Elbe-km 649) und nimmt in Richtung Hamburg bis St. Pauli um etwa 1 cm wieder ab (Abbildung 10).



Abbildung 10: Anstieg des MThw 2013-2017 gegenüber dem MThw 2003-2012 von Brunsbüttel (Elbe-km 696) bis Hamburg (Elbe-km 623).

#### 2.2.4 Externe Einflüsse auf die Ausprägung der Tidewasserstände

Die vorgenommene Betrachtung von relativen Änderungen der Tidewasserstände im inneren Ästuar im Vergleich zum Pegel Helgoland können dabei helfen, die in den absoluten
Werten beobachteten Veränderungen, in einem ersten Schritt zu objektivieren. Eine vollständige Neutralisierung der externen Einflüsse auf die Ausprägung der Tidewasserstände erfordert jedoch die Berücksichtigung weiterer Größen als den hier teilweise bereits angesprochenen Einfluss des Oberwassers.

#### Windrichtung und -geschwindigkeit

Der Wind über der Dt. Bucht ist die dominierende Einflussgröße für die Lage und Inklination des Ruhewasserspiegels zwischen Helgoland und Hamburg und bestimmt damit im Zusammenwirken mit dem Abfluss über das Wehr Geesthacht im Wesentlichen die hydraulischen und geometrischen Randbedingungen für die Transformation der Tideenergie im Ästuar (Strotmann und Grothaus 2014).

In den früheren empirischen Modellen zur Übertragung der Tideparameter von der Nordsee in die Ästuare zur Quantifizierung ausbaubedingter Änderungen (z. B. Jensen et al. 2003) wird noch davon ausgegangen, dass sich der Windeinfluss bereits hinreichend in den Tidewasserständen am Pegel Helgoland abbildet und linear ins Ästuar übertragen werden kann. Neuere Untersuchungen zeigen jedoch, dass diese Ansätze die divergierende Wirkung auf- und ablandiger Winde auf die räumliche Zu- bzw. Abnahme der Hoch- und Niedrigwasserstände und damit die Tidehubänderung im Küstenvorfeld und Ästuar nicht zutreffend beschreiben (Grothaus 2013).

Dies vorausgeschickt zeigt die Jahres-Windstatistik der Station Helgoland des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in den vergangenen Jahren keine besonderen Auffälligkeiten. Die Windverhältnisse konnten weitestgehend als eher "ruhig' bezeichnet werden, was sich auch schon durch den relativ stabilen Verlauf der Hoch- und Niedrigwasserstände des Pegels Helgoland andeutete (Abbildung 7 und Abbildung 9).

In der Deutschen Bucht erhöhen Winde aus westlichen Richtungen die Tidewasserstände, Winde aus östlichen Richtungen verringern sie. Dieser Einfluss lässt sich für den Pegel Helgoland in guter Näherung quantifizieren, indem die Tidehalbwasser mit den quadrierten Windgeschwindigkeiten für 16 Windrichtungsklassen sowie der Druckanomalie an der Messstation Helgoland korreliert werden (Fickert und Strotmann 2009). Abbildung 11 zeigt für die Jahre von 2011 bis 2019 die resultierende positive (blau) oder negative (rot) Windschubwirkung auf die Wasserstände am Pegel Helgoland differenziert nach Windrichtung. Die Integration der vorzeichenbehafteten Fläche liefert die winderzeugte Abweichung des jährlichen Tidehalbwassers vom mehrjährigen statistischen Mittel ohne Windwirkung.

Die in Abbildung 7 und Abbildung 9 erkennbaren Ausreißer mit um ca. 8–10 cm geringeren Tidewasserständen sowohl beim MTnw als auch MThw am Pegel Helgoland im Jahr 2013 sind mit Hilfe der Abbildung 11 damit zu erklären, dass sich in diesem Jahr die Windschubkräfte aus östlichen und westlichen Richtungen nahezu die Waage gehalten haben, während sie üblicherweise aus westlichen Richtungen überwiegen (Abbildung 11).

Eine mit dem Jahr 2013 vergleichbar große "rote" Fläche im Jahr 2018 hatte dagegen lediglich eine Erniedrigung des MTnw in ähnlicher Größenordnung wie 2013 zur Folge, während sich das MThw 2018 aufgrund der häufigeren und stärkeren westlichen Winde auf einem ähnlichen Niveau wie in den Vorjahren einstellte. Bei vergleichbaren Luftdruckbedingungen resultierten diese unterschiedlichen Windverhältnisse in einer Herabsetzung des Tidehalbwassers (hier nicht dargestellt) gegenüber dem langjährigen statistischen Mittel von -8 cm im Jahr 2013 und lediglich -1,7 cm im Jahr 2018.



Abbildung 11: Richtungsdifferenzierte winderzeugte Tidehalbwasseranomalie der Jahre 2011–2019 für den Pegel Helgoland. Eine resultierende Erhöhung der Pegelwasserstände wird in Blautönen und eine Verringerung in Rottönen dargestellt.

#### Langperiodische Gezeiten-Variationen

Die Gezeiten im offenen Ozean ergeben sich im Wesentlichen als Folge der Gezeitenkräfte von Mond und Sonne. Durch die Verbindung zum Nordatlantik werden die Schwingungen der Wassermassen des Atlantiks auf die Nordsee und von dort auf die Ästuare übertragen, weshalb sie auch als Mitschwinggezeiten bezeichnet werden.

Theoretisch lassen sich hunderte Partialtiden mit unterschiedlichen Perioden aus einer Aufzeichnung der örtlichen Wasserspiegelauslenkung analysieren. Den größten Anteil am beobachteten Tidehub hat hier die halbtägige Mondgezeit M2. In Kombination mit der deutlich geringeren halbtägigen Sonnengezeit S2 resultiert der bekannte Spring-Nipp-Zyklus, mit einem Minimum im Tidehub nach Halbmond und einem Maximum nach Vollbzw. Neumond, wenn sich die Massenanziehungskräfte von Sonne und Mond addieren.

Die Einhüllende dieser Tidehubvariaton, die als MSf-Gezeit bezeichnet wird, hat eine Periode von rd. 14,77 Tagen und am Pegel Helgoland eine Amplitude von ca. 35 cm. Entgegen der zuvor bereits zitierten gängigen Vorstellung, dass sich der Tidehub linear verstärkt ins Ästuar übertragen lässt, kann man durch eine Analyse der Phasendifferenz zwischen M2 und S2 feststellen, dass die relative Zunahme des Tidehubs zur Springzeit – also bei hohen Tidehüben – geringer ausfällt als zur Nippzeit. Darüber hinaus entsteht im Ästuar eine langperiodische Schwingung mit der Frequenz der MSf, deren maximale Auslenkung sich stromauf von 0,5 cm in der Mündung auf 5 cm bis Hamburg verstärkt. das bedeutet, dass sich auch ohne Wind der Ruhewasserspiegel in Hamburg während der Spring-Zeit um 10 cm höher einstellt als zur Nippzeit und damit prinzipiell auch die Transformation der Tidewelle im Ästuar beeinflusst.

Mit der Periode eines Jahres bildet sich infolge Schwebung zwischen der M2 und ihrer eng benachbarten Partialtiden MA2 und MB2 eine Schwingung des Tidehubs mit einer Amplitude von rd. 9 cm am Pegel Helgoland und aktuell etwa 25 cm am Pegel St. Pauli aus (Abbildung 12). Diese Schwebung hat ihr Maximum im Mai und ein Minimum im November. Die Auslenkung dieser Schwingung des Tidehubs hat in den vergangenen Jahren deutlich stärker als der Jahresmittelwert des Tidehubs zugenommen.



Abbildung 12: Jahresvariation und Modulation des Tidehubs durch die Nodaltide am Pegel St. Pauli.

Dargestellt ist auch die Nodaltide mit einem 18,61-jährigen Zyklus, verursacht durch die Rotation des aufsteigenden Knotens der Mondbahn. Die Nodaltide äußert sich in einer Modulation des Tidehubs mit einer Amplitude am Pegel Helgoland von etwa 3,5 cm und am Pegel St. Pauli mit rd. 5,8 cm, also ca. 3 % des mittleren Tidehubs. Im Oktober 2015 hat das letzte Nodalmaximum und ca. Mitte 2006 das letzte Minimum vorgelegen. Diese nodale Modulation über 18,6 Jahre hat somit mit einem Anstieg von ca. 1,25 cm/Jahr zur starken Zunahme des Tidehubs beigetragen.

## 2.3 Strömungsgeschwindigkeiten

Für die nachfolgende Betrachtung werden Strömungsdauermessungen der WSV für den Bereich zwischen Elbe-km 643,0 (Wedel, Station D1) und 676,5 (Rhinplate, Station D4) aus den Jahren 2005 bis 2019 sowie Strömungsdauermessungen der HPA bei Elbekm 631,0 (Teufelsbrück) herangezogen. Bei den WSV-Strömungsdaten handelt es sich um Punktmessungen an Standorten in Gewässerquerschnitten, in deren Umfeld i. A. nur geringe morphologische Veränderungen stattfinden. Seit 2006 werden ergänzend alljährlich *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP)-Messungen über eine ganze Tide in diesen Querschnitten durchgeführt, um Informationen über die Querverteilung der Strömung zu erhalten. Bei den Strömungsdaten in Hamburg handelt es sich um querschnittsgemittelte Messungen.



Abbildung 13: Entwicklung der mittleren maximalen Strömungsgeschwindigkeiten an den WSV-Stationen D1 bis D4 sowie an der HPA-Station Teufelsbrück (Mittelwerte über Gewässerkundliches Jahr; oben: Flutstrom, unten: Ebbestrom).

Die Zeitreihen in Abbildung 13 verdeutlichen die Entwicklungen der mittleren maximalen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten (Berechnung über ein Gewässerkundliches Jahr, oberflächennahe Messwerte). Grundsätzlich zeigen sich langjährig betrachtet erhebliche Schwankungen. Für das Jahr 2011 gibt es für Teufelsbrück keine repräsentativen Daten. Für die Jahre 2014 bis 2017 ist erkennbar, dass die mittleren maximalen Geschwindigkeiten sowohl für den Ebbe- wie auch den Flutstrom an allen Stationen auf einem um ca. 20–30 cm/s höheren Niveau liegen als in davorliegenden Jahren. Mittels weitergehender Auswertungen kann ein maßgeblicher Einfluss unterschiedlicher Messzeiträume im Jahr negiert werden, die sich unter anderem ergeben, da die bojen-gebundenen Messstationen der WSV im Winterhalbjahr bei Eisgang über längere Zeiträume eingeholt werden.

Anderes als beim Tidehub sind die Veränderungen bezüglich der mittleren maximalen Strömungsgeschwindigkeiten erst im Nachgang des Juni-Hochwassers 2013 zu beobachten. Nach Höchstwerten in 2017 ist dann, parallel zum Absinken des MThb, seit 2018 ein Rückgang zu erkennen. Die Entwicklung der mittleren Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten (hier grafisch nicht dargestellt), ist ähnlich, aber schwächer ausgeprägt.

Eine besondere Situation zeigt sich bei D1. Hier ist anders als an allen anderen Stationen nicht nur ein großer Unterschied zwischen den Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten zu erkennen, sondern auch eine deutliche Veränderung der Flut- und Ebbestromdauern zu beobachten (Abbildung 14). Dazu ist anzumerken, dass D1 anders als die anderen Stationen im Flutstrom eine exponierte Prallhanglage (Bereich Leitdamm Hanskalbsand, Südufer) hat, während sich der Ebbestrom hier stärker in Richtung Nordufer ausbildet.



Abbildung 14: Entwicklung der mittleren Flut- und Ebbestromdauern an den Station D1 bis D4 (WSA Hamburg, oberflächennahe Messung) sowie an der Station Teufelsbrück (HPA, tiefen- und querschnittsgemittelte Messung); oben: Ebbestrom, unten: Flutstrom.

Die Auswertungen der jährlichen ADCP-Ganztidenmessungen verdeutlichen zunächst die Größenordnungen der Unterschiede zwischen Flut- und Ebbestromdauern im Bereich des Prallhanges (Abbildung 14) gegenüber den gemittelten Flut- und Ebbestromdauern über den Gesamtquerschnitt (Abbildung 15). Die Flutstromdauer ist über den Gesamtquerschnitt betrachtet geringer, die Ebbestromdauer länger als am Prallhang bei D1 gemessen. Entsprechend sind auch die Veränderungen nach 2013 geringer.

Es verbleibt aber eine Zunahme bei den gemessenen Flutstromdauern von ca. 15 Minuten im Zeitraum 2014 bis 2019 gegenüber den Vorjahren 2006 bis 2013 bei entsprechender Verringerung der Ebbestromdauern. Ein vergleichbarer Effekt zeigt sich in Abbildung 15 an der Messstation Teufelsbrück. Maßgeblich für die Entwicklung dürften die geringeren Oberwasserzuflüsse nach 2013 sein. An den weiter stromab gelegenen Stationen D2 bis D4 sind entsprechende Effekte aufgrund des zunehmenden Tideprismas und dem damit geringeren Einfluss des Oberwasserzuflusses nicht mehr erkennbar.



Abbildung 15: Entwicklung der Flut- und Ebbestromdauern bei jährlichen ADCP-Messungen im der Messstation D1 zugeordneten Gewässerquerschnitt Q1 und in der Hahnöfer Nebenelbe (WSA Hamburg, jährliche Messung über ein Tide; ADCP: Mittelwert über gesamten Querschnitt, Hahnöfer Nebenelbe (HN): parallele Punktmessung; oben: Ebbestrom, unten: Flutstrom; in 2017 wurden keine Messungen durchgeführt).

## 2.4 Trübung und Schwebstoffgehalte

Zusätzlich zu den Strömungsgeschwindigkeiten wird an denselben gewässerkundlichen Dauermessstationen auch die Gewässertrübung erfasst. In der Niedrigwasserphase 2013f war parallel zu den in Kapitel 2.2 beschriebenen Veränderungen der Tidewasserstände und dem in Kapitel 2.3 skizzierten tendenziellen Anstieg der Strömungsgeschwindigkeiten auch ein Anstieg der Gewässertrübung zu beobachten. Für den Bereich Hamburg werden Trübungsdaten von der Gewässergütemessstelle Seemannshöft (betrieben durch das Hamburger Hygiene-Institut) herangezogen. Die Trübung als optische Messgröße wurde an allen Stationen in korrespondierende Schwebstoffgehalte umgerechnet (BAW 2018).

An allen Stationen konnte entweder zu Ende 2013 oder zu Anfang 2014 eine sprunghafte Erhöhung der Trübungsverhältnisse und damit der Schwebstoffgehalte festgestellt werden. Hierzu wurden die langjährigen Zeitreihen der durch Umrechnung erzielten Schwebstoffgehalte einer statistischen Bruchpunktanalyse unterzogen (Pettitt 1979). Die Ergebnisse der Analyse, also die Zeitpunkte, zu denen die sprunghafte Erhöhung an jeder Station stattgefunden hat, sind weiter unten in der Tabelle 1 aufgeführt. An der Station Seemannshöft (Elbe km 628,9) hat sich das Niveau der Schwebstoffgehalte etwa Anfang Februar 2014 von zuvor im Mittel 52 mg/l (2007–2013) auf das 2-fache erhöht (Abbildung 16). Bemerkenswert ist dabei die auch im gleitenden Monatsmittel gut erkennbare spontane Erhöhung innerhalb weniger Tage von einem noch durch das Juni-Hochwasser 2013 begünstigten unterdurchschnittlich niedrigen Niveau auf Werte um die 150 mg/l zu Beginn des Jahres 2014. Erhöhte Schwebstoffgehalte auf diesem Niveau gab es auch in den Jahren vor 2014, aber bisher verharrten erhöhte Schwebstoffgehalte nur wenige Wochen auf diesem Niveau und fielen dann wieder auf bzw. unter den Schnitt. Seit 2014 ist eine deutlich höhere Schwankungsbreite auf einem dauerhaft erhöhten Niveau mit maximalen Spitzen von bis zu rd. 250 mg/l im Tagesmittel (Februar 2017) zu beobachten. Zu Ende des Jahres 2017 begannen die Schwebstoffgehalte im Zuge einer mehrmonatigen Phase von etwas höheren Oberwasserzuflüssen (Zeitraum November 2017 bis Februar 2018 mit rd. 1000 m<sup>3</sup>/s im Durchschnitt) vorübergehend zu sinken. Im Laufe des Jahres stiegen die Gehalte wieder an und erreichten spätestens zu Beginn des Herbstes 2018 das erhöhte Niveau der Vorjahre.

Ein ähnliches Bild ergibt sich auch bei Betrachtung der Schwebstoffgehalte im zeitlichen Verlauf an der Station D1 (Hanskalbsand, Elbe-km 643,0), welche die erste Station stromab der Landesgrenze zu Hamburg ist. Abbildung 17 zeigt vergleichbar die tagesgemittelten, oberflächennahen Schwebstoffgehalte von Oktober 2006 bis Dezember 2018, die gleitenden Monatsmittel sowie die beiden mittleren Niveaus von bzw. bis zum statistisch ermittelten Bruchpunkt für die Station D1 in der oberflächennahen Messebene im Januar 2014. Auffällig ist auch hier die ebenfalls spontane Erhöhung der Schwebstoffgehalte. Während bis Januar 2014 ein langfristig mittlerer Schwebstoffgehalt von ca. 75 mg/l beobachtet werden konnte, liegen die Werte danach insgesamt auf einem deutlich gesteigerten Niveau von ca. 165 mg/l und sind somit um mehr als das Zweifache höher. Zwar wurden in früheren Zeiträumen auch schon vergleichsweise hohe Schwebstoffgehalte von bis zu rd. 170 mg/l im gleitenden Monatsmittel (Dezember 2011) erreicht, jedoch liegen die Maxima nach Januar 2014 deutlich höher (ca. 25-40 %). Außerdem hat die Schwankungsbreite der Schwebstoffgehalte bei D1 seit dem Eintreten dieser sprunghaften Erhöhung, wie auch zuvor für die Seemannshöft beschrieben, stark zugenommen. Auch an der Station D1 ist es zu einem Rückgang der Schwebstoffgehalte zu Jahresende 2017 gekommen, im Vergleich zur Station Seemannshöft ist dieser jedoch deutlich schwächer ausgefallen.

#### Konzentration Seemannshöft



Abbildung 16: Entwicklung der oberflächennahen Schwebstoffgehalte (Tagesmittelwerte) an der Gewässergütemessstelle Seemannshöft (betrieben durch das Hamburger Hygiene-Institut) seit 2007.

#### Konzentration D1 Oberfläche



Abbildung 17: Entwicklung der Schwebstoffgehalte an der Dauermessstelle D1 (Tagesmittelwerte, Messebene ca. 1,5 m unter der Wasseroberfläche) seit 2006. Die Schwebstoffgehalte wurden auf Basis der hier gemessenen Trübungswerte bestimmt.

#### Konzentration D4 Oberfläche



Abbildung 18: Entwicklung der Schwebstoffgehalte an der Dauermessstelle D4 (Tagesmittelwerte, Messebene ca. 1,5 m unter der Wasseroberfläche) seit 2006. Die Schwebstoffgehalte wurden auf Basis der hier gemessenen Trübungswerte bestimmt.

Ein ähnliches Bild zeigt sich auch an den Dauermessstationen D2 und D3 (Elbe-km 651,3 und 664,7, hier nicht dargestellt). Auch die in Abbildung 18 dargestellte Entwicklung der Schwebstoffgehalte an der 33,5 km stromab von D1 gelegenen Dauermessstelle D4 (Rhinplate, Elbe-km 676,5) weist einen Sprung der beiden mittleren Niveaus zum November 2013 auf, der Faktor ist mit 1,4 jedoch etwas geringer. Die Spitzen für die Schwebstoffgehalte vor dieser sprunghaften Erhöhung erreichten im Monatsmittel knapp das Ausmaß wie im Zeitraum danach, jedoch kann in der Vergangenheit auch eine etwas geringere Schwankungsbreite der Gehalte beobachtet werden.

Die mittleren Niveaus der beiden Zeiträume bis zum Eintreten dieser sprunghaften Erhöhung (Referenz) sowie im Zeitraum danach (aktuell) für alle Stationen sind nochmals in Tabelle 1 zusammengefasst dargestellt. An den Stationen D1 bis D4 werden zusätzliche Trübungsdaten und damit Schwebstoffgehalte auch in einer sohlnahen Messebene gemessen und sind ebenfalls in Tabelle 1 enthalten. Stromab der Station D4 liegen keine durchgängig qualitätsgesicherten Daten vor und wurden daher an dieser Stelle nicht zur Ausweitung der Analyse herangezogen.

Die dargestellten Zeitreihen für die Schwebstoffgehalte sowie der in Tabelle 1 gegebene Überblick für alle Stationen und Messebenen zeigen eindeutig, dass es gemäß den statistischen Testergebnissen im Zeitraum zwischen Oktober 2013 und Februar 2014 an allen Dauermessstationen zu einer spontanen Erhöhung der Trübung bzw. der korrespondierenden Schwebstoffgehalte im Bereich des gesamten inneren Ästuars gekommen ist. Seitdem sind die Schwebstoffgehalte an sämtlichen Stationen und Messebenen auf diesem hohen Niveau verharrt, auch die Schwankungsbreite zwischen maximalen und minimalen Gehalten hat gegenüber dem Referenzzustand vor Eintreten dieser spontanen Erhöhung zugenommen. Tabelle 1: Langfristige mittlere Niveaus der Schwebstoffgehalte (Stationen D1 bis D4 sowie Station SH-Seemannshöft) in den Zeiträumen bis Februar 2014 zum Eintreten einer sprunghaften Erhöhung (Referenz) sowie im Zeitraum danach ab Februar 2014 (aktuell); die Trübungswerte an den Stationen im Amtsbereich WSA Hamburg (D1, Elbe-km 643 bis D4, Elbe-km 676,5) wurden auf Schwebstoffgehalte umgerechnet, eine Umstellung der optischen Sensorik in 2011 ist dabei berücksichtigt worden.

	Oberflächenn	nahe Messeb	ene [mg/l]		Sohlnahe Messebene [mg/l]							
Sta-	Statistisch	Referenz	aktuell	Faktor	Statistisch	Referenz	aktuell	Faktor				
tion	ermittelter	bis	nach		ermittelter	bis	nach					
	Bruchpunkt	Bruch-	Bruch-		Bruchpunkt	Bruch- Bruch-						
	(Pettitt-	punkt	punkt		(Pettitt	punkt	punkt					
	Test)	(Mittel-	(Mittel-		Test)	(Mittel-	(Mittel-					
		wert)	wert)			wert)	wert)					
SH*	Feb. 2014	52	105	2,0	-	-	-	-				
D1	Jan. 2014	75	165	2,2	Okt. 2014	214	360	1,7				
D2	Dez. 2013	86	216	2,5	Dez. 2013	243	459	1,9				
D3	Okt. 2013	115	224	1,9	Okt. 2013	349	513	1,5				
D4	Nov. 2013	169	240	1,4	Okt. 2013	341	434	1,3				

\*Seemannshöft

Bei genauerer Betrachtung der Ergebnisse, wie in Tabelle 1 dargestellt, zeigt sich, dass der Faktor der Erhöhung zwischen 1,4 und 2,5 auf der oberflächennahen Messebene und zwischen 1,3 und 1,9 auf der sohlnahen Messebene beträgt und damit von ähnlicher Größenordnung ist. Die stärkste Erhöhung kann etwa auf den Abschnitt zwischen D1 und D2 eingegrenzt werden, weiter stromab nimmt die Entwicklung ab. Das zeitliche Eintreten der Bruchpunkte folgt einem Muster, gemäß dem diese Erhöhung zuerst an den weiter stromab gelegenen Stationen D3 und D4 stattgefunden hat und dann im Zeitraum von Dezember 2013 bis Januar 2014 die Stationen D1 und D2 erreicht hat und zuletzt im Februar 2014 an der am weitesten stromauf gelegenen Station Seemannshöft beobachtet werden konnte.

Auffällig ist, dass die Bruchpunktanalyse einen Zeitraum von Oktober 2013 bis Februar 2014 ergeben hat, zu dessen Beginn zwei Sturmflutereignisse stattgefunden haben: Sturmtief Christian am 28.10.2013 sowie am 5./6.12.2013 das Orkantief Xaver. Diese haben viel Sediment auf den angrenzenden Watten und Vorländern mobilisiert und die feinkörnigen Anteile sind im Anschluss stromauf transportiert worden, denn zugleich hat sich an diese beide Sturmflutereignisse die aktuelle Phase eines inzwischen durchgängig seit sechs Jahren unterdurchschnittlich niedrigen Oberwasserzuflusses angeschlossen.

Einzige Ausnahme an dem zuvor beschriebenen Muster ist die Station D1 und hier die sohlnahe Messebene. Diese zeigt einen etwas späteren Bruchpunkt und damit einen sprunghaften Anstieg der Schwebstoffgehalte im Oktober 2014. Hierbei ist auffällig, dass die Station D1 nur wenige Kilometer stromab der Verbringstelle Neßsand liegt, auf der ab November 2014 und den darauffolgenden Monaten im Vergleich zu den Vorjahren überdurchschnittlich große Mengen an Unterhaltungsbaggergut durch die HPA verbracht worden sind. Zugleich kann das menschliche Auge in der Zeitreihe für die sohlnahen Schwebstoffgehalte an der D1 eine weitere sprunghafte Erhöhung der Schwebstoffgehalte ebenfalls im Zeitraum Oktober 2013 und Februar 2014 erkennen (Abbildung 19). Leider wurde dieses Ereignis aufgrund einer einmonatigen Datenlücke im Januar/Februar 2014 messtechnisch nicht vollständig erfasst, so dass diese Daten fehlen und auch nicht in den Pettitt-Test eingehen und durch diesen erfasst werden konnten.



Konzentration D1 Sohle

Abbildung 20 zeigt die Entwicklung der Schwebstoffgehalte nochmals in anderer Form. Dargestellt sind die Jahresmittelwerte (Gewässerkundliches Jahr) für die Schwebstoffgehalte bei Flutstrom von 2011 bis 2019 (links) sowie die Differenzen zum Bezugsjahr 2011 (rechts). Das Niveau der Jahresmittelwerte liegt oberhalb der zuvor diskutierten Zahlen in Tabelle 1, da die Flutstromgeschwindigkeiten an den hier betrachteten Dauermesstationen D1 bis D4 höher als die Ebbestromgeschwindigkeiten und die Flutstromdauern kürzer als die Ebbestromdauern sind (vgl. Kapitel 2.3). Aufgrund der damit stärkeren Resuspension sind die mittleren Schwebstoffgehalte bei Flutstrom entsprechend höher.

In 2016 lagen die mittleren oberflächennahen Schwebstoffgehalte (erfasst bei Flutstrom an den Stationen D1 bis D4) im Mittel um rd. 300 mg/l höher als die Werte, die in 2013 zu Beginn der Niedrigwasserphase 2013f gemessen wurden (Abbildung 20, unten). Nach 2016 war dann eine weitere Erhöhung der Gehalte nur noch bei D3 und D4 zu verzeichnen. Aus den sohlnahen Messungen bei D1 bis D4 (zweite Messebene, rd. 1 m über der Gewässersohle) lässt sich für den Bezugszeitraum die gleiche Entwicklung abbilden, wobei die Schwebstoffgehalte hier in 2016 im Mittel um rd. 650 mg/l höher als in 2013 lagen. In 2018 und 2019 wurden an diesen Stationen gegenüber 2017 wieder durchweg niedrigere Werte gemessen. Auffällig ist aber gleichzeitig, dass an den Station D1 und D2 deutlich höhere Werte als in den Jahren 2011 bis 2014 gemessen wurden. Die Schwebstoffgehalte verharren hier, am oberen Ende der Trübungszone der Tideelbe, auf einem hohen Niveau.

Abbildung 19: Entwicklung der Schwebstoffgehalte an der Dauermessstelle D1 (Tagesmittelwerte, Messebene ca. 1 m über der Gewässersohle) seit 2009. Die Schwebstoffgehalte wurden auf Basis der hier gemessenen Trübungswerte bestimmt.





Abbildung 20: Mittlere Schwebstoffgehalte während Flutstrom (Messebene ca. 1,5 m unter der Wasseroberfläche) an den Dauermessstationen D1 (Wedel) bis D4 (Rhinplate). Oben: Entwicklung im Zeitraum 2011 bis 2019), unten: dazugehörige Differenzen zum Bezugsjahr 2011.

Die an Tonnen befestigten Stationen D1 bis D4 liegen aufgrund nautischer Erfordernisse alle außerhalb der Fahrrinne und können daher nicht die dortigen sohlnahen Schwebstoffgehalte und -transporte registrieren, die wesentlich höhere, aber per Messung bislang nur wenig erfasste Werte erreichen. Ein erster Einblick in die dort vorherrschenden Verhältnisse wurde im November 2015 von der BAW im Rahmen des FuE-Projektes "Schiffserzeugter Sedimenttransport" erarbeitet. Während einer Sondermessung wurden u. a. sorgfältig validierte Messungen der Schwebstoffkonzentration an der Sohle der Fahrrinne durchgeführt. Die Abbildung 21 zeigt die Positionierung der Messgeräte bei Elbe-km 646,8.

Die Abbildung 22 zeigt die gemessenen sohlnahen Schwebstoffgehalte an der Position W4. Obwohl in diesem Bereich das Sedimentinventar eher sandig ist, werden Spitzenwerte von bis zu 4 g/l erreicht. Tidegemittelt liegen die sohlnahen Schwebstoffgehalte bei ca. 1,5 g/l, also rund eine Größenordnung mehr als an den Dauermessstationen registriert.



Abbildung 21: Im Rahmen des FuE-Projektes "Schiffserzeugter Sedimenttransport" der BAW wurden im November 2015 u. a. sorgfältig validierte Messungen der Schwebstoffgehalte an der Sohle der Fahrrinne durchgeführt. Die Abbildung zeigt die Positionierung der Messgeräte.



Abbildung 22: Gemessene sohlnahe Schwebstoffgehalte an der Position W4.

In einer an der BAW-DH durchgeführten Master-Arbeit (Hillmann 2017) wurde, basierend auf den Einzelpunktmessungen an D1 bis D4 im Zeitraum 2011 bis 2016 sowie weiteren Daten der Messstationen im WSV-Amtsbereich Cuxhaven, die Variabilität der Trübungszone der Tideelbe in Abhängigkeit vom Oberwasserzufluss seit 2013 untersucht. Abbildung 23 zeigt eine Darstellung, in der der Abflusskategorie 2000 bis 4000 m<sup>3</sup>/s (grüne Linie) Messdaten des Frühsommerhochwassers 2013 und den Abflusskategorien 0 bis 500 m<sup>3</sup>/s (blaue Linie) sowie 500 bis 700 m<sup>3</sup>/s (orange Linie) Messdaten aus den Folgejahren 2014 bis 2016 zu Grunde liegen. Demnach wurden die höchsten Schwebstoffgehalte in Folge des Hochwassers 2013 bei LZ3 (Otterndorf, Elbe-km 715) gemessen, das Schwebstoffinventar war insgesamt sehr gering. Die weiteren ausgewerteten Messungen zeigten deutlich höhere Schwebstoffgehalte (Anstieg des Schwebstoffinventars) und in der Abflusskategorie 500 bis 700 m<sup>3</sup>/s eine starke Angleichung an den Messstationen D3, D4 und LZ2 (Bereich Pagensand bis Osteriff). Bei geringeren Oberwasserzuflüssen wurden die höchsten Werte an D3 erfasst (Pagensand, Elbe-km 664,7). Während die Messwerte der Stationen stromab von D3 bei extrem niedrigen Abflüssen (0-500 m<sup>3</sup>/s) gegenüber der Abflusskategorie 500 bis 700 m<sup>3</sup>/s geringer waren, d. h. bei noch niedrigerem Oberwasser absanken, waren sie stromauf bei D1 (Hanskalbsand, Elbe-km 643,0) und D2 (Juelssand, Elbe-km 651,3) erhöht. Eine vergleichbare Situation liegt in 2019 vor (vgl. Abbildung 20), wobei die ausschließlich auf Flutstrom bezogenen Werte hier bei D1 und D2 in der oberflächennahen Messung (rd. 1,5 m unter Wasseroberfläche) im Bereich von 380 mg/l und auf einem annähernd gleichen Niveau wie bei D3 und D4 liegen.



Abbildung 23: Lage der Trübungszone bei verschiedenen Abflusskategorien der Elbe (Hillmann 2017; SSC = suspended sediment concentration/Schwebstoffgehalt, hier ebenfalls aus Trübungsmessungen überschlägig errechnet und über die Wassersäule gemittelt).

Im Rahmen einer seitens TU Hamburg-Harburg, WSA Hamburg und BfG betreuten Masterarbeit (Loder 2017) wurden weitere Messdaten zu Trübung und Schwebstoffgehalt ausgewertet, um die aktuelle hydrologische Situation noch besser zu verstehen und insbesondere auch im langjährigen Vergleich besser einordnen zu können. U. a. wurden dabei Ergebnisse aus oberflächennahen Schwebstoffprobenahmen der Flussgebietsgemeinschaft FGG Elbe (Hubschrauberlängsbefliegungen) im Zeitraum 2013/2014 bis 2019 mit denen früherer Niedrigwasserperioden in 1982/86 und 1989/92 verglichen (Abbildung 24). Mit Hilfe dieser Daten kann der Gesamtverlauf in der Trübungszone über rd. 20 Messpositionen sehr gut erfasst werden. Da die Proben durch den Hubschrauber ausschließlich bei Ebbstrom und vorwiegend in Fahrrinnenmitte genommen werden, liegen die hier ermittelten Schwebstoffgehalten im Mittel unter den zuvor vorgenannten Werten (z. B. Abbildung 20, hier über Flutstrom gemittelte Werte). Im Ergebnis zeigt sich in der Niedrigwasserphase 1989/92 eine ähnliche Entwicklung wie aktuell, wobei in 2013/2014 bis 2019 vergleichsweise höhere Gehalte im Bereich Elbe-km 681,4 bis 710,0 augenfällig sind. Für 1982/1986 zeigt sich keine deutliche Entwicklung; anzumerken ist, dass das MQ4 hier knapp 90–100 m<sup>3</sup>/s höher war als in den beiden anderen Vergleichszeiträumen (vgl. Abschnitt 2.1). "Historische" Vergleiche über die gesamte Wassersäule sind leider nicht möglich, da in der Vergangenheit kontinuierlich nur Messprogramme zur Erfassung oberflächennaher Werte, insgesamt deutlich weniger Messungen und keine Dauermessungen durchgeführt wurden.

Elbe-km	1982	1983	1984	1985	1986	1988	1989	1990	1991	1992	1993	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
636,0	52	51	60	47	45	68	54	49	51	59	64	27	41	36	58	70	45	66
639,4	72	56	24	52	33	50	38	64	86	66	85	36	47	55	80	69	54	67
642,0	42	36	24	31	24	52	37	42	46	47	60	- 33	69	45	52	65	64	61
645,5	61	35	23	42	22	29	31	34	64	65	67	31	47	47	54	56	34	50
649,4	72	51	34	49	32	45	31	43	96	99	93	44	46	67	84	63	59	75
650,0	94	45	37	48	32	42	39	32	54	43	68	32	46	65	62	66	62	78
653,0	75	52	36	49	21	35	- 33	32	57	55	81	28	39	56	57	101	89	67
655,0	90	60	50	59	- 33	28	31	52	122	70	128	46	58	83	63	97	71	112
660,5	124	78	83	81	53	74	82	92	115	86	164	31	120	101	124	112	76	136
662,2	170	123	68	97	60	98	114	115	186	171	188	58	84	101	163	120	108	124
662,7	149	143	92	117	77	92	103	169	273	166	273	117	162	163	117	171	89	104
665,0	174	110	96	118	57	105	86	128	166	179	232	69	202	179	202	224	163	179
670,0	122	77	55	87	50	63	61	83	131	95	149	114	196	131	128	201	147	213
674,2	155	94	44	90	56	49	58	66	101	60	144	94	98	128	107	137	73	115
675,5	219	128	162	169	158	142	127	182	184	112	271	118	164	160	233	257	86	220
681,4	158	105	132	133	119	110	128	131	154	185	248	293	294	210	273	353	130	270
689,0	155	138	147	160	103	124	116	143	216	158	212	202	212	188	251	279	111	192
693,0	111	139	104	80	50	72	69	80	57	63	89	141	124	183	129	287	109	166
704,0	61	114	99	88	82	58	87	103	66	47	81	184	146	124	178	122	52	89
710,0	84	96	71	66	66	57	75	75	71			97	95	112	98	187	165	94
721,6	90	106	66	53	54	48	58	61	57	- 36	68	55	78	102	65	95	82	94
727,0	102	83	71	64	63	44	65	72	69	63	67	54	84	72	54	66	49	63
·																		C /16-1
kampagnen/	7/10	12/12	11/14	11/14	11/14	6/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	2/4	E /E	e ie	E IE	E /E	e ie	5/IIQ.
ant	1112	12/12	10/11	11/11	11/11	0/9	90	0/0	0/0	0/0	0/0	2/4	3/5	0/0	3/5	3/5	0/0	Jani

Abbildung 24: Gegenüberstellung von aus Schwebstoffprobennahmen der FGG Elbe (Hubschrauberlängsbefliegungen) ermittelten Jahresmittelwerten (modifiziert nach Loder 2017 und aktualisiert bis 2019); Wertedarstellung Schwebstoffgehalt in [mg/l]), Probenahme direkt an der Gewässeroberfläche; die unterste Zeile zeigt die Anzahl der Messkampagnen/Jahr (= Anzahl Hubschrauberlängsbefliegungen), aus denen die jeweiligen Mittelwerte errechnet wurden.

Eine vergleichbare Entwicklung kann auch für den Zeitraum ab Sommer 1989 nachvollzogen werden. Dieses Jahr markierte den Start einer mehrjährigen Phase mit unterdurchschnittlich niedrigen Oberwasserzuflüssen (Abbildung 2). Die in Kapitel 2.2.1 erstmals erwähnte Duplizität der Ereignisse zeigt sich hier erneut, da es an den drei Tagen vom 26. bis 28. Februar 1990 eine äußerst ungewöhnliche Folge von Sturmereignissen (zwei Orkan-, zwei Sturm- und eine Windflut) und entsprechenden Sturmflutwasserständen (NN+4,75 m bei Cuxhaven, Sturmflutarchiv der Universität Siegen) gab. Dieses Ereignis markierte damals den Beginn stark ansteigender Schwebstoffkonzentrationen in der Tideelbe (Abbildung 24), die in den Folgejahren anhielten.

#### 2.5 Unterhaltungsbaggermengen

Abhängig vom betrachteten Gewässerabschnitt und Art der Sedimente – grobkörnige, sandige Sedimente einerseits und feinkörnige Sedimente mit einem hohen Anteil in der Feinkornfraktion < 63 µm andererseits – unterliegt die Entwicklung der Baggermengen unterschiedlichen Einflussfaktoren. Im Fokus dieses Berichtes liegt die angespannte Unterhaltungssituation in den Revieren Hamburger Hafen und dem Fahrrinnenbereich Wedel bis Juelssand, welche durch einen Anstieg der Mengen an Baggergut mit hohem Feinkornanteil (bindiges Baggergut) verursacht wird (Kapitel 2.5.1 und 2.5.2). Große Mengen an bindigem Unterhaltungsbaggergut fallen zudem im Fahrrinnenbereich Osteriff, bei der Unterhaltung der elbseitigen Vorhäfen im Nord-Ostseekanal sowie in Summe in Nebenbereichen und den zahlreichen Häfen entlang der Tideelbe an. Über die kleineren Häfen liegen keine Gesamtstatistiken für Baggermengen vor, eine vertiefte Analyse ist daher hier nicht möglich. Grundsätzlich ist aber davon auszugehen, dass der überwiegende Anteil der hier anfallenden Baggermengen lediglich lokal, häufig im Wasser-Injektionsverfahren o. ä., umgelagert wird. Aufgrund naturschutzfachlicher Auflagen der Landesbehörden und im Hinblick auf Nutzungsanforderungen (z. B. Saisonbeginn Sportboothäfen) erfolgen Räumarbeiten dabei bevorzugt zu Mitte der ersten Jahreshälfte. Die überwiegenden Mengen sandigen Baggerguts fallen in der Außenelbe stromab Medemgrund an. Die Entwicklung dieser sandigen Mengen ist nicht abhängig vom Oberwasserzufluss, sondern ist vor allem die Folge der Morphodynamik der seitlich der Fahrrinne anschließenden Watten. Eine Betrachtung zum Mündungstrichter (sandiges Baggergut) erfolgt in Kapitel 2.5.3.

Bezüglich grundlegender Beschreibungen zu Baggergutklassierung, Baggergutmengen und Unterhaltungsstrategien von HPA und WSV sei auf Entelmann und Röper (2014) sowie auf BfG (2014) verwiesen.

## 2.5.1 Hamburger Hafen (bindiges Baggergut)

Die Entwicklung der Baggermengen im Hamburger Hafen wird in besonderem Maße durch die Oberwasserverhältnisse geprägt. Während in den Jahren 2008 bis 2013 saisonübergreifend im Schnitt rd. 4,5 Mio. m<sup>3</sup>/a Laderaumvolumen zu baggern waren, stieg der Unterhaltungsbedarf in den Jahren nach dem Hochwasserereignis vom Juni 2013 auf bis zu 14,3 Mio. m<sup>3</sup>/a an. Auch wenn die einzelnen Baggermengen in Abbildung 25 aufgrund des unterschiedlich langen Zeitversatzes zwischen Oberwasserereignis, Sedimentation, Handlungszwang und Handlungsoption nicht direkt mit dem Oberwasserzufluss korreliert werden können, lassen sich die zu beobachtenden starken Schwankungen im Wesentlichen durch die Oberwasserrandbedingungen erklären. So bescherte der durchgehend abflussreiche Sommer 2010 wie auch die Hochwasserwelle vom Juni 2013 dem Hamburger Hafen eine besonders niedrige Sedimentationsrate und damit nur minimale Unterhaltungsbedarfe während der jeweils folgenden Wintersaison.

Dagegen spiegeln die Unterhaltungsbaggermengen der Jahre nach 2014 die durchgehend niedrigen Oberwasserrandbedingungen und den damit einhergehenden verstärkten Stromauf- und Rücktransport von der Verbringstelle Neßsand wieder. Eine weitere Anreicherung des kurzen Sedimentkreislaufs innerhalb Hamburgs konnte durch die Verbringung von rd. 10,3 Mio. m<sup>3</sup> Baggergut zur Tonne E3 vermieden werden (weitere 1,8 Mio. sind für 2018 geplant). Dadurch konnten auch die im Winterhalbjahr benötigten Umlagerungsmengen bei Neßsand von in der Spitze 9,4 Mio. m<sup>3</sup> auf 4,2 Mio. m<sup>3</sup> deutlich heruntergefahren werden.



Abbildung 25: Entwicklung der Baggermengen im Hamburger Hafen pro Saison und Verbringort. (Wintersaison/Umlagersaison i.d.R. vom 07.11. bis 31.03. eines Jahres/Sommersaison vom 01.04. bis 06.11.).

# 2.5.2 Baggerabschnitte Wedel bis Juelssand und Osteriff (bindiges Baggergut)

Betrachtet man die WSV-Unterhaltungsbaggermengen über alle Abschnitte stromab von Hamburg bis in die Außenelbe, so ergeben sich durch die niedrigen Oberwasserzuflüsse keine erheblichen Baggermengenzunahmen. Fokussiert man sich hingegen auf die Fahrrinnenbereiche Wedel bis Juelssand (sog. WSV-Baggerabschnitte 1 bis 3 = BA1 bis 3), so zeigt sich hier eine mit dem Hamburger Hafen vergleichbare Situation.



Abbildung 26: Typische Baggerbereiche zur Verkehrssicherung im Fahrrinnenabschnitt BA1–BA3 (hier: 2015; HPA-Unterhaltungskampagne Sedimentfang nicht miterfasst).

Abbildung 26 zeigt, beispielhaft dargestellt am Jahr 2015, die Feinmaterialstrecken in den BA1 bis 3, in denen im Zeitraum 2011 bis 2019 regelmäßig Hopperbaggerungen erfolgten. Die Eingriffs- bzw. Sedimentationsbereiche waren bis 2015 bei langjähriger Betrachtung nahezu unverändert, d. h. die Eingriffsbereiche haben sich von Jahr zu Jahr nur geringfügig verändert. Bei dem anfallenden Baggergut handelt sich durchweg um schluffigen Feinsand, lediglich im BA1 fällt zeitweise auch feinsandiger Schluff an.

Die WSV-Unterhaltungsbaggermengen in der Fahrrinne (nur Hopperbaggerung) betrugen im Zeitraum 2013 bis 2018 in den Baggerabschnitten Wedel bis Juelssand sowie Osteriff zwischen 5,4 Mio. m<sup>3</sup>/a (2014) und 8,3 Mio. m<sup>3</sup>/a (2018). Der Mittelwert über den Zeitraum errechnet sich zu 7,3 Mio. m<sup>3</sup>/a und liegt damit über dem Mittelwert des vorangehenden Zeitraums über 5 Jahre (2008–2012) von rd. 6,2 Mio. m<sup>3</sup>/a.

Abbildung 27 verdeutlicht die jeweilige Aufteilung dieser bindigen Mengen auf die WSV-Amtsbereiche Hamburg (BA1–3) und Cuxhaven (BA12). Die Jahre mit den höchsten Oberwasserzuflüssen entsprechen den Jahren mit den geringsten Baggermengen im BA1 bis 3. Umgekehrt fallen im BA12 die Jahre 2010 und 2013 mit den höchsten Mengen Baggergut in die Zeiträume der höchsten Oberwasserzuflüsse.



Abbildung 27: Jahresbaggermengen in den in den Feinsedimentationsstrecken Wedel bis Juelssand (BA1 - BA3) sowie Osteriff (BA12) in Abhängigkeit vom Oberwasserzufluss Q [m<sup>3</sup>/s].

In die Phase der anhaltend niedrigen Oberwasserzuflüsse seit Sommer 2013 fallen die Jahre mit den größten Sedimentmengen, die in den BA1 bis 3 zu Unterhaltungszwecken gebaggert werden mussten. Dieses höhere Niveau an Baggermengen gegenüber den früheren Jahren korrespondiert mit dem beobachteten Anstieg bei den Schwebstoffgehalten (vgl. Abbildung 20), was wiederum maßgeblich durch die Oberwasserverhältnisse bestimmt wird. Seit 2015 verharren die Baggermengen in den BA1 bis 3 auf diesem konstant hohen Niveau, was durch die Auswertung der Sedimentationsraten (Kapitel 2.7.2) ebenfalls bestätigt werden kann.

Im BA12 können die jeweiligen Wasserstands- und Windverhältnisse bedeutender als die aktuellen Oberwasserverhältnisse sein, da sie Sedimentations- und Resuspensionsprozesse auf höher gelegenen Wattflächen beeinflussen (Reiß 2015). Insgesamt sind die dem Sedimentationsgeschehen zu Grunde liegenden Prozesse am Osteriff damit noch komplexer als im Bereich Wedel bis Juelssand. Die hohen Baggermengen in 2013 sind nach derzeitigen Erkenntnissen u. a. auf durchgängig hohe Oberwasserzuflüsse zu Beginn des Jahres zurückzuführen, während das kurze Frühsommerhochwasser 2013 nicht maßgebend zu einem Baggermengenanstieg geführt hat. In 2014 waren die Baggermengen am Osteriff vergleichsweise gering, in den Jahren 2015, 2016 und 2018 spiegelt sich auch die weiter oben diskutierte grundlegende Aufstockung des Inventars an Feinsedimenten als Baggermengenanstieg wieder.

# 2.5.3 Mündungsgebiet (sandiges Baggergut)

Die Baggermengen im Mündungstrichter unterliegen mitunter starken Schwankungen, die jedoch kaum noch vom Oberwasserzufluss abhängig sind. Die treibenden Kräfte hier sind die täglichen starken Tideströmungen und der Seegang, der insbesondere bei Starkwindereignissen in kurzer Zeit große Sedimentmengen in Bewegung bringen kann. Die Abbildung 28 zeigt exemplarisch die typischen Baggerbereiche für das Jahr 2018. Flächenhafte Baggerarbeiten, die sich über die gesamte Breite der Fahrrinne erstrecken, sind im BA12 (Osteriff, Kapitel 2.5.2) und im Bereich der Mittelrinne (BA16 und BA17) notwendig. In den anderen Baggerabschnitten müssen lokale Untiefen beseitigt werden, die zumeist aus lateralen Eintreibungen oder dem Aufwachsen von Sohlstrukturen entstehen. Im BA14 (Altenbruch) werden am nördlichen Fahrrinnenrand Eintreibungen vom Medemgrund gebaggert.

Im Mittel der letzten Jahre lagen die Baggermengen bei rund 8 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr (Abbildung 29), wobei ein Großteil der Menge aus dem Osteriff stammte (Abbildung 27). Auffällig sind die hohen Baggermengen im Jahr 2008. Diese Baggermengen resultieren aus dem Durchbruch zwischen Klotzenloch und Medemrinne, was im Baggerabschnitt östliche Mittelrinne, in den der westliche Ausgang des Klotzenloches mündet, zu einer Gesamtbaggermenge von 5 Mio. m<sup>3</sup> geführt hat. Auch die anderen Baggerabschnitte im Mündungsbereich weisen 2008 im Vergleich zu den Vorjahren höhere Baggermengen auf, allerdings in deutlich geringerem Maße als im Baggerabschnitt Östliche Mittelrinne.

Teile des im Abschnitt Klotzenloch-Medemrinne verloren gegangenen Sediments stehen dem Ästuar nicht mehr zur Verfügung, da in 2008f zeitweise große Anteile des Baggerguts aufgrund eingeschränkter Verbringstellenkapazitäten weiter stromab bei Elbe-km 750 am südlichen Fahrwasserrand umgelagert wurden. Nach einer Untersuchung der BAW wurde diese Unterhaltungspraxis geändert. Seitdem wird nach der Maxime gehandelt, Baggergut überwiegend am "roten Rand" des Fahrwassers, d. h. nördlich der Fahrrinne, zu verbringen (BAW 2013). Damit soll u. a. der durch den Bau des Leitdamms Kugelbake verursachte Sedimentverlust im Schleswig-Holsteinischen Wattenmeer kompensiert werden, da der Leitdamm den Sedimenttransport über die Fahrrinne unterbindet. Das Leitbild ist dabei, das Mündungsgebiet in einen morphologischen Zustand zu bringen, wie er etwa um 1970 vorhanden war (Abbildung 30). Damit soll eine Verstärkung der Dämpfung der Tideenergie im Mündungsbereich entsprechend der Ausrichtung des 2008 formulierten Strombau- und Sedimentmanagementkonzeptes von HPA und WSV erreicht werden. Dieses Handeln steht im Einklang mit neuen wasserbaulichen Sichtweisen, gewünschte natürliche morphologische Entwicklungen zu forcieren bzw. ungünstigen Entwicklungen entgegen zu wirken. Mit Hilfe der Stichworte "Building with Nature", "Sand Motor" oder "Mud Motor" findet man internationale Beispiele für dieses Handeln.



Abbildung 28: Typische Baggerbereiche zur Verkehrssicherung im Fahrrinnenabschnitt BA12–BA17 (hier: 2018).



Abbildung 29: Baggermengen der WSÄ Hamburg und Cuxhaven 2006-10/2019.



Abbildung 30: Topographie der Elbmündung, ca. 1970. Die Ortsbezeichnungen beziehen sich auf den gegenwärtigen Zustand (Abbildung 34).

# 2.5.4 Baggermengentwicklung in Nebenbereichen am Beispiel des Durchstichs zur Wischhafener Süderelbe

In den Landeshäfen, Sportboothäfen etc. entlang der Tideelbe ist es in den letzten Jahren zu verstärkten Sedimentationen bzw. einem Anstieg der Baggermengen gekommen. In Bezug auf die Baggermengen fehlen aber übergeordnete Statistiken, so dass auf diesem Wege keine quantitativen Aussagen zur Entwicklung möglich sind. Während die Häfen als ortsnah an die Hauptelbe oder Nebenelbe angebundene Gebiete zumeist einfache Geometrien aufweisen, sind Nebenelben und Nebenflüsse komplexere Systeme, bei denen es gilt, das Systemverständnis hinsichtlich der morphodynamischen Prozesse noch weiter zu verbessern. Die Häfen werden regelmäßig geräumt, um diese betreiben zu können bzw. nautische Belange zu gewährleisten, die Nebenelben und Nebenflüsse hingegen nur eingeschränkt in bestimmten Bereichen. Zur Beurteilung der morphologischen Entwicklung liegen i. d. R. nur in mehrjährigem Abstand Vermessungsdaten vor.

Im Strombau- und Sedimentmanagementkonzept Tideelbe (SSMK) wird die Minimierung der Verlandungsprozesse in Nebenelben und Nebenflüssen als wichtiges Ziel benannt. Zitat (SSMK 2008): "Je mehr Bereiche im Tideraum verlanden oder z. B. durch Eindeichungen verloren gehen, umso mehr werden Verlandungstendenzen in den oberen Abschnitten der Tideelbe verstärkt." Beispielhaft soll in diesem Zusammenhang kurz die besonders auffällige Baggermengenentwicklung im WSV-Baggerbereich Wischhafen beschrieben werden. In diesem Bereich muss wegen des Fährverkehrs Glückstadt – Wischhafen regelmäßig der Durchstich zur Wischhafener Süderelbe gebaggert werden. Abbildung 31 verdeutlicht zunächst einen hier seit 2013/2014 beobachteten Anstieg.



Abbildung 31: Hopperbaggermengen sowie WI-Einsatzzeiten zur Aufrechterhaltung des Fährverkehrs Glückstadt – Wischhafen. Baggermengen 2019 = Prognosewert vom Oktober 2019.

Demnach war in 2012, wahrscheinlich u. a. infolge einer Grundräumung mit einem Hopperbagger in der zweiten Jahreshälfte 2011, gegenüber dem Vorjahr 2011 kein ansteigender Baggerbedarf zu verzeichnen, obwohl höhere Schwebstoffgehalte auftraten (Abbildung 31). In den Jahren nach 2013 zeigten sich mit Erhöhung der Schwebstoffgehalte hingegen auch kontinuierlich erhöhte *Water Injection* (WI)-Einsatzzeiten. Neben der vermehrten Verfügbarkeit von Schwebstoff spielen dabei aber auch morphologische Veränderungen eine entscheidende Rolle (Abbildung 32).

In den Jahren nach 2013 ist es zu einer deutlichen Geländeaufhöhung im Bereich des von Nord nach Süd senkrecht zur Fahrrinne verlaufendem Wischhafener Fahrwassers gekommen. Seit 2014/2015 ist dieses bei Niedrigwasser in weiten Teilen trockengefallen und nach dem DGM-W 2016 schließlich vollständig als Wattfläche zu klassifizieren (Abbildung 32). Mit abnehmender Durchströmung des Bereiches haben sich gleichzeitig Räumungseffekte im Bereich des für die Fährverbindung zu unterhaltenden Durchstichs zur Wischhafener Süderelbe reduziert. Die Verlandung des Wischhafener Fahrwassers ist grundsätzlich als langfristiger morphologischer Anpassungsprozess zu sehen, der in seinen Auswirkungen noch detaillierter zu untersuchen und zu beurteilen ist. Interessant ist im Kontext der aktuell vorgenommen Analyse die deutlich beschleunigte Entwicklung im Zeitraum von 2013 bis 2016. Grundsätzlich ist von einer dauerhaften Verlandung auszugehen, der nur durch Baggermaßnahmen begegnet werden kann.



Abbildung 32: Entwicklung von Wattflächen (Darstellung in dunkelbeige) im Bereich Wischhafen (klassifizierte Darstellung auf Grundlage des DGM-W 2010 und des DGM-W 2016).

Auch in anderen Nebenbereichen waren hohe Sedimentationsraten zu beobachten. Grundsätzlich sind die einzelnen Nebenflüsse und Nebenelben jedoch gesondert zu betrachteten. So zeigen z. B. die Lühesander Süderelbe und Glückstädter Nebenelbe als "kurze Nebenelbensysteme" bereits seit Jahrzehnten morphologisch nahezu unveränderte stabile Verhältnisse mit Schwankungen in Abhängigkeit der hydrologischen Randbedingungen. Andere Bereiche, wie z. B. der beschriebene Bereich Wischhafener Fahrwasser/Brammer Bank oder auch das Gebiet Hahnöfer Nebenelbe/Mühlenberger Loch, zeigen kontinuierliche Verlandungstendenzen, die sich in Phasen mit niedrigen Oberwasserzuflüssen und damit hohen Schwebstoffgehalten verstärken.

# 2.6 Morphologie

# 2.6.1 Morphologische Veränderung von 2010 bis 2016 – Überblick

Anhand der DGM-W der Jahre 2010 und 2016 kann mit Hilfe von Differenzdarstellungen ein erster Überblick über die großräumigen morphologischen Veränderungen gegeben werden. Dazu sind zunächst in der Abbildung 33 die Topographie im Mündungsgebiet des Jahres 2010 und der Abbildung 34 die des Jahres 2016 dargestellt. Die Ortsbezeichnungen und die Markierungen der Baggerabschnitte erleichtern die Orientierung und den Vergleich. Am auffälligsten ist die Entwicklung der Medemrinne, die im Jahr 2016 länger gestreckt ist als im Jahr 2010 und nicht mehr westlich des Medemgrundes vor Cuxhaven in das Fahrwasser mündet, sondern weiter stromab.

Das Mündungsgebiet weist insgesamt eine hohe morphologische Aktivität auf. Dies ist deutlich erkennbar, wenn die Differenzen zwischen den beiden Datensätzen gebildet werden. In der Abbildung 35 ist das Ergebnis dargestellt. Bereiche, die im Jahr 2016 eine höhere Sohllage aufweisen (Deposition), sind rot dargestellt, die tieferliegenden Bereiche blau (Erosion). Die Migration von Rinnen, z. B. die Bewegung nordwärts des östlichen Teils der Medemrinne, ist an dem stets aneinander angrenzenden Muster von Erosion/Deposition zu erkennen. Das Aufwachsen des Medemgrundes insbesondere im westlichen Bereich ist sehr markant, wie auch die Aufhöhung des Fahrwassers vor Cuxhaven, die auch durch die Verlagerung der westlichen Mündung der Medemrinne verursacht wird. Südöstlich des Neuen Luechtergrundes ist ebenfalls ein Aufwachsen zu erkennen. Dieser Bereich wird auch durch die Sedimente genährt, die am Neuen Luechtergrund umgelagert werden.



Abbildung 33: Topographie 2010 im Mündungsgebiet.



Abbildung 34: Topographie 2016 im Mündungsgebiet.



Abbildung 35: Differenztopographie 2010–2016. Rot: 2016 flacher, blau: 2016 tiefer.

Weitere Abschnitte der Tideelbe sind in Abbildung 36 und in Abbildung 37 jeweils als Topographie des Jahres 2016 und der Differenztopographie zu 2010 dargestellt. Neben den ausgeprägten Veränderungen im Mündungsbereich gibt es weiter stromauf eine Verflachung in mehreren Nebenbereichen. Besonders auffällig ist dabei der südliche Gewässerbereich zwischen St. Margarethen und Wischhafen (vgl. Kapitel 2.5.4). Auch der Verbringbereich an der Amtsgrenze nahe St. Margarethen (Elbe-km 689) ist in der Differenzdarstellung gut zu erkennen (Abbildung 36). Ein Zusammenhang zwischen dem Verbringen von Baggergut bei Elbe-km 689 und dem Aufwachsen der Topographie im Bereich der Brammer Bank stromab von Elbe-km 675 liegt nahe.



Abbildung 36: Topographie 2016 (oben) und Differenztopographie 2010–2016 (unten). Rot: 2016 flacher, blau: 2016 tiefer.

In den Nebenelben sind ebenfalls überwiegend Depositionszonen zu erkennen, die in den weiter stromauf gelegenen Bereichen stärker ausgeprägt sind. In den an die Fahrrinne angrenzenden Bereichen sind hingegen in einigen Strecken schmale Erosionszonen zu erkennen.



Abbildung 37: Topographie 2016 (oben) und Differenztopographie 2010–2016 (unten). Rot: 2016 flacher, blau: 2016 tiefer.

Mit Hilfe einer Volumenanalyse kann dieser optische Eindruck konkretisiert werden. da für die Baggerabschnitte 1 bis 10 (BA1 bis BA10) eine vorwiegend erosive Tendenz im Fahrrinnenbereich sowie in den angrenzenden Fahrwasserrändern im Bereich zwischen Tonnenstrich und der 8 m-Linie festgestellt wird (Abbildung 38). Lediglich der Baggerabschnitt 10, in dessen Randbereich sich mehrere Verbringstellen befinden, weist eine positive Sedimentbilanz auf. Der Auftrag im Fahrrinnenbereich in den BA1 und BA2 ist nur temporär gegeben, hier befindet sich der regelmäßig gebaggerte Feinsedimentationsbereich Wedel und der Sedimentfang Wedel. Relevant ist hier vor allem die Betrachtung der weiter stromab gelegenen sandig geprägten Fahrrinnenbereiche (BA4 bis BA9). Insgesamt ist der hier bilanzierte Bereich voluminöser geworden. Dies wird durch Untersuchungen des WSA Hamburg zur morphologischen Entwicklung im Fahrwasserbereich zwischen Elbe-km 638,9 und 689,1 bestätigt, für die halbjährliche Peilungen im Zeitraum von 2008 bis 2014 herangezogen wurden (WSA Hamburg 2016).



#### Volumenbilanz Fahrrinne DGM-W 2016 zu DGM-W 2010

Abbildung 38: Differenzberechnungen DGM-W 2016 zu DGM-W 2010 (oben: Fahrrinne, unten: Fahrwasserrand, d. h. Bereich zwischen Tonnenstrich und 8 m-Linie (BA1 bis BA10) bzw. 10 m-Linie (BA11 bis BA12)).

## 2.6.2 Morphologische Veränderung der Hamburger Transportkörperstrecke Tinsdal-Blankenese 2010 zu 2016

In den letzten Jahren wurde in Teilabschnitten der Unterelbe eine langsam fortschreitende Erosion beobachtet. Die damit einhergehende sukzessive Vertiefung der mittleren Sohllage konzentriert sich dabei insbesondere auf Gewässerabschnitte mit sandiger Sohle, die durch die Ausbildung von Großriffeln bzw. Unterwasserdünen geprägt sind. Eine mögliche Folge dieser Entwicklung ist neben der Tieferlegung der wirksamen Sohle auch eine Schwächung der sandigen Transportkörperstrukturen an der Gewässersohle.

Im Hamburger Bereich gibt es eine bedeutende Transportkörperstrecke (Riffelstrecke) von der westlichen Landesgrenze ab Elbe-km 639, nördlich der Verbringstelle Neßsand bis etwa auf Höhe von EADS bei Elbe-km 633.

Bei dem Vergleich des DGM-W 2010 mit dem DGM-W 2016 wird die Schwächung der Transportkörperstrukturen deutlich. Im Schummerungsplan des DGM-W 2010 (Abbildung 39) ist eine deutlich erkennbare sub-aquatische Riffel- und Dünenstruktur über den gesamten Abschnitt zu beobachten. Die subaquatischen Dünen und Riffel dehnen sich insbesondere im Bereich der Landesgrenze (Elbe-km 639) bis Elbe-km 636 – zum größten Teil – über den gesamten Fahrrinnen-Querschnitt aus. Ab Elbe-km 636 verlieren die Riffel an Steilheit und sind über den Querschnitt geschwungener.

Die klar erkennbare Dünen- und Riffelstruktur ist im Schummerungsplan des DGM-W 2016 (Abbildung 40) nicht mehr eindeutig detektierbar. Zu erkennen ist, dass insbesondere im Bereich der Landesgrenze (Elbe-km 639), direkt nördlich der Klappstelle Neßsand starke morphologische Veränderungen stattgefunden haben und die Riffelstruktur verschwunden ist. Ein wenig stromauf zwischen Elbe-km 638 und 637 ist die Riffelstruktur im DGM-W 2016 am stärksten ausgeprägt, obgleich die Riffelstruktur im DGM-W 2010 für diesen Abschnitt weitaus ausgeprägter war. Die Wellentäler sind eindeutig länger geworden. Die Riffel im Bereich zwischen Elbe-km 636 und 633 sind noch flacher und geschwungener als im DGM-W 2010.

In Abbildung 41 ist der Differenzenplot der DGM-Ws 2010 zu 2016 dargestellt. Gelbe, orange sowie rote Bereiche deklarieren Sedimentations- und blaue Erosionsbereiche. In dieser Darstellung wird deutlich gezeigt, dass entlang der Riffelstrecke die orange-roten Bereiche den blauen Bereichen deutlich überlegen sind. Daraus folgt, dass neben der natürlichen Dünen- und Riffeldynamik/Wanderung sich in den letzten Jahren weitere Sedimente entlang der Riffelstrecke abgelagert haben und die natürliche Dünen- und Riffelstruktur in ihrer Ausprägung geschwächt haben.

Weitere Analysen von Längsprofilen zeigen, dass im Jahr 2015 erstmals eine Auflösung der Riffelstrecke an der Landesgrenze im Abschnitt Elbe-km 639 bis 638,7 zu beobachten ist. Ähnlich wie im angrenzenden BA1 des WSA Hamburg ist davon auszugehen, dass die Dünenkämme von Feinmaterial überlagert wurden, auch eine Beeinflussung von der angrenzenden Verbringstelle Neßsand ist nicht auszuschließen. Diese Entwicklung der Riffelstrecke schreitet bis 2017 voran, danach zeigt die Überlagerung von Feinmaterial zurückgehende Tendenzen. Ein Zurückkommen der in den Vorjahren verlorengegangen Dünenund Riffelstrukturen ist zwar zum Teil zu erkennen, dennoch zeigen weiterführende statistischen Auswertungen der Transportkörperstrecke, dass die Anzahl der Transportkörper im Vergleich von 2009 zu 2019 von etwa 150 auf 110 abgenommen haben. Zudem beträgt und verbleibt die mittlere Transportkörperhöhe auf einem grundsätzlich stabilen Niveau von etwa 1,2 m, während sich die mittlere Transportkörperlänge messbar von etwa 30 m auf 40 m verlängert hat.



Abbildung 39: DGMW-2010 Schummerungsplan im Bereich der Hamburger Riffelstrecke.



Abbildung 40: DGMW-2016 Schummerungsplan im Bereich der Hamburger Riffelstrecke.



Abbildung 41: Differenzendarstellung DGM-W 2010 zu 2016 im Bereich der Hamburger Riffelstrecke. Tiefenwerte in [cm].

## 2.6.3 Morphologische Veränderung Elbe-km 641,8 bis 638,9 (Landesgrenze) von 2010 bis 2019

Während sich Eingriffs- und Sedimentationsbereiche im Zuständigkeitsbereich der WSV zwischen Wedel bis Juelssand, angefangen im Jahr 2010 bis zum Jahr 2015, langjährig kaum verändert haben, sind seitdem – analog zu den Veränderungen im angrenzenden Bereich der Delegationsstrecke – morphologische Veränderungen im Fahrrinnenbereich, konkret im Bereich Elbe-km 641,8 bis 638,9 (Landesgrenze) zu beobachten. Abbildung 42 verdeutlicht die Entwicklung in der Fahrrinnenmitte anhand von fünf ausgewählten Längsprofilen aus den Jahren 2010, 2014, 2015 (jeweils erzeugt aus Fahrrinnenpeilung August) sowie 2017 (erzeugt aus Fahrrinnenpeilung Mai) und 2019 (wiederum erzeugt aus Fahrrinnenpeilung August). Der Bereich Sedimentfang (Elbe-km 641,8 bis 643,8) steht dabei nicht im Fokus, hier befindet sich der Hauptbaggerbereich im Fahrrinnenabschnitt bei Wedel und es werden Vorratsbaggerungen bis zu 2 m unter Solltiefe durchgeführt.



Abbildung 42: Längsprofile in der Fahrrinnenmitte im Bereich Wedel (Peilungen 2010, 2014, 2015, 2019 jeweils August sowie Peilungen vom Mai 2017).

Zwischen 2010 und 2014 zeigten sich aus Fahrrinnenpeilungen erzeugten Längsprofilen stromauf von km 641,8 nur wiederkehrende Variationen in der Riffel-/Dünen-Dynamik (insb. Variation der Riffel-/Dünenamplituden, im Detail ersichtlich aus weiteren im Zeitraum vorliegenden Peilungen), eine Erhöhung der Gewässersohle erfolgte nur phasenweise,

sehr langfristig und in geringem Umfang. Die subaquatischen Dünen erreichten in diesem Zeitraum maximale Höhen von bis zu zwei Meter und zeigten eine vorherrschende stromaufgerichtete Geschiebetransportrichtung. Überschreitungen der Sohltiefe von 16,30 m NHN (rote Linie) traten nur in Form von Einzeluntiefen auf, die Beseitigung dieser Untiefen erfolgte vorrangig mit Hilfe von WI-Einsätzen.

Im Sommer 2015 zeigte sich hingegen erstmals eine Auflösung der Riffelstrecke am stromaufseitigen Ende des BA 1. Es ist davon auszugehen, dass die Dünenkämme von Feinmaterial überlagert wurden, die Tiefenmessung/Detektion des Gewässerbodens ist ab diesem Zeitpunkt zeitweise erschwert (BfG 2017). Die Entwicklung schritt bis Mitte 2017 voran, wobei das entsprechende Längsprofil in Abbildung 42 verdeutlicht, dass es zu einer Ausweitung des überdeckten Riffelstreckenbereichs bis stromab von Elbe-km 640,8 gekommen ist. Mittels Analyse von zeitlich höher aufgelösten Daten zu Sedimentationsraten konnte diese Entwicklung nachvollzogen und in einen unmittelbaren Wirkungszusammenhang mit der Umlagerung von großen Baggergutmengen auf die benachbarte Stelle Neßsand gebracht werden (siehe Kapitel 2.7.2). Während 2010 noch rd. 35 % des Sohlflächenbereiches stromauf des Sedimentfangs durch Riffel-/Dünenstrukturen gekennzeichnet waren, sind ab August 2015 in Schummerungsplänen kaum noch entsprechende Strukturen zu erkennen. Es muss zunächst davon ausgegangen werden, dass infolge der außerordentlich großen Baggergutmengen, die ab 2015 auf der VS Neßsand verbracht wurden (Abbildung 25), die vermehrt zur Verfügung stehenden Schwebstoffe als Suspensionsfracht in den ehemals vorhandenen Dünen-/Riffeltälern sedimentiert sind und von neuen Schwebstoffen überlagert wurden. Nach und nach ist es dann zu einer Verdichtung und Konsolidierung dieser Feinsedimente gekommen, dazu hat die Widerstandsfähigkeit gegenüber den angreifenden Strömungskräften und die Erosionsbeständigkeit zugenommen. Eine ähnliche Entwicklung wurde in der Vergangenheit im Bereich des Sedimentfangs Wedel, der vormals ebenfalls durch Dünenstrukturen gekennzeichnet war, beobachtet. Allerdings ließen sich die entsprechenden Veränderungen hier nur unvollständig rekonstruieren, da im damaligen Zeitraum lediglich Linienpeilungen mit deutlich geringerer Datendichte durchgeführt wurden.

Seit 2018 haben sich im Bereich der Riffelstrecke wieder geringfügige Riffelstrukturen entwickelt (Abbildung 42). Aufgrund mehrerer Einsätze eines Hopperbaggers ist der Bereich zudem etwas tiefer als im Mai 2017. Ein Zustand, wie er im Zeitraum vor 2015 vorherrschte, hat sich jedoch nicht wiedereingestellt.

Eine Abnahme der subaquatischen Dünen- und Riffelstrukturen zeigt sich in den WSV-Fahrrinnenbereichen nicht nur im Streckenbereich Elbe-km 641,8 bis 638,9, sondern auch in den angrenzenden weiter stromab gelegenen Baggerabschnitten Lühesand und Juelssand. Dies wird aus der nachfolgenden Abbildung 43 deutlich. Für die Darstellung wurden die Flächenanteile von Dünenstrukturen (rot), Riffelstrukturen (grün) sowie Bereichen mit geringen Strukturen (grau) innerhalb der Fahrrinne im DGM-W 2010 und im DGM-W 2016 ausgewertet. Die Darstellung zeigt die prozentualen Änderungen von 2016 gegenüber 2010. Eine deutliche Abnahme von Dünen- und Riffelstrukturen zeigt sich damit vor allem in den Hamburg-nahen Baggerabschnitten, die Abnahmen weiter stromab bis Brokdorf (Bereich BA8) sind deutlich geringer und liegen ggf. im Bereich natürlicher Schwankungen. Analysen für den Bereich Brunsbüttel bis Außenelbe (hier nicht dargestellt) zeigen demgegenüber keine entsprechende Abnahme, vielmehr nehmen die groben Strukturen im Außenelbebereich beim Vergleich DGM-W 2016 zu DGM-W 2010 z. T. sogar deutlich zu.



Abbildung 43: Analyse zur Veränderung morphologischer Sohlstrukturen (DGM-W 2016 gegenüber DGM-W 2010). Erkennbar ist eine Abnahme des Flächenanteils mit Dünen- und Riffelstrukturen, dies vorrangig im Streckenbereich nahe des Hamburger Hafens (WSV-Baggerabschnitte 1 bis 3); zur angewandten Methodik vgl. WSA Hamburg (2013).

## 2.7 Sedimentationsraten

Unterhaltungsbaggerungen sind die Folge von Sedimentablagerungen auf der Gewässersohle. Sie werden stets mit einem gewissen zeitlichen Versatz nach der Sedimentation durchgeführt (nach erfolgter Peilung und bei Geräteverfügbarkeit). Bei der Analyse von Jahresdaten spielt dieser Zeitversatz eine eher untergeordnete Rolle, entsprechend kann für Diskussionen auf Jahresstatistiken zu Baggermengen zurückgegriffen werden. Für zeitlich höher aufgelöste Analysen gewässerkundlicher Faktoren, die Einflüsse auf das Sedimentationsgeschehen an der Gewässersohle haben, bedarf es jedoch direkt ermittelter Daten zum Sedimentationsgeschehen.

Mittlere Sedimentationsraten, die mittlere Höhenänderung von Sedimentablagerungen pro Zeiteinheit (z. B. in cm/d), können auf Basis der regelmäßig durchgeführten Peilungen im Bereich der Fahrrinne und der Hafenbecken bestimmt werden. Dazu werden aus jeweils zwei aufeinander folgenden Peildatensätze Differenzmodelle der Gewässersohle gebildet und auf deren morphologische Dynamik (Erosion und Sedimentation) analysiert.

Die Bestimmung der Sedimentationsraten in den Revieren von WSV und HPA, die in den folgenden Kapiteln vorgestellt werden, wurden vergleichbare Methoden verwendet, für eine genauere Erläuterung derselben siehe Winterscheid et al. (2019).

# 2.7.1 Sedimentationsraten in den Sedimentationsschwerpunkten des Hamburger Hafens

Sedimentationsschwerpunkte des Hamburger Hafens sind das Hafenbecken Köhlfleet (Baggerfläche ca. 191.000 m<sup>2</sup>), der Parkhafen (Baggerfläche ca. 394.000 m<sup>2</sup>), der Kuhwerder Vorhafen (Baggerfläche ca. 286.000 m<sup>2</sup>) und die Rethe (Baggerfläche ca. 254.000 m<sup>2</sup>). Dazu kommen die Strombereiche des Köhlbrands (Baggerfläche ca. 518.000 m<sup>2</sup>), die Süderelbe (Baggerfläche ca. 853.000 m<sup>2</sup>) sowie die Norderelbe (Baggerfläche ca. 853.000 m<sup>2</sup>). Für diese Bereiche sind Sedimentationsraten für den Zeitraum von 2013 bis 2018 bestimmt worden. Die Ergebnisse in der Gesamtschau sind in Abbildung 44 zusammen mit dem Monatsmittel des Oberwasserzuflusses am Pegel Neu Darchau dargestellt.

Im direkten Vergleich aller Gebiete untereinander ist zu erkennen, dass die Sedimentationsraten in den beiden Hafenbecken Köhlfleet und Parkhafen am größten sind. Regelmäßig hohe Raten mit über 2 cm/d wurden im Köhlfleet im April 2014 mit 2,59 cm/d, im Mai 2016 mit 2,46 cm/d, im Juni 2017 mit 2,47 cm/d und im Dezember 2018 mit 2,05 cm/d erreicht. Bis auf einzelne Ausnahmen treten in den anderen Hafenbereichen mittlere Sedimentationsraten von < 2 cm/d auf.

Beim Köhlfleet und Parkhafen handelt es sind um die ersten Hafenbecken vor der Stromspaltung, die direkt an der Stromelbe liegen und dazu der Verbringstelle Neßsand am nächsten sind. Sie fungieren daher aufgrund dieser Lage als primäre Sedimentationssenken, denn insbesondere im Jahr 2015 und 2016 – bei sehr niedrigen Oberwasserbedingungen und kurze Zeit nach der Umlagerungssaison – sind diese hohen Sedimentationsraten im Köhlfleet zu beobachten.

Oberstrom vom Parkhafen spaltet sich die Unterelbe in einen südlichen und nördlichen Strang auf. Im südlichen Strang befinden sich der Köhlbrand, die Süderelbe und die Rethe. Die Sedimentationsraten des Köhlbrands und der Süderelbe zeigen qualitativ einen sehr ähnlichen Verlauf. Ein möglicher Grund hierfür kann sein, dass sich beide Gebiete mitten in der Stromelbe befinden, wo grundsätzlich höheren Strömungsgeschwindigkeiten auftreten als in den strömungsberuhigten Hafenbecken. So wird in der Rethe im Allgemeinen eine höhere Sedimentationsrate ermittelt als im Köhlbrand bzw. in der Süderelbe. Auch im nördlichen Strang kann ein qualitativ ähnlicher Verlauf der Sedimentationsraten in der Norderelbe und im Kuhwerder Vorhafen beobachtet werden.

Um die Darstellung der Vielzahl an Sedimentationsraten, die auch einer großen Dynamik unterliegen, zu vereinfachen, wurden in der Abbildung 45 für die Zeiträume von November bis April (Winterhalbjahr) und von Mai bis Oktober (Sommerhalbjahr) mittlere Sedimentationsraten berechnet. Mit dieser reduzierten Datenmenge können die verschiedenen Hafenbereiche besser miteinander verglichen werden.

Deutlich zu erkennen sind die niedrigen Sedimentationsraten in allen Bereichen im Sommerhalbjahr 2013, in welches das Elbehochwasser aus dem Juni 2013 fällt. Nicht enthalten ist in dieser Abbildung 45 der Zeitraum von Januar bis April 2013.

Der gesamte nachfolgende Zeitraum ab dem Winterhalbjahr 2013/2014 ist geprägt von in der Tendenz stets weiter steigender Sedimentationsraten (Signifikanz des Anstiegs geprüft mit saisonalem Mann-Kendall Test). Dieser steigende Trend hält bis ungefähr Sommerhalbjahr 2016 an. Die höchsten Raten werden in den Jahren 2015 und 2016 erreicht. Ab dann stabilisieren sich die Raten auf hohem Niveau und gehen in einzelnen Bereichen wie der Norderelbe dann wieder leicht zurück.

Die Darstellung in Abbildung 45 bestätigt zudem die Aussage, dass die Sedimentationsraten in den beiden Hafenbecken Köhlfleet und Rethe im Vergleich zu den anderen Hauptbaggergebieten am größten sind.



Abbildung 44: Sedimentationsraten in den HPA Sedimentationsschwerpunkte und Oberwasserzufluss am Pegel Neu Darchau im Monatsmittel.


Abbildung 45: Halbjahresmittelwerte der Sedimentationsraten der Sedimentationsschwerpunkte im Hamburger Hafen. Sommerhalbjahr: Mai bis Oktober; Winterhalbjahr: November bis April. Alle Werte auf Basis der Ergebnisse aus Abbildung 44.

#### 2.7.2 Sedimentationsraten Wedel bis Juelssand und Osteriff

Analog zu Kapitel 2.7.1 gibt Abbildung 46 einen Überblick über das Sedimentationsgeschehen in den WSV-seitigen Baggerschwerpunkten für Feinsedimente: Hierbei handelt es sich um die Fahrrinnenabschnitte bei Wedel (Baggerabschnitt BA1, weiter aufgeteilt in die Teilabschnitte Östlich Wedel (Elbe-km 639 bis 641,66) und Sedimentfang Wedel (Elbe-km 641,66 bis 643,9)), Juelssand (BA3, Elbe-km 649,5 bis 654,5) und Osteriff (BA12, Elbe-km 698,5 bis 709,9).

Die höchsten Sedimentationsraten von knapp 2,4 cm/d treten im BA1 (Wedel), hier im Bereich des Sedimentfangs bei Wedel auf, gefolgt von BA12 (Osteriff), danach BA3 (Juelssand). Deutlich zu erkennen ist die Entstehung eines temporären Sedimentationsschwerpunktes im BA1, im Bereich östlich von Wedel, erstmals im Winterhalbjahr 2014/2015 und zuletzt im Winterhalbjahr 2016/2017 und damit zeitgleich zur Unterbringung großer Baggergutmengen (maximal rd. 3,5 Mio. t im Winterhalbjahr 2015/2016) nur wenige hunderte Meter stromauf auf Höhe der Insel Neßsand; die Baggerstatistik der früheren Jahre vor 2013 zeigt hier im Bereich östlich von Wedel keine Unterhaltungsbaggerungen. Im April, also nach Beendigung der Umlagerungssaison, klang die Sedimentation stets rasch wieder ab.

Es ist davon auszugehen, dass der nur wenig stromab liegende Bereich Sedimentfang sowie der Baggerabschnitt Juelssand hiervon ebenso betroffen waren, da maximale Sedimentationsraten systematisch im Zeitraum der Umlagerungssaison oder kurz danach, hier vor allem in den Monaten Februar bis April der Jahre 2016 und 2017, zu beobachten sind.

Zuletzt sind auf die Stelle Neßsand wieder deutlich geringere Baggergutmengen und im Winter 2017/2018 auch wieder bei etwas höheren Oberwasserzuflüssen untergebracht worden, in den Winterhalbjahren 2017/2018 sowie 2018/2019 waren es nur noch rd. 1,5 Mio. t bzw. 0,2 Mio. t (November und Dezember 2018). Zugleich haben die Daten in diesem Abschnitt östlich von Wedel auch keine Sedimentation mehr angezeigt.

In Abbildung 47 sind für die WSV-Baggerabschnitte die mittleren Sedimentationsraten der Zeiträume von November bis April (Winterhalbjahr) und von Mai bis Oktober (Sommerhalbjahr) dargestellt. Im Gegensatz zum Hamburger Bereich haben die Trendanalysen (saisonaler Mann-Kendall Test) für die Baggerabschnitte Osteriff, Juelsand und Sedimentfang Wedel keine signifikanten Anstiege der Raten für den Gesamtzeitraum von Sommerhalbjahr 2013 bis Ende 2017 ergeben.

Auch die Darstellung der Sedimentationsraten als Halbjahresmittelwerte lässt den zuvor beschriebenen Einfluss der Unterbringung von Baggergut bei Neßsand auf die Verhältnisse erkennen. Die beiden Teilabschnitte östl. Wedel und Sedimentfang Wedel, in welche der BA1 aufgeteilt worden ist, erreichen im Winterhalbjahr 2015 ein Sedimentationsmaximum, welches in die Phase einer maximalen Sedimentation im Hamburger Bereich fällt (Abbildung 45). Auffällig im Teilabschnitt Wedel Sedimentfang sind anfangs höhere Sedimentationsraten in den Winterhalbjahren bis 2015, ab dann kehren sich die Verhältnisse und die Sedimentation ist im Sommer stärker als im Winter. Weiter stromab im BA3 (Juelssand) ist ein solcher Effekt bei den Halbjahresmittelwerten nicht zu erkennen.

Im BA12 (Osteriff) treten systematisch höhere Sedimentationsraten im Winterhalbjahr auf, dies ist jedoch aufgrund der Entfernung von über 60 km nicht auf die Unterbringung von Baggergut vor Neßsand zurückzuführen. Ursachen sind vielmehr die Verlagerung der Trübungszone stromab bei den höheren Oberwasserverhältnissen im Winterhalbjahr (Abbildung 27) sowie die Remobilisierung und Eintragung von Sedimenten von den seitlich anschließenden Watten infolge von herbstlichen/winterlichen Starkwindereignissen (Winterscheid et al. 2019).



Abbildung 46: Sedimentationsraten in den WSV Baggerabschnitten und Oberwasserzufluss am Pegel Neu Darchau im Monatsmittel, aus BfG (2018).



Abbildung 47: Halbjahresmittelwerte der Sedimentationsraten der Sedimentationsschwerpunkte in den WSV Baggerabschnitten Wedel, Juelssand und Osteriff. Sommerhalbjahr: Mai bis Oktober; Winterhalbjahr: November bis April, alle Werte auf Basis der Ergebnisse aus Abbildung 46.

## 3 Erkenntnisse aus wasserbaulichen Systemstudien der BAW

### 3.1 Einfluss der morphologischen Veränderungen von 2010 bis 2016

Abbildung 33 und Abbildung 34 zeigen die Topographien im Mündungsbereich für die Jahre 2010 und 2016. Besonders auffällig ist die augenscheinlich stärker ausgeprägte Verbindung zwischen der Medemrinne und dem Klotzenloch, die hydraulisch leistungsfähiger zu sein scheint. Einen ersten Einblick, ob es sich damit wirklich so verhält und welche Auswirkungen die anderen topographischen Veränderungen mit sich bringen, kann nur eine Systemstudie mit einem hydrodynamisch-numerischen Modell der Tideelbe liefern.

Daher wurde das Tideelbemodell, das für die Topographie und die hydrologischen und meteorologischen Verhältnisse von 2010 kalibriert und validiert ist, genutzt, um die Auswirkungen der topographischen Veränderungen auf die Tidedynamik zu ermitteln. Berechnungsnetz, Randwerte und Modelleinstellungen bleiben dabei unverändert, in der Variante wird lediglich die Topographie aus dem DGM-W 2016 verwendet. In Abbildung 48 ist die resultierende Tiefendifferenz der Modelltopographien zu sehen. Die im Vergleich zur Unterelbe wesentlich stärker ausgeprägte Morphodynamik des Mündungsbereiches ist deutlich zu erkennen.



Abbildung 48: Systemstudie – Tiefendifferenz der Modelltopographien für die Jahre 2010 und 2016. Rot: 2016 flacher, blau: 2016 tiefer.

Die veränderten Volumenströme im Mündungsbereich sind anhand der Differenz des mittleren Tidestromvolumens (2016–2010) in Abbildung 49 zu erkennen. Durch die Verlagerung von Sänden und Rinnen ergeben sich lokal größere Verschiebungen, die oberhalb des östlichen Ausgangs der Medemrinne zu einem insgesamt erhöhten Tidestromvolumen führen. Anhand der Differenz des maximalen Tidehubs in Abbildung 50 ist zu erkennen, dass ein Anwachsen des Tidehubs erst oberhalb von St. Margarethen ab Elbe-km 690 stattfindet. Die berechneten Wasserspiegellagen am Pegel St. Pauli für die Modelltopographien 2010 und 2016 sind in Abbildung 51 als Zeitreihe zu sehen. Unten im Bild ist die Differenz

dargestellt. Allein aufgrund der veränderten Topographie steigt in dieser Systemstudie der Tidehub am Pegel St. Pauli um ca. 8 cm.



Abbildung 49: Differenz des mittleren Tidestromvolumens (2016-2010).



Abbildung 50: Differenz des maximalen Tidehubs (2016-2010).



Abbildung 51: Berechnete Wasserspiegellage am Pegel St. Pauli für die Modelltopographien 2010 und 2016. Unten ist die Differenz dargestellt.

#### 3.2 Einfluss einer Unterwasserablagerungsfläche im Bereich Medemrinne-Ost

Die morphologischen Veränderungen im Mündungsgebiet haben erwiesenermaßen einen großen Einfluss auf die Tidedynamik. Daher wurde in einer weiteren Systemstudie in das Modell, das den Zustand 2016 darstellt, im östlichen Bereich der Medemrinne eine Unterwasserablagerungsfläche (UWA) eingebaut, ähnlich wie sie im Rahmen der Fahrrinnenanpassung als Dämpfungsbauwerk aktuell hergestellt wird. Abbildung 52 zeigt einen Ausschnitt aus der Modelltopographie, der modifizierte Bereich ist im Vergleich zu der Abbildung 34 gut zu erkennen. Dieses System und das Referenzmodell wurde dann jeweils über einen Zeitraum von zwei Spring-Nipp-Zyklen simuliert und eine Tidekennwertanalyse durchgeführt.

Als einziges Ergebnis soll hier in Abbildung 53 die Differenz (Variante-Referenz) des mittleren Tidehubs entlang der Fahrrinne dargestellt werden. Durch diese strombauliche Maßnahme würde der mittlere Tidehub großräumig stromauf des Bauwerkes um ca. 7,5– 10 cm reduziert werden. Die Veränderung des mittleren Tidehubs ergibt sich im Wesentlichen aus einer Anhebung des MTnw (ca. +6 cm) und nur zu einem geringen Anteil aus einer Absenkung des MThw (ca. –2 cm). Im Mündungsbereich wird der Tidehub direkt stromab der Maßnahme etwas größer werden (ca. +2 cm), zur Mündung hin klingt die Wirkung ab.

Diese Studie kann somit als Beispiel dienen, dass mit einer Strombaumaßnahme im Mündungsbereich die Tidedynamik in der Unterelbe positiv beeinflusst werden kann. Sie bestätigt auch das Strombaukonzept, die Tideenergie im Mündungsbereich zu dämpfen.



Abbildung 52: Systemstudie – Ausschnitt aus der Modelltopographie 2016, modifiziert mit einer Unterwasserablagerungsfläche (UWA) im östlichen Bereich der Medemrinne.



- d(mittlerer Thb) Variante - Referenz

Abbildung 53: Differenz (Variante-Referenz) des mittleren Tidehubs entlang der Fahrrinne.

## 3.3 Einfluss der effektiven Sohlrauheit zwischen Elbe-km 640 und 655

Mögliche Auswirkungen der in Kapitel 2.6 beschriebenen morphologischen Veränderungen – der Glättung der Sohle im Bereich der Verbringstelle Neßsand – können in Systemstudien abgeschätzt werden, indem der lokale Einfluss der effektiven Sohlrauheit modifiziert wird. Die grundsätzliche Idee des verwendeten Rauheitsmodells ist, dass sich in vorwiegend sandigen Bereichen kleine und große Transportkörper (Riffel, Dünen) ausbilden können, die rauheitswirksam sind (Formrauheit) und somit die Tideenergiedissipation forcieren. Eine Verfeinerung des oberflächennahen Sedimentinventars durch vermehrt anfallende Feinsedimente zerstört diese Sohlformen, somit die Rauheitswirkung der Gewässersohle und verringert dadurch die Tideenergiedissipation.

In einer weiteren Systemstudie wurde daher die effektive Sohlrauheit ca. zwischen Elbekm 640 und 655 im Bereich der Fahrrinne lediglich auf die Kornrauheit gesetzt, um mögliche Auswirkungen der beobachteten Glättung der Sohle zu studieren. In der Abbildung 54 ist der so modifizierte Bereich in der rechten Abbildung anhand der dargestellten effektiven Sohlrauheit gut zu erkennen. Zusätzlich wurde in diesem Bereich das Sedimentinventar durch ein Schluff-Feinsand-Gemisch ersetzt, um höhere Schwebstoffkonzentrationen und stärkere vertikale Konzentrationsgradienten zu erhalten. Auf diese Weise wird die Energiedissipation durch einen zweiten Wirkpfad – der durch die Dichteschichtung verminderten vertikalen Turbulenz – zusätzlich gedämpft.

Die Auswirkungen dieser Systemstudie sind in der Abbildung 55 als Differenz (Variante-Referenz) des mittleren Tidehubs entlang der Fahrrinne dargestellt. Die lokale Verringerung der Sohlrauheit führt im Bereich der Veränderung und weiter stromauf zu einer Erhöhung des mittleren Tidehubs um bis zu 5 cm. Dieser Wert kommt größtenteils durch ein Absinken des Niedrigwassers zustande. Die Wirkungskette ist kompliziert, die Reflexion der Tidewelle ergibt z. B. weiter stromab eine Dämpfung des Tidehubs um ca. 3 cm, die dort wiederum aus einer Anhebung des Tideniedrigwassers und einer Absenkung des Tidehubs resultiert.

In Abbildung 56 und in Abbildung 57 sind die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten zu sehen, die im Analysezeitraum für die beiden Modelle detektiert wurden. In dem Modell mit den verringerten Sohlrauheiten (Abbildung 57) sind diese bereichsweise deutlich größer. Die Position der Dauermessstelle D1 ist in den Abbildungen markiert. Auch an dieser Stelle ist die maximale Strömungsgeschwindigkeit in der Variante größer. Für die in Kapitel 2.3 beschriebene Zunahme der Flutstromgeschwindigkeit könnte somit eine glattere Sohle stromab mit eine Ursache sein.

Vorerst kann anhand dieser Systemstudie festgehalten werden, dass die Tideelbe durchaus sensitiv gegenüber Veränderungen der Sohlrauheit in diesem Bereich ist. Der Einfluss auf den Tidehub ist aber sicherlich deutlich geringer als z. B. der in Kapitel 3.1 untersuchte summarische Einfluss der topografischen Veränderungen. Dies liegt daran, dass mit der Modellkonfiguration dieser Systemstudie die Phänomene (Glättung der Sohle, Erhöhung der Schwebstoffgehalte) stärker als in der Realität beobachtet abgebildet werden und somit die hydrodynamische Auswirkung im Modell größer sind als in der Realität.



Abbildung 54: Systemstudie – Die Verringerung der effektiven Sohlrauheit in der Fahrrinne zwischen Elbe-km 640 (Wedel) und 655 (Stadersand) ist im rechten Bild zu erkennen.



\_\_\_\_ d(mittlerer Thb) Variante - Referenz

Abbildung 55: Differenz (Variante-Referenz) des mittleren Tidehubs entlang der Fahrrinne.



Abbildung 56: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Analysezeitraum, System ohne verringerte Sohlrauheiten.



Abbildung 57: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Analysezeitraum, System mit verringerten Sohlrauheiten.

## 4 Erkenntnisse aus dem Datenmodell der HPA

## 4.1 Aufbau und Kalibrierung des Datenmodells

Das bei der HPA entwickelte Datenmodell zur Berechnung der Sedimentationsmengen im Hamburger Hafen verwendet einen Bilanzierungsansatz, der die komplexen hydrodynamischen Wirkzusammenhänge auf den Sedimenttransport stark vereinfacht und dennoch zu validen Ergebnissen gelangt.

Grundidee des Ansatzes ist die Vorstellung, dass mit jeder Tide in Abhängigkeit vom Oberwasserzufluss jeweils ein prozentualer Anteil des in der Unterelbe befindlichen Sedimentinventars stromab und der Rest stromauf transportiert wird.

Der jeweilige prozentuale Anteil des zurücktransportierten Materials wird durch eine Potenzfunktion (s. Abbildung 58) bestimmt, deren Parameter so zu kalibrieren sind, dass eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen den Ganglinien der über mehrere Jahre gemessenen Peilvolumina und den aufsummierten Einträgen in eine "Sammlerzelle Hafen" (äußere rechte Spalte der Matrix) resultiert.



Abbildung 58: Schema zur Aufteilung des Zellinventars (SI) mittels der Potenzfunktion TQup.

Mit jedem Zeitschritt (hier: Tide) wird das Inventar einer Zelle aus dem vorangegangenen Zeitschritt auf ihre links (downstream) und rechts (upstream) benachbarten Zellen entsprechend dem Ergebnis der 7Q-Funktion vollständig aufgeteilt.

Damit ist das Modell absolut volumentreu, d. h. es gibt keine Akkumulation oder Erosion in einer Spalte und solange keine Massen von außen hinzugefügt oder entnommen werden, bleibt die Summe über eine Zeile konstant, mit der Einschränkung, dass bei hohen Oberwasserzuflüssen auch ein Austrag über die äußere Systemgrenze (zur Linken) erfolgen kann.

Das Sedimentinventar wird genährt durch den Schwebstoffgehalt des Oberwassers, der mit 28 g/m<sup>3</sup> angesetzt wurde. Das entspricht bei einem mittleren Q von 700 m<sup>3</sup>/s einem Eintrag von 618.000 t/a.

Am äußeren linken Systemrand wird eine variable Zugabe bereitgestellt, wenn das Zellinventar dort infolge mangelnden Nachschubs von Oberstrom unter eine definierte Schwelle sinkt. Derartige Situationen treten insbesondere in Phasen auf, in denen der Oberwasserabfluss über längere Zeit einen überwiegenden Stromauftransport induziert und dadurch den gepufferten Vorrat im linken Teil der Matrix vollständig verbraucht. Ohne diese Zugabe befände sich bei niedrigen Oberwasserverhältnissen nicht genügend Material im System, um den Anstieg des Sedimentinventars in der "Sammlerzelle Hafen" realitätsnah abzubilden.

Der maßgebliche Eintrag wird allerdings durch die Umlagerung von Baggergut aus dem Hamburger Hafen bei Neßsand beigesteuert. Die in der Datenbank für jeden einzelnen Umlauf abgelegten Massen (in Tonnen-Trockensubstanz) werden pro Tide aggregiert in die Zelle (x=0), also 12 Tiden unterhalb der "Sammlerzelle Hafen" zugegeben. Das Zellinventar in der Sammlerzelle wird um die gleiche Masse reduziert, so dass diese Verbringung für das Gesamtmodell bilanzneutral ist. Zur Tonne E3 verbrachte Baggermengen werden dagegen lediglich aus der Sammlerzelle entnommen. Keine Berücksichtigung finden bislang Sedimentumlagerungen, die durch verschiedene Akteure während einer Wasserinjektionsbaggerung verursacht werden.

Die Veränderungen des Sedimentinventars in der "Sammlerzelle Hafen" sowie den gewählten 125 Zellen links und 12 Zellen rechts der Umlagerstelle Neßsand lassen sich über die Zeit animiert visualisieren und bieten damit eine anschauliche Demonstration der je nach Abflussmenge stromab oder stromauf wandernden oder um die Einbringstelle akkumulierten Sedimentbudgets (Abbildung 59).



Abbildung 59: Visualisierung des zeitvariablen Zellinventars je Zeitschritt (Tide) in einem Balkendiagramm.

Die Kalibrierung des Modells erfolgt durch die Minimierung der Fehlerquadrate zwischen den Ganglinien des modellierten/bilanzierten Zellinventars der "Sammlerzelle Hafen" und den gepeilten Volumina in den sieben Hauptbaggergebieten des Hamburger Hafens. Das Hafeninventar wird aus den Stützstellen der Vor-/Nachpeilungen bei Baggereinsätzen sowie den regelmäßigen Verkehrssicherungspeilungen durch eine kubische Spline-Interpolation in tägliche Werte approximiert.

Die Kalibrierung des Modells setzt mit dem Beginn der Umlagerungssaison im November 2007 auf ein leeres Zellinventar auf. Dieser vereinfachte Ausgangszustand ist nur deshalb gerechtfertigt, weil bereits kurz nach dem Start des Kalibrierungszeitraums der Oberwasserabfluss auf über 1.000 m<sup>3</sup>/s ansteigt und bis in den Mai 2008 hinein auf einem überdurchschnittlich hohen Niveau von im Mittel rd. 1160 m<sup>3</sup>/s bleibt. Der sukzessive Aufbau des Zellinventars kann deshalb durch eine Beschickung der stromab gelegenen Zellen mit dem bei Neßsand eingebrachten Baggergut (2007/08: 1,03 Mio. t) dem Modell selbst überlassen werden.

Insgesamt wurden über den Zeitraum der Modellkalibrierung (11/2007 bis 03/2018) rd. 18 Mio. t Baggergut aus dem Hafen bei Neßsand eingebracht sowie 6,3 Mio. t über das Oberwasser und 3,87 Mio. t durch Zugabe an der äußeren linken Systemgrenze zugegeben. Demgegenüber steht ein Austrag durch Verbringung zur Tonne E3 von 5,5 Mio. t und ein Verlust über die äußere linke Systemgrenze von 2,55 Mio. t. Eine Bilanz sämtlicher Einund Austräge ist in Tabelle 3 zusammengestellt.

Bilanzierung		Aufsummierter					Zugabe/Verlust	
Modelleinträge		Eintrag in	Umlagerungen	Verbringung	WI-Baggerungen	Eintrag übers	(Entnahme)*	Summen /
&-entnahmen		Hafenzelle	bei Neßsand	zur Tonne E3	(erst ab 2014)	Oberwasser	an Modellgrenze	Bilanzen
Modelleintrag	[t]		18,06 Mio.			6,30 Mio.	3,87 Mio.	28,24 Mio.
Modellaustrag	[t]	-23,43 Mio.		-5,52 Mio.	-0,64 Mio.		-2,55 Mio.	-32,23 Mio.
	⊢aufsummiert							-3,99 Mio.
Bilanz nur Modell excl. Hafenzelle	[t]	-23,43 Mio.	-5,37 Mio.	nicht relevant für Modell o. HZ	Modelleintrag nicht realisiert	0,93 Mio.	2,25 Mio.	
Bilanz nur Hafenzelle	[t]	23,43 Mio.	5,37 Mio.	-0,15 Mio.	-0,79 Mio.	* Kalibrierung machte Entnahme bei sehr hohem Oberwasser erforderlich		

Tabelle 2: Übersicht und Bilanzierung der in das Modell ein- und ausgetragenen Massen.

Die Kalibrierung des Modells zielte in erster Linie darauf ab, die zeitliche Entwicklung der Massen in der "Sammlerzelle Hafen" in bestmöglicher Übereinstimmung mit der Ganglinie der Peilaufmaße nachzubilden. Wie ein Vergleich der Bilanzen über Ein- und Austräge in Tabelle 2 mit der Bilanzierung des Inventars zu Beginn und Ende des Modelllaufs in Tabelle 3 zeigt, konnte dieses Ziel durch die Kalibrierung erreicht werden.

Tabelle 3: Bilanzierung des Modellinventars am Anfang und Ende des modellierten Zeitraums.

	Bilanzierung	_	Inventar	Inventar	Modellinventar	
Modellanfangs-/			Hafenzelle	Hafenzelle	excl. Hafenzelle	Inventarzuwachs:
	-endzustand		bei Modellstart	am 09.03.2018	am 09.03.2018	incl. Hafenzelle
	Inventar / Bilanz Modell incl. HZ	[t]	1,56 Mio.	0,78 Mio.	2,31 Mio.	1,53 Mio.
	Bilanz nur Hafenzelle	[t]		-0,78 Mio.		

Die Kalibrierungsgröße ist die schon vorgestellte  $\tau$ Q-Funktion, die für eine Oberwassermenge Q die Verteilung des Sedimentinventars auf ihre stromauf- und stromab benachbarten Zellen definiert. Da es keine analytische Lösung für das Problem gibt, bleibt nur der Weg, durch iterative Änderung der drei Funktionsparameter eine zufriedenstellende Annäherung der beiden Ganglinien herbeizuführen. Das Ergebnis belegt die qualitativ hohe Ähnlichkeit von Modell und Messung (Abbildung 60).



Abbildung 60: Ergebnis der Modellkalibrierung über einen Zeitraum von 11 Jahren.

#### 4.2 Kernaussagen des Datenmodells

Da die Bilanzierung des Ein- und Austrags in die Modellzelle Hafen eine gute Übereinstimmung zwischen Beobachtung (Peilungen) und Modellierung zeigt, sind folgende Kernaussagen aus dem Modell ableitbar:

- Die Menge des Sedimenteintrags in den Hafen wird dominiert von der Menge der zuvor bzw. gleichzeitig ins System von Ober- und Unterstrom eingetragenen und im System mit Unterhaltungsbaggerungen verbrachten Sedimente (Sedimentverfügbarkeit).
- Der Oberwasserzufluss bestimmt im Wesentlichen die Geschwindigkeit, mit der Baggergutsedimente von der Verbringstelle Neßsand wieder in den Hafen zurücktransportiert werden. Bei langanhaltendem MQ < 400 m<sup>3</sup>/s werden aufgrund der kurzen Entfernung rd. 99 % der auf Neßsand verbrachten Baggergutsedimente wieder zurück in den Hafen transportiert. Ein natürlicher Austrag findet bei diesem Datenmodell erst bei dauerhaft Q > 700 m<sup>3</sup>/s statt.
- In den Jahren bis einschl. Frühjahr 2018 war die Bilanz von ein- und ausgetragenen Sedimenten lediglich ausgeglichen, d. h. der Austrag zu Tonne E3 von insgesamt 4,33 Mio. t aus dem Hafen konnte noch nicht die beabsichtigte Wirkung erzielen, die Fracht in dem Sedimentkreislauf Hafen-Neßsand spürbar abzubauen.
- Seit Mai 2018 ist die Bilanz hochgradig negativ. Grund hierfür sind die bei langanhaltendem extrem niedrigem Oberwasserzufluss exponentiell ansteigenden externen Einträge von Unterstrom (Abbildung 62).

Die Massenbilanz der Ein- und Austräge vom 01.04.2014 bis 01.04.2018 ist ein Nullsummenspiel: Eintrag v. Unterstrom (2,45 Mio. t) + Eintrag v. Oberstrom (1,86 Mio. t) – Austrag zu E3 (4,33 Mio. t) = -0,02 Mio. t.



Abbildung 61: Bilanzierung der Ein- und Austräge vom 01.04.2014 bis 01.04.2018.



Abbildung 62: Analysierte Modelldaten; links: Eintrage von Unter- und Oberstrom mit Regression zum Abfluss Neu Darchau, rechts: bilanzierte Einträge auf Basis der Regressionsfunktion.

Aufgrund des begrenzten Mengenbudgets, das zur Tonne E3 verbracht werden darf, muss es daher das Ziel sein, den bereits beschrittenen Weg zur Reduzierung der Einträge ins System durch Baggergutumlagerungen bei Neßsand (insbesondere bei geringem Oberwasser) konsequent weiter zu verfolgen. Ergänzend sollten die Mengen und Zeiten von WI-Baggerungen besser koordiniert/reglementiert und den Oberwasserbedingungen angepasst werden.

# 4.3 Auswirkung alternativer (adaptiver) und strategischer Handlungsoptionen

Die vergleichsweise schnelle Berechnung der Baggermengenentwicklung im Hamburger Hafen bietet erstmals die Möglichkeit, die Auswirkung alternativen Handelns bei gegebenen äußeren hydrologischen Randbedingungen zu ermitteln und auch wirtschaftlich unter Berücksichtigung der ggf. nur in die Zukunft verlagerten Unterhaltungskosten zu bewerten. Hierbei wurde im Rahmen verschiedener HPA-interner Studien bereits untersucht, wie eine Reduktion der Baggermengen zur Umlagerung bei Neßsand in Phasen niedriger Oberwasserzuflüsse in den Wintermonaten die Sedimentationsraten in den nachfolgenden Sommermonaten beeinflussen kann. Als vorläufiges Fazit kann festgehalten werden, dass eine exorbitante Steigerung der Baggermengen gegen Ende der Verbringsaison Februar/März bei ausbleibendem Frühjahrshochwasser (wie z. B. in den Jahren von 2015 bis 2017) nur kurzzeitig oder auch gar nicht (Februar 2017) zu verbesserten Wassertiefen im Hafen führt und bereits nach wenigen Wochen ins Gegenteil umschlägt. Effektiver wäre es, das Baggergut unter Inkaufnahme von Mindertiefen noch vier Wochen länger liegen zu lassen, um es dann in die Nordsee zu Tonne E3 zu verbringen. Des Weiteren bietet das Modell auch die Möglichkeit, die zu erwartenden Sedimentationsmengen im Hamburger Hafen und ihre zeitliche Entwicklung genauer zu prognostizieren, als dies bisher möglich war. Da die Sedimentationsmengen (zumindest in den letzten Jahren) sehr stark von der Sedimentverfügbarkeit abhängen, können statistische Monatsmittel des Abflusses oder klimatologische Abflussprognosen verwendet werden, um ein Basisszenario der Sedimentationsentwicklung zu simulieren. Darauf aufbauend lässt sich durch worst- und best-case Oberwasserszenarien die zu berücksichtigende Bandbreite für die Mengenkalkulation angeben. Für die Sommersaison 2018 wurde diese Methode erstmals angewendet und resultierte zum Prognosezeitpunkt Anfang April in einer Sedimentationsmenge von 2,25 Mio. t TS  $\pm 10$  % bis zum Ende Oktober (Abbildung 63).

Mit fortschreitender Dauer und Einbeziehung des tatsächlichen Oberwasserzuflusses wird die Bandbreite zusehends enger, so dass die Mengendisposition ggf. nachgesteuert werden kann.



Abbildung 63: Szenarien zur Entwicklung des Sedimentinventars im Hamburger Hafen für unterschiedliche Abflussbedingungen und eines geplanten Austrags von 1 Mio. TTS in die Nordsee.

## 5 Zusammenfassung der beobachteten Veränderungen und Systemstudien

Vor einer Erklärung bzw. Ursachenanalyse werden nachfolgend zunächst die in Kapitel 2 beschriebenen Veränderungen im Bereich Hydrologie und Morphologie sowie die Erkenntnisse aus den Systemstudien der BAW (Kapitel 3) und dem Datenmodell der HPA (Kapitel 4) kurz zusammengefasst:

## Hydrologie

• Oberwasserzufluss (Kapitel 2.1): Seit dem höchsten gemessenen Abfluss HQ im Juni 2013 bewegt sich der Oberwasserzufluss der Elbe auf einem in Relation zum langjährigen statistischen Mittel sehr niedrigen Niveau (nachfolgend bezeichnet als Niedrigwasserphase 2013f). Die geringen Zuflüsse der vergangenen Jahre traten so-wohl in den Sommer- wie auch in den Wintermonaten auf.

- Tidehub (Kapitel 2.2): Seit Jahrzehnten gibt es einen Anstieg des Tidehubs im oberen Abschnitt der Tideelbe zwischen Brokdorf und dem Wehr Geesthacht. Dieser Anstieg hat sich jedoch zwischen 2010/2011 und 2017 beschleunigt; am Pegel St. Pauli um den Faktor 4 auf rund 3 cm/a. Weiter stromab im Amtsbereich Hamburg wurde die gleiche Entwicklung – jedoch in abgeschwächter Form – beobachtet. Seit 2017 sinkt der Tidehub wieder. Im Amtsbereich Cuxhaven und am Pegel Helgoland können keine signifikanten Änderungen festgestellt werden.
- Strömungsgeschwindigkeiten (Kapitel 2.3): Seit Beginn der Niedrigwasserphase 2013f lagen die mittleren maximalen Strömungsgeschwindigkeiten bis 2017 sowohl für den Ebbe- als auch für den Flutstrom an der Station Teufelsbrück (Elbekm 631,0) und an den Dauermessstationen D1 (Elbe-km 643; Wedel) bis D4 (Elbekm 676,5; Rhinplate) auf einem höheren Niveau als in den davorliegenden Jahren; etwas geringer fällt der Anstieg für die mittleren Geschwindigkeiten aus. Eine besondere Situation zeigt sich bei D1, da hier die mittleren Geschwindigkeiten bei Flutstrom angestiegen und bei Ebbestrom gesunken sind. Ab dem Jahr 2018 ist an allen Stationen ein Rückgang der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten zu erkennen. Dazu zeigen sich seit Beginn der Niedrigwasserphase 2013f im Strombereich nahe Hamburg bzw. im Hamburger Hafen Erhöhungen der mittleren Flutstromdauern und Verringerungen der mittleren Ebbestromdauern.

#### Morphologie und Baggermengen

- Trübungsverhältnisse/Schwebstoffgehalte (Kapitel 2.4): Seit dem höchsten gemessenen Abfluss HQ im Juni 2013 und der daran anschließenden Niedrigwasserphase 2013f konnte im oberen Abschnitt der Tideelbe zwischen Brokdorf und dem Hamburger Hafen ein Anstieg der Trübung bzw. der dazu korrespondierenden Schwebstoffgehalte und ein Verharren derselben auf einem deutlich gesteigerten Niveau festgestellt werden. An den Dauermessstationen D4 bis D1 sowie Seemannshöft erfolgte dieser Anstieg sprunghaft im Zeitraum Oktober 2013 bis Februar 2014. Dieser sprunghaften Veränderung gingen zwei Sturmflutereignisse voraus, welche zu Beginn des Zeitraums anhaltend niedriger Oberwasserzuflüsse auftraten. Die bislang vorliegenden Ergebnisse belegen einen Wirkzusammenhang zwischen der Remobilisierung einer großen Menge an Feinsedimenten auf den Wattflächen und Vorländern (infolge Sturmflut), dem anschließenden Stromauftransport (infolge anhaltend niedrigem Oberwasserzufluss) und dem beobachteten sprunghaften Anstieg und Verharren der Schwebstoffgehalte auf einem deutlich gesteigerten Niveau. Eine vergleichden Zeitraum Entwicklung kann auch für anhaltend niedriger bare Oberwasserzuflüsse ab Sommer 1989 nachvollzogen werden, nachdem es hier im Februar 1990 zu einer äußerst ungewöhnlichen Folge von Sturmflutereignissen gekommen ist.
- Baggermengen und Sedimentationsraten, hier Hamburger Hafen (Kapitel 2.5.1 und 2.7.1): Infolge der Niedrigwasserphase 2013f hat es einen Anstieg der Baggermengen zur Umlagerung bei Neßsand gegeben. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein noch stärkerer Anstieg der Baggermengen sowie eine weitere Intensivierung der Kreislaufbaggerung zwischen Hamburg und Neßsand durch die Wiederaufnahme der Verbringung von Baggergut zur Tonne E3 in der Nordsee bei Helgoland verhindert wurde. Korrespondierend zum anhaltend niedrigen

Oberwasser zeigen die Sedimentationsraten in den Baggerschwerpunkten des Hamburger Hafens eine ansteigende Tendenz. Eine Stabilisierung auf hohem Niveau bzw. ein leichter Rückgang (Entlastung durch E3-Verbringung) zeigt sich für das Jahr 2017. Trotz einer weiteren Reduzierung der Umlagerungsmenge bei Neßsand wurden 2018 wieder höhere Sedimentationsraten in den Hamburger Baggerschwerpunkten beobachtet. Dies liegt im Wesentlichen darin begründet, dass die niedrigen Oberwasserbedingungen weiter anhalten und eine hohe Verfügbarkeit von Sedimenten vorhanden ist.

- Baggermengen und Sedimentationsraten, hier Baggerabschnitte Wedel bis Juelssand (Kapitel 2.5.2 und 2.7.2): In die Niedrigwasserphase 2013f fallen ebenfalls die Jahre mit den größten Sedimentmengen, die in den Baggerabschnitten Wedel (BA1) bis Juelssand (BA3) zu Unterhaltungszwecken gebaggert werden mussten. In den Jahren von 2013 bis 2015 sind die Baggermengen in den BA1 bis 3 deutlich angestiegen und verharren seitdem auf diesem konstant hohen Niveau. Die Auswertungen der Sedimentationsraten bestätigen diese Entwicklung.
- Baggermengen in Nebenbereichen, hier Durchstich zur Wischhafener Süderelbe (Kapitel 2.5.4): In den Jahren nach 2013 ist es zu deutlichen Auflandungen im Bereich des Wischhafener Fahrwassers gekommen. Seit 2014/2015 ist dieses bei Niedrigwasser in weiten Teilen trockengefallen. Mit abnehmender Durchströmung des Fahrwassers hat der Unterhaltungsaufwand im Durchstich (Fährverbindung Glückstadt – Wischhafen) zugenommen. Vergleichbare Entwicklungen, die zugleich auch einen mindestens temporären Verlust an Sedimentations- und Flutraum bedeuten, hat es auch in anderen Nebenbereichen gegeben. Eine Bewertung dazu, wieviel Sedimentationsraum in der Phase mit hohen Schwebstoffgehalten verloren gegangen ist, ist aktuell noch nicht möglich; hier sind weitere Untersuchungen und Datenauswertungen in den kommenden Jahren notwendig.
- Morphologische Veränderungen im Mündungstrichter und im Fahrwasserbereich (Kapitel 2.6.1): Zwischen 2010 und 2016 ist es zu ausgeprägten morphologischen Veränderungen im Mündungsbereich gekommen, die auf einen verstärkten Energieeintrag in die Tideelbe schließen lassen. Auch wurden erosive Tendenzen im Fahrwasserbereich stromauf von St. Margarethen beobachtet.
- Morphologische Veränderungen Transportkörperstrecke zwischen Elbe-km 633 (Höhe Tinsdal-Blankenese) und Elbe-km 641,8 (Höhe Wedel) (Kapitel 2.6.2 und 2.6.3): Diese rd. 9 km lange Transportkörperstrecke mit einer mittel- bis grobsandigen Gewässersohle erstreckt sich über die Zuständigkeitsbereiche des WSA Hamburg und der HPA. Für den östlichen Teil wurde eine fortschreitende Glättung morphologischer Strukturen ab dem Jahr 2015 beobachtet. Dünen- und Riffelstrukturen, die in 2010 noch klar erkennbar waren, konnten in 2017 nicht mehr eindeutig detektiert werden, insbesondere im Bereich der Umlagerstelle Neßsand. Jüngste Auswertungen (2018 und 2019) zeigen im Hamburger Bereich eine mögliche Rückkehr der Dünen- und Riffelstrukturen, obgleich die geometrischen Kennzahlen der Transportkörper sich in den letzten Jahren verändert haben (weniger Transportkörper mit einer gleichzeitigen Verlängerung der mittleren Transportkörperlänge). Eine noch stärkere Änderung der morphologischen Eigenschaften der Gewässersohle konnte für den westlichen Abschnitt stromab der Umlagerstelle Neßsand beobachtet werden. Hier ist es ab 2015 zu einer vollständigen Überdeckung der ursprünglichen

Transportkörperstrukturen und mittel- bis grobsandigen Gewässersohle mit Feinsedimenten gekommen. Eine Glättung der Transportkörperstrukturen zeigt sich in geringerem Maße auch in den angrenzenden Baggerabschnitten Lühesand und Juelssand.

### Erkenntnisse aus Modelluntersuchungen:

- Die wasserbaulichen Systemstudien der BAW (Kapitel 3) zeigen, dass allein aufgrund der veränderten Topographie (Vergleich 2010 zu 2016) im Mündungsbereich der Tidehub am Pegel St. Pauli um ca. 8 cm ansteigt. Weitere Systemstudien zum Einfluss der Sohlrauheit zwischen Wedel und Stadersand belegen, dass die Tideelbe durchaus sensitiv gegenüber Veränderungen der Sohlrauheit in diesem Bereich ist. Der Einfluss auf den Tidehub ist jedoch deutlich geringer als z. B. der summarische Einfluss der topografischen Veränderungen. Eine Modellbetrachtung zu Strombaumaßnahmen im Mündungsgebiet verdeutlicht, dass diese in Bezug auf die aktuell veränderte Topographie besonders gut geeignet sind, einer Erhöhung des Tidehubs entgegenzuwirken. Ein Bauwerk ähnlicher Natur der im Rahmen der Fahrrinnenanpassung derzeit gebauten UWA Medemrinne würde den mittleren Tidehub stromauf des Bauwerks um 7,5 bis 10 cm reduzieren.
- Das Datenmodell der HPA (Kapitel 4) zeigt eine hohe Abhängigkeit des Sedimentationsgeschehens im Hamburger Hafen vom Oberwasserzufluss und von den Mengen Baggergut, die im Winterhalbjahr bei Neßsand umgelagert werden. Der Oberwasserzufluss bestimmt im Wesentlichen den Anteil und die Geschwindigkeit des Rücktransports der Baggergutsedimente in den Hafen. Ein Austrag aus dem kurzen Baggerkreislauf findet bei diesem Datenmodell erst bei länger andauernden Oberwasserzuflüssen von Q > 700 m<sup>3</sup>/s statt. Das Modell kann auch belegen, dass aufgrund des in 2014 wieder aufgenommenen Feinmaterialaustrags zur Tonne E3 zumindest bis zum April 2018 ein weiterer Anstieg der Baggermengen im Hamburger Hafen vermieden werden konnte. Für die seit Mai 2018 anhaltenden und durchgehend extrem unterdurchschnittlichen Abflussverhältnisse mit MQ=340 m<sup>3</sup>/s und bis dato 180 Tagen oder ≈31 % unter dem langzeitstatistischen 0,5 %-Quantil von 200 m<sup>3</sup>/s reicht der genehmigte Austrag jedoch bei weitem nicht aus, um dem unter diesen Bedingungen um ein Vielfaches höheren Nachschub aus der Trübungszone wirksam zu begegnen.

## 6 Erklärung der beobachteten Veränderungen

Die beobachteten Veränderungen im Bereich der Hydrologie und Morphologie können unter Berücksichtigung der Modelluntersuchungen nach derzeitigem Kenntnisstand auf die folgenden drei Ursachenbereiche zurückgeführt werden:

- Morphologische Veränderungen im Mündungstrichter
- Niedrigwasserphase 2013f
- Unzureichend angepasstes Sedimentmanagement

#### Morphologische Veränderungen im Mündungstrichter

Die wasserbaulichen Systemstudien der BAW zeigen, dass die Veränderung der Morphologie im Bereich des Mündungstrichters eine wesentliche Ursache der Veränderungen im Wasserstands- und Strömungsgeschehen stromauf von St. Margarethen ist. Neben den evidenten Veränderungen im Mündungstrichter ist langjährig betrachtet im WSV-Amtsbereich Hamburg eine vorwiegend erosive Tendenz im Fahrrinnenbereich sowie in den angrenzenden Fahrwasserrändern (Bereich zwischen Tonnenstrich und 8m-Linie) zu verzeichnen.

Die mit dem Modell ermittelten Differenzen des mittleren Tidehubs spiegeln sich auch in den Tidekennwerten der Tideelbepegel wieder. Nach den bisher vorliegenden Analysen ist, u. a. ausgelöst durch den Durchbruch des Klotzenloches in 2008/2009, ab etwa 2009/2010 von einer Aufweitung im Bereich des Mündungstrichters und damit von einem verstärkten Energieeintrag in das Elbästuar auszugehen. Nach zwei weiteren schweren Sturmfluten 2013/2014 und dem Beginn der Niedrigwasserphase 2013f wird der Tidehub durch die abnehmende Energiedissipation aus Bodenreibung im Fahrrinnenbereich nahe Hamburg in geringerem Maß zusätzlich erhöht.

Die Konstruktion eines Zusammenhangs mit der Fahrrinnenanpassung von 1999 ist nach 12 Jahren ohne Änderung des vorherigen Trends (siehe Abbildung 4) kaum herzustellen und scheidet als mögliche Ursache aus. Auch gab es seit 2003 nach der Herstellung von ca. 140 ha EADS-Standort Erweiterungsflächen im Mühlenberger Loch weder nennenswerte andere anthropogene Eingriffe in das System, noch Belege für natürliche morphologische Veränderungen im oberen Elbeästuar, die für die Tidehub-Entwicklung ursächlich herangezogen werden könnten.

#### Niedrigwasserphase 2013f

Wenngleich die Größe des Oberwasserzuflusses einen gewissen Einfluss auf die Dämpfung des Tidehubs hat, kann doch ein ausschließlicher direkter Zusammenhang zwischen der Niedrigwasserphase 2013f und dem beschleunigten Anstieg des Tidehubs in dieser Größenordnung negiert werden. Empirische Untersuchungen zum Einfluss des Oberwasserzuflusses auf die Tidewasserstände im Hamburger Hafen (Fickert und Strotmann 2009) ergaben eine Größenordnung von weniger als einen halben Zentimeter Tidehubdämpfung am Pegel St. Pauli je 100 m<sup>3</sup>/s Veränderung beim Oberwasserzufluss.

Die Auswirkungen eines dauerhaft niedrigen Oberwasserzuflusses auf den Feinsedimenthaushalt sind jedoch dramatisch: Es erfolgt kein natürlicher Austrag von Feinmaterial in Richtung Nordsee und Sedimente werden im Bereich der Unterelbe verstärkt stromauf verfrachtet. Durch den Vergleich mit der Niedrigwasserphase 1989/1993 (Abbildung 24) kann belegt werden, dass es grundsätzlich in solchen Phasen mit niedrigen Oberwasserzuflüssen zu einer deutlichen Erhöhung des Schwebstoffinventars und einem starken Anstieg der Schwebstoffgehalte kommt. Entsprechend steigen auch die Baggermengen insbesondere in strömungsberuhigten Hafenbereichen stark an.

Während dieser Phasen ist von verstärkten Auflandungen in Nebenbereichen auszugehen. Auf jeden Fall gehen während länger anhaltender Niedrigwasserphasen temporär Fluträume verloren.

#### Unzureichend angepasstes Sedimentmanagement

Bei niedrigen Oberwasserzuflüssen kommt es aufgrund der Kreislaufbaggerungen im Bereich des Hamburger Hafens zu einer zusätzlichen Anreicherung des lokalen Schwebstoffhaushaltes und der sohlnahen Sedimenttransporte. Symptomatisch und besonders augenfällig sichtbar sind die Veränderungen in der Transportkörperstrecke zwischen den Elbekm 633,0 und 641,8 (vgl. Abschnitte 2.6.2 und 2.6.3). Während der Zeiträume 2015/2016 und 2016/2017, in denen hohe Mengen feinkörnigen Baggerguts bei Neßsand verbracht wurden, ist es hier zu einer Überdeckung ehemals vorhandener Dünen- und Riffelstrukturen gekommen. Weiter zeigt die Datenauswertung über die Niedrigwasserphase 2013f, dass die Sedimentationsraten in den Baggerabschnitten Wedel (BA1) und Juelssand (BA3) im Mittel im Zeitraum von März bis Mai (Abbildung 46) deutlich erhöht sind und viele Sedimentationsschwerpunkte im Hamburger Hafen im Februar und März vorübergehend erhöhte bzw. maximale Sedimentationsraten aufweisen (Abbildung 44).

Parallel zur Anreicherung des lokalen Schwebstoffhaushaltes wurden während der Verbringzeiträume in den BA1 und BA3 sowie im Hamburger Hafen Sedimentationsräume hergestellt, u. a. da im Zeitraum von Mitte April bis Ende Juni keine Baggerarbeiten durchgeführt werden, um Schädigungen der Roten-Liste-Art Finte (Laichzeit) auszuschließen. Auch erfolgt im Zeitraum Februar/März zu Winterende bevorzugt eine Räumung weiterer, direkt unterhalb des Hafens gelegener Sedimentationsräume (u. a. Este-Fahrwasser, Hafenbereiche Wedel). Es ist davon auszugehen, dass diese Unterhaltungsaktivitäten mit zu den erhöhten Sedimentationsraten beigetragen haben. Zeitliche Verschiebungen bzw. Anpassungen sind hier aufgrund naturschutzfachlicher und/oder genehmigungsrechtlicher Vorgaben kaum möglich.

Die Überdeckung von Dünen- und Riffelstrukturen und eine damit einhergehende Verringerung der Form- und Kornrauhheiten der Gewässersohle sind für den Fahrrinnenbereich zwischen Elbe-km 633,0 und 654,5 aus Messdaten belegt. Der mögliche Einfluss auf das Tidegeschehen lässt sich anhand der Modellbetrachtungen der BAW abschätzen. Demnach ist der Einfluss auf den Tidehub vorhanden, aber sicherlich deutlich geringer als z. B. der in Kapitel 3.1 untersuchte summarische Einfluss der topografischen Veränderungen.

Im Ergebnis zeigt sich, dass eine frühzeitigere und/oder zeitweise höhere Entlastung des Feinsedimenthaushaltes im inneren Ästuar erforderlich gewesen wäre. Das Datenmodell der HPA lässt darauf schließen, dass eine Stabilisierung in Phasen mit langjährigen niedrigen Oberwasserzuflüssen durch einen jährlichen Austrag um die 1 Mio. t/a (~2,5 Mio. m<sup>3</sup>/a) aus dem System erreicht werden kann. Zum Vergleich: In der BfG-Systemstudie II wurde abschätzend ein kontinuierlich notwendiger, noch zu überprüfender mittlerer Austrag von 1 Mio. m<sup>3</sup>/a genannt (BfG 2014). Allerdings liegt dieser Schätzung nur die Erfahrung früherer Jahre mit noch deutlich höheren Oberwasserzuflüssen zu Grunde.

Notwendig wäre ein flexibleres Handeln im Feinsedimentmanagement gewesen. Darüber hinaus ist für den Mündungstrichter zu prüfen, ob das Sedimentmanagement hier adaptiver gestaltet werden kann.

#### Fazit:

Für die beschriebenen Veränderungen im Tideelbesystem sind nach derzeitigen Erkenntnissen morphologische Veränderungen – insbesondere im Mündungstrichter – ursächlich, die durch die Folgen der seit Sommer 2013 anhaltenden Phase unterdurchschnittlich niedriger Oberwasserzuflüsse überlagert und durch ein auf diese Entwicklung unzureichend angepasstes Sedimentmanagement verstärkt werden.

Entsprechend sind für die Zukunft notwendige Strategieänderungen beim Sedimentmanagement zu diskutieren. Maßnahmen, die unmittelbar umgesetzt werden können, sind zu identifizieren und zu realisieren. Auch Strombaumaßnahmen im Mündungstrichter müssen denkbar sein, morphologische Veränderungen hier schneller erkannt und soweit möglich bereits im Rahmen der laufenden Unterhaltung berücksichtigt werden. Wie sich die Verhältnisse in der Tideelbe im aktuellen Systemzustand nach Ende der Niedrigwasserphase 2013f entwickeln werden und wie diese durch ein angepasstes Sedimentmanagement positiv beeinflusst werden könnten, ist in den kommenden Jahren zu erarbeiten. Insbesondere ist hierbei von Interesse, wann sich die erhöhten Schwebstoffgehalte wieder reduzieren und welche morphologischen Entwicklungen sich ergeben. Wichtige zukünftige Aufgabenschwerpunkte für ein Sedimentmanagement liegen sicherlich im Bereich des Mündungstrichters.

## 7 Handlungsempfehlungen

Mit Fokus auf die Morphologie sollen zum Abschluss die nachfolgenden Handlungsempfehlungen als Reaktion auf die skizzierten Entwicklungen an der Tideelbe zur Diskussion gestellt werden. Grundsätzlich ist das Sedimentmanagement im Hinblick auf folgende vier Zielsetzungen weiter zu optimieren:

- Gezielte Sedimentzufuhr in den Bereich des Mündungstrichters als Beitrag zur Drosselung der einschwingenden Tideenergie
- Erhalt von Dünen- und Riffelstrukturen im Fahrrinnenbereich und Vermeidung von Sandverlusten im inneren Ästuar
- Stabilisierung des Feinsedimenthaushaltes im inneren Ästuar
- Weitgehende Entlastung von nicht vermeidbaren Baggerkreisläufen

#### Gezielte Sedimentzufuhr in den Bereich des Mündungstrichters

Das im Mündungstrichter anfallende sandige Unterhaltungsbaggergut wird derzeit bevorzugt im Bereich des Neuen Lüchtergrundes sowie im Bereich Medemgrund/Medemrinne verbracht. Das Entladen geschieht bislang ausschließlich durch Öffnen der im Schiffsboden eingelassenen Ventile (Klappen). Zusätzlich hierzu sollte die Nutzung des Rainbow-Verfahrens, die Einrichtung von Spülleitungen sowie die Baggerung von kurzen "Zufahrtswegen" geprüft werden. Ziel dieser alternativen Methoden wäre es, das sandige Baggergut weiter hinein in flachere Gewässerbereiche zu verbringen und so mittels gezielterer Sedimentzufuhr maßgeblich zu einer Drosselung bzw. Dämpfung der einschwingenden Tideenergie beizutragen.

Eine gezielte Sedimentzufuhr in den Bereich des Mündungstrichters ist auch aus dem inneren Ästuar (Feinmaterial mit Sandanteilen) und aus dem Bereich der Nordsee (Sand) möglich. Die Verbringung von Feinmaterial aus dem inneren Ästuar ist dabei aufgrund der vorhandenen Schadstoffbelastung nur in begrenzter Menge möglich und bedarf weiterer ökologischer Betrachtungen.

Größere Strombaumaßnahmen im Bereich der Elbmündung zur Drosselung der einschwingenden Tideenergie, die über die laufende Unterhaltung hinausgehen, sind im Strombau- und Sedimentmanagementkonzept Tideelbe (WSD Nord und HPA 2008) zwar benannt, werden in diesem jedoch nicht konkretisiert. Im mit Stakeholdern seitens HPA und WSV im Zeitraum von 2013 bis 2015 geführten Dialogforum Tideelbe (www.dialogforum-tideelbe.de) wurde die Konzeption von Strombaumaßnahmen im Mündungstrichter, u. a. im Hinblick auf naturschutzfachliche Unterhaltungsziele und die Genehmigungsfähigkeit sehr kritisch diskutiert.

Grundsätzlich muss zum Strombau im Mündungstrichter wohl festgehalten werden, dass entsprechende Planungen hier nur über Jahre bis Jahrzehnte konzipiert und umgesetzt werden können. Gerade deswegen ist es nötig, zum jetzigen Zeitpunkt weiter über Konzeptionen für den Mündungstrichter zu diskutieren. Dies auch vor dem Hintergrund, dass mittel- bis langfristig im Rahmen des Klimawandels zusätzliche Sedimentimporte aus der vorgelagerten Nordsee erforderlich werden dürften (vgl. u. a. "Strategie für das Wattenmeer 2100" des MELUR Schleswig-Holstein), um ein Mitwachsen der Watten beim zu erwartenden Meeresspiegelanstieg zu gewährleisten.

Für die Jahre 2006, 2010 und 2016 liegen hochaufgelöste digitale Geländemodelle (Bathymetrie und Topographie) der Tideelbe vor. Zur Datenaufnahme wurden dabei neben Peilungen umfangreiche Laserscanbefliegungen von Wattbereichen beauftragt. Die aus den Datenaufnahmen entwickelten digitalen Geländemodelle sind eine wichtige Grundlage für die Beobachtung morphologischer Veränderungen und die wasserbauliche Systemanalyse. Zur weiteren Beobachtung der Entwicklung im Mündungstrichter, der durch eine sehr intensive morphodynamische Aktivität geprägt ist, sind die Datenaufnahmen zwingend fortzuführen und wo räumlich notwendig, zeitlich zu verdichten. Auswertungen z. B. von Luftbildern in engerer zeitlicher Auflösung oder Nutzung von Satellitendaten zur Beobachtung von Rinnenverlagerungen und Veränderungen bei den Wasser-Land-Grenzen können die Datengrundlage ergänzen. Parallel dazu müssen bestehende Modellierungswerkzeuge bei der BAW so weiterentwickelt werden, dass mit Hilfe stets aktualisierter morphodynamischer Simulationen Auswirkungen von Veränderungen im Mündungstrichter erkannt und ggf. möglichst zeitnah begegnet werden kann. Dies ist mittels Strombaumaßnahmen sowie einer damit einhergehenden Anpassung des Sedimentmanagementkonzepts für den Mündungstrichter möglich.

# Erhalt von Dünen- und Riffelstrukturen sowie Vermeidung von Sandverlusten im inneren Ästuar

In den Fahrrinnenabschnitten stromauf des Osteriffs bis in den Hamburger Hafen hinein bewegen sich in der Fahrrinne mittelsandige Sedimente mit sehr viel geringeren residualen Transportraten als das vor allem in der Wassersäule bevorzugt stromauf transportierte Feinmaterial. Dabei tragen sandige Dünen- und Riffelstrukturen zu einer Energiedissipation und damit zu einer Verminderung der einschwingenden Tideenergie bei. Daher sind bei der Fahrrinnenunterhaltung im inneren Ästuar, wie aktuell bereits praktiziert, der Transport und die Verbringung von sandigem Baggergut auf weit stromab gelegenen Stellen oder sogar die Entnahme von Sedimenten zu vermeiden, indem zur Beseitigung lokaler sandiger Einzeluntiefen bevorzugt das Verfahren der Wasserinjektionsbaggerung eingesetzt wird. Alternativ ist eine Baggerung mit einem Hopperbagger und eine ortsnahe Verbringung der gebaggerten Sedimente vorzunehmen, wie dieses seit 2017 durch die Einrichtung und Nutzung von acht kleineren Verbringstellen zwischen Wedel und Brokdorf umgesetzt wird (vgl. BfG 2015).

Die Hamburg Port Authority hat u. a. im April 2016 sandiges Baggergut von der Verbringstelle Neßsand in die benachbarte Transportkörperstrecke Tinsdal-Blankenese eingebracht, um dem defizitären Sandhaushalt in diesen Fahrrinnenabschnitten der Unterelbe entgegenzuwirken. Umfassende Auswertungen (HPA 2016) zeigen, dass durch Baggerungen an der Verbringstelle Neßsand und die ortsnahe Verbringung des sandigen Baggerguts auf die gewählten Teilflächen in der Transportkörperstrecke Tinsdal-Blankenese keine relevanten Auswirkungen auf die Umwelt zu erwarten sind. Dies konnte auch durch das an die Verbringung von Baggergut anschließende Monitoring im Frühjahr 2016 nachgewiesen werden. Es wird daher empfohlen, auch zukünftig sandiges Baggergut von der Verbringstelle Neßsand in diese Transportkörperstrecke einzubringen und mit einem Monitoring zu überwachen.

#### Stabilisierung des Feinsedimenthaushaltes im inneren Ästuar

Im Rahmen des seitens HPA und WSV im Zeitraum von 2013 bis 2015 mit Stakeholdern geführten Dialogforums Tideelbe konnte als Konsens festgehalten werden, dass auch aus ökologischer Sicht eine Stabilisierung des Feinsedimenthaushaltes im inneren Ästuar erfolgen soll. Aus Sicht der Unterhaltenden ist hierfür eine weiträumige Verbringung stromab auf Stellen in ebbstromdominanten Abschnitten der Tideelbe erforderlich.

Um insbesondere in Phasen eines niedrigen Oberwasserzuflusses, wie in der aktuellen Niedrigwasserphase 2013f, flexibel reagieren zu können, ist anzustreben, hierfür bereits bestehende Handlungsoptionen zu erhalten sowie zusätzliche, bereits angedachte Handlungsoptionen zu nutzen (BfG 2014). Zur weiteren Absicherung der Wirkung der verschiedenen Optionen und Gesamtoptimierung des Feinsedimentmanagements sind verschiedene Unterhaltungsszenarien zu betrachten. Hierbei sind insbesondere die bestehenden Modellierungswerkzeuge der BAW zu nutzen und weiter zu entwickeln.

Aus ökologischer und naturschutzfachlicher Sicht ist vor allem der Schadstoffaspekt zu beachten und bildet daher einen Schwerpunkt bei allen bisher durch die BfG erstellten Auswirkungsprognosen für die Unterbringung von Baggergut. Grundsätzlich sollte die Sanierung von Schadstoffquellen im Elbeinzugsgebiet mit hoher Priorität verfolgt werden, da zukünftig jede Verbesserung der Sedimentqualität eine Erweiterung von Handlungsspielräumen beim Sedimentmanagement bedeutet.

#### Weitgehende Entlastung von nicht vermeidbaren Baggerkreisläufen

Eine zusätzliche Anreicherung des lokalen Schwebstoffhaushaltes, sowie eine damit verbundene zusätzlich verringerte Energiedissipation an der Gewässersohle wie auch ein stärkerer Anstieg der Baggermengen können zum einen vermieden werden, indem bei niedrigem Oberwasserzufluss Baggergut weiter stromab umgelagert wird und zum anderen, indem mit besseren Systemverständnis nicht vermeidbare Kreislaufbaggerungen optimiert durchgeführt werden.

Mit dem Datenmodell der HPA (Kapitel 4) konnte ein besseres Verständnis des Baggerkreislaufes zwischen Neßsand und dem Hamburger Hafen erreicht werden. Beispielsweise können jetzt fundierte Angaben über die durchschnittliche Dauer des Rücktransports für verschiedenen Abflussverhältnissen gemacht werden. So dauert es bei einem Abfluss von 400 m<sup>3</sup>/s etwa 7 Wochen bis nahezu das gesamte bei Neßsand umgelagerte Baggerguts wieder in den Hafen zurück transportiert wird. Das umgelagerte Baggergut fände damit innerhalb einer Umlagersaison vom 7. November bis 31. März nahezu 3-mal den Weg zurück in den Hafen und müsste also insgesamt 4-mal gebaggert werden. Wenngleich solche Verhältnisse über die gesamte Dauer der Umlagersaison bisher noch nicht vorgekommen sind, verdeutlicht das Beispiel doch die empfindliche Abhängigkeit der Unterhaltungsaufwendung im Hamburger Hafen vom Oberwasserzufluss. Aktuell werden bei der HPA mit dem Modell verschiedene Zufluss-Szenarien der vergangenen Winterhalbjahre mit dem für Ende Oktober hochgerechneten Baggerbedarf analysiert, um die Auswirkungen einer an die Abflussbedingungen orientierten Beaufschlagung der Umlagerstelle Neßsand auf die zu erwartenden Unterhaltungsdefizite in einzelnen Hafengebieten unter operativen sowie wirtschaftlichen und vertragsgestalterischen Gesichtspunkten zu bewerten.

Weiter ist aus Modellrechnungen der BAW bekannt, dass es einen Baggerkreislauf zwischen dem WSV-Verbringbereich St. Margarethen (zwischen Störbogen und Brunsbüttel gelegen) und Hamburg gibt. Bei St. Margarethen verbrachtes feinkörniges Baggergut wird bei niedrigen Oberwasserzuflüssen vorwiegend wieder Richtung stromauf transportiert. Es ist auch hier von einer Anreicherung des lokalen Schwebstoffgehaltes im inneren Ästuar auszugehen. Indizien, die diese Anreicherung bzw. einen verstärkten Stromauftransport in der Niedrigwasserphase 2013f belegen, sind die aus Abbildung 24 ersichtliche Zunahme oberflächennaher Schwebstoffgehalte im Bereich Elbe-km 681,4 bis 710,0 und die Veränderungen im südlichen Gewässerbereich zwischen St. Margarethen und Wischhafen (vgl. Kapitel 2.6.1 bzw. Abbildung 32). Mit dem Konzept des Sedimentfangs Wedel (vgl. BfG 2014) erfolgt bereits seit 2008 und mit Vorratsbaggerungen im Bereich Juelssand seit 2016 eine praktische Berücksichtigung der Oberwasserabhängigkeit und damit eine Optimierung. Das Wedeler/Juelssander Baggergut wird seitdem vorrangig im März/April eines Jahres und damit zu einer Zeit umgelagert, in der im langjährigen Mittel die höchsten Oberwasserzuflüsse auftreten. Gleichzeitig können so Baggerungen während der Laichzeit der Rote-Liste-Art Finte vermieden werden.

Eine vollständige Auflösung der beiden geschilderten Baggerkreisläufe wird aufgrund der zu berücksichtigenden Schadstoffaspekte nicht möglich sein. Bei langanhaltend niedrigen Oberwasserzuflüssen sollten die Baggerkreisläufe aber durch weiträumigere Verbringungen Richtung St. Margarethen (HPA-Baggergut) und Mündungstrichter (Wedeler/ Juelssander Baggergut, HPA-Baggergut) entlastet werden. Dabei kann als gesichert gelten, dass die Schadstoffbelastung des Baggergutes bei langanhaltend niedrigen Oberwasserzuflüssen deutlich geringer als zu Zeiten eines mittleren oder sogar hohen Oberwasserzuflusses ist. Ein niedriger Oberwasserzufluss bewirkt einen sich verstärkenden Stromauftransport und erhöht damit den Anteil mariner und nur gering belasteter Sedimente (BfG 2014).

Weitere Optimierungen für beide Baggerkreisläufe sowie Empfehlungen im Hinblick auf die Entlastung durch weiträumigere Verbringungen können zukünftig u. a. mit Hilfe der Berücksichtigung von Oberwasservorhersagen (aktuell in Erprobung) und mittel- bis langfristig mit Einführung operationeller Modelle erfolgen.

#### 8 Schlussbemerkung

Der inhaltliche Schwerpunkt dieses Artikels liegt in der Beschreibung und Erklärung der hydrologischen und morphologischen Entwicklung der Tideelbe – insbesondere für die Jahre von 2013 bis 2018 – sowie in der Formulierung der Handlungsempfehlungen, die sich nach Ansicht der Autoren daraus ergeben. Seit 2017 sinkt der Tidehub wieder. Eine abgesicherte Erklärung dieser Entwicklung kann derzeit nicht gegeben werden, da ein aktuelles digitales Geländemodell noch nicht vorliegt. Vermutlich sind auch hierfür morphologische Veränderungen im Mündungstrichter maßgeblich gewesen. Der Nachweis hierfür steht somit noch aus.

Zudem begannen im Februar 2019 die Baumaßnahmen für die Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe. Zunächst wurden die Randdämme der Unterwasserablagerungsflächen hergestellt, danach die Fahrrinne im WSV-Bereich zwischen Wedel und Glückstadt verbreitert und ab Oktober 2019 um durchschnittlich 1 m vertieft. Diese Baumaßnahmen beeinflussen die Tidedynamik und müssen bei zukünftigen Untersuchungen der hydrologischen und morphologischen Entwicklung der Tideelbe explizit berücksichtigt werden.

## 9 Literaturverzeichnis

BAW: Handlungsoptionen zur Optimierung der Unterhaltungsstrategie im Mündungstrichter der Tideelbe. BAW-Nr. A39550310069, 2013.

BAW: Kalibrierung von Trübungsmessungen für Aussagen zur Schwebstoffkonzentration in den Ästuaren Weser und Elbe. Internes FuE-Vorhaben BAW-Nr. B3955.02.04.70227-1, 2018.

BfG: Sedimentmanagement Tideelbe – Strategien und Potenziale – Systemstudie II. Ökologische Auswirkungen der Unterbringung von Feinmaterial. BfG-1763, Koblenz, 2014.

BfG: Auswirkungsprognose für die Unterbringung von sandigem Baggergut in der Unterelbe (Amtsbereich WSA Hamburg). BfG-1871, Koblenz, 2015.

BfG: Ermittlung der Gewässersohle in hydroakustisch schwer zu vermessenden Gebieten im Bereich der Tideelbe. Bearbeiter: Herr Dr. Weiß. BfG-1931, Koblenz, 2017a.

BfG: Auswirkungsprognose für die Unterbringung von Baggergut im Verbringstellenbereich VSB 730/740 in der Außenelbe, BfG-1922, Koblenz, 2017b.

Entelmann, I.; Röper, H.: Überlegungen für ein zukünftiges Sedimentmanagement Tideelbe. In: Hafentechnische Gesellschaft, HTG-Kongress 2014 (Tagungsband). S. 540–551. Berlin, Mai 2014.

Entelmann, I.; Strotmann, T.; Weilbeer, H.; Winterscheid, A.; Shaikh, S.; Vaessen, B.: Diskussionspapier zur Entwicklung der Unterhaltungssituation in der Tideelbe. Interner Bericht (WSV, HPA, BAW, BfG) der AG Sedimentmanagement mit Schwerpunkt morphologische Aspekte. 2018.

Fickert, M.; Strotmann, T.: Zur Entwicklung der Tideverhältnisse in der Elbe und dem Einfluss steigender Meeresspiegel auf die Tidedynamik in Ästuaren. In: Tagungsband HTG-Kongress 2009. 196–203, 2009.

Grothaus, V.: Analyse empirisch-statistischer Modelle zur Quantifizierung der Einflussgrößen auf die Tidedynamik im Elbeästuar. Masterarbeit, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2013.

Hillmann, S.: Variabilität der Trübungs- und Brackwasserzone der Weser und Elbe anhand von langjährigen Naturmessdaten. Masterthesis, RWTH Aachen, 2017.

HPA: "Hydromorphologische und ökologische Bewertung der Umlagerung von Sand in die Riffelstrecke der Unterelbe inkl. der Ergebnisse des Monitorings aus dem Frühjahr 2016. Interner Bericht. Bearbeiter: Ohle, N., Karrasch M., Gebert, J., Strotmann, T., 2016.

Jensen, J.; Mudersbach, CH.; Blasi, CH.: Hydrological changes in tidal estuaries due to natural and anthropogenic effects, Proceedings of the 6. International MEDCOAST 2003-Conference, Ravenna, Italy, 2003.

Loder, M.: Entwicklung der Trübungszone der Tideelbe von 2013 bis 2017. Masterarbeit, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2017.

Pettitt, A. N.: A non-parametric approach to the change-point problem. In: Journal of the Royal Statistical Society., Applied statistics, 28(2), 1979.

Reiß, M.: Analyse der Sedimentationsdynamik im Baggerabschnitt Osteriff an der Tideelbe. Masterarbeit, Technische Universität Darmstadt, Dezember 2015.

Strom- und Hafenbau Hamburg und WSA Hamburg: Zur Entwicklung des Tideniedrigwassers 1993/1994 in der Unterelbe. Studie Nr. 82 des Referats SB5 des Amtes Strom- und Hafenbau, zugleich Studie Nr. 4 des WSA Hamburg. 1996.

Strotmann, T.; Grothaus, V.: Assessment of Empirical Methods to Quantify the Influence of Outer Boundary Conditions on Tidal Characteristics in the Elbe Estuary. 7th Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering (CGJOINT), 2014.

Sturmflutarchiv: Universität Siegen www.bau.uni-siegen.de/fwu/wb/publikationen/sturmflutarchiv/

Winterscheid, A.; Reiß, M.; Shaikh, S.: About the Analysis of Sedimentation Dynamics in an Estuarine Waterway and its Implications on Sediment Management Concepts. doi:10.3850/38WC092019-0902. 38th IAHR World Congress, Panama City, 2019.

WSA Hamburg: Gewässerkundlicher Bericht "Morphologische Strukturen im Fahrrinnenbereich der Tideelbe. Ein Beitrag zum Reviersteckbrief Tideelbe. Az. 2-231.2 El/107; Bearbeiter: Entelmann, I.; Qrefa-Sander, M., 2013.

WSA Hamburg: Gewässerkundlicher Bericht "Morphologische Entwicklung im Fahrwasserbereich zwischen Elbe 638,9 bis 689,1 im Zeitraum 2008–2014. Az. 2-231.2 El/107; Bearbeiter: Entelmann, I.; Fabis, F.; Qrefa-Sander, M., 2016.

WSD Nord und HPA: Strombau- und Sedimentmanagementkonzept für die Tideelbe. 2008.

## Untersuchungen zur Entwicklung der Tidedynamik an der deutschen Nordseeküste (ALADYN)

Jürgen Jensen<sup>1</sup>, Andra Ebener<sup>2</sup>, Leon Jänicke<sup>1</sup>, Arne Arns<sup>2</sup>, Krischan Hubert<sup>3</sup>, Andreas Wurpts<sup>3</sup>, Cordula Berkenbrink<sup>3</sup>, Ralf Weisse<sup>4</sup>, Xing Yi<sup>4</sup> und Elke Meyer<sup>4</sup>

- <sup>1</sup> Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnenund Küstenwasserbau, juergen.jensen@uni-siegen.de
- <sup>2</sup> Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnenund Küstenwasserbau
- <sup>3</sup>Nds. Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
- <sup>4</sup> Helmholtz-Zentrum Geesthacht

## Zusammenfassung

Die deutsche Nordseeküste ist ein stark tidebeeinflusstes und komplexes Küstengewässer, das vielen natürlichen und anthropogenen Einwirkungen unterliegt. Diese Einwirkungen spiegeln sich in der Ausprägung der Gezeiten wider, die i. d. R. aus Pegelaufzeichnungen abgeleitet werden können. Das Verbundprojekt ALADYN ("Analyse der beobachteten Tidedynamik in der Nordsee", Förderkennzeichen: 03F0756 A-C) liefert einen Beitrag zur Erklärung der Änderungen und zeitlichen Variationen der Tidewasserstände und des Tidehubs seit Mitte des 20. Jahrhunderts. Untersucht wurden dazu mögliche groß- und kleinräumige Einflussfaktoren, die die Entwicklungen der Tidedynamik in der Deutschen Bucht beeinflusst haben. Zu den untersuchten großräumigen Einflussfaktoren zählen u. a. großräumige Veränderungen der Tidedynamik im Nordostatlantik, der Anstieg des mittleren Meeresspiegels, langfristige Schwankungen oder Veränderungen in der großräumigen atmosphärischen Zirkulation, überregionale morphologische Änderungen entlang der Küsten und der Einfluss größerer historischer Baumaßnahmen. Berücksichtigt wurden aber auch kleinräumige Einflüsse und lokale Maßnahmen im Bereich einzelner Pegel, wie z. B. größere Baumaßnahmen und die daraus resultierenden morphologischen Veränderungen im Küstenvorfeld. Um die beteiligten Prozesse zu identifizieren, wurde eine Abschätzung des Einflusses von lokalen Baumaßnahmen im Rahmen des Teilprojekts ALADYN-A durch das Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen durchgeführt. Entwickelt wurde ein Ansatz zur Separierung großräumiger Entwicklungen von lokalen Effekten in langjährigen Beobachtungsdaten der Tidewasserstände und des Tidehubs. Mithilfe von Detailuntersuchungen der lokalen Effekte konnten Auswirkungen einzelner Baumaßnahmen beschrieben werden. Darüber hinaus wurden im Teilprojekt ALADYN-B die durchgeführten statistischen Analysen durch numerische Modelluntersuchungen zum Einfluss großräumiger Effekte auf die Tidedynamik am Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) ergänzt. Zusätzlich untersuchte die Forschungsstelle Küste im Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) im Teilprojekt ALADYN-C Wechselwirkungen zwischen regionalen morphologischen Veränderungen in den Ästuaren und der Tidedynamik im angrenzenden Küstenvorfeld. Anhand der Gegenüberstellung verschiedener morphologischer Zustände konnte aufgezeigt werden, wie weit und wie stark die großräumige Tidedynamik durch regionale Veränderungen beeinflusst werden kann.

### Schlagwörter

Tidedynamik, Deutsche Bucht, Nordsee, Ästuare, Gezeiten, Tidenhub, Tideregime, Tidewasserstände, Zeitreihenanalyse, lokale Effekte, Modellierung, Bathymetrie, Baumaßnahmen, Bruchpunktanalyse, Hauptkomponentenanalyse, Morphologie, Scheitelwasserstände, Meeresspiegelanstieg

## Summary

The German North Sea coast is a tidal and complex coastal water, which is subject to numerous natural and anthropogenic influences. These influences are reflected in the tidal characteristics, which can usually be derived from tide gauge records. The collaborative project ALADYN ("Analysis of observed tidal dynamics in the North Sea", grant no. 03F0756 A-C) contributes to the explanation of changes and temporal variations of tidal water levels and tidal range since the middle of the 20th century. Possible large- and small-scale factors that have affected the development of tidal dynamics in the German Bight were investigated. Among the large-scale factors investigated are large-scale changes in tidal dynamics in the Northeast Atlantic, the rise of mean sea level, long-term fluctuations or changes in large-scale atmospheric circulation, large-scale morphological changes along the coasts and the influence of historical construction measures. However, small-scale influences and local measures in the area of individual gauges, such as larger construction measures and the resulting morphological changes in the coastal foreland, were also taken into account. In order to identify the processes involved, an estimation of the influence of local construction measures was carried out by the Research Institute for Water and Environment (fuu) of the University of Siegen within the subprojet ALADYN-A. An approach was developed to separate large-scale developments from local effects in long-term observation data of tidal water levels and tidal range. With the help of detailed investigations of the local effects, the impact of individual construction measures could be described. Furthermore, in the subproject ALADYN-B the statistical analyses carried out were supplemented by numerical model investigations on the influence of large-scale effects on tidal dynamics at the Helmholtz Centre Geesthacht (HZG). In addition, the coastal research center of the Lower Saxony Water Management, Coastal Defence and Nature Conservation Agency (NLWKN) investigated interactions between morphological changes in the estuaries and tidal dynamics in the adjacent coastal foreland in the subproject ALADYN-C. By comparing different morphological conditions it could be shown how far and to what extent the large-scale tidal dynamics can be influenced by locally limited changes.

## Keywords

tidal dynamics, German Bight, North Sea, estuaries, tides, tidal range, tidal regime, tidal water levels, time series analysis, local effects, modeling, bathymetry, construction measures, change point alanysis, moropholgy, peak water levels, sea level rise

## 1 Einleitung

Bei der Nordsee und insbesondere der Deutschen Bucht handelt es sich um ein stark tidebeeinflusstes und ebenso komplexes wie sensitives System, das fortwährenden, natürlichen und anthropogenen Veränderungen unterworfen ist. Entlang der gesamten deutschen Nordseeküste wurden ab Mitte der 1950er Jahre starke Veränderungen der Tidewasserstände und des Tidehubs beobachtet. Dabei variieren die Entwicklungen auf lokaler Ebene deutlich. Jensen (1984), sowie Führböter und Jensen (1985) konnten eine deutliche Zunahme des mittleren Tidehubs (MThb) entlang der deutschen Nordseeküste aufgrund von ansteigenden mittleren Hochwasserständen (MThw) feststellen, während die Niedrigwasserstände (MTnw) nahezu unverändert blieben. Während über den Zeitraum von 1884 bis 1983 die MThw im Mittel um  $0.25 \pm 0.04$  m pro 100 Jahre angestiegen sind, hat sich dieser Anstieg deutlich beschleunigt und die MThw haben sich zwischen 1959 und 1983 bereits um 0,64 ± 0,15 m pro 100 Jahre erhöht (Führböter und Jensen 1985). Weitere Untersuchungen beschrieben die Veränderung der MTnw ab den 1950er Jahren als zunächst leicht sinkend, woraufhin in den 1980er Jahren ein stationäres Verhalten bzw. ein leicht positiver Trend folgt. Die konträre Entwicklung der Scheitelwasserstände hatte somit nach 1950 eine Zunahme des MThb zur Folge (Jensen et al. 1992). Sowohl großräumige Entwicklungen (z. B. Klimaänderungen und Meeresspiegelanstieg) als auch kleinräumige Effekte (z. B. natürliche morphologische Prozesse und anthropogene Einflüsse) haben zu diesen Veränderungen beigetragen (Haigh et al. 2020). Die Abschätzung der Größenordnung der Beiträge der beteiligten Prozesse ist jedoch noch immer eine große Herausforderung, und eine umfassende Antwort auf die Frage, inwieweit die baulichen Veränderungen (Vor- und Eindeichungen, Sturmflutsperrwerke usw.) an der Küste zu einer Veränderung der Tidedynamik beigetragen haben, steht noch aus.

Um diese ungewöhnlichen Veränderungen zu erklären, wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Untersuchungen zur Interaktion zwischen veränderten Randbedingungen (z. B. mittlerer Meeresspiegel, Astronomie, Meteorologie) und der Reaktion des Tidehubs durchgeführt. Die beobachteten Veränderungen in der Ausprägung der Gezeiten konnten bislang nicht vollständig erklärt werden; infolgedessen wurde im Rahmen dieser Bearbeitung der Einfluss verschiedener möglicher groß- und kleinräumiger Faktoren detailliert untersucht.

Natürliche und anthropogene Einwirkungen auf die Tidedynamik in der Deutschen Bucht sind in einer schematischen Übersicht der Abbildung 1 zu entnehmen. Aufgeführt sind hier die Einwirkungen, auf denen der Fokus in den drei Teilprojekten lag. So zählen zu den großräumigen Einflüssen u. a. die Veränderung der Tidedynamik im Nordostatlantik, der Anstieg des mittleren Meeresspiegels sowie Schwankungen und Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation, die im Teilprojekt ALADYN-B untersucht wurden. Im Teilprojekt ALADYN-C wurden die regionalen und überregionalen Einflussfaktoren wie die natürlichen morphodynamischen Prozesse entlang der Küste sowie Bodensenkungen, z. B. infolge von Gasentnahmen, detailliert betrachtet. Die lokalen und kleinräumigen Faktoren wurden wiederum im Teilprojekt ALADYN-A adressiert. Zu den hier untersuchten Einflüssen zählen u. a. Ausbaumaßnahmen in den Ästuren und Tideflüssen (z. B. Fahrrinnenvertiefungen), Deichbaumaßnahmen wie die Eindeichung der Meldorfer Bucht und weitere lokale Baumaßnahmen (z. B. Hafenumgestaltung und der Bau von Sperrwerken).



Abbildung 1: Übersicht der Einflussfaktoren auf die Tidedynamik in der Deutschen Bucht, differenziert nach großräumigen (Untersuchungsschwerpunkt ALADYN-B), regionalen/überregionalen (Untersuchungsschwerpunkt ALADYN-C) und lokalen/kleinräumigen (Untersuchungsschwerpunkt ALADYN-A) Einflussfaktoren.

## 2 Forschungsfragen und Vorgehen

Durch das Forschungsvorhaben ALADYN sollten Zusammenhänge zwischen den beobachteten Änderungen in den Tidehubzeitreihen und möglichen externen natürlichen und anthropogenen Einflussfaktoren untersucht werden. Die übergeordneten Ziele des Projekts waren folglich detaillierte Analysen der Tidedynamik in der Deutschen Bucht, wobei sowohl Pegelstandsaufzeichnungen der gesamten Nordsee als auch szenariobasierte numerische Modelldaten betrachtet wurden. Das Projekt gliedert sich wie folgt in die drei Teilprojekte bzw. die darin adressierten Fragestellungen:

- i. Wie hat sich die beobachtete Tidedynamik verändert und welche Auswirkung haben anthropogene Einflüsse? (ALADYN-A)
- ii. Welche großräumigen Auswirkungen auf die Tidedynamik lassen sich im Bereich der Deutschen Bucht feststellen? (ALADYN-B)
- iii. Welche Wechselwirkungen bezüglich der Tidedynamik zwischen den Ästuaren und der angrenzenden offenen See lassen sich feststellen?? (ALADYN-C)

In diesen drei Teilprojekten werden mithilfe verschiedener Ansätze die möglichen antreibenden Einwirkungen für Veränderungen der Tidedynamik an der deutschen Nordseeküste umfassend untersucht (vgl. Abbildung 1). Am Verbundprojekt beteiligt waren insgesamt drei Forschungsinstitutionen: das Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen (Koordinator), das Zentrum für Material- und Küstenforschung, Institut für Küstenforschung am Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) und die Forschungsstelle Küste des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN). Die Vernetzung der beteiligten Teilprojekte ist in Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 2: Vernetzung der Teilprojekte und Bausteine des Verbundprojekts ALADYN.

Im Teilprojekt ALADYN-A wurden am fwu die beobachteten Veränderungen der Tideparameter Mittlere Tidewasserstände (MTnw und MThw) und Mittlerer Tidehub (MThb) in der Deutschen Bucht untersucht. Das Ziel war, Erklärungen für die Veränderungen in den MThb-Zeitreihen an den einzelnen Pegelstandorten abzuleiten und Gemeinsamkeiten in der Entwicklung herauszuarbeiten. Anschließend wurden die lokalen Effekte in der Nordsee untersucht. Dazu wurden relevante Baumaßnahmen ab etwa den 1950er Jahren zusammengestellt (Lehmann 2018) und Ursache-Wirkungs-Beziehungen aufgestellt sowie deren Einfluss auf die Tideparameter quantifiziert.

Das Teilprojekt ALADYN-B, bearbeitet vom HZG, ergänzte die Untersuchungen durch entsprechende numerische Modellstudien. Untersucht wurde dabei, inwieweit mögliche Veränderungen großräumiger Prozesse zu den in der Deutschen Bucht beobachteten Veränderungen der Tidedynamik beigetragen haben. Anhand einer Reihe von Hindcastund Sensitivitätsexperimenten wurden damit unter anderem mögliche Beiträge von großräumigen Veränderungen der Gezeitendynamik am Rande der Nordsee, mögliche Einflüsse des Meeresspiegelanstiegs und der Variabilität des Windklimas sowie Einflüsse großräumiger Veränderungen der Bathymetrie in der Deutschen Bucht und die direkten Auswirkungen größerer Baumaßnahmen entlang der schleswig-holsteinischen Küste untersucht.

Im Teilprojekt ALADYN-C untersuchte der NLWKN auf Basis numerischer Modellrechnungen MThb-Veränderungen in der Nordsee, die durch anthropogene Eingriffe in den Ästuaren (am Beispiel von Ems und Weser) hervorgerufen wurden. Auf der Grundlage von Rekonstruktionen historischer morphologischer Zustände (u. a. Homeier et al. 2010) wurde qualitativ und quantitativ abgeschätzt, inwieweit regionale Veränderungen innerhalb der Ästuare die überregionale Tidedynamik im angrenzenden Küstenvorfeld beeinflussen. Zudem wurde auch der Einfluss von Landsenkungen infolge von Gasförderung einbezogen. Das Modell des Teilprojektes ALADYN-C wurde mit dem Modell des Teilprojektes ALADYN-B durch den Austausch von Randwerten verknüpft.

Für die Untersuchungen der Veränderung der Tidedynamik in der Deutschen Bucht stehen Zeitreihen der Tidewasserstände sowie des Tidehubs von verschiedenen Pegelstandorten zur Verfügung. In Abbildung 3 ist die räumliche Verteilung der verwendeten Pegelzeitreihen dargestellt. Insgesamt wurden Wasserstandsaufzeichnungen von 21 Tidepegeln verwendet, von denen 18 Pegel in der Deutschen Bucht, zwei an der niederländischen Küste im Bereich der Emsmündung und ein weiterer Pegel an der Küste Dänemarks liegen.



Abbildung 3: Verwendete Pegelstandorte innerhalb des Untersuchungsgebietes.

Die für die jeweiligen Pegelstandorte verfügbaren Datensätze wurden von der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) sowie über die Portale des zugehörigen Zentralen Datenmanagements (ZDM, https://www.portalnsk.de/) für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Die Pegeldaten wurden als Teil dieses Forschungsvorhabens für alle weiteren Analysen plausibilisiert und bereinigt.

#### 3 Ergebnisse und Ausblick

#### 3.1 ALADYN-A – Ein Ansatz zur Identifizierung und Quantifizierung von Tideveränderungen durch lokale Systemänderungen (fwu)

Entlang der deutschen Nordseeküste ist es seit der Mitte des 20. Jahrhunderts zu beträchtlichen Veränderungen der Tidedynamik gekommen. Die Entwicklungen spiegeln sich insbesondere in einem Anstieg des MThb wieder, wobei an der Küste Schleswig-Holsteins die größeren Veränderungen im Vergleich zur Nordseeküste Niedersachsens stattgefunden haben. Die Trends des MTnw hingegen variieren sowohl in ihrer Ausprägung als auch zwischen positiven und negativen Werten über das gesamte Untersuchungsgebiet. Diese inhomogene Entwicklung des MTnw in der Deutschen Bucht liefert ein erstes Indiz für die Beeinflussung des Tidegeschehens an unterschiedlichen Küstenabschnitten durch lokale Effekte. Demnach scheinen die abgeleiteten Veränderungen der Tidewasserstände im Untersuchungsgebiet sowohl eine gemeinsame Entwicklung durch großräumige Einwirkungen als auch kleinräumige Effekte zu enthalten. Diese kleinräumigen Effekte können z. B. durch lokale bauliche Maßnahmen und morphologische Entwicklungen verursacht werden. Die vorgestellte Methodik der Kombination verschiedener statistischer Verfahren ermöglicht es, diese beiden genannten Komponenten an jedem beliebigen Pegelstandort im Untersuchungsgebiet zu trennen. Die zugrunde liegende Annahme der Methodik ist, dass die ähnlichen Trends insbesondere der MThw- und MThb-Zeitreihen einer gemeinsamen und großräumigen Beeinflussung unterliegen und sich dies in einem gemeinsamen Signal äußert. Durch die starke Variation der Trends der MTnw wird deutlich, dass die Pegel unter dem starken Einfluss lokaler Effekte stehen.

Als Methodik zur Separierung der klein- und großräumigen Signale in den Zeitreihen der Tideparameter wurde die sog. Hauptkomponentenanalyse (*engl. Principal Component Analysis, PCA*) herangezogen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die erste Hauptkomponente (*engl. Principical Component, PC*), die den Großteil der Varianz im Untersuchungsgebiet beschreibt, auch das jeweils in den betrachteten Zeitreihen enthaltene gemeinsame Signal abbildet (vgl. Jänicke et al. 2020). Demzufolge bilden alle weiteren, in den höheren Hauptkomponenten enthaltenen Veränderungen die lokalen Effekte ab. Rund 90 % der Varianz wird im Untersuchungsgebiet im Fall der MThw- und MThb-Zeitreihen durch die erste PC (PC1) abgebildet, wohingegen das MTnw nur zu 70 % durch PC1 repräsentiert wird. Dies bedeutet, dass MThw und MThb signifikant stärker von großräumigen Einwirkungen beeinflusst werden. Zudem weisen die Zeitreihen des MTnw räumlich variierende Varianzen der niedrigeren PC auf und nur rund 70 % lassen sich über das gemeinsame Signal beschreiben. Für jeden Pegelstandort lässt sich also zusätzlich zu den Beobachtungszeitreihen über eine Rekonstruktion mit der ersten Hauptkomponente sowohl das gemeinsame Signal ermitteln als auch über Differenzenbildung ein lokales Signal generieren.

Mithilfe einer Bruchpunktanalyse lassen sich unstetige Veränderungen in den Tidekennwerten detektieren. Angewendet wurde die Bruchpunktanalyse auf die jeweils ermittelten Differenzenzeitreihen zwischen Beobachtungszeitreihen und dem gemeinsamen Signal an den einzelnen Pegelstandorten. Im Weiteren können die linearen Trends der Teilzeitreihen untersucht werden, die durch die detektierten Bruchpunkte begrenzt werden. Dadurch lässt sich wiederum die Entwicklung vor und nach einem Bruchpunkt vergleichen. Durch die zeitliche und räumliche Zuordnung der identifizierten Bruchpunkte können für diese potentielle Ursachen gefunden werden. Aufgrund der resultierenden Änderungen nach einem Bruchpunkt lassen sich die zugeordneten Ursachen plausibilisieren und ggf. physikalisch erklären. Zusätzlich dazu können die Bruchpunkte der lokalen Signale in einer gemeinsamen Betrachtung Aufschluss über räumliche Muster geben. So lässt sich der Wirkungsradius einzelner plausibilisierter Ursachen wie bspw. größerer Baumaßnahmen beschreiben. Im untersuchten Gebiet jedoch konnten durch eine solche Betrachtung für keinen der drei Tideparameter ein räumliches Muster oder zusammenhängende Bruchpunkte eindeutig identifiziert werden. Demzufolge scheint die Wirkung von Baumaßnahmen lokal begrenzt zu sein oder aber die abgeleitete Methodik stößt hier an ihre Grenzen. Anhand der verwendeten Pegelstandorte konnte jedoch gezeigt werden, dass sich durch die Methodik Auswirkungen von Baumaßnahmen in den Zeitreihen feststellen lassen, die zudem physikalisch plausibel erscheinen. Die Methodik wird daher als geeignet erachtet, großräumige bzw. gemeinsame Signale in Wasserstandsaufzeichnungen zu separieren und einzelne lokale Effekte zu untersuchen.

Mit dem vorgestellten Verfahren konnten verschiedene Baumaßnahmen bzw. deren Auswirkungen in den Beobachtungszeitreihen detektiert werden. Ausbaumaßnahmen und Vertiefungen von Gewässerabschnitten der drei großen Tideästuare wurden als unstetige Veränderungen vorwiegend, aber nicht ausschließlich, im MTnw erkennbar. So führte die Vertiefung des Emder Fahrwassers zwischen 1952 und 1972 vermutlich zu Bruchpunkten an den Pegeln Borkum Südstrand und Emden, der Ausbau der Außenweser in den Jahren 1998/99 zu Bruchpunkten an den Pegeln Mellumplate und Bremerhaven und die Elbvertiefung im Zeitraum von 1974 bis 1978 scheint für unstetige Veränderungen von MTnw und MThb am Pegel Cuxhaven Steubenhöft verantwortlich zu sein. Auch die Eindeichungsmaßnahmen der Meldorfer Bucht zwischen 1969 und 1978 lassen sich sehr deutlich im MThb des Pegels Büsum erkennen und durch ansteigendes MTnw und stagnierendes MThw beschreiben. Zudem konnten Hafenbaumaßnahmen wie am Pegel Delfzijl, erkennbar durch einen Bruchpunkt gegen Ende der 1970er, in den Aufzeichnungen detektiert werden. Außerdem scheint die Methode geeignet zu sein, Änderungen am Pegelstandort (z. B. Lage, Bezugsniveau) in den Zeitreihen der Tidekennwerte zu identifizieren. So lässt sich vermutlich die Umstellung des Pegels Norderney Hafen auf Norderney Riffgat in den 1960er Jahren feststellen, und am Pegel Esbjerg Havn lässt sich eine plötzliche Erhöhung von MTnw und MThw um einige Zentimeter auf eine örtliche Versetzung des Pegels zurückführen. An einigen Pegeln wie bspw. Helgoland Binnenhafen und Dagebüll wurden ebenfalls ein bzw. zwei Bruchpunkte detektiert, die jedoch keiner Baumaßnahme bzw. keinem lokalen Effekt zugeordnet werden konnten. Dies muss jedoch nicht zwingend auf ein ungeeignetes Verfahren hinweisen, vielmehr kann eine mangelhafte Informationsgrundlage zu durchgeführten historischen Baumaßnahmen es erschweren, allen kleinräumigen Änderungen Ursachen zuzuordnen. Auch andere Ursachen, wie kleinräumige und nicht als Bruchpunkte detektierbare Änderungen, die im Rahmen dieser Untersuchung nicht adressiert wurden, sind nicht auszuschließen. Dazu können bspw. auch morphologische Prozesse und Entwicklungen gehören, deren Kipppunkt (noch) nicht erreicht ist. Insbesondere in solch einem komplexen System wie dem der Nordsee und insbesondere deren Küstengewässern kann nicht davon ausgegangen werden, dass vielfältige Änderungen von großund kleinräumigen Randbedingungen auch kontinuierliche Systemreaktionen verursachen. Wie auch bei der Methodik der Kipppunkte im Klimasystem (vgl. u. a. Lenton et al. 2008) sind die Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung nicht immer offensichtlich und unterliegen zahlreichen nichtlinearen Wechselwirkungen.
### 3.2 ALADYN-B – Modellgestützte Untersuchungen zur großräumigen Tidedynamik (HZG)

Mithilfe numerischer hydrodynamischer Modellierung und statistischer Auswertung wurden verschiedene großräumige Faktoren untersucht, die zu den beobachteten Veränderungen der Tidedynamik in der Deutschen Bucht beigetragen haben könnten. Dazu wurde das im 2D-Modus genutzte Modell TRIM-NP (Tidal Residual Intertidal Mudflat - Nested and Parallized) (Kapitza und Eppel 1990; Pätsch et al. 2017) in einer genesteten Version verwendet. Dabei werden immer kleinere Modellgebiete mit höherer Auflösung von Randwerten größerer Gebiete mit geringerer Auflösung angetrieben. Das größte verwendete Modellgebiet umfasste dabei die Nordsee und angrenzende Teile des Nordostatlantiks mit einer Auflösung von 12,8 km x 12,8 km. In dieses Gebiet wurden weitere kleinere Gebiete mit verschiedenen Gitterweiten von 6,4 km, 3,2 km und 1,6 km sowie von 800 m und 400 m genestet. Dabei wird die südliche Nordsee durch das 1,6-km-Gitter abgedeckt, wohingegen die Modellgebiete mit 800 m und 400 m Gitterweite im Wesentlichen die Deutsche Bucht und die deutschen Küstengebiete umfassen. Die verwendeten Gitter stellen einen Kompromiss dar, um zum einen großräumige Prozesse über längere Zeiträume, zum anderen aber auch Einflüsse überregionaler Faktoren zu berücksichtigen. Der Einfluss lokaler kleinräumiger Faktoren konnte und sollte mit diesem Setup nicht abgebildet werden.

Mit diesem Setup wurden mögliche Beiträge einer Reihe großräumiger Faktoren zu den beobachteten Veränderungen der Tidedynamik in der Deutschen Bucht untersucht. Dazu zählten großräumige Veränderungen der Tidedynamik im Nordostatlantik sowie der in der Vergangenheit beobachtete Anstieg des mittleren Meeresspiegels, langfristige Schwankungen oder Veränderungen in der großräumigen atmosphärischen Zirkulation, großräumige morphologische Änderungen entlang der Küsten und der direkte Einfluss größerer historischer Baumaßnahmen, von denen ein räumlich größerer Beitrag ausgegangen sein könnte.

Um die großräumigen Veränderungen in der Tidedynamik vom Einfluss lokaler Effekte zu trennen, wurde zunächst für die jährlichen Tideparameter (MThb, MThw, MTnw) an 15 Pegeln entlang der deutschen Küste für den Zeitraum 1958-2014 eine Zerlegung mittels empirischer Orthogonalfunktionen (EOFs) durchgeführt. Es zeigte sich, dass die erste EOF des MThw durch kohärente großräumige inter-annuale Schwankungen sowie einen kohärenten, an allen Pegeln zu beobachtenden großräumigen Anstieg von etwa 3,7 mm/Jahr im Untersuchungszeitraum charakterisiert war. Mit dieser EOF lassen sich bereits 96 % der beobachteten Variabilität im MThw beschreiben, so dass davon auszugehen ist, dass die beobachteten Veränderungen im Wesentlichen großräumig sind. Für das MTnw liegt die erklärte Varianz der ersten EOF mit 79 % niedriger. Auch hier lassen sich kohärente Schwankungen, allerdings kein statistisch signifikanter gemeinsamer Trend über den Untersuchungszeitraum feststellen. Dies legt nahe, dass die beobachteten Veränderungen an den 15 Pegeln durch eine Kombination großräumiger Veränderungen im MThw und eher kleinräumiger oder lokaler Veränderungen im MTnw erklärt werden könnten.

In einem nächsten Schritt wurden dann mögliche Beiträge großräumiger Prozesse untersucht. Auch wenn davon ausgegangen werden kann, dass sich die Tidedynamik im Nordatlantik selbst innerhalb geologischer Zeiträume nur langsam ändern wird, wurde dieser Faktor in Betracht gezogen, da Schelfmeere, die sich nahe der Resonanz befinden, möglicherweise sensitiv bereits auf kleine Änderungen reagieren können. Dazu wurde zunächst untersucht, ob – und wenn ja, welche – Veränderungen der Tidedynamik am Rande der Nordsee beobachtet werden konnten und daran anschließend, inwiefern mögliche resonante Verstärkungen innerhalb der Nordsee wahrscheinlich sind. Die Analyse von Pegeldaten aus Aberdeen und Newlyn am nördlichen bzw. südlichen Rand der Nordsee zeigte, dass sich an beiden Pegeln in den vergangenen etwa 80 Jahren der mittlere Tidehub abgesehen von deutlichen nodalen Schwankungen nicht signifikant geändert hat. Sensitivitätsexperimente mit dem beschriebenen hydrodynamischen Modell ergaben des Weiteren, dass am Rande der Nordsee vorgegebene Änderungen im Tidehub im Inneren des Modellgebiets gedämpft wurden, so dass mögliche Beiträge von Veränderungen in der großräumigen Tidedynamik außerhalb der Nordsee vermutlich keinen wesentlichen Beitrag zu den beobachteten Veränderungen in der Deutschen Bucht geliefert haben.

Die möglichen Beiträge von beobachtetem Meeresspiegelanstieg und von Veränderungen in der großräumigen atmosphärischen Zirkulation zu den Änderungen in der Tidedynamik wurden sowohl mit Modellexperimenten und Hindcasts als auch mit statistischen Analysen untersucht. Hierbei ergab sich, dass statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen dem beobachteten Meeresspiegelanstieg und dem MThw sowie dem MTnw existieren. Es konnte jedoch keine signifikante Korrelation zwischen den beobachteten Veränderungen im mittleren Tidehub und dem beobachteten Meeresspiegelanstieg gefunden werden. Die jährlichen großräumigen Schwankungen im MThw und MTnw hängen stark mit der jährlichen Variabilität der großräumigen atmosphärischen Zirkulation zusammen, wobei letztere jeweils etwa 72 % der beobachteten Variabilität im MThw und MTnw erklären kann. Dagegen tragen langfristige Veränderungen im Windklima vermutlich nur in sehr geringem Maß zu langfristigen Veränderungen der Tideparameter bei. So beträgt beispielsweise der anhand der modellierten Daten abgeschätzte Trend im MThw lediglich knapp 13 % des beobachteten Wertes.

In einem letzten Schritt wurden mögliche Beiträge größerer Baumaßnahmen (z. B. infolge von Deichbaumaßnahmen) und morphologischer Veränderungen untersucht. Auch hier wurden lediglich mögliche großräumige Effekte untersucht. Analog zum obigen Vorgehen wurden die Veränderungen in einer Kombination aus Modellexperimenten und statistischen Analysen untersucht. Sowohl in der statistischen Modellbildung als auch in den numerischen Experimenten zeigte sich, dass die beobachteten großräumigen morphologischen Veränderungen in der Lage sind, einen Großteil der beobachteten Veränderungen im MThb zu erklären. Allerdings standen großräumige Bathymetriedaten erst ab 1996 zur Verfügung, so dass kein umfassender Rückschluss auf frühere Veränderungen möglich ist.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse von ALADYN-B, dass das Zusammenspiel mehrerer großräumiger Faktoren zumindest deutliche Beiträge zu den beobachteten Veränderungen und Schwankungen in den Tideparametern in der Deutschen Bucht geliefert haben könnten. Insbesondere können jährliche und dekadische Schwankungen in der großräumigen atmosphärischen Zirkulation einen wesentlichen Teil der beobachteten jährlichen und dekadischen Variabilität der mittleren Hochwasser erklären. Beobachtete langfristige Veränderungen können Beiträge durch den gestiegenen mittleren Meeresspiegel sowie durch morphologische Änderungen und Veränderungen von Küstenlinien durch Baumaßnahmen enthalten. Hierbei scheint der Anstieg des mittleren Meeresspiegels in der Vergangenheit eher mit gleichläufigen Anstiegen im MThw und MTnw verbunden gewesen zu sein. Großräumige morphologische Veränderungen und Veränderungen der Küstenlinien scheinen dagegen in der Lage zu sein, den Tidehub wesentlich zu beeinflussen.

# 3.3 ALADYN-C – Wechselwirkungen zwischen Ästuar und Küstenvorfeld (NLWKN)

Basierend auf numerischen Modellanalysen wurde der Einfluss von Ausbaumaßnahmen innerhalb der Ästuare Ems und Weser auf das jeweils benachbarte Küstenvorfeld untersucht. Zu diesem Zweck wurde ein skalenübergreifendes, unstrukturiertes Berechnungsgitter aufgebaut und mit dem semi-impliziten hydronumerischen Finite-Elemente-Modellsystem SCHISM (Zhang et al. 2016) betrieben. Das Modell erstreckt sich in dem gewählten Setup über die gesamte Nordsee bis in Teile des Nordostatlantiks. Hintergrund dieser großräumigen Betrachtung der zunächst regionalen Veränderungen ist einerseits dessen a priori unbekannter Einflussbereich, andererseits die Bestrebung, Randbedingungen für den Antrieb des Modells möglichst fern vom Untersuchungsgebiet sowie unter Verzicht von übergeordneten Modellkaskaden zu erzeugen. Der letztgenannte Punkt minimiert das Risiko von Randeinflüssen auf die Modellergebnisse und ermöglicht eine physikalisch konsistente Ausbreitung der Tidedynamik im gesamten Modellgebiet ohne Informationsverlust an andernfalls unverzichtbaren Übergabepunkten.

In den durchgeführten Untersuchungen wurde die Hydrodynamik verschiedener morphologischer Ausbauzustände mittels numerischer Modellierung auf Grundlage aktueller sowie rekonstruierter Topographien nachgebildet und die daraus resultierenden Unterschiede bestimmter Tidekennwerte in der Fläche ausgewertet. Dies ermöglichte sowohl die quantitative Erfassung der Differenzen als auch die räumliche Ausbreitung von Änderungen des Tideregimes bei Betrachtung einzelner, von anderen Einflussfaktoren isolierter Eingriffe bzw. anderweitiger morphologischer Veränderungen.

Für die Erstellung der Modelltopographie konnte einerseits auf bereits vorhandene Rekonstruktionen historischer Ausbauzustände zurückgegriffen werden (Elsebach et al. 2007, Herrling und Niemeyer 2007), andererseits wurden weitere Rekonstruktionen durch umfangreiche manuelle Digitalisierung angefertigt.

Darüber hinaus wurde mit derselben Methodik der Einfluss auf die Tidedy-namik der Außenems untersucht, der sich durch Bodensenkungen infolge von Gasent-nahme im benachbarten Groninger Erdgasfeld ergibt.

Die Ergebnisse zeigen, dass regionale Veränderungen der Bathymetrie das Tidegeschehen auch fernab des Ausgangsgebietes beeinflussen können, insbesondere leewärts der Propagationsrichtung der Tidewelle. Die Ergebnisse liefern eine Einschätzung über den Beitrag der vergangenen umfangreichen Flussbaumaßnahmen entlang Ems und Weser an der Veränderung des Tideregimes als auch an den beobachteten langzeitlichen Trends. Somit schaffen die Ergebnisse einen neuen und relevanten Beitrag zur Interpretation dieser Daten hinsichtlich Veränderungen des mittleren Meeresspiegels sowie klimabedingter Einflussfaktoren.

# 4 Danksagung

Das Verbundprojekt ALADYN wurde vom 01. Oktober 2016 bis zum 30. September 2019 vom BMBF im Projekt Küstenmeerforschung des Rahmenprogramms Forschung für Nachhaltige Entwicklung (FONA 3) durch den Projektträger Jülich gefördert. (BMBF-Förderkennzeichen: 03F0756 A-C).

Der Projektkoordinator, die Teilprojektleiter und Mitarbeiter bedanken sich für die sehr gute Betreuung durch den Projektträger Jülich und die fruchtbare und sehr kollegiale Zusammenarbeit mit der projektbegleitenden Gruppe.

Die im Rahmen des von der DFG geförderten Vorhabens TIDEDYN erzielten Ergebnisse konnten für die Entwicklung der statistischen Methodik genutzt werden und hatten hinsichtlich der Zielsetzung von ALADYN sehr positive Synergieeffekte zur Folge.

# 5 Literaturverzeichnis

Elsebach, J.; Kaiser, R.; Niemeyer, H. D.: Identifikation von erheblich veränderten Gewässerbereichen in der Tideweser. Untersuchungsbericht der NLWKN Forschungsstelle Küste 05/2007, Norderney (unveröffentlicht), 2007.

Führböter, A.; Jensen, J.: Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht. In: Die Küste, 42, 78–100, 1985.

Haigh, I. D.; Pickering, M. D.; Green, J. A. M.; Arbic, B. K.; Arns, A.; Dangendorf, S.; Hill D.; Horsburgh, K.; Howard, T.; Idier, D.; Jay, D. A.; Jänicke, L.; Lee, S. B.; Müller, M.; Schindelegger, M.; Talke, S. A.; Wilmes, S.-B.; Woodworth P. L.: The Tides They Are a-Changin': A comprehensive review of past and future non-astronomical changes in tides, their driving mechanisms and future implications. Review of Geophysics, 58, 1, https://doi.org/10.1029/2018RG000636, 2020.

Herrling, G.; Niemeyer, H. D.: Reconstruction of the historical tidal regime of the Ems-Dollard estuary prior to significant human changes by applying mathematical modeling. HARBASINS Report, 2007.

Homeier, H.; Stephan H.-J.; Niemeyer, H. D.: Historisches Kartenwerk Niedersächsische Küste der Forschungsstelle Küste. Berichte der Forschungsstelle Küste. Band 43/2010, Norderney, 2010.

Jänicke, L; Ebener, A.; Dangendorf, S.; Arns, A.; Schindelegger, M.; Niehüser, S.; Haigh, I. D.; Woodworth, P. L.; Jensen, J.: Assessing 20th century tidal range changes in the North Sea. Preprint, Manuscript submitted in: Journal of Geophysical Research: Oceans, https://doi.org/10.1002/essoar.10503227.1, 2020.

Jensen, J.: Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste. In: Mitteilungen Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig, 83, 1984.

Jensen, J.; Mügge, H.-E.; Schönfeld, W.: Analyse der Wasserstandsentwicklung und Tidedynamik in der Deutschen Bucht. In: Die Küste, 53, 211–275, 1992.

Lehmann, C.: Baumaßnahmen an der Westküste Schleswig-Holsteins seit 1900; Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH), 2018.

Lenton, T. M.; Held, H.; Kriegler, E.; Hall, J. W.; Lucht, W.; Rahmstorf, S.; Schellnhuber, H. J.: Tipping elements in the Earth's climate system. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 105, 6, 1786–1793, https://doi.org/10.1073/pnas.0705414105, 2008.

Zhang, Y.; Ye, F.; Stanev, E.V.; Grashorn, S.: Seamless cross-scale modeling with SCHISM. In: Ocean Modelling, 102, 64–81, 2016.

# Untersuchungen zur Entwicklung der Tidedynamik an der deutschen Nordseeküste – Ein Ansatz zur Identifizierung und Quantifizierung von Tideveränderungen durch lokale Systemänderungen

Andra Ebener<sup>1</sup>, Leon Jänicke<sup>1</sup>, Arne Arns<sup>2</sup>, und Jürgen Jensen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnenund Küstenwasserbau, andra.ebener@uni-siegen.de

<sup>2</sup> Universität Rostock, Professur Küstenschutz und Küstendynamik

#### Zusammenfassung

Die Tidedynamik und die -wasserstände an der Deutschen Nordseeküste haben sich seit der Mitte des 20. Jahrhunderts verändert. Sowohl großräumige Einwirkungen (z. B. Klimaänderungen und Meeresspiegelanstieg) als auch kleinräumige Effekte (z. B. natürliche morphologische Prozesse und anthropogene Einflüsse) haben zu diesen Entwicklungen beigetragen. Um die Ursachen und deren Beitrag zu den beobachteten Änderungen besser verstehen zu können, wurde eine Methodik entwickelt, die es ermöglicht, gemeinsame Anteile in den Zeitreihen aufgrund von großräumigen Einflüssen aus den Beobachtungsdaten zu separieren. Durch die Kombination verschiedener statistischer Verfahren werden aus den Aufzeichnungen der Tidekennwerte MTnw, MThw und MThb Zeitreihen generiert, die ausschließlich Änderungen aufgrund von lokalen Einwirkungen enthalten. Die detaillierte Analyse dieser lokalen Signale hinsichtlich unstetiger Veränderungen (Bruchpunkte) ermöglicht es anschließend, kleinräumige anthropogene Maßnahmen einzelnen festgestellten Entwicklungen zuzuordnen und deren Einfluss abzuschätzen. Zur Beurteilung des Einflusses werden die Veränderungen vor und nach einem festgestellten Bruchpunkt untersucht. Für diese Untersuchung wurden Tidewasserstandzeitreihen von insgesamt 21 Tidepegelstandorten mit Schwerpunkt im Bereich der Deutschen Bucht, der niederländischen und der dänischen Küste verwendet. In diesem Beitrag wird die kombinierte Anwendung von Trend-, Hauptkomponenten- und Bruchpunktanalysen für die Separierung von gemeinsamen Entwicklungen und die Abschätzung des Beitrags von lokalen Systemänderungen erläutert. Beispielhaft für die Pegel Büsum, Cuxhaven Steubenhöft und Bremerhaven werden Möglichkeiten, Grenzen und Deutung der Ergebnisse erläutert.

# Schlagwörter

Bruchpunktanalyse, Deutsche Bucht, Hauptkomponentenanalyse, lokale Effekte, Nordsee, Scheitelwasserstände, Tidedynamik, Tidehub, Tideregime, Tidewasserstände, Zeitreihenanalyse

# Summary

The tidal dynamics along the German North Sea coast have changed considerably since the middle of the 20<sup>th</sup> century. Various causes have led to the observed developments on different scales. Both large-scale developments (e.g. climate change and sea-level rise) and small-scale effects (e.g. morphological processes and anthropogenic influences) have contributed to these changes. In order to improve the understanding of the causes and their contribution to the observed changes, a method has been developed that allows to separate large-scale effects from the observed data. By combining different common statistical methods, time series are generated from the records of the tidal characteristics MLW, MHW and MTR, which only contain changes due to local and regional impacts. The detailed analysis of these local signals with regard to mean and abrupt changes will then allow to assign small-scale anthropogenic measures to individual developments and to estimate their impact. For this purpose, 21 tide gauge locations with a focus on the German Bight and additional two tide gauges on the Dutch and one tide gauge at the Danish coasts were investigated. This paper explains the combined application of trend, principal component and change point analyses for the separation of large-scale developments and the estimation of the contribution of small-scale system changes. Using the striking exemplary tide gauges Büsum, Cuxhaven Steubenhöft and Bremerhaven, the possibilities, limits and interpretation of the results are explained.

# Keywords

change point detection, German Bight, principal component analysis, local effects, North Sea, peak water levels, tidal dynamic, tidal water levels, tidal range, tidal regime, time series analysis

# 1 Einleitung

Entlang der deutschen Nordseeküste wurden bereits im 20. Jahrhundert Veränderungen des Wasserstandes und des Tidehubs beobachtet. Dabei variieren die Entwicklungen auf lokaler Ebene deutlich. Jensen (1984) sowie Führböter und Jensen (1985) konnten eine deutliche Zunahme des mittleren Tidehubs (MThb) entlang der deutschen Nordseeküste aufgrund von ansteigenden mittleren Hochwasserständen (MThw) feststellen, während die Niedrigwasserstände (MTnw) nahezu unverändert blieben. Während über den Zeitraum von 1884 bis 1983 die MThw im Mittel um  $0,25 \pm 0,04$  m pro 100 Jahre angestiegen sind, hat sich dieser Anstieg deutlich beschleunigt und die MThw haben sich zwischen 1959 und 1983 bereits um  $0,64 \pm 0,15$  m pro 100 Jahre erhöht (Jensen und Führböter 1985). Weitere Untersuchungen beschreiben die Veränderung der MTnw ab den 1950er Jahren als zunächst leicht sinkend, woraufhin in den 1980er Jahren ein stationäres Verhalten bzw. ein leicht positiver Trend folgt. Die gegensätzliche Entwicklung der Scheitelwasserstände hatte somit nach 1950 eine Zunahme des MThb zur Folge. Neben den Untersuchungen von Scheitelwasserständen konnten die Veränderungen der Tidedynamik aber auch anhand deren Eintrittszeiten sowie den Parametern Ebbe- und Flutdauer festgestellt werden (Jensen et al. 1992). Sowohl großräumige Entwicklungen (z. B. Klimaänderungen und Meeresspiegelanstieg) als auch kleinräumige Effekte (z. B. natürliche morphologische Prozesse und anthropogene Einflüsse) haben zu diesen Veränderungen beigetragen (Haigh et al. 2020).

Viele der einzelnen potentiellen Ursachen für die Tideänderungen sind gut verstanden und können qualitativ beschrieben werden. So können z. B. die Auswirkungen von Fahrrinnenvertiefungen in Ästuaren auf die Tideverhältnisse, in Form einer Erhöhung der Tidedynamik, oder die Veränderung durch den Bau von Tidewehren oder Sturmflutsperrwerken beschrieben werden (Malcherek 2010). Mithilfe von statistischen Methoden oder Modelluntersuchungen lassen sich zudem einzelne großräumige Einflüsse wie der Anstieg des mittleren Meeresspiegels auf die Tidewasserstände in Küstenregionen abschätzen. Trotz der Möglichkeit, grundlegende Effekte zu beschreiben, lassen sich die einzelnen Auswirkungen aufgrund der vielfältigen, teils nicht-linearen Wechselwirkungen mit starker räumlicher und zeitlicher Variabilität vorhandener Einwirkungen nur schwer voneinander trennen (vgl. z. B. Idier et al. 2019, Arns et al. 2020). Zudem bleiben die Veränderungen aufgrund von wasserbaulichen Maßnahmen bpsw. in Modelluntersuchungen häufig unberücksichtigt (Weiße und Meinke 2017). Die Trennung der beteiligten Prozesse ist somit noch immer eine wesentliche Herausforderung, und eine umfassende Antwort auf die Frage, inwieweit einzelne bauliche Veränderungen an der Küste zum Wandel der Tidedynamik beigetragen haben, ist noch nicht gefunden. Die durchgeführten Analysen und Ergebnisse sollen zur Beantwortung dieser beiden Fragestellungen beitragen.

Angesichts der Frage, welche groß- und kleinskaligen Prozesse in welchem Maße zu den festgestellten Veränderungen beigetragen haben, wurde im Teilprojekt ALADYN-A (Förderkennzeichen: 03F0756A) ein Ansatz entwickelt, der eine separate Untersuchung von großräumiger und lokaler Entwicklung ermöglicht. In diesem Beitrag wird eine Methodik zur Trennung von gemeinsamen Anteilen der Entwicklungen und lokalen Veränderungen der Tidedynamik, insbesondere des MThb als Differenz von MTnw und MThw, mithilfe verschiedener statistischer Verfahren vorgestellt. Zunächst wurden dazu die Änderungen der Tidewasserstände und des MThb in der Deutschen Bucht und an Pegelstandorten an der niederländischen und dänischen Küste analysiert. Aus den Wasserstandsaufzeichnungen von insgesamt 21 Tidepegeln in einem Zeitraum von 1935 bis 2015 wurden Zeitreihen des MThb abgeleitet. Veränderungen der mittleren Tidekennwerte wurden mittels linearer Trendschätzung, Hauptkomponenten- und Bruchpunktanalysen untersucht. Darüber hinaus wird die Hauptkomponentenanalyse verwendet, um gemeinsame Entwicklungen von lokalen Signalen zu trennen. Bereits Schönfeld und Jensen (1991) wendeten die Hauptkomponentenanalyse zur Auswertung von Wasserstandszeitreihen von deutschen Nordseepegeln an. Diese Methodik wurde im Teilprojekt ALADYN-A weiterentwickelt und anstelle der Untersuchung von ausschließlich gemeinsamen Veränderungen verwendet, um lokale Entwicklungen detailliert analysieren zu können. Dazu wurden die ersten Hauptkomponenten, die beim MThw und MThb bereits mehr als 90 % und beim MTnw über 70 % der Gesamtvarianz beschreiben, als gemeinsames Signal aus den Beobachtungszeitreihen entfernt. Die folglich um die gemeinsamen Anteile der Entwicklungen bereinigten Zeitreihen wurden wiederum auf unstetige Veränderungen untersucht und diese Ergebnisse bekannten Baumaßnahmen und deren Auswirkungen gegenübergestellt. Zur Veranschaulichung der entwickelten Methodik werden drei Beispiele vorgestellt, die sowohl Möglichkeiten als auch Grenzen aufzeigen.

# 2 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage

Für die Untersuchungen der Veränderung der Tidedynamik in der Deutschen Bucht stehen Zeitreihen der Tidewasserstände sowie des MThb von einer Vielzahl an Pegelstandorten zur Verfügung. In Abbildung 1 ist die räumliche Verteilung der verwendeten Pegelzeitreihen dargestellt. Insgesamt wurden Wasserstandsaufzeichnungen von 21 Tidepegeln verwendet, von denen 18 Pegel in der Deutschen Bucht, zwei an der niederländischen Küste im Bereich der Emsmündung und ein weiterer Pegel an der Küste Dänemarks liegen. Tidepegel im Bereich von Ästuaren wurden nicht in die Untersuchung miteinbezogen, da hier vielfältige Wechselwirkungen auftreten, die zwar die Tidedynamik im Ästuar, jedoch nicht bzw. kaum das Gesamtsystem der Küstenpegel beeinflussen. Neben den Pegelstandorten in den Ästuaren wurden zudem die Zeitreihen an den beiden Sperrwerken Eider und Friedrichskoog von den Analysen ausgenommen, da deren Zeitreihenlänge nicht mindestens einem Nodaltidezyklus (18,61 Jahre, vgl. Kapitel 3.1) umfasst und sie daher nur eingeschränkt nutzbar für Trenduntersuchungen sind.



Abbildung 1: Verwendete Pegelstandorte innerhalb des Untersuchungsgebietes.

Die für die Pegelstandorte verfügbaren Datensätze wurden zu Beginn akquiriert und von der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) sowie über die Portale des zugehörigen Zentralen Datenmanagements (ZDM, https://www.portalnsk.de/) für

die geplanten Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Die Pegeldaten wurden als Teil dieses Forschungsvorhabens für alle weiteren Analysen plausibilisiert und bereinigt. Die Abbildung 2 stellt die insgesamt zur Verfügung stehende Datengrundlage der Scheitelwasserstände, bzw. der daraus ermittelten Jahreszeitreihen, dar. Es ist zu erkennen, dass die Zeitreihen der Tideparameter unterschiedliche Zeiträume der Datenverfügbarkeit aufweisen. Aufgrund dieser variierenden Zeitreihenlängen wurde für die weiteren Untersuchungen ein gemeinsamer Untersuchungszeitraum mit möglichst hoher Datenverfügbarkeit gewählt. Unter Berücksichtigung der Nodaltide mit einer Periodendauer von 18,61 Jahren und der verfügbaren Zeitreihenlänge wurde zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit ein Untersuchungszeitraum von 1940 bis 2013 (entspricht 74 Jahren bzw. 4-mal Nodaltidezyklus) gewählt. Innerhalb dieses Zeitraums werden die eingetretenen Veränderungen analysiert.



Abbildung 2: Datenverfügbarkeit der jährlichen Tidekennwerte im Untersuchungsgebiet; in grau hinterlegt: Zeitraum mit hoher Datenverfügbarkeit, im weiteren Verlauf verwendet als Untersuchungszeitraum der Hauptkomponenten- und Bruchpunktanalyse.

# 3 Methodik

Aus den zur Verfügung stehenden Zeitreihen der amtlichen Scheitelwasserstände wurden zunächst die jährlichen Mittelwerte MThw und MTnw gebildet. Zusätzlich wurden Einzelwerte der Tidehubzeitreihen nach der Definition der DIN 4049-3 ermittelt. Daraus wiederum wurden Monatsmittel generiert und die MThb-Zeitreihen gebildet. Für alle in diesem Artikel vorgestellten Analysen und Ergebnisse wurden die jährlichen Mittelwerte verwendet.

Im Folgenden wird die im Rahmen des Projektes ALADYN genutzte und weiterentwickelte Methodik vorgestellt. Es wurden die Veränderungen der Tidedynamik mithilfe verschiedener statistischer Analysen untersucht. Zudem wurde ein Verfahren verwendet, um lokale Effekte und kleinräumige Veränderungen zu detektieren und von gemeinsamen Signalen zu trennen. In Abbildung 3 sind die Bausteine der entwickelten Methodik schematisch dargestellt. Folgende einzelne Analyseschritte wurden dazu durchgeführt:

- 1. Untersuchung der Veränderungen der mittleren Tideparameter mit Schätzung linearer Trends anhand der beobachteten Zeitreihen (Untersuchung von räumlichen Mustern)
- 2. Schließung von Datenlücken mit dem Interpolationsverfahren Ordinary Kriging
- 3. Hauptkomponentenanalyse zur Extraktion der gemeinsamen Signale aus den beobachteten Daten
- 4. Berechnung der Zeitreihen mit ausschließlich kleinräumigen und lokalen Veränderungen
- 5. Anwendung des sogenannten probabilistischen Bayesian change point algorithm nach Ruggieri (2012) auf die verbleibende Zeitreihe, um unstetige Änderungen der Tidedynamik zu erkennen (im Folgenden auch als Bruchpunkte bezeichnet)
- 6. Vergleich und Diskussion der erfassten unstetigen Änderungen, z. B. mit historischen Baumaßnahmen
- 7. Beschreibung der Auswirkungen von den potentiellen Ursachen der festgestellten unstetigen Änderungen (Charakteristika der Zeitreihen vor und nach den festgestellten Bruchpunkten)



Abbildung 3: Schematische Darstellung der entwickelten Methodik zur Separierung von gemeinsamen und lokalen Veränderungen und der detaillierten Untersuchung von lokalen Effekten.

Alle durchgeführten Analysen werden im Folgenden näher erläutert.

#### 3.1 Trendanalysen

Um die mittleren Änderungen (stetige Änderungen) der MTnw -, MThw- und MThb-Zeitreihen beschreiben zu können, wurden lineare Trendanalysen durchgeführt. Erst nachdem bekannt ist, wie sich die Tidedynamik insgesamt verändert hat, ist es möglich, die Auswirkungen lokaler Effekte zu beschreiben. Zudem werden die Trendanalysen verwendet, um gemeinsame Entwicklungen und räumliche Muster zu detektieren.

Zunächst wurden lineare Trends der Zeitreihen errechnet, die dazu dienen, die Langzeitentwicklung im Untersuchungsgebiet zu quantifizieren. Bei Analysen des MTnw, des MThw oder des MThb in der Nordsee erfolgen Trendanalysen i. d. R. über Zeiträume, die ein Vielfaches der Nodaltide darstellen. Bei einer Amplitude in der Größenordnung von ca. 3-4 cm (z. B. Jensen et al. 1988, Wahl et al. 2008) können die Ergebnisse von Trendanalysen, besonders bei relativ kurzen Zeitreihen (z. B. < 50 Jahre), andernfalls verfälscht werden. Aus dieser Bedingung und der variierenden Datenverfügbarkeit ergeben sich folgende Zeiträume, die für die lineare Trendanalyse herangezogen wurden: 1940 bis 2013, 1958 bis 2013, 1977 bis 2013 und 1995 bis 2013. Betrachtet man die gewählten Zeiträume hinsichtlich ihrer Länge, so zeigt sich, dass es sich in allen Fällen um etwa ein Vielfaches der Nodaltide-Periode von 18,61 Jahren handelt, bzw. um ein Vielfaches von 19 Jahren, da die Analysen ausschließlich Jahresmittelwerte adressieren. Dies stellt sicher, dass Anteile der Nodaltide nicht fälschlicherweise als langfristige Trends interpretiert werden (vgl. z. B. Bartels 1952, Jensen et al. 1992). Die Ergebnisse der Trendanalyse für alle genannten Zeiträume sind dem Abschlussbericht (Ebener et al. 2020) zu entnehmen, in diesem Beitrag beziehen sich die Trendanalysen auf den längsten verfügbaren Zeitraum von 1940 bis 2013. Zu beachten ist im Folgenden, dass für den Untersuchungszeitraum grundsätzlich der Zeitraum 1935 bis 2015 gewählt wurde, dieser jedoch nur für die Trendanalyse aufgrund der Berücksichtigung der Nodaltide sowie der Datenverfügbarkeit auf den Zeitraum 1940 bis 2013 gekürzt werden musste.

Für die lineare Trendanalyse wird also für jede Aufzeichnungszeitreihe eine lineare Trendfunktion der folgenden Form berechnet:

$$y = a_1 \cdot x + a_0 \tag{1}$$

Dabei entspricht der Koeffizient a<sub>1</sub> der Steigung der Geraden y und bildet den linearen Trend der betrachteten Zeitreihe x ab. Der Koeffizient a<sub>0</sub> beschreibt den Wert y für den Fall, dass x den Wert Null annimmt, d. h. bei a<sub>0</sub> schneidet die Trendgerade die y-Achse (Şanal 2015). Zusätzlich zu den ermittelten Trends (in [mm/a]) sind jeweils die 2-σ-Standardfehler, ebenfalls in [mm/a], zur Darstellung der Unsicherheiten angegeben. Die linearen Trends sowie die zugehörigen Standardfehler wurden über einem Algorithmus nach Mawdsley und Haigh (2016) ermittelt. Die Standardfehler wurden dabei mit einer Lag-1-Autokorrelationsfunktion geschätzt, um die serielle Autokorrelation einer Zeitreihe zu berücksichtigen. Zur Überprüfung der ermittelten Trends auf Signifikanz wurde der Mann-Kendall-Test durchgeführt (vgl. z. B. Salas 1993) und dafür ein 95 %iges Signifikanzniveau gewählt. Folglich wird ein linearer Trend als signifikant bezeichnet, wenn dieser mit einem 95 %igen Konfidenzintervall von Null abweicht.

### 3.2 Interpolation zur Schließung von Datenlücken

Um die unvollständigen Zeitreihen für die durchzuführenden Analysen zu komplementieren, wird das Verfahren des Ordinary Kriging (auch bekannt als Gaußprozess-Regression) zur Schließung der Datenlücken angewendet. Das Kriging ist ein geostatistisches Verfahren zur Interpolation von fehlenden Werten in einem Datenkollektiv, basierend auf vorhandenen benachbarten Werten. Das Kriging wurde ursprünglich von Daniel Krige in den 1950er Jahren für den Bergbau entwickelt (Krige 1951), seit einigen Jahren wird das Verfahren aber auch in vielen anderen Bereichen angewendet. So haben beispielsweiße Rigor et al. (2000) und Rhode et al. (2013) das Kriging erfolgreich zur Lückenschließung von Temperaturdaten angewendet. Im Allgemeinen handelt es sich beim Kriging um ein lineares Interpolationsverfahren. Dabei werden die fehlenden Werte gemäß einer gegebenen Kovarianzstruktur bestimmt, die wiederum aus den vorhandenen Beobachtungswerten errechnet wird (Cressie 1990). Ein wesentlicher Vorteil des Krigings ist, dass sich die interpolierten Werte stufenlos ändern und die beobachteten Werte durch das Kriging unverändert bleiben. Zur Interpolation der fehlenden Werte berücksichtigt das Kriging die Abstände zwischen den vorhandenen Beobachtungen, um die räumliche Varianz abbilden zu können. Ist innerhalb einer Region eine Bündelung beobachteter Werte festzustellen, so wird die Gewichtung der Punkte dieser Region reduziert. Das bedeutet, dass innerhalb einer Gruppierung von Beobachtungswerten die Dichte berücksichtigt wird, während in Regionen mit spärlicher Datenabdeckung nur die Entfernung berücksichtigt wird (Cowtan und Way 2014). Mit der folgenden Formel lässt sich die Vorgehensweise vereinfacht zusammenfassen:

$$\hat{Z}_{(x_0)} = [w_1 w_2 \dots w_{n-1} w_n] \cdot \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_{n-1} \\ z_n \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n w_i(x_0) \times Z(x_i)$$
(2)

Dabei entspricht  $\hat{Z}$  dem Wert, der an der unbeobachteten Stelle x<sub>0</sub> zu bestimmen ist, während die Werte von i = 1 bis n die Anzahl der beobachteten Stellen darstellen.  $\hat{Z}$  wird aus einer linearen Kombination aller beobachteten Werte  $z_i = Z(x_i)$  berechnet, die durch den Parameter w nach Abstand und Dichte gewichtet werden. Die entsprechenden Parameter bezüglich des Einflusses von Dichte und Abstand auf die Gewichtung müssen daher sorgfältig ausgewählt werden. Eine besondere Eigenschaft dieses Verfahrens ist die Konvergenz von interpolierten Werten zum Mittelwert ihrer Region mit zunehmendem Abstand zum nächsten Messpunkt. Deshalb sind die Ergebnisse in der Regel nicht extrem und eher konservativ (Cowtan und Way 2014).

Die Anwendung dieses Verfahrens basiert auf dem Vorgehen von Jänicke et al. (2021) und wird im Rahmen dieses Projekts zur Schließung von zeitlichen Lücken unseres Datensatzes innerhalb des Untersuchungszeitraums 1935 bis 2015 verwendet.

#### 3.3 Hauptkomponentenanalyse

Um die Ursachen der beobachteten Veränderungen zu analysieren, wurde eine Hauptkomponentenanalyse (*engl. principal component analysis, PCA*) durchgeführt. Die PCA ist ein multivariates Verfahren zur Analyse von Datensätzen, bei dem Beobachtungen durch mehrere quantitative abhängige Variablen beschrieben werden. Ziel der PCA ist es, die wichtigsten Informationen aus den Daten zu extrahieren und sie als eine Reihe neuer Variablen darzustellen, die auch als Hauptkomponenten (*engl. principal components, PCs*) bezeichnet werden. Das Muster der Ähnlichkeit der Beobachtungen kann somit dargestellt werden (Abdi und Williams 2010).

Die PCA gehört zu den Methoden der multivariaten Statistik. Sie dient der Strukturierung und Vereinfachung umfangreicher Datensätze durch die Approximation einer großen Anzahl statistischer Variablen mit einer geringeren Anzahl signifikanter, nicht-korrelativer Linearkombinationen. Sei x ein Vektor mit n Zufallsvariablen, so wird zunächst eine lineare Funktion  $f_1(x)$  mit den konstanten Koeffizienten  $c_{1i}$  bestimmt, indem der Eigenvektor aus der räumlich gewichteten Kovarianzmatrix von x berechnet wird. Dann stellt  $f_1(x)$  die größtmögliche Gesamtvarianz aller Variablen in x dar:

$$f_1(\mathbf{x}) = c_{11} \cdot \mathbf{x}_1 + c_{12} \cdot \mathbf{x}_2 + \dots + c_{1n} \cdot \mathbf{x}_n = \sum_{i=1}^n c_{1i} \cdot \mathbf{x}_{1i}$$
(3)

Als nächstes wird dieser Vorgang für eine Funktion  $f_2(x)$  wiederholt, die mit  $f_1(x)$  unkorreliert ist und den größtmöglichen Betrag der verbleibenden Varianz beschreibt. Es ist möglich, n solcher Funktionen zu finden, wobei es i. d. R. das Ziel ist, mit deutlich weniger Funktionen möglichst viel der Varianz zu erklären. Diese Funktionen  $f_i(x)$  werden als Hauptkomponenten bezeichnet (Jolliffe 2002).

Großräumige Entwicklungen im Untersuchungsgebiet lassen sich durch die Bestimmung der ersten Hauptkomponente (PC) beschreiben, wenn diese einen hohen Anteil an der Gesamtvarianz erklären kann. Dies basiert auf der Annahme, dass alle von der ersten PC abgebildeten Änderungen den gemeinsamen Entwicklungen aller untersuchten Pegelstandorten entsprechen. Weitere in unteren PCs sichtbare Änderungen spiegeln räumlich begrenzte und lokale Effekte wider. Mit der PCA ist es somit möglich, groß- und kleinräumige Entwicklungen der Tideparameter voneinander zu trennen. Wird, wie im folgenden Schritt, eine Beobachtungszeitreihe über die erste PC rekonstruiert, erhält man ein Signal am betrachteten Pegelstandort, das ausschließlich durch großflächige Veränderungen gekennzeichnet ist. Wird diese Rekonstruktion von der Beobachtungsreihe subtrahiert, beschreiben die Residuen die primär durch lokale Effekte verursachten Veränderungen. Beispiele für großräumig induzierte Effekte sind der Anstieg des mittleren Meeresspiegels oder klimatisch induzierte Veränderungen. Lokale Effekte dagegen sind Baumaßnahmen wie der Bau von Staustufen oder Sandvorspülungen als Beitrag zum Küstenschutz. Hinsichtlich der Frage, inwieweit die Tideparameter durch Baumaßnahmen beeinflusst werden, dient die PCA als Grundlage für die Unterscheidung zwischen nordseeweiten (gemeinsamen) Entwicklungen und lokalen Effekten.

Zur Validierung der aufgestellten Hypothese wurden die Ergebnisse von Jänicke et al. (2021) einbezogen. Jänicke et al. (2021) stellen fest, dass die erste Hauptkomponente aus einem nordseeweiten Pegelkollektiv das Verhalten des MThb in der Deutschen Bucht beschreibt, während die zweite Hauptkomponente die Entwicklung des MThb an der britischen Küste wiederspiegelt. Für den Zeitraum von 1958 bis 2014 wurden die erste und zweite Hauptkomponente der beiden Datensätze verglichen und die Korrelationen (R<sup>2</sup>) untersucht. Wie in Abbildung 4 dargestellt, wurde eine hohes Bestimmtheitsmaß (hohe quadrierte Korrelation) der ersten Hauptkomponenten mit R<sup>2</sup> [PC1, PC1<sub>Jänicke et al.</sub>] = 0,91 ermittelt. Im Gegensatz dazu wurde für die zweite Hauptkomponente ein niedriges R<sup>2</sup> von 0,20 beobachtet. Für unsere Untersuchungen bedeutet dies, dass das von Jänicke et al.

(2021) bestimmte zweite großräumige Signal, repräsentiert durch die PC2, keinem großräumig gemeinsamen Signal des MThb in der Deutschen Bucht entspricht. Dies entspricht unserer Annahme, dass ab der zweiten PC lokale Entwicklungen abgebildet werden und die Deutsche Bucht als ein eigenständiges System betrachtet werden kann.



Abbildung 4: Zeitreihen der ersten beiden Hauptkomponenten, die aus den MThb-Zeitreihen der für diese Studien verwendeten Daten (schwarze Linien) und dem Datensatz (blaue Linien) von Jänicke et al. (2021) innerhalb der gemeinsamen Datenverfügbarkeit von 1958 bis 2014 errechnet wurden, sowie die Korrelation der jeweiligen ersten beiden Hauptkomponenten.

#### 3.4 Extraktion des gemeinsamen Signals

Um die Auswirkungen lokaler Effekte, wie z. B. historischer Baumaßnahmen, auf die Tideparameter an den untersuchten Standorten abschließend beschreiben zu können, wurde eine Bruchpunktanalyse durchgeführt. Die Bruchpunktanalyse wurde jedoch nicht unmittelbar auf die Beobachtungszeitreihen angewendet, sondern auf die um die erste PC bereinigten Zeitreihen. Die These hinter diesem Verfahren ist, dass unstetige Veränderungen ein Hinweis auf Baumaßnahmen sein können. Die reduzierten Zeitreihen (im Folgenden: Differenzenzeitreihen, *engl. residual time series*) als Differenz zwischen Beobachtung und Rekonstruktion (gemeinsames Signal) enthalten alle nicht über das gemeinsame Signal abbildbare Veränderungen. Demnach wird davon ausgegangen, dass lokale unstetige Änderungen in den Differenzenzeitreihen sichtbar werden. Die Differenzenzeitreihen des MThb werden für die einzelnen Tidepegelstandorte nach der folgenden Gleichung berechnet. Analog dazu werden die Differenzenzeitreihen von MTnw (MTnwres) und MThw (MThwres) gebildet.

$$MThb_{res,i} = MThb_{obs,i} - PC1_{MThb,i}$$
(4)

mit:

i:	Pegelnummer
MThb <sub>res,i</sub> :	Differenzenzeitreihe des MThb (residual time series) [cm]
MThb <sub>obs,i</sub> :	Beobachtungszeitreihe des MThb (observed) [cm]
PC1 <sub>MThb,i</sub> :	Rekonstruktion auf Basis der PC1 [cm]

#### 3.5 Bruchpunktanalyse

Weist eine Zeitreihe Inhomogenitäten auf, so kann durch die Bruchpunktanalyse der Zeitpunkt (Bruchpunkt) bestimmt werden, zu dem sich das Verhalten mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit verändert hat (Straub 2004). In dieser Arbeit werden alle abrupten wesentlichen Änderungen des Trends, des Mittelwerts oder der Varianz, die als Bruchpunkt sichtbar werden, als unstetige Veränderungen bezeichnet. In diesem Fall liefert ein Bruchpunkt ein Indiz für eine kurzfristige Veränderung des Tidegeschehens. Mithilfe der Bruchpunktanalyse können die Zeitpunkte der Veränderung in einer gemessenen Zeitreihe detektiert werden, um anschließend deren Ursachen und Auswirkungen zu diskutieren. Instationaritäten in Wasserstandszeitreihen können vielfältige Ursachen und Ausprägungen aufweisen. Unstetige Änderungen einer gemessenen Zeitreihe werden häufig durch anthropogene Einflüsse im Einzugsgebiet verursacht, können bspw. aber auch durch Setzungen am Pegel oder Baumaßnahmen hervorgerufen werden (Dangendorf und Jensen 2011).

Durch die Anwendung des *Bayesian change point algorithm* von Ruggieri (2012) können Unsicherheiten sowohl für die Anzahl als auch für die Lage der Bruchpunkte (BP) mit einem probabilistischen Ansatz geschätzt werden. Der Algorithmus ermöglicht es, Änderungen des Mittelwerts, des Trends und/oder der Varianz der untersuchten Parameter zu erkennen. Darüber hinaus ist es unwahrscheinlich, dass der *Bayesian change point algorithm* Bruchpunkte erkennt, die eigentlich nicht in der Zeitreihe enthalten sind (Ruggieri 2012). Wie bereits erwähnt, wird das Verfahren auf die Differenzenzeitreihen der Tideparameter nach Gleichung (4) angewendet. Um die Vergleichbarkeit zwischen den beobachteten Entwicklungen und den Ergebnissen der Bruchpunktanalyse gewährleisten zu können, wird die Bruchpunktanalyse nur auf Zeitreihen innerhalb des Untersuchungszeitraums und im Bereich der Datenverfügbarkeit angewendet.

Untersucht wurden die Differenzenzeitreihen der drei relevanten Tideparameter MTnw, MThw und MThb. Für jede der Zeitreihen liegt folglich nach den Untersuchungen jeweils eine Wahrscheinlichkeitsberechnung der Anzahl enthaltener BP und eine Ganglinie der Wahrscheinlichkeit für die Lage der potentiellen BP im Untersuchungszeitraum vor. In Abbildung 5 ist beispielhaft die Bruchpunktanalyse des MThb am Pegel Dagebüll dargestellt. Dabei sind im oberen Teil der Abbildung die Beobachtungszeitreihe und die Rekonstruktion der ersten Hauptkomponente für diesen Pegel abgebildet. Eine erste visuelle Prüfung der beiden Zeitreihen zeigt, dass die beobachteten Werte des MThb teilweise deutlich niedrigere oder höhere Werte als die Rekonstruktion aufweisen. Abgesehen von dem scheinbaren "Einknicken" der Kurven um 1950 lässt die visuelle Prüfung keinen Rückschluss auf eindeutige unstetige Änderungen zu. Betrachtet man hingegen die Differenzenzeitreihe (vgl. Abbildung 5.b), lässt sich eine unstetige Änderung in der Mitte der 1970er Jahre vermuten. Zudem wurde mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,6 % errechnet, dass die Differenzenzeitreihe einen Bruchpunkt enthält. Dabei liegt dieser Bruchpunkt mit einer Wahrscheinlichkeit von 43,8 % im Jahr 1972 und ist mit einem 95%-Vertrauensbereich im Zeitraum von 1971 bis1976 aufgetreten.



Abbildung 5: Darstellung der Bruchpunktanalyse mit vorausgegangener Hauptkomponentenanalyse am Beispiel des MThb am Pegel Dagebüll; (a) Die schwarze Linie beschreibt die Beobachtungszeitreihe MThb und die blaue Linie entspricht der Rekonstruktion auf Grundlage der ersten PC (b) Die dunkelrote Linie repräsentiert die Differenzenzeitreihe. Der Wert der (roten) Kurve entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass zu dem jeweiligen Zeitpunkt ein Bruchpunkt vorhanden ist.

#### 4 Ergebnisse

# 4.1 Mittlere Änderungen der Tidedynamik

Um die Änderungen der Tidedynamik zu beschreiben, wurden zunächst die linearen Trends der Beobachtungszeitreihen berechnet. Um die Bedeutung und die Unsicherheiten der berechneten linearen Trends zu bestimmen, wurden zusätzlich die Standardfehler (SE) berechnet. Die Entwicklung des MThb ist immer abhängig von der Veränderung der mittleren Wasserstände MThw und MTnw. Abbildung 6 zeigt die drei beobachteten Fälle von Tidehubänderungen durch fallende oder steigende MThw und MTnw an drei exemplarischen Pegeln in der Deutschen Bucht. Die Erhöhung des MThb aufgrund der zunehmenden Differenz zwischen den mittleren Tidewasserständen ist beispielhaft am Pegel Dagebüll (Abbildung 6, links) dargestellt. Die nächste Beobachtung lässt sich anhand des Beispiels Wilhelmshaven Alter Vorhafen (Abbildung 6, Mitte) beschreiben. Hier ist keine signifikante Veränderung im MTnw aufgetreten, während das MThw angestiegen ist. Auch diese Konstellation führt zu einem Anstieg des MThb, jedoch mit geringerer Ausprägung als im ersten Fall, da hier die ansteigende Differenz der Tidewasserstände lediglich aus dem steigenden Tidehochwasser herrührt. Der dritte Fall konnte lediglich am Pegel Büsum (Abbildung 6, rechts) beobachtet werden und enthält keine mittlere Änderung des MThb aufgrund des simultanen Anstiegs der Tidewasserstände und folglich keine Veränderung bezüglich deren Differenz.



Abbildung 6: Exemplarische Entwicklung von MThw (hellblau) und MTnw (grün) sowie des MThb (dunkelblau) an den Tidepegeln Büsum, Dagebüll und Wilhelmshaven Alter Vorhafen in der Deutschen Bucht. Lineare Trends im Zeitraum von 1940 bis 2013 in [mm/a]. Durchgängige Linien: signifikante Trends; gestrichelte Linien: keine signifikante Veränderung; grauer Bereich: Darstellung der Differenz zwischen den Tidewasserständen.

Die Vergleichbarkeit der linearen Trends und der zugehörigen Unsicherheiten ist durch die unterschiedliche Datenverfügbarkeit eingeschränkt. Aus diesem Grund wurde die Trendanalyse auf den gemeinsamen Zeitraum 1940 bis 2013 angewendet (siehe Tabelle 1). Während sich das MThw im gesamten Untersuchungsgebiet signifikant um 2,2 bis 4,9 mm pro Jahr erhöht hat, konnten steigende sowie abnehmende und stagnierende MTnw während des Untersuchungszeitraums beobachtet werden. Ähnlich wie bei der Entwicklung des MThw sind auch die MThb zwischen 1,3 und 7,2 mm pro Jahr gestiegen. Die einzige Ausnahme bildet der Pegel Büsum, an dem aufgrund des gleichzeitigen Anstiegs von MTnw und MThw kein signifikanter linearer Trend des MThb festgestellt werden kann.

1940 bis 2013		MThw		MTnw	MThb	
		Pegel	Trend [m	m/a]	Trend [mm/a]	Trend [mm/a]
NL		Delfzijl	4,0 ±	0,9	-2,0 ± 0,8	6,0 ± 2,0
Deutsche Bucht		Borkum Südstrand	2,3 ±	0,6	1,0 ± 0,8	1,3 ± 0,9
	Niedersachsen	Norderney Riffgat und Hafen	2,2 ±	0,6	$0,3 \pm 0,8$	1,9 ± 1,2
		Helgoland Binnenhafen	2,5 ±	0,8	$1,1 \pm 1,1$	1,4 ± 1,0
		LT Alte Weser – Roter Sand	2,5 ±	0,7	1,0 ± 0,9	1,5 ± 1,0
		Wilhelmshaven Alter Vorhafen	3,9 ±	0,7	$0,7 \pm 0,8$	3,2 ± 1,1
		Bremerhaven	3,7 ±	0,8	- <b>2,2</b> ± 0,9	5,9 ± 1,2
		Cuxhaven Steubenhöft	2,9 ±	0,7	$0,8 \pm 1,1$	2,1 ± 1,8
	Schleswig- Holstein	Büsum	2,9 ±	0,8	<b>2,6</b> ± 1,0	$0,4 \pm 1,4$
		Husum	4,0 ±	0,8	-0,4 ± 1,2	4,3 ± 1,1
		Wittdün	4,1 ±	0,7	-0,4 ± 1,1	4,4 ± 1,2
		Dagebüll	4,7 ±	0,7	- <b>2,</b> 5 ± 1,5	7,2 ± 1,6
		Hörnum	4,0 ±	0,7	$0,1 \pm 1,0$	$3,9 \pm 0,9$
		List	3,1 ±	0,6	$0,5 \pm 0,9$	2,6 ± 0,7
DK		Esbjerg	4,9 ±	1,1	$1,7 \pm 1,4$	$3,2 \pm 0,8$

Tabelle 1: Lineare Trends und 2-σ-Standardfehler der Tideparameter im Untersuchungsgebiet innerhalb des gemeinsamen Zeitraums 1940 bis 2013 in [mm/a]; rot: negative lineare Trends, dunkelgrau: nicht signifikanter linearer Trend.

Um mögliche räumliche Muster bei der Veränderung der MThw- und MThb-Zeitreihen zu erkennen, wurden Mittelwerte der linearen Trends separat für die Küste Niedersachsens (Pegel Borkum Südstrand bis Cuxhaven Steubenhöft) und Schleswig-Holsteins (Pegel Büsum bis List) berechnet. Dabei wurden an der Küste Schleswig-Holsteins deutlich stärkere Anstiege im MThw und MThb festgestellt (siehe Tabelle 2). Die räumlich differenzierte Entwicklung im Untersuchungsgebiet wird noch deutlicher, wenn die Pegel Cuxhaven Steubenhöft und Büsum im Übergangsbereich der beiden Küstenabschnitte von der Untersuchung ausgeschlossen werden. Folglich gibt es an der niedersächsischen Küste einen durchschnittlichen Anstieg des MThw von 2,9 ± 0,6 mm/a und des MThb von 2,5 ± 1,1 mm/a und an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste einen größeren mittleren Anstieg des MThw von 4,0 ± 0,7 mm/a und des MThb von 4,5 ± 1,1 mm/a. Ein ähnliches Muster kann für die MTnw im Untersuchungsgebiet nicht abgeleitet werden, da eine große Anzahl der Pegelstandorte keine signifikanten Trends aufweisen. Der Trend der MTnw variiert zwischen -2,5 und 2,6 mm/a über das gesamte Untersuchungsgebiet.

Tabelle 2: Mittelwerte der linearen Trends in [mm/a] von MThw und MThb an der niedersächsischen und schleswig-holsteinischen Küste mit und ohne die Tidepegel Cuxhaven Steubenhöft und Büsum (1940–2013).

	MThw	MThb
Küstenabschnitt	Ø Trend [mm/a]	Ø Trend [mm/a]
Niedersachsen (Borkum Südstrand bis Cuxhaven Steubenhöft)	2,9 ± 0,6	$2,5 \pm 1,1$
Niedersachsen (Borkum Südstrand bis Bremerhaven)	$2,9 \pm 0,6$	$2,6 \pm 1,0$
Schleswig-Holstein (Büsum bis List)	$3,8 \pm 0,7$	3,8 ± 1,2
Schleswig-Holstein (Husum bis List)	$4,0 \pm 0,7$	$4,5 \pm 1,1$

#### 4.2 Identifizierung des gemeinsamen Signals

Mithilfe der PCA werden die ersten beiden gemeinsamen Hauptkomponenten der Tidekennwerte aller zur Verfügung stehenden Pegelzeitreihen bestimmt. Untersucht wurden die jährlichen Mittelwerte MTnw, MThw und MThb. Abbildung 7 zeigt die errechneten ersten beiden Hauptkomponenten der untersuchten Tideparameter mit den zugehörigen Koeffizienten der einzelnen Tidepegelstandorte. Zur Rekonstruktion werden die ermittelten Hauptkomponenten mit den jeweiligen Koeffizienten multipliziert. Zusätzlich wird der Mittelwert der Ausgangszeitreihe zur Rekonstruktion addiert, um die Rekonstruktion auf das entsprechende Höhenniveau der Ausgangszeitreihe zu setzen. Dies ist notwendig, weil die PCA den Mittelwert im Verfahren nicht abbilden kann. Da die Koeffizienten nicht einheitlich über das Untersuchungsgebiet positiv oder negativ ausfallen, müssen diese bei der Auswertung der Hauptkomponenten und deren Effekt auf den Gesamtwasserstand mitberücksichtigt werden.



Abbildung 7: Linke Spalte: Die ersten beiden Hauptkomponenten (PC) für die MTnw-, MThwund MThb-Zeitreihe aller betrachteten Tidepegel; rechte Spalte: Koeffizienten der ersten beiden PCs aller betrachteten Tidepegel, schwarze Balken: Koeffizienten PC1 und blaue Balken: Koeffizienten PC2.

Die Koeffizienten der PC1 des MTnw fallen ausnahmslos positiv aus und weisen lediglich eine leicht variierende Ausprägung auf. Zudem schwankt die erste Hauptkomponente stark um Null und wie Tabelle 3 zu entnehmen ist, enthält sie keinen signifikanten linearen Trend. Daraus lässt sich ableiten, dass PC1 die hohe gemeinsame Variabilität des MTnw im Untersuchungsgebiet abbildet und gleichzeitig keine mittlere Veränderung (nicht signifikanter linearer Trend) beschreibt, wie auch in den Beobachtungszeitreihen kein gemeinsamer linearer Trend im MTnw vorhanden ist. Im Gegensatz dazu enthält die zweite Hauptkomponente eine signifikante lineare Zunahme. Durch die positiven Koeffizienten an einer Vielzahl der untersuchten Tidepegel ist der Anteil der PC2 an diesen Pegeln positiv bzw. trägt zu einer Erhöhung des Gesamtsignals bei. An den Pegeln mit negativen Koeffizienten führt dies hingegen zu einer Reduzierung des MTnw. Bereits die deutlich variierende Ausprägung der Koeffizienten der PC2 ist ein Hinweis darauf, dass die PC2 lokale Effekte abbildet. Die PC2 trägt somit an den Pegeln Büsum und Esbjerg zu einer Verstärkung des Anstiegs, an den Pegeln Delfzijl, Emden Neue Seeschleuse, Bremerhaven und Dagebüll wiederum zu einer Dämpfung bzw. einer Reduzierung des MTnw bei.

Tabelle 3: Qualitative Veränderung der ersten beiden Hauptkomponenten des MTnw, MThw und MThb im Untersuchungsgebiet; o: kein signifikanter linearer Trend; +: signifikanter positiver linearer Trend.

Qualitative Veränderung der Hauptkomponenten PC1 & PC2						
	MTnw	MThw	MThb			
PC1	0	+	+			
PC2	+	О	0			

Die erste Hauptkomponente des MThw weist einen positiven signifikanten linearen Trend auf und beschreibt mit ausschließlich positiven Koeffizienten eine gemeinsame Zunahme des MThw. Zudem wird über die PC1 bereits 94,1 % der Variabilität durch dieses gemeinsame Signal abgebildet. Die PC2 hingegen weist stark variierende Koeffizienten und gleichzeitig keine signifikante mittlere Veränderung (linearer Trend) auf. Auch ist augenscheinlich keine so ausgeprägte Variabilität in der zweiten Hauptkomponente zu entdecken. Die niedrigeren PCs scheinen somit die lokal variierenden Abweichungen der Entwicklung des MThw vom Gesamtsignal abzubilden, wobei der PC2 hier der größte Anteil zugeordnet werden kann. Betrachtet man die Koeffizienten und die ermittelten erklärten Varianzen, so weist die zweite Hauptkomponente mit Ausnahme an den Pegeln Esbjerg, Bremerhaven, Cuxhaven Steubenhöft und Büsum eher einen geringen Anteil an der Variabilität des Gesamtsignals auf.

Das MThb weist ebenfalls im gemeinsamen Signal (PC1) einen signifikanten linearen Anstieg auf. Die PC2 hingegen verläuft augenscheinlich leicht negativ, allerdings lässt sich hier kein signifikanter Trend ermitteln. Durch die ausschließlich positiven Koeffizienten und den großen Anteil erklärter Varianz (90,3 %) im Untersuchungsgebiet führt die erste Hauptkomponente zu einem nahezu einheitlichen Anstieg des MThb. Die positiven Koeffizienten der PC2 insbesondere an der Küste Niedersachsens verursachen hingegen eine Dämpfung dieses Anstiegs. An der Küste Schleswig-Holsteins wiederum wird der gesamtheitliche Anstieg zusätzlich durch das lokale Signal (PC2) verstärkt. Eine Ausnahme bildet lediglich der Pegel Büsum (Nr. 13), an dem die Überlagerung beider Hauptkomponenten keine Änderung hervorruft.



Abbildung 8: Räumliche Verteilung der erklärten Varianz der ersten beiden Hauptkomponenten des MTnw, MThw und MThb entlang der Nordseeküste. (a) Erklärte Varianz in [%] der PC1 und (b) erklärte Varianz in [%] der PC2 an den untersuchten Pegelstandorten.

In Abbildung 8 ist weiterführend die räumliche Verteilung der erklärten Varianz durch die ersten beiden Hauptkomponenten des MTnw, MThw und MThb abgebildet. Deutlich zu

erkennen ist, dass die Verteilung der erklärten Varianz der PC1 im Fall des MThw sehr einheitlich über das Untersuchungsgebiet verläuft. Während rund 94 % der Variabilität bereits durch die erste Hauptkomponente abgebildet wird, werden nur noch etwa 2 % durch die zweite Hauptkomponente beschrieben. Bereits hier lässt sich die These ableiten, dass das MThw durch ein gemeinsames Signal geprägt ist und weniger sensibel auf lokale Effekte reagiert. Wesentlich inhomogener fällt die räumliche Verteilung der erklärten Varianz der beiden Hauptkomponenten des MThb und besonders des MTnw aus. Während an einer Vielzahl der Pegel ebenfalls eine hohe erklärte Varianz der PC1 festzustellen ist, sind es vereinzelte Pegel, an denen diese wesentlich geringer ausfällt. Hier sind besonders die Tidepegel Delfzijl, Emden Neue Seeschleuse, Cuxhaven, Büsum und Dagebüll zu nennen. Dies liefert einen Hinweis darauf, dass lokale Effekte eine größere Wirkung auf das MTnw haben und diese Abweichungen vom gemeinsamen Signal eher lokal beschränkt sind.

# 4.3 Anwendungsbeispiele

Veränderungen im MThb lassen sich bereits mithilfe der Entwicklung der MThw und MTnw beschreiben. Aus diesem Grund werden nachfolgend für die Pegel Büsum, Cuxhaven Steubenhöft und Bremerhaven exemplarisch die Entwicklungen und Bruchpunkte aller drei untersuchten Tideparameter (MTnw, MThw und MThb) sowie deren Differenzenzeitreihen gemeinsam betrachtet. Weiterhin wird der Einfluss von detektierten Bruchpunkten untersucht. Hierzu wurden zusätzlich Trendanalysen der Zeitreihensegmente vor und nach einem signifikanten Bruchpunkt durchgeführt. Abschließend werden potentielle Ursachen der Bruchpunkte diskutiert und physikalische Begründungen herausgearbeitet. Eine wesentliche Hilfestellung bei der Zuordnung von detektierten Bruchpunkten zu durchgeführten Baumaßnahmen liefert der im Rahmen des Projekts angefertigte Baumaßnahmenkatalog vom Projektpartner LKN.SH (Lehmann 2018). Hier wurde eine Zusammenstellung und Katalogisierung von für das Projekt signifikanten Baumaßnahmen an der SH-Küste erstellt. Zusätzlich wurden die sich durch signifikante Bruchpunkte identifizierten Teilzeitreihen hinsichtlich linearer Trends untersucht. Im Weiteren aufgeführt und auch in der graphischen Darstellung der Zeitreihen abgebildet sind nur signifikante lineare Trends der Teilzeitreihen (Definition Signifikanz vgl. Kapitel 3.1). Teilzeitreihen ohne signifikante mittlere Änderung werden nicht dargestellt. Die detaillierten Untersuchungen und Auswertungen der anderen verwendeten Pegelstandorte sind in ausführlicher Form dem Abschlussbericht (Ebener et al. 2020) zu entnehmen.

# 4.3.1 Büsum

Der Pegel Büsum im Norden der Meldorfer Bucht weist als einziger Tidepegel im Untersuchungsgebiet keinen signifikanten Trend im MThb über den gesamten Untersuchungszeitraum auf (vgl. Abbildung 9). Die Ursache ist, dass beide mittleren Tidewasserstände eine Zunahme in ähnlicher Größenordnung erfahren haben und sich die Differenz der beiden Größen folglich nicht wesentlich erhöht hat. Während sich die Differenz zwischen Beobachtung und Rekonstruktion im MThw nahezu nicht verändert hat, ist die Differenz zwischen Beobachtung und Rekonstruktion im MTnw drastisch angestiegen. Eine starke lokale Beeinflussung des MTnw scheint somit stattgefunden zu haben. In der Differenzenzeitreihe des MThb konnte ein Bruchpunkt im Jahr 1974 (95%-Vertrauensintervall: 1972– 1988) festgestellt werden. Im Gegensatz zu dem nicht signifikanten Trend der Beobachtungszeitreihe über den gesamten Zeitraum sinkt das MThb in den Folgejahren des Bruchpunkts bis zum Ende des Untersuchungszeitraums deutlich ab. Die Ursache des Bruchpunkts führte somit auch dazu, dass die Differenz zum rekonstruierten gemeinsamen Signal ansteigt und die gesamte Zeitreihe keinen signifikanten Trend enthält. Der Anstieg im gemeinsamen Signal wurde also durch ein lokales Absinken überlagert. Auch wenn die Differenzenzeitreihen der beiden Wasserstände keine signifikanten Bruchpunkte aufweisen, so erkennt man deutliche erhöhte Werte der Wahrscheinlichkeit für einen Bruchpunkt. Diese Peaks liegen im Zeitraum zwischen etwa 1970 und 1990 für das MThw und etwas früher um 1970 im MTnw. Im Fall beider Tidewasserstände liegen die Peaks, wenn auch nur geringfügig, unterhalb der 95% igen Vertrauensgrenze. Dennoch können diese Ausschläge ein Indiz auf eine lokale Beeinflussung sein, und die erhöhte Wahrscheinlichkeit in den 1970er Jahren unterstreicht das Vorhandensein des Bruchpunkts im MThb im gleichen Zeitraum. Potentieller Auslöser dieser Veränderung ist die Eindeichung der Meldorfer Bucht zwischen 1969 und 1978. Zugeordnet wird diese Baumaßnahme dem Bruchpunkt aufgrund der Überschneidung des Bruchpunktes mit der Bauzeit und aufgrund der Lage des Pegels innerhalb der Meldorfer Bucht. Zudem hat die Meldorfer Bucht durch den Bau der beiden Speicherkooge Nord und Süd (zusammengefasst: Eindeichung der Meldorfer Bucht) insgesamt mehr als 31 Mio. m3 Tidevolumen verloren (Lehmann 2018). Eine mögliche Folge ist, dass die in die Bucht einlaufende Tidewelle wesentlich früher am Deich reflektiert wird, somit einen kürzeren Weg zurücklegt und es zu veränderten Interferenzmustern und ggf. zusätzlichen Resonanzeffekten innerhalb der Bucht kommt.

Trotz der erhöhten Wahrscheinlichkeit für einen Bruchpunkt in den 1990er Jahren im MThw kann diese nicht als signifikanter Bruchpunkt gedeutet werden. Dennoch wurde nach einer möglichen Ursache für den Peak gesucht. Es konnte jedoch keine Baumaßnahme oder ähnliches ermittelt werden, die sich dem Peak durch räumliche und zeitliche Nähe zuordnen ließe und anschließend durch die beobachtete Entwicklung nach dem Peak plausibilisiert werden könnte. Dieses Beispiel zeigt allerdings auch die Grenzen des Verfahrens auf. So können in den Zeitreihen Unstetigkeiten enthalten sein, für die keine konkreten Ursachen identifiziert werden können. Grund dafür kann z. B. eine mangelhafte Informationsgrundlage zu durchgeführten Baumaßnahmen sein. Zudem besteht die Möglichkeit, dass auftretende Bruchpunkte nicht zeitgleich mit den durchgeführten Maßnahmen eintreten. Aber auch andere Ursachen lassen sich nicht ausschließen, die im Rahmen der durchgeführten Analysen nicht detailliert untersucht und plausibilisiert werden konnten. Dazu können u. a. morphologische Prozesse und Entwicklungen gehören, deren Kipppunkt erst Jahre später erreicht wird. Insbesondere in einem solch komplexen hydraulischen System wie dem der Nordsee kann nicht davon ausgegangen werden, dass kontinuierliche Änderungen von groß- und kleinräumigen Randbedingungen auch immer direkte Systemreaktionen verursachen. Wie auch bei dem Prinzip der Kipppunkte im Klimasystem (vgl. u. a. Lenton et al. 2008) sind die Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung nicht immer stetig und unterliegen zahlreichen nichtlinearen Wechselwirkungen. Aus diesem Grund können ggf. küstenhydrologische Auswirkungen sichtbar werden, denen keine konkrete Ursache durch offensichtliche geographische oder zeitliche Nähe zugeordnet werden kann.



Abbildung 9: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzenzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Büsum.

#### 4.3.2 Cuxhaven Steubenhöft

Während in der Gesamtzeitreihe kein signifikanter linearer Trend des MTnw beobachtet werden konnte, steigen sowohl das MThw als auch das MThb am Pegel Cuxhaven Steubenhöft im Mündungsbereich der Elbe um 2,9  $\pm$  0,7 bzw. 2,1  $\pm$  1,8 mm/a an. Wie in Abbildung 10 dargestellt, konnte jeweils in den Differenzenzeitreihen von MTnw und MThb ein signifikanter Sprung im Jahr 1977 (95%-Vertrauensbereich: 1975–1978) festgestellt werden. Betrachtet man die Zeitreihe separat vor und nach dem Bruchpunkt, so fällt auf, dass die Differenz zwischen der Beobachtungszeitreihe und der Rekonstruktion im MTnw zunächst ansteigt und mit dem Bruchpunkt abrupt absinkt und in den Folgejahren wieder deutlich zunimmt. Ab den 1990er Jahren steigt die Differenz wieder auf ein ähnliches Niveau wie vor dem Bruchpunkt. Das unstetige Absinken der Differenz hat offensichtlich dazu geführt, dass das großräumige ansteigende Signal überlagert wird und keine wesentliche mittlere Änderung im MTnw beobachtet werden konnte. Mit dem Bruchpunkt im MThb verändert sich auch hier die Differenz plötzlich. Vor dem Jahr 1977 verändert sich die Differenz zwischen der Beobachtungszeitreihe und der Rekonstruktion unwesentlich und steigt dann schlagartig mit dem Bruchpunkt an, um ab diesem Zeitpunkt bis zum Ende des Untersuchungszeitraums wieder stetig abzunehmen. Eine ähnliche Entwicklung lässt sich auch in den beobachteten MThb feststellen, da mit dem Bruchpunkt das MThb sprunghaft ansteigt und bis zum Ende der Zeitreihe wieder leicht absinkt. Lediglich im

MThw lassen sich für die Differenzen keine wesentlichen Änderungen feststellen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass lokale Effekte am Pegel Cuxhaven Steubenhöft keinen erkennbaren Einfluss auf die MThw aufweisen.



Abbildung 10: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzenzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Cuxhaven Steubenhöft.

Als potentielle Ursache der unstetigen Veränderung in den späten 1970er Jahren des MTnw und MThb ist der Ausbau der Unterelbe von 1974 bis 1978 zu nennen (FGG Elbe 2007). Grundsätzliche Effekte von Vertiefungsmaßnahmen in Ästuaren sind abfallende MTnw und ansteigende MThw, somit in Folge auch erhöhte MThb. Dabei verursacht eine Vertiefung eine geringere Dämpfung der einschwingenden Tidewelle und es wird mehr Energie in das Ästuar transportiert. Die Absenkung des MTnw ist dabei meist wesentlich größer als der simultane Anstieg des MThw, da die ausbaubedingte relative Veränderung im MTnw i.d. R. wesentlich größer ist als im Fall des MThw (vgl. u. a. Niemeyer 1999, Malcherek 2010). Abbildung 10 zeigt, dass das Absinken des Niedrigwassers einen signifikanten Bruchpunkt zur Folge hat; im MThw lässt sich dies jedoch nicht als statistisch relevante unstetige Änderung feststellen.

# 4.3.3 Bremerhaven

Am Pegel Bremerhaven im Mündungsbereich der Weser konnte für alle drei untersuchten Tideparameter ein signifikanter linearer Trend festgestellt werden. Während das beobachtete MTnw eine Reduzierung um  $2,2 \pm 0,9$  mm/a erfahren hat, ist das MThw um  $3,7 \pm 0,8$  mm/a angestiegen (vgl. Abbildung 11). Als Folge der gegenläufigen Entwicklung der Tidewasserstände hat auch das MThb um  $5,9 \pm 1,2$  mm/a deutlich zugenommen. Neben den Veränderungen in der Beobachtungszeitreihe konnten auch Veränderungen und ein Bruchpunkt in der Differenz zwischen Beobachtung und Rekonstruktion für das MTnw festgestellt werden. Zudem weist die Differenzenzeitreihe des MTnw einen signifikanten Bruchpunkt im Jahr 1995 (95%-Vertrauensintervall: 1991–2000) auf, mit dem zeitgleich eine Erhöhung der Differenz einhergeht und die Rekonstruktion wesentlich höhere MTnw beschreibt, als tatsächlich beobachtet wurden. Daraus lässt sich folglich ableiten, dass die Ursache des Bruchpunkts auch ein plötzliches Absinken des MTnw hervorgerufen hat.



Abbildung 11: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzenzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Bremerhaven.

Betrachtet man die Entwicklung des groß- und des kleinräumigen Signals vor und nach dieser unstetigen Veränderung, so scheint das MTnw insbesondere vor dem Bruchpunkt stetig zu sinken. Mit dem Bruchpunkt selbst tritt eine weitere, deutlichere Reduzierung auf, woraufhin ein stagnierender Verlauf folgt. Weitere erhöhte Wahrscheinlichkeiten auf unstetige Veränderungen sind in den Jahren 1956 und 1982 zu finden. Demzufolge scheinen auch in diesen Jahren kleinräumige Änderungen eingetreten zu sein, deren Auswirkung jedoch mit einer 95% igen Vertrauensgrenze nicht als signifikanter Bruchpunkt betrachtet werden kann. Dennoch kann aufgrund einer visuellen Auswertung der Differenzenzeitreihe das MTnw bis Ende der 1950er Jahre näherungsweise als stagnierend beschrieben werden, woraufhin sich eine stetige Abnahme der Differenz im MTnw ereignet.

Der unstetigen Änderung des MTnw im Jahr 1995 lässt sich zeitlich und räumlich der SKN-14 m Ausbau der Außenweser in den Jahren 1998 bis 1999 zuordnen, bei dem die Außenweser sowohl vertieft als auch verbreitert wurde und das Buhnensystem vervollständigt wurde (Schubert und Rahlf 2003). Auch dem Absinken des MTnw ab Beginn der 1960er Jahre konnte eine potentielle Ursache zugeordnet werden. Im Zeitraum von den 1950er bis in die 1970er Jahre wurden ebenfalls Vertiefungsmaßnahmen in der Außenweser zur Wiederherstellung des SKN-10 m durchgeführt (Vierfuß 2003). Die hypothetische Zuordnung der Bruchpunkte zu den genannten Vertiefungsmaßnahmen lässt sich durch die grundsätzlichen physikalischen Auswirkungen solcher Strombaumaßnahmen plausibilisieren. Eine reine Vertiefung von Ästuaren führt zu einer geringeren Dämpfung der in ein Ästuar einschwingenden Tidewelle. Die Folge ist eine Zunahme des MThb, der insbesondere durch eine starke Absenkung des MTnw hervorgerufen wird. Aber auch ansteigende MThw sind eine wesentliche Folge von Fahrrinnenvertiefungen (vgl. u. a. Niemeyer 1999, Malcherek 2010). Nach dem Bruchpunkt im Jahr 1995 sind deutlich reduzierte MTnw festzustellen, wodurch sich auch ein Peak der Wahrscheinlichkeit für einen Bruchpunkt im lokalen Signal des MThb ausprägt, aber mit der gewählten 95% igen Vertrauensgrenze keinem signifikanten Bruchpunkt entspricht. Ebenso lässt sich keine signifikante unstetige Veränderung im MThw feststellen, sodass die Vertiefungen wie erwartet weniger Einfluss auf das MThw gehabt haben. Während also die lokalen Vertiefungsmaßnahmen der Außenweser das MTnw am Pegel Bremerhaven stark beeinflusst haben, scheint das MThw vordergründig durch gemeinsame Entwicklungen aufgrund von großräumigen Einflüssen geprägt zu sein.

#### 4.4 Untersuchung von räumlichen Mustern

Weiterführend wurden die detektierten Bruchpunkte nicht nur an den einzelnen Pegelstandorten separat untersucht, sondern zusätzlich in einer Gesamtübersicht getrennt nach den drei Tideparametern, um räumliche Muster zu detektieren. Die Übersicht der Bruchpunkte im MThb ist in der Abbildung 12 abgebildet. Hier ist zu erkennen, dass die Verteilung der wahrscheinlichsten Lage von enthaltenen Bruchpunkten stark über das Untersuchungsgebiet variiert. Es lässt sich lediglich ein relativ nah beieinander liegendes Pegelpaar finden, das im selben Zeitraum erhöhte Wahrscheinlichkeiten für einen Bruchpunkt aufweist. Dabei handelt es sich um die Pegel Cuxhaven Steubenhöft und Büsum, mit einer Entfernung von ca. 30 km (Luftlinie, keine Landmasse zwischen den Pegeln), die in den 1970er Jahren beide mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit eine unstetige Veränderung des MThb aufweisen. Jedoch ist nach den pegelspezifischen Auswertungen (vgl. Kapitel 4.3.1 und 4.3.2) eine gemeinsame Ursache dieser Änderung nahezu ausgeschlossen bzw. nicht zu erkennen. Alle weiteren Pegel, die in einem gemeinsamen Zeitraum unstetige Veränderungen enthalten, sind deutlich weiter voneinander entfernt als das genannte Pegelpaar und folglich kann davon ausgegangen werden, dass die Entfernung gemeinsame lokale Einwirkungen ausschließt. Auch lässt sich kein getrenntes Muster für die beiden Küstenabschnitte Niedersachsens und Schleswig-Holsteins finden.



Abbildung 12: Wahrscheinlichkeiten der Bruchpunkt-Zeitpunkte der Differenzenzeitreihen des MThb im Zeitraum 1935 bis 2015.

Auch bei der Betrachtung der Übersichten für die Bruchpunkte der beiden Tidewasserstände (vgl. für MTnw: Abbildung 13 und MThw: Abbildung 14) können keine eindeutigen räumlichen oder zeitlichen Muster abgeleitet werden. Einzig die Pegel Norderney Riffgat und Hafen, Emden Neue Seeschleuse und Borkum Südstrand weisen gemeinsam in der Mitte der 1960er Jahre erhöhte Wahrscheinlichkeiten für einen Bruchpunkt auf und liegen jeweils etwa 40 km Luftlinie voneinander entfernt. Doch betrachtet man die Lage der Pegel - insbesondere des Pegels Emden Neue Seeschleuse - genauer, so ist eine gemeinsame Ursache für die unstetigen Änderungen sehr unwahrscheinlich. Der Pegel Emden Neue Seeschleuse liegt im Bereich der Dollart Bucht und damit im Mündungsbereich der Ems. Eine Tidewelle aus der Nordsee muss demnach zunächst den zwischen den Pegeln Emden Neue Seeschleuse und Borkum Südstrand gelegenen Pegel Delfzijl, ebenfalls im Mündungsbereich der Ems gelegen, passieren. Demnach ist zu erwarten, dass gemeinsame Änderungen der drei genannten Pegel ebenfalls am Standort Delfzijl sichtbar werden sollten. Hier lässt sich jedoch kein Bruchpunkt in den 1960er Jahren feststellen. Es kann folglich davon ausgegangen werden, dass die hohen Wahrscheinlichkeiten für einen Bruchpunkt an den Pegeln Emden Neue Seeschleuse, Borkum Südstrand und Norderney Riffgat und Hafen keine gemeinsame Ursache besitzen und damit kein räumliches Muster darstellen.



Abbildung 13: Wahrscheinlichkeiten der Bruchpunkt-Zeitpunkte der Differenzenzeitreihen des

MTnw im Zeitraum 1935 bis 2015. Es scheinen also keine zeitlichen und räumlichen Muster der unstetigen Veränderungen vorhanden zu sein. Folglich besitzen die detektierten Bruchpunkte sehr wahrscheinlich unterschiedliche Ursachen, die jeweils eher kleine Wirkungsradien aufweisen. Diese Betrachtung der Bruchpunktanalyse hinsichtlich räumlicher und zeitlicher Gemeinsamkeiten der

Pegelstandorte im Untersuchungsgebiet bestätigt die zugrunde liegende These, dass die Auswirkungen von einzelnen kleinräumigen (Bau-) Maßnahmen räumlich sehr begrenzt zu sein scheinen und die Änderungen der Tideparameter lokal stark variieren.



Abbildung 14: Wahrscheinlichkeiten der Bruchpunkt-Zeitpunkte der Differenzenzeitreihen des MThw im Zeitraum 1935 bis 2015.

# 5 Zusammenfassung

An der deutschen Nordseeküste ist es seit der Mitte des 20. Jahrhunderts zu großen Veränderungen der Tidedynamik bzw. Ausprägung der Gezeiten gekommen. Die Entwicklungen spiegeln sich insbesondere in einem Anstieg des MThb wieder, wobei an der Küste Schleswig-Holsteins größere Veränderungen im Vergleich zur Nordseeküste Niedersachsens stattgefunden haben. Die Trends des MTnw hingegen variieren sowohl in ihrer Ausprägung als auch zwischen positiven und negativen Trends über das gesamte Untersuchungsgebiet. Diese inhomogene Entwicklung des MTnw in der Deutschen Bucht liefert ein erstes Indiz für die Beeinflussung des Tidegeschehens durch lokale Maßnahmen/Einflüsse an unterschiedlichen Küstenabschnitten. Demnach scheinen die abgeleiteten Veränderungen der Tidewasserstände im Untersuchungsgebiet sowohl eine gemeinsame Entwicklung durch großräumige Einwirkungen als auch eine lokale Komponente zu enthalten. Diese lokalen Komponenten können z. B. durch bauliche Maßnahmen und lokale morphologische Entwicklungen verursacht werden. Die vorgestellte Methodik der Kombination verschiedener statistischer Verfahren ermöglicht es, diese beiden genannten Komponenten an den untersuchten Pegelstandorten im Untersuchungsgebiet zu trennen. Die zugrunde gelegte These der Methodik ist, dass die ähnlichen Trends insbesondere der MThw- und MThb-Zeitreihen einer gemeinsamen und großräumigen Beeinflussung unterliegen und sich dies in einem gemeinsamen Signal äußert. Durch die starke Variation der Trends der MTnw wird deutlich, dass diese Pegel gleichzeitig auch unter dem Einfluss kleinräumiger und lokaler Effekte stehen.

Einer der wesentlichen Schritte der Methodik zur Separierung der klein- und großräumigen Signale in jeder Pegelzeitreihe ist die sog. Hauptkomponentenanalyse (PCA). Es wurde davon ausgegangen, dass die erste Hauptkomponente (PC1), die den Großteil der Varianz im Untersuchungsgebiet beschreibt, somit auch die gemeinsamen Entwicklungen abbildet. Demzufolge entsprechen alle weiteren, in den höheren Hauptkomponenten enthaltenen Veränderungen den lokalen Signalen. Rund 90 % der Varianz wird im Untersuchungsgebiet im Fall der MThw- und MThb-Zeitreihen durch die erste PC (PC1) abgebildet, wohingegen das MTnw nur zu 70 % durch PC1 repräsentiert wird. Dies bedeutet, dass MThw und MThb signifikant stärker von großräumigen Einflüssen beeinflusst werden. Zudem weisen die Zeitreihen des MTnw räumlich variierende erklärte Varianzen der niedrigeren PCs auf, und nur rund 70 % lassen sich bereits über das gemeinsame Signal beschreiben. Regionale Entwicklungen und räumlich begrenzte Systemveränderungen bilden sich also in den höheren PCs ab. Für jeden Pegelstandort lässt sich also zusätzlich zu den Beobachtungszeitreihen über eine Rekonstruktion mit der ersten Hauptkomponente sowohl das gemeinsame Signal ermitteln als auch über Differenzenbildung aus der Zeitreihen eliminieren.

Nachdem das gemeinsame Signal aus jeder Aufzeichnungszeitreihe separiert wurde, konnten nun die lokalen Effekte über die Differenzenzeitreihen detaillierter untersucht werden. Mithilfe einer Bruchpunktanalyse lassen sich unstetige Veränderungen in den Tidekennwerten detektieren. Angewendet wurde die Bruchpunktanalyse auf die jeweils ermittelten Differenzen zwischen Beobachtungszeitreihen und dem gemeinsamen Signal an den einzelnen Pegelstandorten. Des Weiteren können die linearen Trends der Teilzeitreihen betrachtet werden, die sich durch die detektierten Bruchpunkte ergeben. Dadurch lässt sich wiederum die Entwicklung vor und nach einem Bruchpunkt vergleichen. Durch die zeitliche und räumliche Zuordnung der unstetigen Änderungen können für die Bruchpunkte potentielle Ursachen gefunden werden. Mithilfe der eingetretenen Änderung nach einem Bruchpunkt lassen sich die zugeordneten Ursachen plausibilisieren und physikalisch erklären. Zusätzlich dazu können die Bruchpunkte der lokalen Signale in einer gemeinsamen Betrachtung Aufschluss über räumliche Muster geben. So lässt sich der Wirkungsradius einzelner plausibilisierter Ursachen wie bspw. größerer Baumaßnahmen beschreiben. Im untersuchten Gebiet jedoch konnten durch eine solche Betrachtung für keinen der drei Tideparameter ein räumliches Muster oder zusammenhängende Bruchpunkte eindeutig identifiziert werden. Demzufolge scheint die Wirkung von Baumaßnahmen lokal begrenzt zu sein. Anhand von drei Beispielen konnte jedoch gezeigt werden, dass sich durch die Methodik Auswirkungen von Baumaßnahmen in den Zeitreihen feststellen lassen, die zudem physikalisch plausibel erscheinen. Die Methodik wird daher als geeignet erachtet, großräumige bzw. gemeinsame Signale in Wasserstandsaufzeichnungen zu separieren und hinsichtlich einzelner lokaler Effekte zu untersuchen.

Mit dem vorgestellten Verfahren konnten verschiedene Baumaßnahmen bzw. deren Auswirkungen in den Beobachtungszeitreihen detektiert werden. Ausbaumaßnahmen und Vertiefungen von Gewässerabschnitten der drei großen Nordseeästuare wurden als unstetige Veränderung, vorwiegend, aber nicht ausschließlich im MTnw, sichtbar. So sorgte die Vertiefung Elbe im Zeitraum von 1974 bis 1978 für eine unstetige Veränderung von MTnw und MThb am Pegel Cuxhaven Steubenhöft. Zudem führte der Ausbau der Außenweser in den Jahren 1998/99 zu einem Bruchpunkt an dem Pegel Bremerhaven. Auch die Eindeichungsmaßnahmen der Meldorfer Bucht zwischen 1969 und 1978 lassen sich sehr deutlich im MThb des Pegels Büsum erkennen und beschreiben durch ansteigendes MTnw und stagnierendes MThw. Weitere Umbaumaßnahmen wie bspw. Hafenumbaumaßnahmen am Pegel Delfzijl, ein Pegelversatz am dänischen Pegel Esbjerg und die Umstellung des Pegels Norderney Hafen auf Norderney Riffgat in den 1960er Jahren konnten mithilfe des vorgestellten Verfahrens detektiert werden (vgl. Ebener et al. 2020). An einigen anderen Pegeln wie bspw. Helgoland Binnenhafen und Dagebüll wurden ebenfalls ein bzw. zwei Bruchpunkte detektiert, die jedoch keiner Baumaßnahme oder einem lokalen Effekt zugeordnet werden können. Dies muss jedoch nicht zwingend auf einen Fehler im Verfahren hinweisen, sondern auch mangelhafte Informationsgrundlagen zu durchgeführten historischen Baumaßnahmen machen es unmöglich, allen kleinräumigen Änderungen Ursachen zuzuordnen. Auch andere Ursachen sind nicht auszuschließen, die im Rahmen dieser Studie nicht adressiert wurden, wie kleinräumige und nicht als Bruchpunkte detektierbare Änderungen. Darunter können bspw. morphologische Prozesse fallen und Entwicklungen, deren Kipppunkt (noch) nicht erreicht ist. Insbesondere in solch komplexen System wie dem der Nordsee kann nicht davon ausgegangen werden, dass kontinuierliche Änderungen von groß- und kleinräumigen Randbedingungen auch immer allmähliche Systemreaktionen verursachen. Wie auch bei dem Prinzip der Kipppunkte im Klimasystem (vgl. u. a. Lenton et al. 2008) können die Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung zahlreichen nichtlinearen Wechselwirkungen unterliegen. Aus diesem Grund können ggf. Auswirkungen von Einflüssen wie bspw. anthropogene Maßnahmen sichtbar werden, denen keine eindeutige Ursache zugeordnet werden können.

Auch wenn das vorgestellte Verfahren zur Trennung von großräumigen und lokalen Anteilen der Entwicklung in den Zeitreihen der Tidekennwerte Schlussfolgerungen auf die Wirkung von vereinzelten Baumaßnahmen zulässt, ist die weitere Entwicklung von optimierten Verfahren zur Quantifizierung der Auswirkungen unerlässlich. Weiterentwickelte oder neue Verfahren könnten zur Beantwortung der Forschungsfrage nach dem Anteil der beteiligten Prozesse beitragen. Auch ist noch nicht ganzheitlich geklärt, wie sich die räumliche Ausdehnung von einzelnen lokalen Effekten bestimmen lässt. Weiterführend ist es notwendig, neben der Auswertung von kleinräumigen Veränderungen die Ursachen für die deutlich ausgeprägteren großräumigen Entwicklungen zu verstehen. Dazu gehört die Beschreibung, welche großräumigen Effekte - bspw. ozeanographische Prozesse - anteilig zu den Entwicklungen beigetragen haben. Die zugrundeliegenden Prozesse und Wechselwirkungen für Änderungen der Tidedynamik sind noch nicht gänzlich verstanden und können nur mittels einer ganzheitlichen Betrachtung des Gesamtsystems Nordsee untersucht werden. Ein weiterer Aspekt, der in diesem Forschungsvorhaben nicht adressiert wurde, aber relevante Erkenntnisse in weiterführenden Analysen liefern kann, ist die zeitliche Variabilität. So könnte der Einfluss des saisonalen Zyklus auf die Entwicklung der Tidedynamik mithilfe einer höher aufgelösten Datengrundlage wie bspw. mit monatlichen Mittelwerten der Tideparameter untersucht werden.

# 6 Danksagung

Das Verbundprojekt ALADYN wurde vom 01. Oktober 2016 bis zum 30. September 2019 vom BMBF im Projekt Küstenmeerforschung des Rahmenprogramms Forschung für Nachhaltige Entwicklung (FONA 3) durch den Projektträger Jülich gefördert. (BMBF-Förderkennzeichen: 03F0758A). Wir bedanken uns für die gute Betreuung durch den Projektträger Jülich und die fruchtbare Zusammenarbeit mit der Projektbegleitenden Gruppe, bestehend aus Sylvin Müller-Navarra, Volker Neeman, Thomas Strotmann, Frank Thorenz und Norbert Winkel.

Die im Rahmen des von der DFG geförderten Vorhabens TIDEDYN (Förderkennzeichen: 290112166) erzielten Ergebnisse konnten für die Entwicklung der statistischen Methodik genutzt werden und hatten hinsichtlich der Zielsetzung von ALADYN sehr positive Synergieeffekte zur Folge.

# 7 Literaturverzeichnis

Abdi, H.; Williams, L. J.: Principal component analysis. In: WIREs Comp Stat, 2 (4), 433–459, https://doi.org/10.1002/wics.101, 2010.

Arns, A.; Wahl, T.; Wolff, C.; Vafeidis, A. T.; Haigh, I. D.; Niehüser, S.; Jensen, J.: Nonlinear interaction modulates global extreme sea levels, coastal flood exposure, and impacts. In: Nature Communications, 11, Article number: 1918, https://doi.org/10.1038/s41467-020-15752-5, 2020.

Bartels, J.: Gezeitenkräfte, Handbuch der Physik, Bd. XLVIII, 1952.

Cowtan, K.; Way, G. R.: Coverage bias in the HadCRUT4 temperature series and its impact on recent temperature trends. In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 140, 1935–1944, https://doi.org/10.1002/qj.2297, 2014.

Cressie, N.: The origins of kriging. In: Mathematical Geology., 22, 3, 239-252, 1990.

Dangendorf, S.; Jensen, J.: Untersuchungen zur Detektion von Instationaritäten in küstenhydrologischen Zeitreihen. In: Mitteilungen des Forschungsinstituts Wasser und Umwelt der Universität Siegen, CoastDoc Seminar 2010, Heft 2, 2011.

Ebener, A.; Arns, A.; Jänicke, L.; Dangendorf, S.; Jensen, J.: Untersuchungen zur Entwicklung der Tidedynamik an der deutschen Nordseeküste - Ein Ansatz zur Identifizierung und Quantifizierung von Tideveränderungen durch lokale Systemänderungen. ALADYN-A: Analyses of observed tidal dynamics; Abschlussbericht zum KFKI-Projekt ALADYN (03F0756A), 2020.

Führböter, A.; Jensen, J.: Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht. In: Die Küste, 42, 78–100, 1985.

Haigh, I. D.; Pickering, M. D.; Green, J. A. M.; Arbic, B. K.; Arns, A.; Dangendorf, S.; Hill D.; Horsburgh, K.; Howard, T.; Idier, D.; Jay, D. A.; Jänicke, L.; Lee, S. B.; Müller, M.; Schindelegger, M.; Talke, S. A.; Wilmes, S.-B.; Woodworth P. L.: The Tides They Are A-Changin': A comprehensive review of past and future non-astronomical changes in tides, their driving mechanisms and future implications. In: Review of Geophysics, 58, 1, https://doi.org/10.1029/2018RG000636, 2020.

Idier, D.; Bertin, X.; Thompson, P.; Pickering, M. D.: Interactions Between Mean Sea Level, Tide, Surge, Waves and Flooding: Mechanisms and Contributions to Sea Level Variations at the Coast In: Surveys in Geophysics, 40, 1603–1630, https://doi.org/10.1007/s10712-019-09549-5, 2019.

Jänicke, L.; Ebener, A.; Dangendorf, S.; Arns, A.; Niehüser, S.; Haigh, I.; Woodworth, P.; Jensen, J.: Assessing 20th century tidal range changes in the North Sea. In: Journal of Geophysical Research: Oceans, https://doi.org/10.1029/2020JC016456, 2021.

Jensen, J.; Mügge, H.-E.; Visscher, G.: Untersuchungen zur Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht. In: Die Küste, 47, 135–161, 1988.

Jensen, J.; Mügge, H.-E.; Schönfeld, W.: Analyse der Wasserstandsentwicklung und Tidedynamik in der Deutschen Bucht. Abschlussbericht zum KFKI-Projekt – Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht. In: Die Küste, 53, 211–275, 1992.

Jensen, J., Frank, T.; Wahl, T.: Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste (AMSeL). In: Die Küste, 78, 59–163, 2011.

Jolliffe I. T.: Principal Component Analysis, Springer Series in Statistics, https://doi.org/10.1007/b98835, 2002.

Krige, D. G.: A Statistical Approaches to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand. Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa, 52, 119–139, 1951.

Lenton, T. M.; Held, H.; Kriegler, E.; Hall, J. W.; Lucht, W.; Rahmstorf, S.; Schellnhuber, H. J.: Tipping elements in the Earth's climate system. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 105, 6, 1786–1793; https://doi.org/10.1073/pnas.0705414105, 2008.

Malcherek, A.: Tidedynamik in Ästuaren. In: Malcherek, A.: Gezeiten und Wellen. 81–109, https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9764-0\_5, 2010.

Mawdsley, R. J.; Haigh I. D.: Spatial and Temporal Variability and Long-Term Trends in Skew Surges Globally. In: Front. Mar. Sci., 3, 29, https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00029, 2016.

Niemeyer, H. D.: Change of mean tidal peaks and range due to estuarine waterway deepening; 26th International Conference on Coastal Engineering; Copenhagen, Denmark; https://doi.org/10.1061/9780784404119.251, 1999.

Rigor, I. G.; Colony, R. L.; Martin S.: Variations in surface air temperature observations in the arctic. In: J. Clim., 13, 1979–1997, 2000.

Ruggieri, E.: A Bayesian approach to detecting change points in climatic records. In: Int. J. Climatol., 33, 2, 520–528, https://doi.org/10.1002/joc.3447, 2012.

Salas, J. D.: Analysis and Modelling of Hydrologic Time Series. In: Maidment, D. R. (Ed.): Handbook of Hydrology, McGraw-Hill Inc., New York; 1993.

Şanal, Z.: Mathematik für Ingenieure, Grundlagen – Anwendungen in Maple. 2015.

Schönfeld, W.; Jensen, J.: Anwendung der Hauptkomponentenanalyse auf Wasserstandszeitreihen von deutschen Nordseepegeln. Zwischenbericht zum KFKI-Projekt "Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht". In: Die Küste, 52, 191–204, 1991.

Schubert, R.; Rahlf, H.: Hydrodynamik des Weserästuars. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 86, Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, 49–53, 2003.

Straub, H.: Langzeitverhalten von hydrologischen Größen. KLIWA-Symposium 2004. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Karlsruhe, 2004.

Vierfuß, U.: Realisierte Strombaumaßnahmen an der Weser, Grundlagen für Strombau-Konzeptionen an Tideästuaren. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Hamburg, 2003.

Wahl, T.; Jensen, J.; Frank, T.: Changing Sea Level and Tidal Dynamics at the German North Sea Coastline. Proc. of the Coastal Cities Summit 2008 – Values and Vulnerabilities, St. Petersburg, Florida, USA, 2008.

Weiße, R., Meinke, I.: Meeresspiegelanstieg, Gezeiten, Sturmfluten und Seegang; In: Klimawandel in Deutschland; Springer Spektrum; https://doi.org/10.1007/978-3-662-50397-3, 2017.

# Modellgestützte Untersuchungen zum Einfluss großräumiger Faktoren auf die Tidedynamik in der Deutschen Bucht

Xing Yi<sup>1</sup> und Ralf Weisse<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Helmholtz-Zentrum Geesthacht, xing.yi@hzg.de <sup>2</sup> Helmholtz-Zentrum Geesthacht

# Zusammenfassung

Seit etwa Mitte des 20. Jahrhunderts wird an den Pegeln entlang der deutschen Nordseeküste ein zum Teil beschleunigter Anstieg des mittleren Tidenhubs beobachtet. Dieser Anstieg verläuft nicht kontinuierlich und ist von zum Teil erheblichen Schwankungen sowohl im Bereich von Jahren als auch von Jahrzehnten gekennzeichnet. Die Zunahme des Tidenhubs unterscheidet sich dabei von Pegel zu Pegel, ist aber generell mit einer Zunahme des im Küstenschutz bemessungsrelevanten mittleren Hochwassers verbunden. Zur Erklärung dieser Veränderungen kommen eine Reihe lokaler, regionaler und großskaliger Prozesse und deren Wechselwirkungen in Betracht. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, mit Hilfe modellgestützter und statistischer Untersuchen mögliche Beiträge regionaler und großräumiger Prozesse zu den beobachteten Veränderungen in der Tidedynamik in der Deutschen Bucht zu quantifizieren. Dabei zeigte sich, dass sich die beobachteten Veränderungen nicht durch einzelne Prozesse, sondern eher durch das Zusammenspiel sowohl großräumiger, regionaler als auch lokaler Faktoren erklären lassen.

# Schlagwörter

Gezeiten, Tidedynamik, Tidenhub, Deutsche Bucht, Nordsee, Modellierung, Bathymetrie, Morphologie, Baumaßnahmen, Meeresspiegelanstieg, atmosphärische Zirkulation

# Summary

Increases in mean tidal range are observed at most tide gauges along the German North Sea coast. This increase is most pronounced since about the 1950s and is superimposed with strong inter-annual and decadal variability. Amplitudes and characteristics of the increases vary among tide gauges but generally, a large-scale increase in mean tidal high water relevant for design of coastal protection is observed. There are a number of local, regional and large-scale processes that, together with their interactions, may potentially account for the observed changes. The objective of this study is to assess potential contributions from regional and large-scale factors using a combination of modelling and statistical approaches and techniques. No process was identified that could solely account for most of the observed changes. Instead, an interplay between large-scale, regional as well as local factors and their interactions appears to be the most likely explanation for the observed changes.

### Keywords

tides, tidal dynamics, tidal range, German Bight, North Sea, modelling, bathymetry, morphology, water works, sea level rise, atmospheric circulation

# 1 Einleitung

Die Gezeiten und der mit Ihnen verbundene Tidenhub sind eines der prägenden Merkmale an der deutschen Nordseeküste. Das Steigen und Fallen des Wassers und die mit Ihnen verbunden Strömungen und Kräfte verursachen Umlagerungen von Sediment, Veränderungen von Küstenlinien und beeinflussen die Dynamik von Ökosystemen oder die Befahrbarkeit von Fahrwassern und die Erreichbarkeit von Häfen. Der mittlere Tidenhub nimmt vom Inneren der Deutschen Bucht zu den Küsten hin deutlich zu und erreicht in Teilen der Wattgebiete Werte um etwa drei Meter und zum Teil noch höhere Werte in den Ästuaren (Kohlus und Küpper 1998).

Analysen von Tideparametern an den deutschen Nordseepegeln zeigen, dass sich diese Parameter sowohl langfristig verändert haben als auch Schwankungen im Bereich von Jahren und Jahrzehnten aufweisen. Insbesondere seit etwa Mitte des 20. Jahrhunderts kann aufgrund zum Teil gegenläufiger Entwicklungen in den mittleren Hoch- und Niedrigwassern eine Zunahme des mittleren Tidenhubs beobachtet werden (Jensen et al. 1992, Jensen und Mudersbach 2007). Dabei zeigen Trendanalysen, dass sich die beobachteten Veränderungen im Tidenhub im Wesentlichen aus einem an allen Pegeln zu beobachtenden Anstieg des mittleren Hochwassers und einem weniger einheitlichen Signal (Anstieg, Fall oder keine Änderung) des mittleren Niedrigwassers zusammensetzen (Ebener et al. 2020). Zur Erklärung dieser Veränderungen kommen sowohl großräumige Faktoren – wie z. B. der Anstieg des Meeresspiegels oder regionale Faktoren wie z. B. größere Baumaßnahmen und morphologische Veränderungen – als auch lokale Faktoren wie Änderungen in den Ästuaren in Frage (Haigh et al. 2020, Hollebrandse 2005, Hubert et al. 2020).

Ziel des Projekts "Analyse der beobachteten Tidedynamik in der Nordsee" (ALADYN 2016) war es, Beiträge verschiedener möglicher Faktoren zu den beobachteten Änderungen zu untersuchen und zu vergleichen. Aufgrund der räumlichen Kohärenz der beobachteten Änderungen sollte dabei insbesondere auch betrachtet werden, ob großräumige Einflussfaktoren (s. z. B. Jensen et al. 2020, Haigh et al. 2020) einen entscheidenden Einfluss haben können, oder ob es sich ausschließlich um die Überlagerung lokaler küstennaher Signale handelt. Im Kontext des Gesamtprojekts befasst die vorliegende Arbeit sich dabei ausschließlich mit der Analyse möglicher Beiträge großskaliger Veränderungen und Prozesse. Lokale Faktoren und kleinskalige Prozesse insbesondere im Bereich der Ästuare und ihr Einfluss auf die Deutsche Bucht sind in Hubert et al. (2020) beschrieben.

Im Folgenden werden kurz die Daten, das verwendete numerische Modell und dessen Setup sowie die wesentlichen statistischen Analysemethoden beschrieben (Kapitel 2). Die Ergebnisse sind in Kapitel 3 dargestellt. In Kapitel 3.1 werden zunächst kurz die beobachteten großräumigen Veränderungen von Tideparametern an 15 Pegeln entlang der deutschen Nordseeküste beschrieben. Die daran anschließenden Abschnitte befassen sich mit der Analyse möglicher Einflüsse großräumiger und regionaler Faktoren auf die Tidedynamik in der Deutschen Bucht. In Kapitel 3.2 wird dabei auf Beiträge durch Veränderungen
in der großräumigen Tidedynamik, d. h. durch von außen in die Nordsee gelangende Einflüsse, eingegangen. Dieses umfasst sowohl eine Diskussion möglicher Änderungen des großräumigen Gezeitensignals als auch mögliche Änderungen in Folge des bereits beobachteten Meeresspiegelanstiegs. In Kapitel 3.3 werden Einflüsse aufgrund langfristiger Schwankungen und Veränderungen im Windklima über der Nordsee analysiert. In Kapitel 3.4 wird schließlich auf mögliche Beiträge durch großskalige morphologische Veränderungen und durch veränderte Küstenlinien durch größere Baumaßnahmen in Schleswig-Holstein eingegangen. Abschließend erfolgt eine kurze Zusammenfassung und Einordnung der Ergebnisse (Kapitel 4).

### 2 Daten und Methoden

### 2.1 Daten

Bei den durchgeführten Arbeiten wurden beobachtete Tideparameter an 15 Pegeln entlang der deutschen Nordseeküste (Abbildung 1) für den Zeitraum 1958-2014 verwendet, wie sie innerhalb des Projekts ALADYN durch die Universität Siegen aufbereitet und zur Verfügung gestellt wurden (Ebener et al. 2020). In der vorliegenden Arbeit wurden dabei jährliche Werte des mittleren Tidenhubs (MThb, MTR), des mittleren Tidehochwassers (MThw, MHW), des mittleren Tideniedrigwassers (MTnw, MLW) sowie des mittleren Meeresspiegels (MSL) verwendet. Zusätzlich wurde auf Daten der an den nördlichen und südlichen Rändern der Nordsee gelegenen Pegel Aberdeen und Newlyn zurückgegriffen, die durch das British Oceanographic Data Centre (BODC 2020) zur Verfügung gestellt wurden.



Abbildung 1: Positionen und Namen der verwendeten 15 Pegel entlang der deutschen Nordseeküste. Die roten Zahlen beziehen sich auf die im Folgenden verwendete Nummerierung.

### 2.2 Numerische Modellierung

Für die im Folgenden beschriebenen numerischen Experimente wurde das im 2D-Modus genutzte Modell TRIM-NP (Tidal Residual Intertidal Mudflat – Nested and Parallized) (Kapitza und Eppel 1990, Pätsch et al. 2017) verwendet. Dieses geht zurück auf das ursprünglich von Casulli und Cattani (1994) entwickelte Modell TRIM. Das größte im Folgenden verwendete Modellgebiet umfasst die Nordsee und angrenzende Teile des Nordostatlantiks mit einer Auflösung von 12,8 km x 12,8 km. In dieses Gebiet wurden insgesamt drei weitere kleinere Gebiete mit verschiedenen Gitterweiten von 6,4 km, 3,2 km und 1,6 km genestet, wobei das feinste Gitter im Wesentlichen die südliche Nordsee und die Deutsche Bucht abdeckt (Abbildung 2). Für einige Experimente, wie zum Beispiel die Abschätzung des Einflusses von Baumaßnahmen oder von morphologischen Veränderungen, wurden zusätzliche Modellgebiete mit einer Gitterweite von 800 m x 800 m bzw. 400 m x 400 m aufgesetzt und genutzt, die im Wesentlichen die Deutsche Bucht abbilden. Die verwendeten Gitter und Auflösungen stellen einen Kompromiss dar, bei dem versucht wurde, zum einen großräumige Prozesse über längere Zeiträume, zum anderen aber auch den Einfluss größerer regionaler Faktoren zu berücksichtigen. Der Einfluss lokaler kleinräumiger Faktoren konnte und sollte mit diesem Setup nicht abgebildet werden.



Abbildung 2: Modellgebiet der genesteten Version des hydrodynamischen Modells TRIM-NP mit den Gebieten der vier Gitterweiten von 12,8 km (orange), 6,4 km (blau), 3,2 km (gelb) und 1,6 km (grün).

Das Modell TRIM-NP löst die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen auf einem regulären Arakawa-C-Gitter mit kartesischen Koordinaten, wobei tidebedingtes Trockenfallen und Überfluten küstennaher Gitterpunkte möglich ist. An den offenen Rändern des größten Modellgebiets wurden in allen Experimenten astronomische Tiden aus FES2004 (Lyard et al. 2006) in Form von Amplituden und Phasen von insgesamt 33 Partialtiden auf einem 0,125° x 0,125° Gitter vorgegeben. In Experimenten, in denen der atmosphärische Einfluss berücksichtigt wurde, wurden die bodennahen Winde durch eine Parametrisierung von Smith und Banke (1975) in Windschubspannungen umgerechnet. Die Parametrisierung wurde ursprünglich anhand von Windgeschwindigkeitsmessungen im Bereich von 3-21 m/s entwickelt. Jensen et al. (2006) zeigten jedoch, dass sie für die Nordsee auch bei höheren Windgeschwindigkeiten angewendet werden kann. Die Ausgabe von Wasserständen erfolgte bei allen Experimenten alle 20 Minuten. Basierend auf diesen Daten wurden anschließend entsprechende Kenngrößen wie MThw, MTnw, MThb etc. berechnet. Kalibrierung und Validierung des Modells sind in (Gaslikova et al. 2013) und (Pätsch et al. 2017) beschrieben.

### 2.3 Statistische Methoden

Zur Analyse großräumiger Veränderungen in der Tidedynamik und möglicher Einflüsse großräumiger Faktoren wurden zwei statistische Verfahren verwendet, die besonders gut in der Lage sind, großräumige Signale zu extrahieren. Dies sind zum einen die Analyse mittels empirischer Orthogonalfunktionen (EOFs, auch Hauptkomponenten-Analyse genannt) und zum anderen die kanonische Korrelationsanalyse (CCA) (Storch und Zwiers 2003). Bei der EOF Analyse wird ein orts- und zeitabhängiger Datenvektor  $\mathbf{x}(\vec{r}, t)$  (z. B. von Tideparametern an verschiedenen Pegeln) in eine Reihe von zeitunabhängigen Mustern (EOFs)  $p_k(\vec{r})$ und zugehörigen Zeitreihen (Amplituden)  $\alpha_k(t)$  zerlegt, so dass gilt:

$$\mathbf{x}(\vec{r},\mathbf{t}) = \sum_{k=0}^{n} \alpha_k(t) \, p_k(\vec{r}). \tag{1}$$

Dabei sind die Muster  $p_k(\vec{r})$  orthogonal zueinander und absteigend nach ihrem Anteil an erklärter Varianz sortiert. Das erste Muster erklärt somit den größten Anteil an der Gesamtvarianz und bildet damit in der Regel großskalige, an allen Orten gleichzeitig ablaufende Veränderungen ab. Um anschließend Zusammenhänge zwischen großskaligen Änderungen verschiedener Größen aufzuzeigen, wurde zum einen auf eine kanonische Korrelationsanalyse zurückgegriffen, bei der jeweils nach Linearkombinationen von EOF-Moden gesucht wird, deren Korrelation maximal ist, zum anderen wurden multiple Regressionsverfahren verwendet (Storch und Zwiers 2003).

### 3 Ergebnisse

## 3.1 Großräumige Veränderungen von Tideparametern entlang der deutschen Nordseeküste

Die Veränderung des mittleren Tidenhubs im Zeitraum 1958–2014 an den betrachteten 15 Pegeln ist in Abbildung 3 dargestellt. Mit der Ausnahme von Büsum zeigen alle Zeitreihen eine von inter-annualer und dekadischer Variabilität überlagerte Zunahme des MThb. Diese liegt im Bereich von einigen Millimetern pro Jahr und erreicht ihre größten Werte an den Pegeln Dagebüll, Bremerhaven und Emden, wo die beobachteten Anstiegsraten Werte von 5 mm/Jahr überschreiten. Details und weitergehende Untersuchungen sind in Ebener et al. (2020) dargestellt.

Diese Veränderungen können prinzipiell durch Veränderungen im mittleren Tidehochwasser, im mittleren Tideniedrigwasser oder durch Kombinationen von beiden verursacht und beschrieben werden. Um großräumige Veränderungen im MThw und MTnw zu identifizieren, wurden für die jährlichen Werte beider Parameter EOF-Analysen für den Zeitraum 1958–2014 durchgeführt (Abbildung 4). Für das MThw beschreibt die erste EOF kohärente großskalige Schwankungen von Jahr zu Jahr an den betrachteten Pegeln sowie einen kohärenten, an allen Pegeln zu beobachtenden großskaligen Anstieg von etwa 3,7 mm/Jahr im Untersuchungszeitraum. Mit dieser EOF lassen sich bereits 96 % der beobachteten Variabilität im MThw beschreiben, so dass davon auszugehen ist, dass die beobachteten Veränderungen im Wesentlichen großräumig sind. Für das MTnw liegt die erklärte Varianz der ersten EOF mit 79 % etwas niedriger. Auch hier lassen sich kohärente Schwankungen, allerdings kein statistisch signifikanter gemeinsamer Trend über den Untersuchungszeitraum feststellen. Dies legt nahe, dass die beobachteten Veränderungen an den 15 Pegeln durch eine Kombination großräumiger Veränderungen im MThw und eher kleinräumiger oder lokaler Veränderungen im MTnw zurückzuführen sein könnten. Diese Vermutung wird durch den stark lokalen Charakter der 2. EOF des MTnw gestützt, die einen deutlichen zum Teil gegenläufigen Trend an mehreren Pegeln beschreibt (Abbildung 4).



Abbildung 3: Veränderung des jährlichen mittleren Tidenhubs (blau) und des zugehörigen 5-jährig gleitenden Mittels an den 15 betrachteten Nordseepegeln.



Abbildung 4: Erste EOF des MThw (oben) sowie erste (Mitte) und zweite (unten) EOF des MTnw. Muster (rechts; dimensionslos; Stationsnummern s. Abbildung 1) und zugehörige Zeitreihen (links; in Metern; dick: 5-jährig gleitendes Mittel).

#### 3.2 Einfluss großräumiger Veränderungen ozeanographischer Faktoren

Prinzipiell können sowohl großräumige Veränderungen der Tidedynamik im Nordatlantik als auch der in der Vergangenheit beobachtete Anstieg des Meeresspiegels zu den Veränderungen der Tideparameter in der Deutschen Bucht beigetragen haben (Haigh et al. 2020). Auch wenn davon ausgegangen werden kann, dass sich die Tidedynamik im Nordatlantik selbst innerhalb geologischer Zeiträume nur langsam ändern wird, wurde der Faktor hier in Betracht gezogen, da Schelfmeere, die sich nahe der Resonanz befinden, möglicherweise sensitiv auf bereits geringfügige Änderungen reagieren können.

Im Folgenden wurde deshalb zunächst untersucht, ob und wenn ja welche Veränderungen in der Tidedynamik am Rande der Nordsee beobachtet werden konnten. Daran anschließend wurde untersucht, inwieweit eine mögliche resonante Verstärkung von am Rande der Nordsee beobachteten Signalen innerhalb der Nordsee wahrscheinlich ist.

Dazu wurden zunächst Zeitreihen des jährlichen MThb sowie der jährlichen MThw und MTnw an den Pegeln Aberdeen und Newlyn nahe der nördlichen und südlichen Nordseeränder untersucht. Für beide Pegel standen dazu relativ lange Beobachtungszeitreihen seit 1936 zur Verfügung. Es zeigte sich, dass an beiden Pegeln in den vergangenen etwa 80 Jahren die jährlichen mittleren Hoch- und Niedrigwasser signifikant angestiegen sind. Diese Änderungen liefen jedoch in etwa parallel, so dass sich der mittlere Tidenhub an beiden Pegeln, abgesehen von deutlichen nodalen Schwankungen, die am Pegel Aberdeen zum Beispiel im Bereich von etwa ein bis zwei Dezimetern liegen, nicht signifikant geändert hat. Dieses wird durch frühere Untersuchungen von z. B. Cartwright (1972) gestützt, der für den Pegel Brest zwischen 1711 und 1936 keine Veränderung im Tidenhub feststellen konnte.

Um zu untersuchen, ob dennoch Signale vom Rand der Nordsee, wie z. B. nodale Schwankungen im Tidenhub, innerhalb der Nordsee durch Resonanz verstärkt werden können und so potentiell zu den beobachteten Veränderungen in der Deutschen Bucht beigetragen haben könnten, wurden mit TRIM-NP eine Reihe von Sensitivitätsexperimenten durchgeführt, bei denen der Tidenhub an den Rändern systematisch variiert wurde. Anschließend wurde untersucht, inwieweit sich diese Signale innerhalb der Nordsee verändert und möglicherweise verstärkt haben könnten. Dabei zeigte sich, dass die im Inneren des Modellgebiets auftretenden Änderungen im Tidenhub generell geringer als die am Rand vorgegebenen Änderungen waren (Abbildung 5). Das deutet darauf hin, dass Änderungen im Inneren des Modellgebiets eher gedämpft werden und die ohnehin geringen Änderungen am Rand vermutlich keine wesentliche Ursache und Erklärung für die beobachteten Änderungen im Tidenhub in der Deutschen Bucht liefern.



Abbildung 5: Veränderungen im von TRIM-NP modellierten mittleren Tidenhub (MTR) in der Nähe der 15 Pegel in der Deutschen Bucht in Prozent bei einer Erhöhung des Tidenhubs an den Modellrändern um 5 % (links) und in cm bei einer Erhöhung des mittleren Meeresspiegels um 20 cm (rechts).

In den letzten etwa 100 Jahren ist der mittlere Meeresspiegel in der Nordsee um etwa 20 cm angestiegen (Albrecht et al. 2011, Wahl et al. 2013). Durch diesen Anstieg kann sich prinzipiell zum einen das Resonanzverhalten der Nordsee verändern, zum andern kann sich durch die Veränderung der Wassertiefe die Propagation der Tidewelle und damit die Tidedynamik ändern (Haigh et al. 2020). Um zu untersuchen, inwieweit ein großräumiger Anstieg des Meeresspiegels die Tidedynamik in der Deutschen Bucht beeinflusst haben könnte, wurde am Rand des äußersten Gitters des Modells TRIM-NP eine Erhöhung des mittleren Wasserstands von 20 cm vorgegeben, die in etwa dem beobachteten Anstieg des mittleren Meeresspiegels in den letzten 100 Jahren entspricht (Wahl et al. 2013). Dadurch werden im Modell entlang der niedersächsischen/schleswig-holsteinischen Küste leicht erhöhte/verringerte Tidenhübe erzeugt. Jedoch sind auch in diesem Modellexperiment die Signale zu klein, als dass sie als wesentliche Erklärung für die beobachteten Veränderungen des Tidegeschehens in der Deutschen Bucht dienen könnten (Abbildung 5).

Um diese Aussage zu stützen, wurde zusätzlich eine statistische Analyse durchgeführt, die die Veränderungen der beobachteten Tideparameter an den Pegeln entlang der deutschen Nordseeküste in Bezug zu beobachteten Änderungen des mittleren Meeresspiegels setzte (Abbildung 6). Sowohl für die Original- als auch für die trendbereinigten Zeitreihen zeigten sich deutliche und statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen dem beobachteten Meeresspiegelanstieg und den mittleren Tidehoch- und -niedrigwassern. Es konnte jedoch keine signifikante Korrelation zwischen den beobachteten Veränderungen im mittleren Tidenhub und dem beobachteten Meeresspiegelanstieg gefunden werden. Diese Analyse stützt die Ergebnisse der Modellstudie und deutet darauf hin, dass großräumig betrachtet sowohl das mittlere Tidehoch- als auch das mittlere Tideniedrigwasser mit dem beobachteten Meeresspiegelanstieg angewachsen ist, der Tidenhub sich dabei aber nicht signifikant verändert hat. Die gleichen Schlussfolgerungen gelten analog für die trendbereinigten Zeitreihen und damit für die beobachteten jährlichen und dekadischen Schwankungen.



Abbildung 6: Streudiagramme von jährlichen Anomalien des mittleren Hochwassers (MHW, links), des mittleren Tideniedrigwassers (MLW, Mitte) und des mittleren Tidenhubs (MTR, rechts) 1958– 2014 im Vergleich zu Anomalien des mittleren Meeresspiegels für die Original- (unten) und die trendbereinigten (oben) Zeitreihen basierend auf Daten der 15 untersuchten Pegel entlang der deutschen Nordseeküste. Gezeigt sind jeweils Anomalien in Bezug auf das jeweilige langjährige Mittel an den einzelnen Pegeln. Im oberen Teil jeder Abbildung sind zusätzlich die linearen Regressions- (k) und Korrelationskoeffizienten (r) angegeben. Signifikant von Null verschiedene Korrelationen (5 % Irrtumswahrscheinlichkeit) sind mit einem Stern gekennzeichnet.

# 3.3 Möglicher Einfluss großräumiger Schwankungen und Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation

Langfristige Schwankungen oder Veränderungen in der großräumigen atmosphärischen Zirkulation (z. B. in der Nordatlantischen Oszillation; Hurrell et al. 2001) können prinzipiell zu veränderten Wind- und Luftdruckverhältnissen über der Nordsee und dem angrenzenden Nordostatlantik führen, die einen veränderten mittleren Wasserstand in der Nordsee zur Folge haben und damit potentiell Veränderungen im Tidegeschehen triggern könnten.

Um diese Hypothese zu untersuchen, wurde eine multi-dekadische Modellsimulation mit TRIM-NP (Weisse et al. 2014) herangezogen, die mit räumlich hochaufgelösten stündlichen Wind- und Luftdruckfeldern für den Zeitraum 1958–2014 (Geyer 2014) angetrieben wurde. An den offenen Rändern wurden wiederum Amplituden und Phasen von 33 Partialtiden aus FES2004 (Lyard et al. 2006) vorgeschrieben und Beiträge des Meeresspiegelanstiegs vernachlässigt, so dass alle in der Modellsimulation auftretenden Veränderungen in den Tideparametern ausschließlich auf Veränderungen im Wind- und Luftdruckklima zurückzuführen sind.



Abbildung 7: Schwarz: Zeitreihen (dünn) der jeweils 1. EOF der beobachteten jährlichen mittleren Tidehochwasser MHW (links) und Tideniedrigwasser MLW (rechts), basierend auf Daten der 15 betrachteten Pegel in der Deutschen Bucht, und zugehöriges 5-jährig gleitendes Mittel (dick). Entsprechende Zeitreihen aus der Analyse des Modelllaufs (blau; Trend 0,47 mm/Jahr bzw. 0,83 mm/Jahr) und eines statistischen Modells (orange; Trend 0,62 mm/Jahr bzw. 0,61 mm/Jahr), basierend auf den ersten drei EOFs des Luftrucks über dem Nordatlantik.

Um zu untersuchen, inwieweit beobachtete Veränderungen in dieser Simulation abgebildet werden, wurden die beobachteten großräumigen Signale des MThw und des MTnw in Form ihrer jeweils ersten EOF (Abbildung 4) auf die Modelldaten projiziert. Die entsprechenden Zeitreihen sind in Abbildung 7 dargestellt. Es zeigte sich, dass die entsprechenden Zeitreihen aus dem Modellauf mit jeweils etwa 0,85 hohe Korrelationen mit den aus den Beobachtungen abgeleiteten Zeitreihen aufweisen, dass sich allerdings die Trends insbesondere beim MThw deutlich unterscheiden. Daraus lassen sich prinzipiell zwei Schlüsse ableiten: Zum einen hängen die jährlichen großräumigen Schwankungen im MThw und MTnw offensichtlich stark mit der jährlichen Variabilität der großräumigen atmosphärischen Zirkulation zusammen, wobei letztere jeweils etwa 72 % der beobachteten Variabilität im MThw und MTnw erklären kann. Zum anderen tragen langfristige Veränderungen im Windklima dagegen vermutlich nur in sehr geringem Umfang zu möglichen langfristigen Veränderungen der Tideparameter bei. So beträgt beispielsweise der anhand der modellierten Daten abgeschätzte Trend im MThw lediglich knapp 13 % des beobachteten Wertes.

Um diese Ergebnisse zu stützen, wurde wiederum zusätzlich eine statistische Analyse durchgeführt, bei der die großräumigen beobachteten Luftdruckfelder in Bezug zu den beobachteten Veränderungen der Tideparameter an den Pegeln gesetzt wurden. Dabei wurden zunächst die jährlichen Luftdruckfelder über der Nordsee und dem Nordostatlantik mittels einer EOF-Analyse in ihre dominierenden großräumigen Moden zerlegt. Anschließend wurde zwischen den drei dominierenden Moden der atmosphärischen Variabilität, die insgesamt etwa 81 % der Gesamtvariabilität der Luftdruckfelder beschreiben, und den beobachteten jährlichen Tideparametern basierend auf einer multiplen Regressionsanalyse ein statistisches Modell aufgestellt, das die Veränderungen der Tideparameter aufgrund von Schwankungen und Änderungen in den drei dominierenden EOF-Moden beschreibt. Die Ergebnisse dieses statistischen Ansatzes weisen eine hohe Ähnlichkeit mit denen des dynamischen Modellexperiments auf (Abbildung 7) und bestätigen die bereits getroffenen Schlussfolgerungen.

# 3.4 Möglicher Einfluss großräumiger morphologischer Änderungen auf die Tidedynamik

Größere Änderungen im MThb im Bereich der Deutschen Bucht insbesondere seit etwa Mitte des 20. Jahrhunderts lassen sich über mehrere Dekaden nachverfolgen (z. B. Jensen et al. 1992; Abbildung 3). Angesichts solcher Zeiträume ist es möglich, dass die Tidedynamik einzelner oder mehrerer Pegel durch größere Baumaßnahmen (z. B. infolge von Eindeichungen) und die daraus resultierenden morphologischen Veränderungen im Küstenvorfeld beeinflusst worden ist. Auch hier werden im Folgenden lediglich mögliche großräumige Effekte untersucht, wohingegen lokale Auswirkungen in Hubert et al. (2020) beschrieben und untersucht worden sind.

Ein Beispiel für die beobachteten großräumigen morphologischen Änderungen in der Deutschen Bucht über einen Zeitraum von 20 Jahren ist in Abbildung 8 anhand der durch das Projekt EasyGSH-DB (EasyGSH-DB 2020) entwickelten hochaufgelösten Bathymetrien der Jahre 1996 und 2014 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die größten Änderungen im Bereich der Watten und der Ästuare befinden und dort lokal Größenordnungen von einigen Metern erreichen können, die dann z. B. durch mögliche Veränderungen von Tideprismen zu Änderungen von Tideparametern an den küstennah gelegenen Pegeln beigetragen haben könnten.

Hochaufgelöste Bathymetrien wie durch EasyGSH-DB bereitgestellt, liegen erst ab 1996 vor und umfassen damit nicht den Zeitraum von ca. 1960–1990, innerhalb dessen die markantesten Veränderungen in der Tidedynamik beobachtet wurden. Um trotzdem zu einer Größenabschätzung möglicher Einflüsse auf das Tidegeschehen zu gelangen, wurde deshalb sowohl eine Reihe von Sensitivitätsexperimenten mit TRIM-NP und vorhandenen Bathymetrien als auch eine statistische Analyse durchgeführt, die mögliche großskalige Zusammenhänge aufzeigen könnte.



Abbildung 8: Differenzen in Metern zwischen den EasyGSH-DB-Bathymetrien 2014 und 1996 entlang der niedersächsischen (links) und entlang der schleswig-holsteinischen Küste (rechts).

Um mögliche großskalige Zusammenhänge zwischen morphologischen Veränderungen und Änderungen in den Tideparametern zu untersuchen und herauszufiltern, wurden zunächst wiederum EOF-Analysen des beobachteten mittleren Tidenhubs an den 15 untersuchten Pegeln entlang der deutschen Nordseeküste und der EasyGSH-DB Bathymetrien durchgeführt. Um mögliche Zusammenhänge zwischen großskaligen Änderungen aufzuzeigen, wurde anschließend basierend auf den dominanten EOF-Moden eine kanonische Korrelationsanalyse durchgeführt, bei der nach Linearkombinationen von EOF-Moden gesucht wird, deren Korrelation maximal ist. Dazu wurden für den Tidenhub zwei und für die Bathymetrie drei EOFs verwendet, die insgesamt 84 % bzw. 76 % der Gesamtvarianz erklärten. Das Ergebnis dieser Analyse ist in Abbildung 9 dargestellt. Es zeigte sich, dass großräumige Veränderungen im Tidenhub eher mit vielen zeitgleich ablaufenden kleinräumigeren Variationen als mit größerskaligen morphologischen Anderungen korreliert sind. Zeitlich besteht zwischen diesen Änderungen mit etwa 0,82 eine sehr hohe Korrelation (Abbildung 9). Entsprechend der Ergebnisse dieser Analyse waren die zwischen etwa 2007 und 1996 beobachteten morphologischen Änderungen von Änderungen im Tidenhub im Bereich von einigen Zentimetern begleitet. Auffallend ist, dass diese Änderungen bis etwa 2014 dann wieder rückläufig sind und sich die Werte am Ende kaum von denen am Anfang des Untersuchungszeitraumes unterscheiden.



Abbildung 9: Erstes Paar kanonisch korrelierter Muster der jährlichen Bathymetrien des EasyGSH-DB Datensatzes (links) und des jährlichen mittleren Tidenhubs an den 15 Pegeln entlang der deutschen Nordseeküste (rechts) 1996–2014 und zugehörige Zeitreihen (unten).

Um diese Ergebnisse näher zu untersuchen, wurden mit dem hydrodynamischen Modell TRIM-NP drei Sensitivitätsexperimente durchgeführt. Dazu wurden für das Modell zwei zusätzliche genestete Gitter mit Auflösungen von 800 m x 800 m und 400 m x 400 m aufgesetzt, welche die durch die EasyGSH-DB-Bathymetrien abgedeckten Teile der Deutschen Bucht umfassen. Anschließend wurden die durch EasyGSH-DB bereitgestellten Bathymetrien der Jahre 1996, 2007 und 2014 auf das Gitter interpoliert und mit identischen am Rand vorgeschriebenen Tiden für jeweils einen Monat gerechnet. Abbildung 10 zeigt die durch die TRIM-NP simulierten Veränderungen im mittleren Tidenhub für die Jahre 2007–1996 bzw. 2014–1996 im Vergleich zu den Ergebnissen des statistischen Modells und den Beobachtungen. Anhand der Beobachtungen ist zu erkennen, dass der MThb an den meisten Pegeln zwischen 1996 und 2007 zunächst um einige Zentimeter abgenommen hat, um sich dann bis 2014 wieder auf die Werte von etwa 1996 einzupendeln. Sowohl das statistische als auch das hydrodynamische Modell, die diese Entwicklung ausschließlich aufgrund von morphologischen Änderungen simulieren, können diese Entwicklung in etwa nachbilden, wobei die dynamisch modellierten Anderungen für 1996-2007 im Mittel etwas zu gering ausfallen.



Abbildung 10: Verteilungen von Veränderungen im MThb in cm anhand von beobachteten jährlichen (grün) und modellierten (CCA – rot; TRIM – blau) MThb an den betrachteten 15 Pegeln für die Zeiträume 1996–2007 und 1996–2014. Die Werte aus dem statistischen Modell für 1996– 2014 sind alle kleiner als einen halben Zentimeter. Durch Runden auf ganze Zentimeter wird die Verteilung sehr schmal.



Abbildung 11: Gegenüberstellung der für 1996–2007 modellierten (CCA – rot; TRIM – blau) Veränderungen im MThb in cm mit den Beobachtungen an den 15 betrachteten Pegeln entlang der deutschen Nordseeküste.

Abbildung 11 zeigt die für den Zeitraum größter Veränderungen (1996–2007) modellierten Veränderungen im MThb noch einmal im Detail. Insbesondere das statistische Modell gibt

die beobachteten Änderungen bis auf zwei Ausreißer sehr gut wieder. Die Ausreißer (Bremerhaven und Emden) liegen dabei beide in den Mündungsbereichen der Ästuare. Da das statische Modell lediglich auf drei EOFs der morphologischen Änderungen basiert, lassen sich die beobachteten Änderungen im MThb demnach bis auf die Ausreißer sehr gut durch großräumige (bzw. zeitgleich ablaufende kleinräumigere) Änderungen in der Morphologie beschreiben. Auch durch das hydrodynamische Modell wird die starke Abnahme des MThb an einigen Pegeln von 1996–2007 gut wiedergegeben, allerdings gibt es auch ein Cluster von Pegeln mit starken beobachteten Veränderungen, bei denen die modellierten Änderungen um Null schwanken. Eine mögliche Ursache könnte in der küstennahen Auflösung von TRIM-NP und hier insbesondere der fehlenden Auflösung in den Ästuaren liegen, die eventuell nicht ausreichend sein könnte, um die Reflexion der Tidewelle realistisch abzubilden (Rasquin et al. 2019).

Neben solchen morphologischen Änderungen können auch größere Änderungen der Küstenlinien, zum Beispiel durch Eindeichungen, und entsprechende Veränderungen von Tidevolumina Auswirkungen auf die Tidedynamik haben. Es wurde deshalb zusätzlich mit Hilfe numerischer Experimente untersucht, welchen möglichen direkten Einfluss größere Baumaßnahmen auf die Entwicklung des MThb gehabt haben könnten. Dazu wurden beispielhaft Veränderungen entlang der schleswig-holsteinischen Küste betrachtet und auf einen in ALADYN (s. Ebener et al. 2020) durch den Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH) entwickelten und georeferenzierten Katalog von Baumaßnahmen entlang der schleswig-holsteinischen Küste zurückgegriffen. Diese Änderungen wurden in das hydrodynamische Modell TRIM-NP mit einer Auflösung von 800 x 800 m eingebaut und Veränderungen im MThb untersucht.

Abbildung 12 zeigt beispielhaft die direkten Veränderungen im mittleren Tidenhub aufgrund von größeren Baumaßnahmen. Auch wenn die Details dieser Änderungen nicht sehr belastbar sind, so können doch zwei wesentliche Schlussfolgerungen gezogen werden. Zum einen sind die Veränderungen im Tidenhub aufgrund großer Baumaßnahmen vermutlich im Bereich von Zentimetern bis zu Dezimetern anzusiedeln. Zum anderen sind die Veränderungen eher kleinräumig und auf begrenzte Küstenabschnitte beschränkt. Aufgrund der Synchronität einer Vielzahl von Baumaßnahmen ab den 1960ern kann die von Woodworth et al. (1991) aufgestellte Hypothese, dass diese in der Summe einen Einfluss auf die großräumige Tidedynamik gehabt haben können, deshalb nach wie vor nicht verworfen werden.



Abbildung 12: Unterschiede im mittleren Tidenhub (in Metern) aufgrund von vier größeren Baumaßnahmen entlang der schleswig-holsteinischen Küste (Eindeichung/Baumaßnahme Beltringharder Koog, Hauke Haien Koog, Speicherkoog Nord und Speicherkoog Süd).

### 4 Zusammenfassung

Mit Hilfe numerischer Modellierung und statistischer Auswertung wurden verschiedene großräumige Faktoren untersucht, die zu den beobachteten Veränderungen der Tidedynamik in der Deutschen Bucht beigetragen haben könnten. Auch wenn eine abschließende und umfassende Beurteilung nach wie vor nicht möglich ist, zeigten die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen, dass das Zusammenspiel mehrerer großräumiger Faktoren zumindest wesentliche Beiträge zu den beobachteten Veränderungen und Schwankungen in den Tideparametern in der Deutschen Bucht geliefert haben könnte. So können beispielsweise jährliche und dekadische Schwankungen im Windklima und der großräumigen atmosphärischen Zirkulation einen wesentlichen Teil der beobachteten jährlichen und dekadischen Variabilität insbesondere im mittleren Hochwasser erklären. Beobachtete langfristige Veränderungen können Anteile durch den gestiegenen Meeresspiegel sowie von morphologischen Änderungen und Veränderungen von Küstenlinien durch Baumaßnahmen enthalten. Hierbei scheint der Anstieg des mittleren Meeresspiegels in der Vergangenheit großräumig eher mit gleichläufigen Anstiegen im mittleren Hoch- und Niedrigwasser und weniger mit Veränderungen im mittleren Tidenhub verbunden gewesen zu sein. Morphologische Veränderungen und Veränderungen der Küstenlinien scheinen dagegen in der Lage zu sein, den Tidenhub wesentlich zu beeinflussen. Hier wäre eine Rekonstruktion älterer Bathymetrien, z. B. aus der Mitte des 20. Jahrhunderts, sowie eine georeferenzierte Katalogisierung weiterer größerer Baumaßnahmen, z. B. entlang der niedersächsischen Küste, wünschenswert, die eine umfassendere Bewertung möglicher Beiträge zur veränderten Tidedynamik ermöglichen würden.

### 5 Danksagung

Unser Dank gebührt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), welches das Projekt ALADYN-B im Rahmen der Fördermaßnahme "Küstenmeerforschung in Nord- und Ostsee" im Rahmenprogramm FONA 3 (Förderkennzeichen 03F0756B) über einen Zeitraum von drei Jahren gefördert hat. Wir danken weiterhin dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) für die fachliche Begleitung des Projektes in der Bearbeitungsphase und unseren Projektpartnern der Universität Siegen, der Forschungsstelle Küste des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küstenund Naturschutz sowie dem Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH) für Ihre Zusammenarbeit und Kooperation innerhalb des Gesamtverbundvorhabens.

### 6 Literaturverzeichnis

ALADYN. Analyse der beobachteten Tidedynamik in der Nordsee. http://www.kfki.de/de/projekte/aladyn, Stand: 20.04.2020.

Albrecht, F.; Wahl, T.; Jensen, J.; Weisse, R.: Determining sea level change in the German Bight. In: Ocean Dynamics, 61, 12, 2037–2050, https://doi.org/ 10.1007/s10236-011-0462-z, 2011.

BODC. UK Tide Gauge Network. https://www.bodc.ac.uk/data/hosted\_data\_systems/sea\_level/uk\_tide\_gauge\_network/, Stand: 20.04.2020.

Cartwright, D. E.: Secular Changes in the Oceanic Tides at Brest, 1711–1936. In: Geophysical Journal International, 30, 4, 433–449, https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1972.tb05826.x, 1972.

Casulli, V.; Cattani, E.: Stability, accuracy and efficiency of a semi-implicit method for three-dimensional shallow water flow. In: Computers & Mathematics with Applications, 27, 4, 99–112, https://doi.org/10.1016/0898-1221(94)90059-0, 1994.

EasyGSH-DB: Erstellung anwendungsorientierter synoptischer Referenzdaten zur Geomorphologie, Sedimentologie und Hydrodynamik in der Deutschen Bucht. https://mdide.baw.de/easygsh/, Stand: 21.04.2020.

Ebener, A.; Arns, A.; Jänicke, L.; Dangendorf, S.; Jensen, J.: Untersuchungen zur Entwicklung der Tidedynamik an der deutschen Nordseeküste. In: Die Küste, 89, https://doi.org/10.18171/1.089106, 2020.

Gaslikova, L.; Grabemann, I.; Groll, N.: Changes in North Sea storm surge conditions for four transient future climate realizations. In: Natural Hazards, 66, 3, 1501–1518, https://doi.org/10.1007/s11069-012-0279-1, 2013.

Geyer, B.: High-resolution atmospheric reconstruction for Europe 1948–2012. CoastDat2 In: Earth System Science Data, 6, 1, 147–164, https://doi.org/10.5194/essd-6-147-2014, 2014.

Haigh, I. D.; Pickering, M. D.; Green, J. A. M.; Arbic, B. K.; Arns, A.; Dangendorf, S.; Hill, D. F.; Horsburgh, K.; Howard, T.; Idier, D.; Jay, D. A.; Jänicke, L.; Lee, S. B.; Müller, M.; Schindelegger, M.; Talke, S. A.; Wilmes, S.-B.; Woodworth, P. L.: The Tides They Are A-Changin'. A Comprehensive Review of Past and Future Nonastronomical Changes in Tides, Their Driving Mechanisms, and Future Implications In: Reviews of Geophysics, 58, 1, https://doi.org/10.1029/2018RG000636, 2020.

Hollebrandse, F. A. P.: Temporal development of the tidal range in the southern North Sea. TU Delft, Delft, (Master Thesis), 2005.

Hubert, K.; Wurpts, A.; Berkenbrink, C.: Interaction of Estuarine Morphology and adjacent Coastal Water Tidal Dynamics. In: Die Küste, 89, https://doi.org/10.18171/ 1.089108, 2020.

Hurrell, J. W.; Kushnir, Y.; Visbeck, M.: The North Atlantic Oscillation. In: Science, 291, 5504, 603-605. doi: 10.1126/science.1058761, 2001.

Jensen, J.; Ebener, A.; Jänicke, L.; Arns, A.; Dangendorf, S.; Hubert, K.; Wurpts, A.; Berkenbrink, C.; Weisse, R.; Yi, X.; Meyer, E.: Untersuchungen zur Entwicklung der Tidedynamik an der deutschen Nordseeküste (ALADYN). In: Die Küste, 89, https://doi.org/10.18171/1.089105, 2020.

Jensen, J.; Muderbach, C.; Müller-Navarra, S.; Bork, I.; Koziar, C.; Renner, V.: Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste. In: Die Küste, 71, 123–167, 2006.

Jensen, J.; Mudersbach, C.: Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten. In: Glaser, R., Schenk, W., Vogt, J., Wießner, R., Zepp, H.; Wardenga, U. (Hg.): Küstenszenarien. Leipzig, 99–112, 2007.

Jensen, J.; Mügge, H. E.; Schönfeld, W.: Analyse der Wasserstandsentwicklung und Tidedynamik in der Deutschen Bucht. In: Die Küste, 53, 211–275, 1992.

Kapitza, H.; Eppel, D.: Simulating morphodynamical processes on a parallel system. In: Spaulding, M. L. (Hg.): Estuarine and coastal modeling. Proceedings of the conference. Newport, Rhode Island, November 15–17, 1989. New York, 1990.

Kohlus, J.; Küpper, H.: Umweltatlas Wattenmeer. 1. Nordfriesisches und Dithmarscher Wattenmeer Ulmer, Stuttgart, 270 S., 1998.

Lyard, F.; Lefevre, F.; Letellier, T.; Francis, O.: Modelling the global ocean tides. Modern insights from FES2004. In: Ocean Dynamics, 56, 5–6, 394–415, https://doi.org/10.1007/s10236-006-0086-x, 2006.

Pätsch, J.; Burchard, H.; Dieterich, C.; Gräwe, U.; Gröger, M.; Mathis, M.; Kapitza, H.; Bersch, M.; Moll, A.; Pohlmann, T.; Su, J.; Ho-Hagemann, H. T. M.; Schulz, A.; Elizalde, A.; Eden, C.: An evaluation of the North Sea circulation in global and regional models relevant for ecosystem simulations. In: Ocean Modelling, 116, 70–95, https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.06.005, 2017.

Rasquin, C.; Seiffert, R.; Wachler, B.; Winkel, N.: The significance of coastal bathymetry representation for modelling the tidal response to mean sea level rise in the German Bight. https://doi.org/10.5194/os-2019-84, 2019.

Smith, S. D.; Banke, E. G.: Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 101, 429, 665–673, https://doi.org/10.1002/qj.49710142920, 1975.

Storch, H. von; Zwiers, F. W.: Statistical analysis in climate research. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 484 S., 2003.

Wahl, T.; Haigh, I. D.; Woodworth, P. L.; Albrecht, F.; Dillingh, D.; Jensen, J.; Nicholls, R. J.; Weisse, R.; Wöppelmann, G.: Observed mean sea level changes around the North Sea coastline from 1800 to present. In: Earth-Science Reviews, 124, 51–67, https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.05.003, 2013.

Weisse, R.; Gaslikova, L.; Geyer, B.; Groll, N.; Meyer, E. M. I.: coastDat - model data for science and industry. In: Die Küste, 81, 5–18, 2014.

Woodworth, P. L.; Shaw, S. M.; Blackman, D. L.: Secular trends in mean tidal range around the British Isles and along the adjacent European coastline. In: Geophysical Journal International, 104, 3, 593–609, https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb05704.x, 1991.

## Interaction of Estuarine Morphology and adjacent Coastal Water Tidal Dynamics (ALADYN-C)

Krischan Hubert<sup>1</sup>, Andreas Wurpts<sup>2</sup> and Cordula Berkenbrink<sup>2</sup>

 <sup>1</sup> Nds. Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, krischan.hubert@nlwkn.niedersachsen.de
<sup>2</sup> Nds. Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz

### Summary

Long term tidal dynamic changes comprise a share of multiple possible influencing processes. In the shallow Wadden Sea in the south eastern German Bight, morphological changes – both natural and those manmade – are key contributors, as coastal relief and tidal wave are shaping and interacting with each other. Several publications have analysed, how bathymetrical changes in the estuarine zone due to river construction measures influence the tidal regime inside the investigated entity. This study aims at identifying, how far those tidal dynamic changes will have an impact on adjacent coastal waters and give an estimate how they are reflected in the data of surrounding tide gauges. The investigation is based on comparisons of tidal characteristics for different morphological conditions of selected regions along the German coastline by means of numerical modelling. A crossscale model domain was set up to simulate the hydrodynamics of the entire Greater North Sea with a special focus on the highly resolved German tidal waters. Digitized historical conditions for the Ems and Weser estuary prior to major human activities along the rivers were used to reproduce the tidal regime of the corresponding time period within the largescale environment of the overall domain. Morphological changes that account for single measures, such as the land subsidence due to gas extraction, were analysed isolated from other changes. The differences of the simulation results are compared to values from control runs with the present bathymetrical state. This illustrates the region of influence, in which tides are effected from locally limited bathymetrical changes.

### Keywords

tidal dynamics, sea level rise, long-term trend, estuary, Ems, Weser, North Sea, historic bathymetry, coastal morphology, cross-scale modelling, land subsidence due to gas extraction, ALADYN, SCHISM

### Zusammenfassung

Langzeitänderungen der Tidedynamik setzen sich aus einer Vielzahl von möglichen ursächlichen Prozessen zusammen. Im flachen Wattenmeer haben morphologische Veränderungen – sowohl natürlicher als auch anthropogen geprägter Art – einen entscheidenden Einfluss, da sich Tidewelle und Küstenrelief gegenseitig stark beeinflussen und formen. Mehrere wissenschaftliche Arbeiten haben bereits untersucht, inwiefern Änderungen der Bathymetrie von Ästuaren im Zuge von Flussausbauten das Tideregime innerhalb des betrachteten Gebiets beeinflussen. Dieser Beitrag geht der Frage nach, wie weit sich diese Änderungen der Tidedynamik auch in außerhalb liegenden Gebieten feststellen lassen. Die Untersuchungen basieren auf Vergleichen von Tidekennwerten, die mittels numerischer Modellierung für verschiedene morphologische Zustände ausgewählter Abschnitte der deutschen Nordseeküste nachgebildet wurden. Für diesen Zweck wurde ein skalenübergreifendes Strömungsmodell erstellt, welches die Hydrodynamik des gesamten Nordseegebietes simuliert. Im Fokus der Untersuchungen stehen dabei die im Modellgebiet hochaufgelösten deutschen Tidegewässer. Digitalisierte Bathymetrie-Datensätze von historischen Ausbauzuständen der Ems und Weser, die bis vor die maßgebenden menschlichen Eingriffe in die Flussläufe zurückreichen, wurden verwendet, um die lokalen Gezeiten der entsprechenden Zeiträume innerhalb des gesamtübergreifenden Modellgebietes abbilden zu können. Veränderungen, die auf Einzelmaßnahmen zurückzuführen sind, wie Bodensenkungen infolge von Gasentnahme, werden isoliert von anderen Einflussfaktoren analysiert. Die Differenzen der Simulationsergebnisse aus dem Vergleich mit Werten aktueller Ausbauzustände stellen den Einflussbereich dar, in welchem lokal begrenzte Änderungen der Bathymetrie das Tideregime beeinflussen.

### Schlagwörter

Tidedynamik, Meeresspiegelanstieg, Trend, Ästuar, Ems, Weser, Nordsee, historische Bathymetrie, Küstenmorphologie, skalenübergreifendes HN-Modell, Landsenkung infolge Gasentnahme, ALADYN, SCHISM

### 1 Introduction

The motivation for the joint research project ALADYN was to gain a better understanding of the composition of observed tidal range changes within the German Bight. Therefore, the three separate parts of the project would each aim on identifying and analysing different potential factors that may have contributed to the observed trends. One task within ALADYN was to analyse tidal regime changes induced by local bathymetrical changes. The goal of this project part was to analyse how far local hydrodynamic changes would spread into adjacent coastal regions. The focus is on the region around the estuaries Ems and Weser, both entering the North Sea at the Lower Saxonian coastline.

The hydrodynamics of the German Bight, its coastal morphology and a vast number of natural processes as well as human activities are greatly dominated by the influence of the tides. Along the coastline, there are numerous tide gauges, some of which are already in operation since up to over 150 years. Figure 1 shows yearly mean tidal high (MHW) and tidal low water (MLW) levels for selected gauge stations throughout the German Bight since begin of their operation.

Trend analysis of long-term tide records indicate a general increase of both MHW and MLW with rates of several centimetres up to a few decimetres within one century. Whereas the trends of the high waters are rather similar throughout the different gauge stations, trends in low waters are slightly diverse, as the low waters might react stronger on local morphological variations due to greater influence of bottom friction. For example, the low waters near the estuaries – i. e. Bremerhaven and Emden - seem to decrease due to the constant deepening of the neighbouring navigational channels. But there is one trend that is valid for all gauge stations: The MLW is always either falling or rising less strong than the corresponding MHW. Thus, the rates of mean tidal range (MTR) increase are all positive (see Table 1).



Figure 1: Left panel: Overview. Middle and right panel: Yearly mean tidal high and low waters [cm] with arbitrary offset at different gauge stations throughout the German Bight. The positions are indicated in the left panel. Data provided by German Federal Waterways and Shipping Administration (WSV).

The observed trends are composed from a variety of different processes that all contribute with different magnitudes and signs and that may interact linearly and non-linearly with each other. In addition to global factors like sea level rise, vertical land movement, variations in wind climate or astronomical constellations, changes of the tidal regime can also mirror local effects (Haigh, 2020). Morphology is a key factor on such local scales, especially in shallow coastal zones. Here the tidal regime is dominated by the bathymetry and correspondingly susceptible to morphological changes (Niemeyer and Kaiser 1999). The Wadden Sea represents an inherently morphodynamical system, which is subject to continuous rearrangement. Contributors are naturally imposed shifts and transformations of the tidal channels, flats, basins and barrier islands as well as anthropogenically induced changes due to navigational purposes or demands of coastal protection (Elsebach et al. 2007, Herrling and Niemeyer 2008).

In both Weser and Ems estuary, the major human interventions and consecutive morphological reactions started more than 130 years ago. After smaller previous measures the so-called Franzius corrections started in 1887 and were the beginning of a substantial rearrangement of the Outer and Lower Weser riverbeds, in order to obtain the access of the port of Bremen to the open sea. The corrections comprised a transition from a fairly shallow, curvy and branched riverbed to a deeper, comparatively narrow and single-branched channel (Elsebach et al. 2007, Franzius 1888, Niemeyer, 2000). Several consecutive adaptations of the river for increasing navigational demands followed up to present times (BUND, Portal Tideweser).

Considering the tidal range, the modifications engendered a drastic amplification of the tidal wave amplitude along the estuaries. Figure 2 displays the change of tidal range over time for lower Weser and Ems rivers. Before the Franzius corrections, the tidal wave was almost completely damped on its way through the estuary while today it is fully reflected and also steepened with strongly amplified range. At the head of the estuary, the present tidal range exceeds the one at the mouth, whereas it used to be close to zero before the corrections.

The evolution of the Ems estuary's morphology follows a similar pattern (Herrling and Niemeyer 2007b). Here, modifications also started in the second half of the 19<sup>th</sup> century, but continuous tide gauge records do not date back as long as for the Weser.

Table 1: Linear trends [mm/a] of yearly mean tidal high water, low water and tidal range values for the time of recording at different gauge stations throughout the German Bight. The positions are indicated in Figure 1. Data provided by WSV.

		Linear trends [mm/a]		
Tide gauge	Period	MHW	MLW	MTR
Husum	1901 – 2016	3.28	0.11	3.17
List	1937 – 2015	3.36	0.47	2.89
Wangerooge West	1951 – 2017	3.34	1.60	1.74
Langeoog	1951 – 2017	2.38	1.10	1.28
Norderney Hafen/Riffgat	1891 – 2017	2.80	1.33	1.47
Borkum Südstrand /Fischerbalje	1931 – 2017	3.09	1.18	1.91
Leuchtturm Roter Sand/Alte Weser	1936 - 2017	4.49	2.84	1.65
Helgoland Binnenhafen	1910 - 2016	2.16	0.72	1.44
Wilhelmshaven Alter Vorhafen	1873 - 2017	2.93	0.65	2.28
Emden Neue Seeschleuse	1901 - 2017	2.33	-0.29	2.62
Cuxhaven Steubenhöft	1843 - 2017	2.25	1.31	0.94
Bremerhaven Doppelschleuse/Alter Leuchtturm	1881 - 2017	2.74	-1.68	4.42

The anthropogenic interventions caused significant changes of the tidal regime within the estuaries of Ems and Weser itself. Those effects have already been thoroughly analysed with hydrodynamic modelling approaches (Elsebach et al. 2007, Herrling and Niemeyer 2008, Herrling et al. 2014).

This project is expanding the existing scope of the investigations. It is not only dealing with the tidal regime changes within the estuaries, but also whether how strong and how far these inner-estuarine changes also affect the adjacent coastal waters and tidal gauges located there. We examine possible interactions of the estuaries with the coastal zone and analyse, how far the hydrodynamic changes spread outside of the region of the corresponding morphological changes. This objective is addressed using numerical simulations of the large-scale tidal dynamics with comparisons between present and historical morphological conditions. The method allows to analyse single measurements or regions isolated from surrounding morphological changes. This way, shares of tidal characteristic changes can be assigned to certain events including the nonlinear behaviour of the hydrodynamics.



Figure 2: Yearly mean tidal range values [cm] along the Weser (upper panel) and Ems (lower panel) estuaries from 1880–2018. Red lines indicate a position near the head of the estuary, blue lines near the mouth and green lines approximately half way in between. Data provided by WSV. (Elsebach et al. 2007 and Niemeyer 2000 (unpublished)).

### 2 Methodology

For the purpose of this study a numerical model domain was set up, that not only covers the investigation area but is well extended above the Greater North Sea into parts of the North East Atlantic. This approach offers several advantages over models with smaller extend or nested cascades of models:

- It bypasses model cascades, as the tidal oscillations at the seaward open boundaries can be forced directly through tidal constituent phases and amplitudes in the open ocean. Due to the great distance between open boundary and investigation area, the velocity boundary condition can be omitted.
- The propagation of the tidal wave is physically consistent throughout the entire model domain. There is a bi-directional interaction between the coastal zone and the open sea, which would be missing in a one-way nested application. Influences from model boundary forcing are avoided.

• The investigation area is not limited pre-hand to an inner domain or specific region. This is an important factor, as the spatial distribution is part of the analysis and is considered as unknown initially.

The procedure of the evaluation of morphologically induced tidal regime changes happens as follows: For each analysis we perform two simulations on the same numerical grid, which is beforehand optimized for two morphological states. The first simulation is the control run. It contains the present state bathymetry and is equal for all analysis. The bathymetry of the second simulation is replaced by a historical data set in the respective area of interest. All remaining parts of the model and all boundary conditions remain exactly the same. After calculating the differences of certain tidal characteristics between the two simulations, it is possible to derive spatial information on how far these differences exceed the manipulated area.

Analysis are carried out over a period of at least two spring-neap cycles. For the comparisons, synthesized mean tidal curves for elevation and u- and v-velocities are derived from all single tidal cycles for each computational node in the domain. This procedure ensures that the calculated differences comprise an average over the diurnal, fortnightly and monthly inequalities of the tide. It is not only an average of single parameters like peak and crest heights or maximum flood and ebb velocities. The synthesized tidal curve displays an averaged tidal curve over 12.4 hours with a temporal discretization of six minutes (see Section 3).

### 2.1 Model Setup

The simulations are carried out with the semi-implicit, finite element model suite SCHISM (Zhang et al. 2016, version 5.6.1) which is tailored to seamless cross-scale applications. The domain is – in the horizontal plane – discretized with an unstructured grid of triangular and quadrangular elements.

Figure 3 gives an overview of the model domain. The western seaward open boundary spans from the north-western tip of Spain across the Atlantic at ~16° west up to Iceland. The northern seaward open boundary spans from Iceland across the Norwegian Sea down to western Norway. The most easterly part of the model is the Kattegat. The model boundary towards the Baltic Sea follows the coast of the Danish major islands Funen and Zealand, connecting the Danish and Swedish mainland. The connecting belts to the Baltic Sea are not considered as open boundaries, as we consider the influence it has on the investigation area in the German Bight as insignificant, especially as it would have to encounter the netdirection of both the Norwegian and so-called "Silberrinnen" tidal wave (See- und Ozeanhandbücher 1958). In the German Bight, the different entities of the Wadden Sea - tidal inlets, tidal basins and barrier islands - are resolved. The model includes the estuaries of the Ems, Weser and Elbe rivers up to their tidal barriers in Herbrum, Bremen and Geesthacht respectively. Also parts of the tidal Eider River are included in the Model domain. Ems, Weser and Elbe River are supplied with discharge open boundaries. The discharge boundaries are located upstream of the tidal barriers which are represented by weir structures in the model (Ateljevich et al. 2014). Tributaries of Ems and Weser River as well as the Eider River are treated as sources.

The SCHISM model enables maximum flexibility for the horizontal discretization. Because the terms imposing the most stability constraints are handled numerically implicit and advection of momentum is treated by means of an un-Trim-like Lagrange approach, a wide range of different mesh sizes is possible, as Courant numbers far beyond 1 are possible (Zhang et al. 2016). We highly resolve the investigation area around the estuaries and the Wadden Sea and have a very coarse resolution in the Greater North Sea and Atlantic parts of the model. This way, around 90 % of the ~675 thousand horizontal computational nodes and ~ 1.2 million elements are inside the investigation area, which in contrast only covers less than 1 % of the model domain (compare Table 2). Consequently, the large overall domain has little effect on the computational time.

Table 2: Numb	pers of grid	nodes, ar	ea size an	d Element	size	range	for	different	regions	of	the
model domain.	Values are o	only appro	oximate.			0			0		

Region	number	Share of	Area	Share of	Element
	of nodes	nodes		Area	size range
	-	%	$km^2$	%	m
Inner estuaries of Ems Weser Elbe	100000	14.8	1100	0.05	$5^{*} - 200$
Wadden Sea	500000	74.1	15000	0.65	50 - 200
Remaining Greater North Sea	50000	7.4	700000	31.15	200 - 10000
Remaining Model domain	25000	3.7	1530000	68.15	3000 - 50000
Total	675000	100.0	2246100	100.00	5 - 50000
*direction of quad. elements perpendicular to flow direction					



Figure 3: Overview of the model domain (Hubert et al. 2019). Top left panel shows the spatial extent, colors indicate the bathymetry. Bottom left panel shows the German Bight as an enlarged detail of the model. Top right panel shows the unstructured horizontal grid, which's local resolution is aligned with respect to the corresponding model depth. Bottom right panel shows an exemplary transition from triangular to quadrangular elements at the head of Lower Weser estuary.

The majority of elements are of triangular shape. Their sizes are determined by the surrounding depth (compare Figure 3). In the channels of Ems and Weser as well as in selected tidal channels, where there occurs distinct bidirectional flow, quadrangular elements are used to ensure a proper representation of the channels cross-sections and further reduce numerical diffusion and element numbers. As the Ems river gets comparatively narrow close to its tidal barrier, element sizes perpendicular to the flow direction go under 10 meters, in order to assure a minimum number of five to six active nodes in the cross-section during low water conditions. In the vertical discretization, localized sigma coordinates (LSC<sup>2</sup>) are used (Zhang et al. 2015).

Bathymetrical information for the model is compiled from several sources (compare Table 3). In the larger domain of the Greater North Sea and Atlantic we use open source data from EasyGSH-DB and EMODnet. Within the Lower Saxony Coastal Zone and estuaries, we use state owned high-resolution LiDAR and sounding data. Bathymetry for the tidal parts of the Eider River were provided by the Schleswig-Holstein Agency for Coastal protection, National park and Marine Conservation.

Region	Period*	Source					
Present							
Atlantic and parts of the North Sea	2016	EMODnet					
German Bight and parts of the North Sea	2016	EasyGSH-DB					
Parts of the tidal Eider River	2012	State of Schleswig Holstein					
Ems estuary	2015	State of Lower Saxony					
Jade Estuary	2012	State of Lower Saxony					
Weser estuary	2012	State of Lower Saxony					
Elbe estuary	2010	State of Lower Saxony					
East Frisian islands	2013-2016	State of Lower Saxony					
Historic							
Entire Lower Saxony coastline	1650, 1750, 1860, 1960	Homeier et al. 2010					
Ems	1937	Herrling and Niemeyer 2007a					
Lower Weser	1887	Elsebach et al. 2007					
Outer Weser	1870	Dev. within this project					
East Frisian islands	1960	Dev. within this project					
* data might not be limited to a single year but cover a larger time span							

Table 3: Present and historic bathymetries used in the numerical model

Considering the historical bathymetries, a number of data sets have been developed within former research work as well as within this research project. They have been developed by comprehensive digitization of historic navigational charts or other ancient documents. Figure 4 shows exemplarily the setup of the historic bathymetry of the outer Weser estuary.

Because bathymetrical information more than a hundred years ago was sparse – both in space and time – as well as much less accurate compared to today's possibilities, there are a few limitations that need to be pointed out:

• The historical data sets, especially for larger areas, never represent a close instant of time. The preparation of navigational charts in 19<sup>th</sup> and early 20<sup>th</sup> century took several

measuring campaigns to complete and thus are compiled from data that was collected over a period of sometimes several years.

- For larger areas, there are sometimes not enough maps of the same period available to cover the whole area, or certain maps have to be omitted due to insufficient quality or other reasons. For example, the historical bathymetry for the Ems estuary is compiled from different maps covering several decades (Herrling and Niemeyer 2007a).
- As ancient maps were mainly created for navigational purposes, information outside the navigational channels, i.e. tidal flats, are provided only with little depth information. These gaps have to be filled with assumptions.
- The vertical reference system differs from today's vertical reference and thus depths need to be adjusted. In some cases, depth will be given with reference to local low water marks. Here, adjustment of the depths is a lot more difficult, as it has to be done with historical tide gauge data.

Also present bathymetrical data sets face some of these problems, especially when looking at the larger offshore domain of the North Sea, where on the one hand depth are still shallow, so that inaccuracies can have a notable impact on the simulated tide but on the other hand such inaccuracies are unavoidable with respect to the size of the area and the absence of GNSS kinematic reference.

Therefore it is very important to straighten out that the derived results in this study must always be looked at with respect to the range of uncertainties.



Figure 4: Homeier charts (Homeier et al. 2010) of the outer Weser and Jade estuary region for the state of 1860 showing supra-, inter-and subtidal areas (left panel) and Triangular Irregular Network (TIN) of the same region for the reconstructed state of 1870. The background shows a historical navigational chart of 1870 (Lang 1973) that was used to digitize the elevation data for the TIN.

### 2.2 Model Calibration

Due to the model setup and its completely new spatial domain covering a large area, the calibration process took a big share within the project. The ALE approach of the SCHISM model requires the calibration to iteratively optimize the model grid, since a specific range of very high CFL values has to be met. During the evaluation process of the study, necessary modifications of the grid resolution setup also had to be implemented continuously. The model was calibrated with and validated for different time periods from 2014 to 2017.

The overall results also strongly depend on the used turbulence closure scheme: The cross-scale domain shows depth variations between several thousand meters at the continental shelf and constantly wetting and drying cells next to tidal channels of 10 m depth in the Wadden Sea and estuaries.

Shallow water wave equation models, when turbulence is considered in a boussinesqapproximated way (e.g. two equation turbulence models) basically assume the complete water depth as the turbulent wall boundary layer.

Especially without meteorological or wave forcing at the surface, the specific configuration of the turbulence model may pose severe problems finding a realistic compromise between the open ocean and deeper North Sea areas and the Wadden Sea and estuaries. This is further complicated with vertical grid resolution issues.

The following parameters had to be considered in the calibration of the model:

· Horizontal grid and time stepping

The most important part was the design of the unstructured mesh in the horizontal plane, since the mathematical approach requires strict compliance with the appropriate CFL range. It has to accommodate optimal resolution of the investigation area in combination with a reasonable overall mesh size, time stepping and computational time. Several meshes for the same domain were set up and tested. Especially in the Wadden Sea and estuarine zone, the setups have developed intensely over time. Besides the implementation of quadrangular elements in the estuarine zone and stepwise refinement of the entire Wadden Sea from Den Helder to Esbjerg, a major step was to improve the grid design for Ems and Weser river, so that it can handle both historical and present states with flow-parallel quadrangular elements, even though positions and directions of the main channels differ greatly in some parts between the two conditions. Additionally, the model domain includes several areas between historical and present dyke lines. The current grid is optimized for a time stepping of 200 seconds.

• Vertical discretization

In the vertical plane, different solutions for discretization have been tested from 2D, pure z, hybrid sigma/z-coordinates to localized sigma coordinates (Zhang et al. 2015). The current setup uses LSC<sup>2</sup> with a focus on the top 200 m, i. e. continental shelf.

Bottom friction and turbulence closure scheme

The model was calibrated using different regional friction coefficients. The bottom friction is calibrated in alignment with present conditions and adopted for the historical states. This of course is a compromise and has the consequence, that results will not be satisfactory in all places and morphological states. But since friction is also one of the boundary conditions, this procedure ensures that we analyse differences induced only by bathymetrical changes and not from friction coefficient variations or

other boundary conditions. Bottom roughness is given as roughness length  $z_0$  with a constant value of 2 mm.

• Bathymetry

As bathymetrical data is only accurate up to a certain level, it is valid and probably necessary to adjust it as a parameter in the calibration process in the range of its uncertainties (Verboom et al. 1991). Especially the historical bathymetries lack on accuracy, as stated before. Another problem evolves from the sparse density of the historical depth information. This leads to a great underestimation of the bed form resistance and existing dune structures, which cannot be compensated through roughness parameters. Therefore, these features are substituted by artificial surface irregularities that are added with a random distribution in the historical model parts.

The seaward open boundaries are driven with amplitudes and phases of 29 astronomical constituents, covering daily, fortnightly, monthly and seasonal inequalities of the tide. The nodal tide is represented with a constant node factor for each constituent. The amplitudes and phases of the constituents at the boundary nodes are interpolated from the FES Global Tides Model 2014. Constituent's Equilibrium arguments with reference to Greenwich and node factors are calculated within the SCHISM model suite on basis of Schureman (1940) for the starting and middle time of the simulation respectively.

The open boundaries at the tidal barriers of Ems, Weser and Elbe are supplied with discharge data. For some calibration runs we use daily discharge values measured at the gauges Versen (near Ems River tidal barrier), Intschede (Weser) and Neu-Darchau (Elbe). For the analysis though, we use approximate multiannual mean discharge values (see Table 4), as we only want to analyse the influence from bathymetrical changes under mean boundary conditions. Additional sources are set for Eider River and major tributaries along lower Ems and Weser.

<b>Rivers</b> and	Position	Discharge	Source
tributaries		$m^3/s$	
Ems	At tidal barrier	80.0	Versen (rounded value), NLWKN 2018
Weser	At tidal barrier	300.0	Intschede (rounded value), NLWKN 2018
Elbe	At tidal barrier	700.0	Neu-Darchau (rounded value), HPA 2017
Leda	At tidal barrier	15.0	estimate
Hunte	At Weser inflow	15.0	Elsebach et al. 2007
Ochtum	At Weser inflow	7.5	Elsebach et al. 2007
Lesum	At Weser inflow	13.0	Elsebach et al. 2007
Geeste	At Weser inflow	5.0	Elsebach et al. 2007
Eider	Near Tönning	6.5	estimate

Table 4: Constant discharge values at open boundaries and sources in the German Bight.

Atmospheric forcing is used within the calibration process to check the model performance under different meteorological conditions, even though the later analysis is carried out with astronomical tidal input only, because boundary conditions should remain the same between historical and present conditions and results should refer to mean tidal values and not be influenced by other boundary conditions. For the atmospheric calibration we use hourly forecast model data for air pressure, wind speed and wind direction from the ICON-Model of the German Meteorological Service (Deutscher Wetterdienst DWD). The model results are compared to observation data of tide gauge stations along the British (10), Dutch (5) and German (55) coastline as well as from different offshore (5) stations. Figure 5 shows a selection of comparisons throughout the German Bight and inside the estuaries of Ems and Weser for the present morphological state as well as for gauge stations near the margins of the North Sea and offshore.



Figure 5: Comparison of Simulation (red) to Observation (gray) data at selected gauge stations. Positions are indicated in Figure 6. Observation data provided by WSV, British Oceanographic Data Centre and Rijkswaterstaat.

Figure 6 displays the Root mean square error (RMSE) for both High and Low water values at selected gauge stations in the German Bight. The upper panel shows the combined RMSE. Along the coastline the RMSE is satisfactory with values below 10 cm. Inside the estuaries, especially for low water conditions, there is a misfit between observation and simulation at some stations. This applies near the tidal barrier of the Ems River and around Bremerhaven and Nordenham in the Weser River. It is assumed that this is due to the rheological influence of the fluid mud and the dynamics of the estuarine circulation, since turbidity and density induced turbulence damping is not included in the calculations. As the pure hydrodynamic model cannot reproduce these effects, the calibration concentrates



on a best overall fit in space (different tidal gauge stations) and time (different morphological states).

Figure 6: Root Mean Square Errors (RMSE) for tide gauges in the German Bight (present morphological state). Lower panels display RMSE for High and Low water values, upper panel the combined RMSE. Numbers in upper panel indicate position of plots in Figure 5.

Figure 7 shows results in comparison to observation data for a model run with storm surge conditions during January 2017 at the Dutch gauge station Huibertgat, which plays an important role in the calibration process, as its position close to the Dutch-German boarder is in tidal luv of the investigation area along the German Coastline. The results show that the model is able to perform both in calm weather and storm surge conditions. Atmospheric forcing is driven with forecast model data from the ICON-Model (DWD). As this is no observation data, disagreements between modelled and observed water level can also be due to under- or overestimated atmospheric parameters in the forecast model. The upper panel shows water level elevation, lower three panels show air pressure, wind speed and wind direction respectively.



Figure 7: Comparison of simulation (red) to observation (grey) and forecast model (light blue) data at gauge station Huibertgat during a time period with storm surge conditions in the German Bight (January 2017). Huibertgat is offshore the most eastern Dutch barrier islands Schiermonnikoog and Rottumerplaat. Observation data provided by Rijkswaterstaat.

Since for most gauge stations available historical single water level values are rare, we use multiannual mean values to compare the model results from historical bathymetries. In Figure 8 there are comparison plots for different gauge stations along the Weser estuary. The plots are ordered in upstream direction. The results were produced without meteorological forcing and with an arbitrary astronomical constellation, as we do not compare to a specified period but to multiannual mean values. In order to meet the observations better, mean sea level for calibration of the model was lowered by 25 cm. The discharge time series is artificial. It consists of discharges between approximately half to double of the mean discharge (300 m<sup>3</sup>/s) at the tidal barrier, which roughly meets the late 19<sup>th</sup> century as well as today situation (Elsebach et al. 2007). The thin grey tide curve in the background displays the tide under present conditions. It does not represent observation data, but also modelled data from a simulation with the present bathymetry and exactly the same boundary conditions. The difference between the red and the thin grey lines demonstrates the drastic change in tidal regime between the two morphological states, as already displayed in Figure 2. The horizontal dark grey dashed lines represent the five yearly mean tidal values at the corresponding gauge station for the year indicated in the legends. The shaded range illustrates minimum and maximum values of the corresponding five-year period. Further upstream, these ranges grow bigger, as influence from discharge grows with decreasing influence from the tides. The modelled results show the same behaviour. The tidal range at Große Weserbrücke is significantly smaller and the water level oscillates along with variations in discharge values around the historical mean values. In contrast, under present conditions (thin grey lines), discharge-differences are hardly notable close to the tidal barrier.



Figure 8: Comparison of simulated historical (red) and present (thin grey) tide to historical multiannual mean values (dashed grey lines and shaded areas) along the Weser estuary in upstream direction. Positions can be seen in Figure 9.

Differences of the tidal regime not only at selected gauge stations but along a transect of the Weser river with a discretization of 1 km is demonstrated in Figure 9. The upper and middle left panels show synthesized mean tidal curves (for explanation see Section 3) for every km of the tidal Weser river from km 0 to km 126 for historical (upper) and present (middle panel) morphological conditions. The positions are indicated in the lower left panel with the corresponding colour. The grey dots show the historical pathway of the main channel in the outer Weser before the Franzius corrections. Tidal curves are plotted over time beginning with high water at km 0. The dashed lines represent positions approximately at gauge stations (see legend. Not all gauge stations were already in operation in 1887 – they serve as orientation in the plots).

The plots again reveal the change of the tidal regime. The tidal range increases especially further upstream. The tidal phases shift along the transect, as under historical conditions, the tidal wave took longer to reach from outer Weser to Bremen. Finally, the decrease of the water level gradient can be derived from the figures. Present tidal curves are closely grouped. The right panels show different tidal wave lines and envelope curves of high and low waters along the transect for historical (upper three panels) and present time (middle three panels) and in comparison of both states (lower right panel). The small crosses show observation data.

Along the historical transect, simulated low water conditions remain significantly above the observed mean values, especially upstream of Vegesack. One reason for this is the sparse bathymetrical information and chosen assumptions (no calibration over friction, same roughness parameters as in present run). The representation of the historical tributaries Ochtum and Lesum might also be problematic here. They are represented in the model with substitute systems, but their share of the tidal volumes that the rivers would withdraw from the Weser in historical times can only be roughly estimated. Franzius (1888) stated that before the corrections, upstream of Ochtum and Lesum only half of the tidal volume would progress to Bremen. This might explain why the model is hardly able to rise low water crests according to observation data. This means that the numerical model still underestimates the tidal regime changes and that results are a rather conservative estimate.



Figure 9: Left panels show modelled tidal curves at different positions at longitudinal sections of the tidal Weser River for both the historical (1887, top panel) and present (2017, middle panel) morphological state. Dashed lines indicate position near tidal gauge stations (bottom right legend). Bottom left panel indicates the corresponding position of the tidal curves and gauge stations. Right panels show tidal wave lines along the same longitudinal sections for the historical (top three panels) and present (middle three panels) states for different positions of tidal peaks and crests. The dashed lines show the envelope curves for all possible tidal wave lines. The bottom right panel shows a comparison of the modelled envelope curves of historic (blue) and present (red) state. The crosses indicate observed tidal high and low water values from tide gauge records.

In the case of baroclinical calibration, open boundaries are set to a constant value of 35.0 PSU at the seaward and 0.3 PSU at riverine open boundaries. The domain is initiated with a hotstart file, that was previously ramped-up for 30 days with initial PSU between 32

and 34 on the shelf and <32 to 0.5 in the estuaries. Analysis though are carried out barotropically without solving for transport equations. Salinity plays an important role for sea level heights, especially in the estuarine zone, where the density gradient influences the elevation in the range of several centimetres. But when comparing only the differences between historical and present tidal characteristics rather then looking at absolute values, the differences remain nearly the same for both barotropical and baroclinical simulations in the coastal zone, as the influence from density evens out here (see Figure 10, bottom left panel in comparison to top right panel). Because the advantages due to baroclinical simulation regarding the outcome in the coastal zone is rather small compared to the strongly increased computational effort, simulations are carried out baroclinical approach is the difficulty to calibrate the historical model for salinity, as there is no sufficient data.



Figure 10: Model differences of bathymetry on top overall bathymetry (top left) and difference of mean tidal range values for the control run minus the setup of the historical lower and outer Weser and Jade estuaries in barotropic mode (top right), baroclinic mode (bottom left) and evaluated for only half of the simulation period (here, the slightly higher apogean spring-neap-cycle, bottom right). The top panels are adopted from Figure 13 in Section 3.

The differences between perigean and apogean tides also even out when comparing water level differences. The first estimations intended that it seemed important for the results to include at least two spring-neap cycles. But analysis showed that despite differences of up to several centimetres in absolute values, the effect cancels out when comparing the differences between historical and present morphological states (see Figure 10, bottom right panel in comparison to top right panel).

## 3 Results

The computation of the synthesized mean tidal curves is similar to the evaluation of a tidal record with a so-called "Auswerteharfe" (Hensen 1954). The simulations are carried out over a period of 32 days without atmospheric forcing. The first two days are omitted as ramp-up period. The remaining 30 days assure that the simulation contains results of at least two spring-neap cycles with diurnal, fortnightly and monthly inequalities of the tide (compare left panels in Figure 11). For every computational node of the domain, peak values, i. e. tidal high waters, are detected. The first and last value are again omitted, leaving – in general – 56 tidal high waters. All values of the 55 tidal cycles between two consecutive tidal highs are interpolated on a grid of 12.4 hours with a discretization of six minutes. The average of all of these interpolations is the synthesized mean tidal curve of the corresponding computational node (compare right panels in Figure 11). The procedure can be repeated with other values like u- and v-velocities. This allows to derive different hydrodynamic mean values for the whole domain like mean tidal high and low water values, flood and ebb phase durations, maximum flood and ebb velocities, residual currents and others.



Figure 11: Left panels: Simulated tidal record (red) over 30 days for an arbitrary point in the North Sea (top) and near Weener, Ems (bottom). Black markers indicate tidal peaks, small integers indicate tide numbers. Right panels: Synthesized mean tidal curves for elevation (red), u- (black) and v-velocity (dashed) derived from the 55 tidal cycles in the left panel.

Before showing results for the Ems and Weser estuary, the evaluation process shall be demonstrated in a first small scale example. The Hindenburgdamm, built in the 1920's, connects the island of Sylt with the mainland. Figure 12 shows how this dam influences the tidal characteristics in the area around Sylt. The model bathymetry has only been changed around the dam in the slightly blue shaded area in the upper left panel. The remaining bathymetry and all boundary conditions are equal to those of the control run. Consequently, the figure does not show how the real tidal characteristics have changed since the construction of the dam, but rather illustrate the sensitivity for the present morphological condition with and without the Hindenburgdamm.
The anti-clockwise rotating tidal wave propagates in northward direction at Sylt and thus is dammed behind the island. Consequently, the dam increases the tidal range (top right panel) and tidal high waters (bottom left panel) in the southern tidal basin and decreases them in the northern tidal basin. As the dam is positioned on the watershed divide between the two basins, there is no effect on low water conditions (bottom right panel).

Due to the strongly implicit character of the model, which enables the cross-scale approach in the first place, small numerical disturbances, i. e. caused from the wetting and drying algorithm, can propagate far off their place of origin, as Courant numbers are large. These disturbances can be observed in remote places of the domain, which cannot be related to local morphological changes. No explicit disturbances of this kind are shown in the results of the following figures, but since the wetting/drying-induced noise can be found up to two centimetres in range and cannot unambiguously be differentiated from the physical effect, all differences within this range, regardless of their vicinity to the morphological changes, are shaded differently in green colour.



Figure 12: Model differences of bathymetry on top overall bathymetry (top left), mean tidal range (top right), mean tidal high (bottom left) and low (bottom right) water conditions for the control run minus the setup without the Hindenburgdamm.

For the Weser estuary we compare two different historical setups in Figure 13. In the first setup, the bathymetry has only been changed in the lower Weser estuary, i. e. from Bremerhaven up to Bremen. In the second setup, the historical states of the outer Weser and Jade have also been considered in the simulation.



Figure 13: Model differences of bathymetry on top overall bathymetry (left) and mean tidal range values (right) for the control run minus the setup of the historical lower Weser estuary (top) and minus the setup of the historical lower and outer Weser and Jade estuaries (bottom) respectively.

The right panels show the modelled differences of the mean tidal range between the present and the two corresponding historical states and how far the changes reach outside of the region with changed bathymetry. The reader should be aware that River Elbe is included with its present topography for both runs.

Whereas for the first (upper) setup changes are found up to Dwarsgat (position indicated in Figure 9), changes of the second (bottom) setup influence the tide far beyond the margins of the changed bathymetry up to the coast of Schleswig-Holstein to small extends of a few centimetres. The influence of the changed topography is notably stronger in the anti-clockwise net-direction of the tidal wave propagation.

Also the evaluation of the Ems estuary shows an anti-clockwise shift of the differences (see Figure 14, right panel), even though changes above two centimetres seem to remain mainly within the area, where model bathymetry has been changed – in this case lower and outer Ems estuary.

In both cases, the MTR-rise is the result of decreasing MLW and increasing MHW.



Figure 14: Model differences of bathymetry on top overall bathymetry (left) and mean tidal range values (right) for the control run minus the setup of the historical lower and outer Ems estuary.

Part of the research project was to analyse effects that are caused from land subsidence due to gas extraction from the gas field of Groningen, as subsidence, in this case manmade, influences the relative sea level directly (Fokker et al. 2018). The Groningen gas field is located close to the Ems estuary and is supposed to be the largest onshore gas field in Western Europe (NAM B.V. 2016). Figure 15 shows measured and modelled subsidence values of the Ems-Dollard region from 1972 to 2013 that were collected within the continuous monitoring process of the gas field (NAM B.V. 2015). It can be seen that the subsidence reaches into the Ems estuary, even though only with small absolute values ranging from approximately two to 22 cm, mostly in the area of Paapsand, a tidal flat west of the navigational channel of the Ems. Subsidence from neighbouring German gas fields is not included, as there is no monitoring program collecting data. Besides that, output volumes from the German gas fields are significantly smaller than those from the Groningen gas field (LBEG 2018).

The subsidence values were transferred into a TIN and subtracted from the depth of the model grid in order to simulate differences to the control run.



Figure 15: Measured and modelled subsidence values in the Ems-Dollard region for the period 1972–2013. Green areas show gas fields, black dots measured subsidence at benchmarks and blue lines contour-lines of modelled subsidence (NAM B.V. 2016).



Figure 16: Model differences of bathymetry (red) on top overall bathymetry (left) and mean tidal range values (right) for the control run minus the setup of subsidence values from gas extraction in the gas field of Groningen. Mind the different scale in comparison to the other figures.

The results show that the influence from gas extraction in the Groningen gas field on single tidal characteristics in the Ems estuary remains small in comparison to the impact it has on the vertical land movement. The major part of the differences is below one cm (see Figure 16, right panel). The figure only shows results for mean tidal high-water conditions, because the greatest subsidence occurs in areas that fall dry during low water.

### 4 Summary

The setup and application of a cross-scale numerical model to analyse the influence of morphodynamical and man-made changes in the estuarine zones of the Lower Saxonian coast on tidal dynamics in adjacent regions was introduced.

Reproductions of morphological states of past and present times have been used to evaluate differences of the tidal regimes and visualize the reach of these changes into unmodified regions of the model. The results show that local changes of the bathymetry can influence the tidal regime even far offside the place of action, especially in the leeward direction of the tidal wave propagation.

The results give an estimate of the contribution of historically large estuarine river construction measures to tidal regime changes. The lack of historical data requires several assumptions in the model and boundary conditions to be made.

The results give a good impression of the man-made contribution to observed longterm trends in mean high and low water measurements, which is a new and relevant contribution to the interpretation of those data in the context of mean sea level rise and climate change driven effects.

### 5 Acknowledgements

We would like to thank our project partners from the Research Institute for Water and Environment at the University of Siegen and the Institute of Coastal Research at the Helmholtz-Zentrum Geesthacht for the collaboration and their contributions. ALADYN-C is funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) under the reference 03F0756C.

### 6 References

Ateljevich, E; Zhang, Y.; Nam, Kijin: Hydraulic Structures in SELFE. California Department of Water Resources, 2014.

BUND: Fahrwasservertiefungen der Unter- und Außenweser. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, Landesverband Bremen. Retrieved on Nov. 2018: http://archiv.bund-bremen.net/fileadmin/bundgruppen/bcmslvbremen/naturschutz/weservertiefung/Weservertiefungen\_UEbersichtstabelle.pdf.

DWD: ICON (Icosahedral Nonhydrostatic) Model, Deutscher Wetterdienst, Offenbach. Retrieved on Jun. 2018: https://www.dwd.de/SharedDocs/downloads/DE/modelldokumentationen/nwv/icon/icon\_dbbeschr\_aktuell.pdf?view=nasPublication&nn=495490

Elsebach, J.; Kaiser, R.; Niemeyer, H. D.: Identifikation von erheblich veränderten Gewässerbereichen in der Tideweser. Untersuchungsbericht der NLWKN Forschungsstelle Küste 05/2007, Norderney, 2007 (unpublished).

EasyGSH-DB: Erstellung anwendungsorientierter synoptischer Referenzdaten zur Geomorphologie, Sedimentologie und Hydrodynamik in der Deutschen Bucht (EasyGSH-DB). Retrieved on Apr. 2018: https://wwwmdi-de.baw.de/easygsh

EMODnet: European Marine Observation Data Network. Retrieved on Jan. 2017: http://www.emodnet.eu/bathymetry

FES: Finite Element Solution Global Tide Model 2014. FES2014 was produced by Noveltis, Legos and CLS Space Oceanography Division and distributed by Aviso, with support from Cnes. Retrieved on Okt. 2017: http://www.aviso.altimetry.fr/

Fokker, P. A.; van Leijen, F. J.; Orlic, B.; van der Marel, H.;Hanssen, R. F.: Subsidence in the Dutch Wadden Sea. In: Netherlands Journal of Geosciences, 97–3, 129–181, https://doi.org/10.1017/njg.2018.9, 2018.

Franzius, L.: Die Korrektion der Unterweser. Bremische Deputation für die Unterweserkorrektion, Bremen, 1888.

Haigh, I. D., Pickering, M. D., Green, J. A. M., Arbic, B. K., Arns, A., Dangendorf, S., et al.: The tides they are a-changin': A comprehensive review of past and future nonastronomical changes in tides, their driving mechanisms and future implications. In: Reviews of Geophysics, 57, https://doi.org/10.1029/2018RG000636, 2020.

Herrling, G.; Niemeyer, H. D.: Reconstruction of the historical tidal regime of the Ems-Dollard estuary prior to significant human changes by applying mathematical modeling. HARBASINS Report, https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/70706, 2007a.

Herrling, G.; Niemeyer, H. D.: Long-term Spatial Development of Habitats in the Ems-Dollard Estuary. HARBASINS Report, https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/7070, 2007b. Herrling, G.; Niemeyer, H. D.: Comparison of the hydrodynamic regime of 1937 and 2005 in the Ems-Dollard estuary by applying mathematical modeling. HARBASINS Report, https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/70703, 2008.

Herrling, G.; Elsebach, J.; Ritzmann, A.: Evaluation of Changes in the Tidal Regime of the Ems-Dollard and Lower Weser Estuaries by Mathematical Modelling. In: Die Küste, 81, 2014.

Hensen, W.: Modellversuche für die untere Ems. Mitteilungen der Hannoverschen Versuchsanstalt für Grundbau und Wasserbau. Franzius-Institut der Technischen Hochschule Hannover. Hannover, 1954.

Homeier, H.; Stephan H.-J.; Niemeyer, H. D.: Historisches Kartenwerk Niedersächsische Küste der Forschungsstelle Küste. Berichte der Forschungsstelle Küste. Band 43/2010, Norderney, 2010.

Hubert, K.; Wurpts, A.; Berkenbrink, C.: Modelling the Impact of Estuarine and Coastal Morphological Changes on Tidal Dynamics in the German Bight. In: E-proceedings of the 38<sup>th</sup> IAHR World Congress September 1–6, 2019, Panama City, https://doi.org/10.3850/38WC092019-0799, 2019.

HPA: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch Elbegebiet Teil III 2014. Hamburg Port Authority, Hamburg, 2017.

Lang, A. W.: Historisches Seekartenwerk der Deutschen Bucht. No 78 Grapow, Jade-, Weser- und Elbmündungen, Berlin 1870. Karl Wachtholtz Verlag, Neumünster 1973.

LBEG: Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland 2017. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie. Hannover, 2018.

NAM B.V.: Bodemdaling door aardgaswinning. NAM-velden in Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe. Status rapport 2015 en Prognose tot het jaar 2080. Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., Assen, 2015.

NAM B.V.: Winningsplan Groningen Gasveld 2016, 2016. https://www.nam.nl/algemeen/mediatheek-en-downloads/winningsplan-2016/\_jcr\_content/par/textimage\_996696702.stream/1461000524569/1d3f1162f0dbba3f15b8bbc2c7087224fb413e e1/winningsplan-groningen-2016.pdf, Request: Okt. 2017.

Niemeyer, H. D.; Kaiser, R.: Mittlere Tidewasserstände. In: Umweltatlas Wattenmeer. Band 2: Wattenmeer zwischen Elb- und Emsmündung. Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer, Umweltbundesamt. Wilhelmshaven, Berlin, 1999.

Niemeyer, H. D.: Prüfung der Sturmflutsicherheit in Brake zwischen Weserlust und Haus Linne. NLÖ Forschungsstelle Küste, Norderney, 2000 (unpublished).

NLWKN: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch Weser- und Emsgebiet 2015. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Norden, 2018.

Portal Tideweser: Weseranpassung. Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung. Retrieved on Jul. 2019: https://www.kuestendaten.de/Tideweser/DE/Projekte/Weseranpassung/Weseranpassung-node.html

Schureman, Paul: Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides. Special Publications No. 98. U.S. Department of Commerce, 1940. See- und Ozeanhandbücher: Nr. 2006: Nordsee, östlicher Teil. Von Hanstholm bis Terschelling. Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg, 1958.

Verboom, G. K.; de Ronde, J. G.;van Dijk, R. P.: A fine grid tidal flow and storm surge model of the North Sea. In: Continent. Shelf Res.,12, 1991.

Zhang, Y.; Ateljevich, E.; Yu, H-C.; Wu, C-H.; Yu, J. C. S.: A new vertical coordinate system for a 3D unstructured-grid model. In: Ocean Modelling, 85, 16–31, 2015.

Zhang, Y.; Ye, F.; Stanev, E. V.; Grashorn, S.: Seamless cross-scale modeling with SCHISM. In: Ocean Modelling, 102, 64–81, 2016.

# Praxisnahes Küstenlabor zur Entwicklung von kurzund langfristigen Strategien zum Schutz und zur Bewahrung der schleswig-holsteinischen Halligen (Living CoastLab Halligen)

Jürgen Jensen<sup>1</sup>, Arne Arns<sup>2</sup>, Sebastian Niehüser<sup>3</sup>, Holger Schüttrumpf<sup>4</sup>, Verena Krebs<sup>4</sup>, Theide Wöffler<sup>4</sup>, Roger Häußling<sup>5</sup>, Nenja Ziesen<sup>4</sup>, Michael Kleyer<sup>6</sup>, Julia Bass<sup>6</sup>, Hilmar von Eynatten<sup>7</sup>, Volker Karius<sup>7</sup> und Ingo Hache<sup>7</sup>

- <sup>1</sup> Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnenund Küstenwasserbau, juergen.jensen@uni-siegen.de
- <sup>2</sup> Universität Rostock, Professur Küstenschutz und Küstendynamik
- <sup>3</sup> Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnenund Küstenwasserbau
- <sup>4</sup> RWTH Aachen University, Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
- <sup>5</sup> RWTH Aachen University, Institut für Soziologie
- <sup>6</sup> Carl von Ossietzky Universität Oldenburg; Landscape Ecology Group Institut für Biologie und Umweltwissenschaften (LÖK)
- <sup>7</sup> Georg August Universität Göttingen; Abteilung Sedimentologie und Umweltgeologie

# Zusammenfassung

Im Rahmen des Vorgängerprojektes von Living CoastLab Halligen ("ZukunftHallig"; Jensen et al. 2016) konnte gezeigt werden, dass auf den Halligen verbleibende Sedimentablagerungen infolge regelmäßiger Überflutungen ein vertikales Anwachsen der Geländehöhen begünstigen. Gleichzeitig wurde jedoch ein stärkerer Trend im Anstieg der mittleren und extremen Wasserstände beobachtet. Prognosen über zukünftige Wasserstände deuten sogar auf noch stärkere Anstiege der Wasserstandsverhältnisse hin (Church et al. 2013). Durch die derzeitigen Aufwuchsraten können die Wasserstandsänderungen voraussichtlich nicht kompensiert werden. Um die Halligen nachhaltig zu sichern, werden daher Strategien benötigt, die diese natürliche Anpassungsfähigkeit fördern und gleichzeitig einen unmittelbaren Schutz der Bewohner\*innen auf den Warften ermöglichen. Durch ein inter- und transdisziplinäres Team aus Ingenieur\*innen, Soziolog\*innen, Ökolog\*innen, Geolog\*innen sowie Behörden und Vertreter\*innen der lokalen Bevölkerung wurden geeignete Strategien untersucht und entwickelt. Bei den Forschungsarbeiten wurde dabei zwischen kurzfristigen Schutzmaßnahmen und langfristigen Strategien zur Verbesserung der natürlichen Anpassungsfähigkeit der Halligen unterschieden. Das dreijährige Projekt wurde im Rahmen des Förderschwerpunkts "Küstenmeerforschung in Nord- und Ostsee (KüNO)" mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Insgesamt waren fünf Forschungsinstitute an dem Verbundvorhaben Living CoastLab Halligen beteiligt.

# Schlagwörter

Halligen, Trübung, Sedimentation, Erosion, Vegetation, Hydrodynamik, Schwebstoffe, Modellierung des Sedimenttransports

# Summary

Within the framework of the previous project of Living CoastLab Halligen (ZukunftHallig: Jensen et al. 2016), it could be shown that sediment deposits remaining on the Halligen as a result of regular flooding encouraging a vertical increase of the terrain heights. At the same time, however, a stronger trend in the rise of medium and extreme water levels was observed. Projections of future water levels indicate even stronger increases in water level conditions (Church et al. 2013). The current rates of accretion are unlikely to be able to compensate for the changes in water levels. In order to secure the Halligen in the long term, strategies are therefore needed that enhance this natural adaptability and at the same time enable direct protection of the inhabitants. Such strategies have been investigated and developed by an inter- and transdisciplinary team of engineers, sociologists, ecologists, geologists, authorities and representatives of the local population. In the research work, a decisive distinction was made between short-term protection measures and long-term strategies to improve the natural adaptability of the Halligen. The three-year project was funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) as part of the funding priority "Küstenmeerforschung in Nord- und Ostsee (KüNO)". A total of five research institutes were involved in the joint project Living CoastLab Halligen.

# Keywords

Halligen, turbidity, sedimentation, erosion, vegetation, bydrodynamics, suspended particulate matter, sediment transport modelling

# 1 Einleitung

Inmitten des Schleswig-Holsteinischen Wattenmeeres, das 2009 in die Liste des UNESCO-Welterbes aufgenommen wurde, befinden sich die weltweit einzigartigen Halligen. Die kleinen Marschinseln haben keine Deiche und sind aufgrund ihrer exponierten Lage unmittelbar dem Einfluss von Sturmfluten und dem Meeresspiegelanstieg ausgesetzt. Bis zu 50-mal im Jahr werden die Halligen mit Ausnahme der Warften und der darauf befindlichen Gebäude überflutet. Trotz dieser Überflutungen leben gegenwärtig etwa 270 Bewohner auf den Halligen, deren Lebensweise optimal an diese speziellen Bedingungen angepasst ist. Der Klimawandel wird jedoch für eine Verschärfung der Situation in diesem Lebensraum sorgen. Im Rahmen des Vorgängerprojektes "ZukunftHallig" (Jensen et al. 2016) konnte gezeigt werden, dass auf den Halligen verbleibende Sedimentablagerungen infolge regelmäßiger Überflutungen ein vertikales Anwachsen der Geländehöhen begünstigen. Gleichzeitig wurde jedoch ein stärkerer Trend im Anstieg der mittleren und extremen Wasserstände beobachtet. Prognosen über zukünftige Wasserstände deuten sogar auf noch stärkere Anstiege hin (Church et al. 2013), welche durch die derzeit abgelagerten Sedimentmengen nicht kompensiert werden können. Um die Halligen nachhaltig zu sichern, werden daher Strategien benötigt, die diese natürliche Anpassungsfähigkeit fördern und gleichzeitig einen unmittelbaren Schutz der Bewohner\*innen auf den Warften ermöglichen. Im Rahmen des Projektes Living CoastLab Halligen wurden diese Strategien von einem inter- und transdisziplinären Team aus Ingenieur\*innen, Soziolog\*innen, Ökolog\*innen, Geolog\*innen sowie Behörden und Vertreter\*innen der lokalen Bevölkerung entwickelt. Im Folgenden werden die übergeordneten Ziele des Verbundvorhabens Living CoastLab Halligen erläutert, das Vorgehen der einzelnen Teilprojekte beschrieben sowie die wichtigsten Erkenntnisse einschließlich eines Ausblicks und verbleibendem Forschungsbedarfs gegeben.

# 2 Ziele

Das übergeordnete Ziel des Verbundvorhabens Living CoastLab Halligen ist, nachhaltige Strategien für den Küstenschutz und das Küstenmanagement der schleswig-holsteinischen Halligen zu entwickeln. Im Forschungsprojekt "ZukunftHallig" (das Vorläuferprojekt dieses Antrags) identifizierten Jensen et al. (2016) zwei verschiedene Zeitskalen, die bei der Entwicklung solcher Strategien berücksichtigt werden müssen: (i) kurzfristige Schutzmaßnahmen für die Bewohner\*innen, die direkt umgesetzt werden könnten, und (ii) langfristige Strategien zur Verbesserung der natürlichen Anpassungsfähigkeit der Halligen. Die damit verbundenen Forschungsfragen lauten:

- (i) Welche Küstenschutzmaßnahmen und -strategien werden von den Bewohner\*innen als sinnvoll erachtet, welche sind (technisch) umsetzbar und was sind zentral zu berücksichtigende Aspekte?
- (ii) Wie kann die natürliche Anpassungsfähigkeit der Halligen unter Berücksichtigung eines erhöhten Meeresspiegels verbessert werden?

Um diese Fragen zu beantworten, wurde (i) die Wirksamkeit kurzfristiger Maßnahmen (innovative, mobile Hochwasserschutzmaßnahmen) im Labor für unterschiedliche Belastungsfälle getestet und hinsichtlich der für die Hallig-Bewohner\*innen elementaren Kriterien bewertet und in Gruppendiskussionen auf den Halligen vorgestellt. Für die Ableitung langfristiger Strategien zur natürlichen Anpassung an den Meeresspiegelanstieg und einen optimierten Küstenschutz wurden (ii) anhand von beobachteten und gemessenen Daten (z. B. Naturmessungen der Trübung, Erfassung des Wellenauflaufs, Einfluss der Vegetation auf die Sedimentablagerung etc.) sowie einer Kombination aus statistischen und hydrodynamisch-numerischen Modellen Analysen durchgeführt und bewertet. Diese ermöglichen, die Ursachen und Folgen verschiedener Maßnahmen (z. B. optimierte Deckwerkshöhen, Betriebsarten von Schleusen/Sielen, optimierte landwirtschaftliche Nutzung) abzuschätzen. Konkret wurden die im Folgenden aufgeführten weiteren Forschungsziele definiert:

- Simulation der Wechselwirkung zwischen hydrodynamischer Einwirkung und dem resultierenden Sedimenttransport.
- Abschätzung von langfristigen Änderungen der Sedimentation (für die Jahre 2030, 2050, 2080).
- Bereitstellung optimierter Schutz- und Managementstrategien für die Halligen.
- Erfassen von Trübungsmessungen vor und auf der Hallig und vertikalen Aufwuchsraten für einzelne Sturmflutereignisse.
- Verständnis des Beitrags der Vegetation auf die Sedimentablagerung.

• Akzeptanz durch Einbeziehung der Bewohner\*innen (Bedürfnisse, Erwartungen, Erfahrungen) für einen nachhaltigen Langzeitschutz der Halligen.

Um diese Ziele zu erreichen, sind detaillierte Kenntnisse über die lokalen Bedingungen erforderlich. Sowohl der Projektkoordinator als auch die Teilprojektleiter verfügen über eine breite Erfahrung (auch gemeinsam) im Untersuchungsgebiet und haben größtenteils bereits im Projekt "ZukunftHallig" mitgewirkt. Aufbauend auf diesem Wissen und dieser Erfahrung sind für das hier vorgestellte Nachfolgeprojekt vier Teilprojekte geplant worden, die Sozial-, Natur- und Ingenieurwissenschaften (interdisziplinär) sowie staatliche Institutionen und Bewohner\*innen (transdisziplinär) einbeziehen (vgl. Kapitel 3).

# 3 Vorgehen

Das Projekt gliederte sich in vier Teilprojekte bzw. Arbeitspakete (vgl. Abbildung 1). Insgesamt waren fünf Forschungsinstitutionen der Universitäten Siegen (Koordinator; Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu)), Aachen (Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW); Institut für Soziologie, Lehrstuhl Technik- und Organisationssoziologie (IfS)), Oldenburg (Institut für Biologie und Umweltwissenschaften: Arbeitsgruppe Landschaftsökologie (LÖK)) und Göttingen (Geowissenschaftliches Zentrum der Universität Göttingen (GZG)) an dem Verbundprojekt beteiligt.



Abbildung 1: Vernetzung der Teilprojekte im Projekt Living CoastLab Halligen.

Im ersten Arbeitspaket (Hallig-A) wurden am fwu multivariate Analysemethoden zur statistischen Erfassung und Beschreibung der ermittelten Werte aus Feldmessungen der Trübung in der Wassersäule zur Übertragung auf das Untersuchungsgebiet verwendet. Anschließend wurden die hydrodynamischen Einwirkungen sowie deren Rückkopplung auf den Sedimenttransport im Untersuchungsgebiet analysiert und modelliert. Übergeordnetes Ziel ist die Abschätzung langfristiger Sedimentationsraten für die Jahre 2030, 2050 und 2080 unter der Berücksichtigung von Meeresspiegelprojektionen, die ein vertikales Anwachsen der Hallig bedingen. Auf Basis dieser Informationen sowie der entwickelten Modellkette können optimierte Schutz- und Managementstrategien erarbeitet werden (Niehüser et al. 2020).

Im Rahmen des zweiten Arbeitspakets wurde die Wirksamkeit kurzfristiger Maßnahmen unter Berücksichtigung von Vorschlägen bewertet, die im Vorläuferprojekt "ZukunftHallig" gemeinsam mit den Hallig-Bewohner\*innen entwickelt wurden. Im Zentrum stehen dabei mobile Hochwasserschutzmaßnahmen. Diese wurden am IWW in Labortests untersucht und hinsichtlich ihrer technischen Eignung beurteilt (Hallig-B I). Parallel identifizierte das IfS über Expert\*innen-Interviews für die Hallig-Bewohner\*innen elementare Kriterien (Hallig-B II). In Gruppendiskussionen auf den Halligen wurden die Ergebnisse der Laboruntersuchungen vorgestellt und Meinungsbilder der Bewohner eingeholt (Hallig-B I und II). Ziel ist eine abschließende Bewertung der Wirksamkeit der mobilen Maßnahmen unter Einbeziehung der Hallig-Bewohner\*innen unter Berücksichtigung aller relevanter Kriterien (Krebs et al. 2020).

Am LÖK in Oldenburg wurde im dritten Arbeitspaket (Hallig-C) der Einfluss von Pflanzengemeinschaften und ihren biologischen Merkmalen auf die Sedimentation in Salzwiesen untersucht. Pflanzengemeinschaften und ihre Merkmale hängen von der Flächenbewirtschaftung durch die Landwirte ab. Somit können die Ergebnisse bei der Entwicklung langfristiger Managementstrategien helfen (Bass et al. 2020).

Das GZG in Göttingen führte im vierten Arbeitspaket (Hallig-D) schließlich Trübemessungen vor und auf der Hallig, Messungen zur Sedimentakkumulation auf der Hallig sowie Sedimenttransportmodellierungen durch. Übergeordnete Ziele waren die Identifikation von Trübstoffen, die auf Grund der Rahmenbedingungen nicht zur Sedimentakkumulation beitragen und die Erarbeitung und modellmäßige Überprüfung von Vorschlägen für einen modifizierten Küstenschutz (Karius et al. 2020).

#### 4 Ergebnisse und Ausblick

# 4.1 Hallig-A – Einschätzung des Einflusses von Einzelmaßnahmen und Strategieentwicklung (fwu)

Ob ein natürliches Potential zur Erhöhung der Sedimentdeposition vorhanden ist, hängt einerseits von den Trübstoffkonzentrationen in der Wassersäule rund um die Halligen während eines Hochwasserereignisses, das zu einem Landunter führt, ab. Andererseits muss der Transport der Sedimente auf die Hallig gewährleistet sein. Zur Abschätzung des Sedimenttransportes und der Ablagerungsprozesse sowie des Einflusses unterschiedlicher Maßnahmen und Eingriffe werden beobachtete und statistisch generierte Daten sowie eine Kombination verschiedener statistischer und numerischer Modelle herangezogen.

Für die statistische Erfassung und Beschreibung der ermittelten Trübewerte in der Wassersäule aus Feldmessungen zur flächigen Übertragung um und auf die Hallig Langeneß kann geschlussfolgert werden, dass die einzelnen Auswertungen der Messstationen unterschiedliche Charakteristiken aufweisen. Dies ist bedingt durch die Komplexität der ablaufenden physikalischen Prozesse und der Unsicherheiten in den Trübungsmessungen. Zudem stellen die verwendeten Daten aus der numerischen Modellierung eine vereinfachte Abbildung der in der Natur auftretenden und hochfrequenten Prozesse dar. Auf Basis von künstlichen neuronalen Netzen konnten die Trübedaten allerdings für die vorliegende Fragestellung adäquat wiedergegeben werden (RMSE: 0,03 bis 0,08 g/l; R<sup>2</sup>: 0,64 bis 0,89) und auf das Untersuchungsgebiet angewendet werden. Verbleibende Unsicherheiten resultieren im Wesentlichen aus der Extrapolation für unbekannte Ereignisse.

Die Simulation der Wechselwirkung zwischen hydrodynamischer Einwirkung und resultierendem Sedimenttransport auf die Hallig Langeneß hat gezeigt, dass bei moderaten Landunterereignissen, wie sie während der Projektlaufzeit erfasst wurden, deutlich weniger Sedimente und nur feinere Sedimentfraktionen (maßgeblich Schluffe) auf die Hallig gelangen als beispielsweise bei einer sehr schweren Sturmflut (Schluff bis Feinsand). Diese Erkenntnisse werden gestützt durch die Beobachtungen aus den Felduntersuchungen und die Erfahrungen der Hallig-Bewohner\*innen. Die Abschätzung von langfristigen Änderungen der Sedimentation für die Jahre 2030, 2050 und 2080 hat gezeigt, dass sich die Differenzen zwischen einem moderaten Landunter und einer Sturmflut bei einem erhöhten Basiswasserstand in Form des prognostizierten Meeresspiegelanstiegs angleichen. Der Sedimenttransport findet, begünstigt durch die hydrodynamischen Verhältnisse und die niedrigere Ausbildung der Halligkante, hauptsächlich im Süden der Hallig Langeneß statt. Die Sedimentation zeigte bei den durchgeführten Analysen Maximalwerte in der Nähe der Siele. Zukünftig ist zu berücksichtigen, dass mit einem steigenden Wasserstand durch den prognostizierten Meeresspiegelanstieg auch die Strömungsgeschwindigkeiten und damit die Sohlschubspannungen zunehmen und einer nachhaltigen Konsolidierung der Sedimente gegenüberstehen können.

Aus diesem Grund wird die Modellkette zur Entwicklung optimierter Schutz- und Managementstrategien für die Halligen bereitgestellt, um Vergleichsbetrachtungen und entsprechende Entscheidungen zum Erhalt der Halligen durchführen zu können (vgl. Karius et al. 2020). Die Untersuchungen lassen u. a. den Schluss zu, dass die Halligkante einen "widersprüchlichen" Nutzen aufweist. Auf der einen Seite können nur bei ausreichend hohen Wasserständen Sedimente auf die Hallig transportiert werden, die für einen vertikalen Aufwuchs erforderlich sind. Zum anderen wird für die Sedimentation eine ausreichend lange Beruhigung der Strömungsprozesse benötigt. Mit der entwickelten Modellkette können unterschiedliche Fragestellungen zum Erhalt bzw. zur Stabilisierung der Halligen untersucht werden, z. B. wie sich unterschiedliche Deckwerksstrukturen und -höhen sowie Sieltoranlagen, Halligpriele und Gräben auf den Transport und die Sedimentation der Trübstoffe in der Wassersäule auswirken. Hierbei ist es wichtig, die Erfahrungen der Hallig-Bewohner\*innen mit einzubeziehen und zu berücksichtigen.

### 4.2 Hallig-B I und II – Bewertung der einzelnen Küstenschutzmaßnahmen unter realen Bedingungen (IWW) und Verknüpfung von wissenschaftlichen Konzepten mit sozialen Bedürfnissen (IfS)

### 4.2.1 Hallig-B I

Im Rahmen des Arbeitspakets Hallig-B I fand die Untersuchung von kurzfristigen Küstenschutzmaßnahmen unter realen Bedingungen statt. Aufbauend auf Vorschlägen aus dem Vorgängerprojekt "ZukunftHallig" wurde hierzu insbesondere der Einsatz mobiler Hochwasserschutzmaßnahmen als relevant und kurzfristig umsetzbar identifiziert. Aufgrund der Schwierigkeiten, die mit einem ursprünglich geplanten Praxistest der mobilen Maßnahmen auf einer Halligwarft einhergingen (Probleme bei den Genehmigungen durch die Küstenschutzbehörden sowie die Unvorhersehbarkeit des tatsächlichen Eintretens einer Sturmflut während der Projektlaufzeit), fanden die Untersuchungen unter kontrollierten, aber dennoch realitätsnahen Bedingungen im Labor statt. Insgesamt wurden drei neuartige Systeme, die bereits im Binnenbereich Anwendung finden, sowie ein konventionelles System (Sandsäcke), das bereits jetzt auf den Halligen eingesetzt wird, getestet (Abbildung 2).



Abbildung 2: Im Labor getestete mobile Hochwasser- bzw. Küstenschutzmaßnahmen.

Zur Bewertung der Wirksamkeit wurden zwei Anwendungsfälle betrachtet: das Verschließen von Stöpen im Ringdeich der Warften und der Objektschutz auf der Warft. Die Maßnahmen wurden im Labor fünf Belastungsfällen (Einstau, Anströmen, Wellenanprall, Überströmen und Treibgutanprall) ausgesetzt. Durch Verschiebungsmessungen, die Bestimmung von Leckageraten sowie visuelle Beobachtung wurde die Performance der Maßnahmen bewertet. Die Beurteilung der hydrodynamischen Wirksamkeit im Sturmflutfall erfolgte schließlich aufbauend auf den labortechnischen Ergebnissen getrennt für die beiden Anwendungsfälle.

Generell sind alle untersuchten Maßnahmen auch unter den küstenspezifischen Belastungen hydrodynamisch wirksam. Einschränkungen ergeben sich für zwei Maßnahmen (Sandsäcke und Hydrobaffle) infolge der mangelnden Standsicherheit im Falle einer Überströmung, insbesondere beim Hydrobaffle führt ein Nichteinhalten des Freibords in bestimmten Anwendungsfällen zu einem plötzlichen und schlagartigen Versagen der Maßnahme. Unter Einbeziehung weiterer für die Halligbewohner\*innen relevanter Aspekte (Platzbedarf, Wartungsbedarf, Aufbauzeit etc.) ergibt sich ein differenzierteres Bild (siehe Krebs et al. 2020), wobei alle Maßnahmen unter bestimmten Bedingungen für den Einsatz auf den Warften geeignet sind. Sie verfügen damit über das Potential, den bestehenden Sturmflutschutz zu ergänzen und an Schwachstellen zu verbessern.

Die Vorstellung der Maßnahmen in Gruppendiskussionen auf den Halligen (s. u.) zeigte ein heterogenes Meinungsbild unter den Halligbewohner\*innen hinsichtlich ihrer Einschätzung der Wirksamkeit der Maßnahmen. Für die Zukunft könnte ein beispielhafter Einsatz neuartiger Maßnahmen vor Ort (direkter Einsatz oder Probeaufbau) dazu beitragen, die Akzeptanz in der Bevölkerung zu erhöhen. Die Untersuchungen zeigten: Eine Ergänzung der konventionellen Maßnahmen durch innovative mobile Maßnahmen kann den Küstenschutz verbessern und verstärken. Es gilt jedoch zu betonen, dass es sich um kurzfristige Maßnahmen handelt, die generelle Notwendigkeit langfristiger Maßnahmen bleibt hiervon unberührt.

### 4.2.2 Hallig-B II

Um den Einbezug der Halligbewohner\*innen in die Entwicklung alternativer Küstenschutzmaßnahmen zu gewährleisten, wurde zum einen Datenmaterial aus dem Vorgängerprojekt "ZukunftHallig" verwendet; zum anderen wurden 16 qualitative Interviews geführt und zwei Gruppendiskussionen (Hallig Hooge/Hallig Langeneß) arrangiert. Zu den besonderen Merkmalen des Lebensraumes Halligen zählen insbesondere ihre geografische Lage und die daraus entstehenden Einschränkungen. Aufgrund dieser exponierten Lebenslage, dem Leben mit Landunter sowie mit Sturmfluten, verfügen insbesondere die schon lange ansässigen Halligbewohner\*innen über ein besonderes Erfahrungswissen. Für die Akzeptanz alternativer Maßnahmen ist es wichtig, die Bedürfnisse und Erwartungen der Bewohner\*innen miteinzubeziehen, wobei zugleich auch auf die Erfahrungsbestände zurückgegriffen werden kann, um neue Maßnahmen auf praktische Anwendbarkeit zu überprüfen und weiterzuentwickeln. Die bisher auf den Halligen angewandten Küstenschutzmaßnahmen, wie unter anderem Warften, geschlossene Deckwerke und Lahnungen, haben einen sehr hohen Stellenwert. Als zentrale Aspekte, welche neue Küstenschutzmaßnahmen erfüllen sollen, wurden insbesondere die Verträglichkeit mit der Umgebung wie beispielsweise mit den Boden-, Wind-, Wasser-, Strömungsverhältnissen, aber auch mit den bisherigen Maßnahmen genannt. Neue Maßnahmen sollten somit kompatibel mit den bisherigen Maßnahmen sein und/oder als Ergänzung fungieren. Außerdem ist die Möglichkeit der Anwendung auf den Halligen besonders zu berücksichtigen: Hierzu zählen sowohl die technische Anwendbarkeit und die Personenkraft als auch die Lagerung und Wartung neuer Maßnahmen sowie die Kosten dieser. Herauszustellen ist die Individualität der einzelnen Halligen und Warften. Daher ist auch über unterschiedliche, individuelle Lösungen nachzudenken. Bezüglich der Sedimentation werden Vermutungen angestellt, dass sich lediglich bei Sturmflut Sediment ablagert, welches zum Anwachsen führt, jedoch nicht bei normalen Landunter. Dementsprechend kritisch wird auch das Stehenlassen des Wassers betrachtet. Durch den Vortrag zur Sedimentation im Rahmen der Gruppendiskussion konnten bisherige Ergebnisse der Proben auf Hallig Langeneß für die Bewohner\*innen transparent gemacht werden, wobei für die Teilnehmer\*innen auf Hooge die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Hallig Hooge relevant sind. Insgesamt werden generell Maßnahmenvorschläge zur Erhöhung der Sedimentation auf Hooge sowie zum Erhalt der Sandbänke als wünschenswert erachtet. Zudem wird eine intensivere Zusammenarbeit von Küsten- und Naturschutz gewünscht. Bei den vorgestellten Maßnahmen haben sich deutliche Unterschiede im Meinungsbild der Bewohner\*innen ergeben: Während die Diskussionsteilnehmer\*innen auf Langeneß und Nordstrandischmoor allen vorgestellten Systemen ablehnend gegenüberstehen, erscheint das automatische System Klappschott für die Bewohner\*innen von Hooge am geeignetsten, aber auch HWS-mobil wird hier bezüglich einer Erfüllung zentraler Aspekte positiv gewertet. Jedoch zeigte sich weiterer Testungsbedarf bezüglich der Faktoren Starkregen, Salzwasser und Salzluft. Darüber hinaus wird eine Testung von bestehenden Maßnahmen in der Versuchshalle, beispielsweise ein Test der herkömmlichen Schotten oder Dammbalken als Einsatz in der Stöpe, für einen Vergleich als wünschenswert erachtet. Außerdem wurden weiterführende, zu untersuchende Vorschläge getätigt (zu finden im Maßnahmenkatalog). Durch das oben genannte partizipative Verfahren, gewährleistet durch Interviews und Gruppendiskussionen, konnten und können die Bedürfnisse, Erwartungen und Erfahrungen der Halligbewohner\*innen in die (Weiter)-Entwicklung von alternativen Küstenschutzmaßnahmen einfließen.

# 4.3 Hallig-C – Bestimmung biogeomorphologischer Rückkopplungen zwischen Pflanzen und Sedimenten (LÖK)

In dem dritten Teilprojekt (Hallig-C) wurde der Einfluss von biologischen Eigenschaften der Vegetation auf die Sedimentationsrate in Salzwiesen untersucht. Die biologischen Eigenschaften werden auch durch die Bewirtschaftung der Flächen beeinflusst, so dass die Ergebnisse bei der Entwicklung langfristiger Managementstrategien der Halligen genutzt werden könnten.

Die Integration von Vegetation als Rauheitsbeiwert in hydrodynamischen Modellen hat eine lange Tradition (Manning 1891; Strickler 1923). Allerdings wird die Vegetation dafür nur in sehr grobe Klassen unterteilt und es bleibt Raum für subjektive Interpretation (Chow 1959). Eine bessere Beschreibung der Rauheit der Vegetation liefern messbare, biologische Eigenschaften der Pflanzen (Lavorel et al. 1997). Dennoch gibt es nur wenige – und zum Teil widersprüchliche – Studien, die biologische Merkmale und vertikale Höhenänderungen in Salzwiesen betrachten (Mudd et al. 2010; Reef et al. 2018).

Mit linearer Regression wurde der Einfluss von Rauheit und Abstand zur Halligkante auf die Sedimentation untersucht. Die Rauheit der Vegetation lässt sich durch die oberirdischen Eigenschaften Wuchshöhe, Stammbiomasse, Blattbiomasse, Blattfläche sowie spezifische Stammlänge als Wert für die Biegsamkeit des Stängels beschreiben. Viele Merkmale krautiger Pflanzen Nordwesteuropas sind korreliert (Kleyer et al. 2019), so auch die Eigenschaften der Arten auf den Halligen. Daher gingen sie als aggregierte Variable mit dem Wert der ersten Hauptkomponente in die Regression ein. Lediglich die Wuchshöhe ging als einzelne Variable in die Regression ein.

Die Ergebnisse zeigen einen linearen Zusammenhang zwischen Sedimentation und Distanz zur Halligkante und einen wannenförmigen Zusammenhang zwischen Sedimentation und Wuchshöhe der Pflanzen. Hohe Vegetation nahe der Halligkante führte zu besonders hoher Sedimentation. Die Güte der Modellanpassung war moderat. Andere Parameter der Rauigkeit der Vegetation (spezifische Stängellänge, Biomasse der Stängel etc.) hatten zwar auf den Halligen keinen signifikanten Einfluss auf die Sedimentation, in natürlicheren Salzwiesen, wie sie an der Festlandküste oder auf den Barriere-Inseln zu finden sind, allerdings schon (Bass et al. 2020).

Die Salzwiesen der Halligen sind größtenteils durch Gemeinschaften der oberen Salzwiese geprägt (vorwiegend vom Typ Juncus gerardii und Festuca rubra) und unterscheiden sich hauptsächlich durch die Beweidungsintensität. Eine starke Beweidung führt zu einer deutlichen Reduktion der Wuchshöhe am Ende der Vegetationsperiode, wenn die Sturmfluten beginnen, so dass dieses Merkmal die Rauheit am besten beschreibt. In Salzwiesen mit einer natürlicheren Sukzession und unterschiedlicheren Vegetationsgemeinschaften eignen sich hingegen die anderen biologischen Eigenschaften besser.

Die Ergebnisse des dritten Teilprojekts zeigen, dass die oberirdischen Strukturen der Vegetation einen zusätzlichen Einfluss auf die Sedimentationsrate und somit auf das vertikale Wachstum der Salzwiesen haben. Dieser Einfluss ist allerdings auf den Halligen relativ gering, so dass die Berücksichtigung der Vegetation in Modellen zu den Entwicklungen von Salzwiesen die Vorhersagen lediglich leicht verbessern kann. Im Hinblick auf langfristigen Managementstrategien könnte das Aussetzen der Beweidung und eine damit verbundene Steigerung der Rauheit ebenfalls nur zu einer geringen Zunahme der Sedimentablagerungen und einem dadurch resultierenden vertikalen Anwachsen der Geländehöhe führen.

# 4.4 Hallig-D – Vermessung, Bewertung und Beeinflussung der Trübung der Wassersäule (GZG)

Auf der Hallig Langeness wurde ein Trübemessnetzwerk errichtet, welches aus sechs Stationen im Watt und zwei Stationen auf der Hallig von Februar 2017 bis März 2020 insbesondere in den Wintermonaten kontinuierlich Trübedaten geliefert hat. Durch entsprechende Kalibration konnten SPM-Gehalte (Suspended particulate matter) bestimmt und mit Sedimentakkumulationsraten, die mit Sedimentfallen auf der Hallig gemessen wurden, korreliert werden. Ausgehend von den meteorologischen Parametern, wie Windrichtung und Windgeschwindigkeit, konnten die zeitliche und räumliche Variabilität des SPM um die Hallig bestimmt werden (Hache et al. 2019).

Im zweiten Schritt wurden bis zu acht Landunter im Zeitraum 2017–2019 einzeln erfasst und die Sedimentakkumulation auf der Hallig zeitglich bestimmt. Dabei wurden Sedimentfallen hinter den Halligkanten in räumlicher Nähe zu den im Watt befindlichen Trübemessstationen ausgewertet. Mit diesen Sedimentfallen konnten Sedimentakkumulationsraten hinter unterschiedlich hohen Halligrauhstreifen ("Igel") gemessen werden. Im Ergebnis konnten SPM-Gehalte vor der Halligkante gemessen werden, die zwar potentiell zur Sedimentakkumulation auf der Hallig beitragen könnten, aber bedingt durch die Küstenschutzmaßnahmen nur teilweise ausgeschöpft werden. Hierbei konnte der Einfluss der Igelhöhe auf die Sedimentakkumulation gezeigt werden (Hache et al. 2020). Über die Wintermonate integrierte Sedimentakkumulationsraten bestätigen die im Vorgängerprojekt "ZukunftHallig" erhobenen Daten (Schindler et al. 2014).

Im Zeitraum Winter 2019/2020 konnten erstmalig die SPM-Gehalte sowie die Sedimentakkumulation bei echten Sturmflutbedingungen gemessen werden. Insgesamt wurden drei Überflutungen gemessen. Die akkumulierten Sedimentmengen korrelieren insgesamt sehr gut mit den Trübedaten und zeigen eine bessere Ausnutzung des vorhandenen Potentials bei höheren Wasserständen auf der Hallig. Der Einfluss der Halligrauhstreifen nimmt somit unter Sturmflutbedingungen ab und die Korngröße der abgelagerten Sedimente nimmt im Median zu (Hache et al. 2020).

Im letzten Schritt wurden Sedimenttransporte mit dem Danish Hydraulic Institut's (DHI) Mike21 FM (flexible mesh) Modellierungsprogramm simuliert. Die grundlegende Modellerstellung erfolgte durch das Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen. Innerhalb dieses Modells nahmen wir Änderungen in der Igelhöhe vor und untersuchten deren Auswirkung auf den Sedimenttransport. Die Modellergebnisse zeigen, dass nicht jede Herabsetzung des Igels mit einer Erhöhung der Sedimentakkumulation einhergeht. So blieb ein positiver Effekt durch das Herabsetzen des Igels im Norden der Hallig aus. Im Süden von Langeneß erhöhte sich jedoch die Sedimentakkumulation deutlich, besonders bei normalen Landunter mit moderaten Überflutungshöhen. Die Sedimentakkumulation bei Sturmfluten übertrifft die bei moderaten Landunter allgemein um ein Vielfaches. Dagegen zeigen die Änderungen in der Igelhöhe einen geringeren Unterschied in der Menge der auf die Hallig transportieren Sedimente. Allerdings rücken bei Sturmfluten Sedimentmengen in den Fokus, die zwar auf die Halligoberfläche transportiert werden, jedoch mit dem ablaufenden Wasser die Hallig auch wieder verlassen (Hache et al. 2020).

Die Ergebnisse verdeutlichen den komplexen Zusammenhang aus (i) der Erhöhung des Transports von ausreichend verfügbarem Sediment (Hache et al. 2020) durch angepasste Küstenschutzmaßnahmen auf die Hallig und (ii) der Minimierung des Verlusts von bereits auf die Hallig transportierten Sedimenten. Dies zeigt weiteren Forschungsbedarf zur Erhöhung der Sedimentakkumulationsraten auf Langeneß auf. Die Ergebnisse der Modellierung sollten daher unter natürlichen Bedingungen getestet und validiert werden. Dazu könnten an strategischen Stellen der Hallig die Raustreifen niedriger gestaltet und eine angepasste Steuerung des ablaufenden Wassers bei Sturmfluten umgesetzt werden. Es sollten weiterhin Maßnahmen getroffen werden, die bei kleinen Landuntern das Überflutungswasser ungehindert auf die Hallig strömen lassen und bei Sturmfluten das ablaufende Wasser bremsen. Denkbar wäre eine variable Verbauung der Priele vor den Sieltoren und/oder eine variable Sieltorsteuerung.

### 5 Danksagung

Das Verbundprojekt Living CoastLab Halligen wurde vom 01. Oktober 2016 bis zum 30. September 2019 als eines von 12 Verbundprojekten mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Förderschwerpunkts "Küstenmeerforschung in Nord- und Ostsee (KüNO)" gefördert (BMBF-Förderkennzeichen: 03F0759A, 03F0759B, 03F0759C, 03F0759D). Es wurde darüber hinaus eine kostenneutrale Verlängerung um fünf Monate bis zum 29. Februar 2020 bewilligt.

Der Projektkoordinator, die Teilprojektleiter und Mitarbeiter bedanken sich für die intensive Betreuung durch den Projektträger Jülich und die fruchtbare Zusammenarbeit mit den Küstenschutzbehörden sowie der projektbegleitenden Gruppe.

### 6 Literaturverzeichnis

Bass, J.; Kleyer, M.: Der Einfluss von Vegetation auf Höhenänderungen in Salzwiesen. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Living CoastLab Halligen – Teil Hallig-C, BMBF-Förderkennzeichen 03F0759C: Vorhaben: Bestimmung biogeomorphologischer Rückkopplungen zwischen Pflanzen und Sedimenten, Arbeitsgruppe Landschaftsökologie, Universität Oldenburg, 2020.

Chow, V. T.: Open-channel hydraulics. New York, USA: McGraw-Hill New York, 1959.

Church, J. A.; Clark, P. U.; Cazenave, A.; Gregory, J. M.; Jevrejeva, S.; Levermann, A.; Merrifield, M. A.; Milne, G. A.; Nerem, R. S.; Nunn, P. D.; Payne, A. J.; Pfeffer, W. T.; Stammer, D.; Unnikrishnan, A. S.: Sea Level Change. Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC. In: Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013.

Hache I.; Karius V.; von Eynatten H.: Suspended particulate matter for sediment accumulation on inundated anthropogenic marshland in the southern North Sea – Potential,

thresholds and limitations. In: Continental Shelf Research, 207, 1042142020, https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104214, 2020.

Hache I.; Karius V.; Gutkuhn J.; von Eynatten H.: The development and application of an autonomous working turbidity measurement network: Assessing the spatial and temporal distribution of suspended particulate matter on tidal flats in the North Frisian Wadden Sea. In: Continental Shelf Research, 176, 36–50, https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.02.010, 2019.

Jensen, J.; Arns, A.; Schüttrumpf, H.; Wöffler, T.; Häußling, R.; Ziesen, N.; Jensen, F.; von Eynatten, H.; Schindler, M.; Karius, V.: ZukunftHallig – Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen unter Berücksichtigung des Klimawandels. In: Die Küste, 84, Wasserbau., 3–8, https://hdl.handle.net/20.500.11970/ 105210, 2016.

Karius, V.; Hache, I.; von Eynatten, H.: Messung und Bewertung von Trübstoffkonzentrationen – Schlussfolgerungen für einen die Sedimentakkumulation optimierenden Küstenschutz auf Hallig Langeneß. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Living CoastLab Halligen – Teil Hallig-D, Geowissenschaftliches Zentrum Abtl. Sedimentologie/Umweltgeologie, Georg-August Universität Göttingen, 2020.

Kleyer, M.; Trinogga, J.; Cebrián-Piqueras, M. A.; Trenkamp, A.; Fløjgaard, C.; Ejrnæs, R.; Bouma, T. J.; Minden, V.; Maier, M.; Mantilla-Contreras, J.: Trait correlation network analysis identifies biomass allocation traits and stem specific length as hub traits in herbaceous perennial plants. In: Journal of Ecology, 107(2), 829–842, 2019.

Krebs, V.; Ziesen, N; Wöffler, T.; Häußling, R.; Schüttrumpf, H.: Teilstationäre Maßnahmen als kurzfristige Strategie zum Schutz der nordfriesischen Halligen – Einsatztests unter praxisnahen Bedingungen und Berücksichtigung sozialer Bedürfnisse der Bewohner\*innen. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Living CoastLab Halligen – Teil Hallig-B, BMBF-Förderkennzeichen 03F0759B, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) und Institut für Soziologie (IfS) der RWTH Aachen University, 2020.

Lavorel, S.; McIntyre, S.; Landsberg, J.; Forbes, T. D. A.: Plant functional classifications: from general groups to specific groups based on response to disturbance. In: Trends in Ecology & Evolution, 12(12), 474–478, 1997.

Manning, R.: On the flow of water in open channels and pipes. In: Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland 20, 161–207, 1891.

Mudd, S. M.; D'Alpaos, A.; Morris, J. T.: How does vegetation affect sedimentation on tidal marshes? Investigating particle capture and hydrodynamic controls on biologically mediated sedimentation. In: Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 115, F03029, 2010.

Niehüser, S.; Klein, M.; Arns, A.; Jensen, J.: Analysen zum langfristigen Schutz der Halligen – Wechselwirkung zwischen Hydrodynamik und Sedimenttransport. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Living CoastLab Halligen – Teil Hallig-A, BMBF-Förderkennzeichen 03F0759A: Vorhaben: Einschätzung des Einflusses von Einzelmaßnahmen und Strategieentwicklung, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), Universität Siegen, 2020. Reef, R.; Schuerch, M.; Christie, E. K.; Möller, I.; Spencer, T.: The effect of vegetation height and biomass on the sediment budget of a European saltmarsh. In: Estuarine, Coastal and Shelf Science, 202, 125–133, 2018.

Schindler, M.; Karius, V.; Arns, A.; Deicke, M.; von Eynatten, H.: Measuring sediment deposition and accretion on anthropogenic marshland - part II: The adaption capacity of the North Frisian Halligen to sea level rise. In: Estuarine, Coastal, and Shelf Science, 151. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.08.027, 2014.

Strickler, A.: Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauhigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen. Bern, Schweiz: Eidg. Amt für Wasserwirtschaft, 1923.

# Analysen zum langfristigen Schutz der Halligen – Wechselwirkung zwischen Hydrodynamik und Sedimenttransport

Sebastian Niehüser<sup>1,3</sup>, Martin Klein<sup>2</sup>, Arne Arns<sup>3</sup> und Jürgen Jensen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnen- und Küstenwasserbau, sebastian.niehueser@uni-siegen.de

<sup>2</sup> Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnen- und Küstenwasserbau

<sup>3</sup> Universität Rostock, Professur Küstenschutz und Küstendynamik

#### Zusammenfassung

In den letzten Jahrhunderten verursachten die gemeinsamen Auswirkungen von Meeresspiegelanstieg und Sturmfluten, landwirtschaftliche Nutzung, Setzungen durch Entwässerung und Torfabbau massive Landverluste an der nordfriesischen Küste. Es wird geschätzt, dass in den letzten Jahrhunderten rund 100 Halligen verloren gegangen sind und nur zehn von ihnen bis heute existieren (Quedens 1992). Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden Deckwerke errichtet und seitdem sind die Halligen weitestgehend größenstabil, aber werden immer noch regelmäßig überflutet. Frühere Forschungsprojekte (z. B. "Sahall", "ZukunftHallig") kamen zu dem Schluss, dass die Halligen von diesen Überflutungen durch Sedimentablagerungen profitieren. Hache et al. (2020) zeigen jedoch, dass einige der vorhandenen Deckwerke wie eine Barriere wirken und den Sedimenttransport auf die Halligen teilweise behindern. Die Untersuchungen aus "ZukunftHallig" zeigten auch, dass der Anstieg des Meeresspiegels größer verlief als die vertikale Akkretion im letzten Jahrhundert (Schindler et al. 2014b). In der Folge würden die Halligen in Zukunft häufiger oder sogar dauerhaft überflutet werden und verloren gehen. Die Qualifizierung und insbesondere die Quantifizierung der Sedimentationsprozesse sind jedoch nach wie vor eine anspruchsvolle Aufgabe. Ein Meeresspiegelanstieg wird auch die Extrem- bzw. Sturmflutereignisse auf höhere Basiswasserstände heben und die hydrodynamischen Einwirkungen erhöhen, die Erosion und Landverluste fördern. Darüber hinaus stellen die Halligen ein Offshore-Barrierensystem dar, das die Festlandküste vor starken Windwellen und Vorlanderosionen schützt. Ein nachhaltiger Schutz der Halligen trägt damit auch zum Küstenschutz des schleswigholsteinischen Festlandes bei.

Bei den vorgestellten Untersuchungen wird mittels zweidimensionaler hydrodynamischnumerischer Modelle der Einfluss der Hydrodynamik auf die Sedimentdynamik und letztlich auf das vertikale Anwachsen der Halligen ermittelt. Die in der Wassersäule vorhandenen Sedimentkonzentrationen werden aus vorhandenen Trübungsmessungen vor und auf der Hallig Langeneß (Hache et al. 2019) mittels statistischer Ansätze auf das Modellgebiet projiziert. Dabei werden die verschiedenen erfassten Partikelklassen berücksichtigt. Für die Modellierung der Sedimentdynamik wird schließlich ein an das hydrodynamisch-numerische Modell gekoppeltes lagrangesches Partikeltransportmodul verwendet. Dadurch können die zurückgelegten Pfade der einzelnen Partikel, infolge der simulierten Sturmfluten und Landunter sowie Meeresspiegelanstiegsprojektionen, von ihrem Ursprung bis zur Sedimentation nachvollzogen werden. Die Modellkette wird schließlich für die Entwicklung optimierter Schutz- und Managementstrategien für die Halligen bereitgestellt.

# Schlagwörter

Hydrodynamisch-numerische Modelle, Sedimentation, Erosion, Meeresspiegelprojektion, Halligen

# Summary

Over the last centuries, the combined effects of cultivation, subsidence, sea-level rise and storm surges have caused massive land losses on the North Frisian coast. It is estimated that about 100 Halligen have been destroyed in recent centuries and only ten of them have survived to this day (Quedens 1992). At the beginning of the 20th century, revetments were built and since then the Halligen have mostly been stable in size, but still frequently flooded. Earlier research projects (e.g. Sahall, ZukunftHallig) concluded that the Halligen benefit from these inundations through sediment deposition. However, Hache et al. (2020) show that some of the existing revetments act as a barrier and partially impede sediment transport on the Halligen. Furthermore, Schindler et al. (2014b) show that sea level rise was faster than vertical accretion in the last century. As a consequence, the Halligen mould be flooded more frequently or even permanently in the future. However, quantifying the sedimentation processes is still a challenging task. Sea-level rise will also shift extreme events to higher levels and increase the hydrodynamic impacts the mainland coast from strong wind waves and foreshore erosion. A sustainable protection of the Halligen thus also contributes to the coastal protection of the Schleswig-Holstein mainland.

In the presented investigations the influence of hydrodynamics on the sediment dynamics and finally the vertical accretion of the Halligen is determined by using two-dimensional hydrodynamic-numerical models. The sediment concentrations in the water column are projected onto the model area from existing turbidity measurements around and on the Hallig Langeneß (Hache et al. 2019) using statistical approaches. The different particle classes recorded are taken into account. For the modelling of the sediment dynamics, a particle transport module coupled to the hydrodynamic-numerical model is used. This allows the trajectories of the individual particles, as a result of the simulated storm surges and inundation events and sea level rise projections, to be traced from their origin to sedimentation. The model chain will finally be made available for the development of optimized protection and management strategies for the Halligen.

# Keywords

hydrodynamic-numerical models, sedimentation, erosion, sea level projection, Halligen

# 1 Einleitung

Vor der schleswig-holsteinischen Nordseeküste liegen inmitten des nordfriesischen Wattenmeeres die Halligen. Bei den Halligen handelt es sich um zehn kleine Marschinseln, die um die Nordseeinsel Pellworm angeordnet sind. Die Halligen werden nicht durch Deiche vor Überflutungen geschützt und sind aufgrund ihrer exponierten Lage und ihres geringen Höhenniveaus geprägt durch die Gezeiten der Nordsee. Zusätzlich sind die Halligen dem unmittelbaren Einfluss von Sturmfluten ausgesetzt, wodurch es bis zu 50-mal im Jahr zu einem sogenannten "Landunter" kommt. Bei einem Landunter werden die Halligen nahezu vollständig überflutet, lediglich die 38 "Warften" (künstliche Erhöhungen), auf denen die Häuser der rund 270 Bewohner der Halligen liegen, ragen dann noch aus dem Meer hervor. Auf einigen Halligen wurden in den vergangenen Jahren Sommerdeiche oder Deckwerke (Halligigel) mit unterschiedlichen Höhen hergestellt, wodurch es auf den verschiedenen Halligen unterschiedlich oft zu Landuntern kommt. Aufgrund dieser regelmäßigen Überflutungen sind die Halligbewohner\*innen traditionell auf die Verhältnisse und das Leben auf den Halligen angepasst. Durch den Anstieg des mittleren Meeresspiegels (MSL) in Folge des Klimawandels wird es jedoch zu einem Anstieg der Überflutungshäufigkeiten auf den Halligen kommen. Dies würde unmittelbar zu einer Verschärfung der Lebensbedingungen der dortigen Bewohner\*innen führen. Neben der grundliegenden Funktion als Lebensraum für die Hallig-Bewohner\*innen erfüllen die Halligen im Wattenmeer zusätzlich Funktionen für den Küstenschutz des Festlandes, da z. B. bei Sturmfluten die Seegangsbelastungen im Wattenmeer aufgrund der geringen Wassertiefen im Bereich der Halligen reduziert werden.

Die Entstehung der Halligen in ihrer heutigen Form unterliegt einer langen Historie. Das Wattenmeer wurde nach den Eiszeiten und einem sich verlangsamenden MSL-Anstieg über die vergangen 3.000 Jahre durch natürliche Prozesse geformt (Streif 2004). Gezeiten und Seegang haben Ablagerungen eines ehemaligen Gletschers erodiert, wobei sich der Sand an den Inseln sowie die Feinanteile und Lockersedimente im Wattenmeer abgelagert haben. Durch den hohen Anteil an feinen Sedimenten finden im Wattenmeer, bedingt durch natürliche und anthropogene Prozesse, noch immer signifikante morphologische Veränderungen statt. So bilden die heutigen Halligen nur die Überreste eines ehemals deutlich größeren Marschlandes, das über die vergangenen Jahrhunderte durch Sturmfluten teilweise zerstört wurde (Ricklefs et al. 2015, Quante et al. 2016, Jensen 2019). Auf Grund dieser Effekte sowie der Kultivierung und erfolgten Setzungen hat sich die Anzahl der Halligen in den letzten Jahrhunderten bereits von rund 100 auf die zehn Verbliebenen reduziert (Quedens 1992). Generell wird das Watt jedoch als resilient angesehen und kurzfristige Einwirkungen haben somit keine langfristigen Effekte auf die Morphologie. Eine langfristige Änderung im Energieeintrag durch äußere Einwirkungen, beispielsweise durch den MSL-Anstieg, kann jedoch die Morphodynamik nachhaltig verändern (Bartholomä und Flemming 1996).

Im Watt vor Schleswig-Holstein liegen die abgelagerten Sedimente hauptsächlich als Feinsand und nur in geringeren Fraktionen als Mittel- oder Grobsand vor. In Küstennähe und an den Halligkanten steigen die Anteile an kohäsiven, schlammigen Anteilen deutlich an. Der Bereich um die größte nordfriesische Hallig Langeneß ist ebenfalls dominiert von feinsandigen Sedimenten, während um die Hallig ein schmaler Streifen Mittelsand vorhanden ist. Entlang der südöstlichen Halligkante finden sich zusätzlich hohe Anteile von Schluff und Ton mit über 50 %. Vor dem nordöstlichen Ufer befinden sind Schluff- und Tonanteile von 20 % bis 50 %. Fraktionen mit Grobsand sind erst in weiterem Abstand von Langeneß anzutreffen (Figge 1981). Als signifikanter Indikator morphologischer Aktivitäten gelten die suspendierten Partikel in der Wassersäule (*engl. suspended particulate matter*, SPM) (Pietrzak et al. 2016). Im Wattenmeer treten im Vergleich zur restlichen Nordsee relativ hohe SPM-Konzentrationen auf, was auf eine ausgeprägte Morphodynamik zurückzuführen ist (van Beusekom 2016). Bei Betrachtung der SPM-Verteilung um Langeneß lässt sich dabei zusätzlich eine hohe Variabilität feststellen. Die SPM-Konzentration wird dabei unter anderem von den meteorologischen Bedingungen, den Jahreszeiten und lokalen Gegebenheiten beeinflusst. Hohe SPM-Konzentrationen treten vor allem bei Sturmfluten bzw. Stürmen auf, bei denen die SPM-Konzentration ein Vielfaches der bei ruhigem Wetter auftretenden Konzentration betragen kann (Hache et al. 2019). Die Deposition von gelösten Sedimenten hängt von vielen Faktoren, wie beispielweise Gelände- und Vegetationshöhen ("Auskämmeffekt"), ab (Nolte et al. 2018). Die natürliche Sinkgeschwindigkeit der Partikel führt dazu, dass sich die Sedimente unweit ihrer Quelle akkumulieren (Temmerman et al. 2003). Auf Langeneß dienen die Halligkante und die Sieltore aufgrund der nur temporären Überflutungen häufig als Sedimentquellen (Schindler et al. 2014b). Die Sedimentdynamik auf Langeneß unterscheidet sich leicht in ihrer geografischen Ausprägung. Die Sedimentfracht und -deposition im Osten der Hallig Langeneß ist ausgeprägter als im Westen. Zusätzlich zeigten Nolte et al. (2018), dass durch die Vegetationshöhe auf Langeneß unbeweidete Flächen größere Sedimentdepositionsraten aufweisen als beweidete Flächen. Das bestätigen Bass et al. (2020) und weisen eine Abhängigkeit der Wuchshöche als funktionelles Merkmal der Vegetation mit der vertikalen Aufwuchsrate nach. Nach Schindler et al. (2014b) werden auf der Hallig durch die regelmäßigen Überflutungen schließlich vertikale Aufwuchsraten von 1,2 mm/a erreicht.

Die Untersuchungen im Vorgängerprojekt "ZukunftHallig" (Jensen et al. 2016) haben entsprechend gezeigt, dass die Sedimentablagerungen auf den Halligen infolge regelmäßiger Überflutungen ein vertikales Anwachsen der Geländehöhen begünstigen. Dem gegenüber wurde jedoch auch ein Anstieg der mittleren und extremen Wasserstände beobachtet. Wegen dieser und weiterer Prognosen, die auf einen noch stärkeren Anstieg der Wasserstände hindeuten (Church et al. 2013), ist jedoch fraglich, ob der Anstieg der Wasserstände vom derzeitigen vertikalen Aufwuchs durch Sedimentablagerungen kompensiert werden kann. In Schindler et al. (2014b) wurde diesbezüglich dargestellt, dass die vertikalen Aufwuchsraten durch Sedimentablagerungen auf den Halligen im Zeitraum von 1915 bis 2011 nicht mit dem Anstieg der Wasserstände mithalten konnten. Zusätzlich konnte ermittelt werden, dass die seit Beginn des 20. Jahrhunderts errichteten Küstenschutzeinrichtungen zwar die Überflutungshäufigkeiten verringert haben, gleichzeitig jedoch auch die Ablagerung von Sedimenten behinderten. Vor diesem Hintergrund gilt es, die natürlichen Vorgänge des vertikalen Aufwuchses der Halligen zu analysieren und darauf aufbauend Maßnahmen zum nachhaltigen Schutz und dem Erhalt der Halligen zu entwickeln. Es werden Strategien benötigt, die die natürliche Anpassungsfähigkeit der Halligen zukünftig fördern und damit einen unmittelbaren Schutz der Bewohner\*innen auf den Warften ermöglichen.

Zum nachhaltigen Schutz und dem Erhalt der Halligen ist es erforderlich, die derzeitige Dynamik des Sedimenttransportes zu untersuchen und daraus Rückschlüsse auf zukünftige Entwicklungen zu erhalten. Dafür wird im vorliegenden Beitrag der derzeitige Sedimenttransport exemplarisch für die Hallig Langeneß untersucht, um Abschätzungen hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen zu ermöglichen. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich die gewonnenen Erkenntnisse und Methoden auch auf die anderen Halligen übertragen lassen. Konkret werden folgende Frage- bzw. Aufgabenstellungen bearbeitet:

• Statistische Erfassung und Beschreibung der ermittelten Werte aus Feldmessungen der Trübung in der Wassersäule zur Übertragung auf das Untersuchungsgebiet.

- Simulation der Wechselwirkung zwischen hydrodynamischer Einwirkung auf den resultierenden Sedimenttransport im Untersuchungsgebiet.
- Abschätzung von langfristigen Änderungen der Sedimentation (für die Jahre 2030, 2050, 2080).
- Bereitstellung der Modellkette zur Entwicklung optimierter Schutz- und Managementstrategien für die Halligen.

## 2 Methodik und verwendete Datengrundlage

Bei den Untersuchungen wird mittels zweidimensionaler hydrodynamisch-numerischer Modelle (HNM) der Einfluss der Hydrodynamik auf die Sedimentdynamik und letztlich auf das vertikale Anwachsen der Halligen ermittelt. Die in der Wassersäule vorhandenen Sedimentkonzentrationen werden aus vorhandenen Trübungsmessungen vor und auf der Hallig Langeneß (Hache et al. 2019) mittels statistischer Ansätze auf das Modellgebiet projiziert. Es werden außerdem verschiedene Partikelklassen berücksichtigt. Für die Modellierung der Sedimentdynamik wird schließlich ein an das HNM gekoppeltes lagrangesches Partikeltransportmodul verwendet. Dadurch können die infolge der simulierten Sturmfluten und Landunter sowie Meeresspiegelanstiegsprojektionen zurückgelegten Pfade der einzelnen Partikel von ihrem Ursprung bis zur Sedimentation nachvollzogen werden. In den folgenden Kapiteln wird detaillierter auf die Methodik und die verwendeten Datengrundlagen eingegangen. Es wird dabei maßgeblich zwischen den HNM und den statistischen Verfahren differenziert. Anschließend werden die Ergebnisse vorgestellt, wobei der Schwerpunkt auf den Änderungen als Folge des prognostizierten Meeresspiegelanstiegs in Bezug auf die Hydrodynamik und das Sedimentverhalten liegt. Im letzten Teil werden schließlich mögliche Lösungsstrategien und der weitere Forschungsbedarf dargelegt.

### 2.1 Hydrodynamisch-numerische Modellierung

Für die Erstellung einer Modellkette zur Simulation der hydrodynamischen Verhältnisse um und auf der Hallig Langeneß wird in einem ersten Schritt auf ein existierendes HNM der gesamten Nordsee einschließlich eines Teils des Nordatlantiks zurückgegriffen (vgl. Arns et al. 2015). Die verwendeten Randbedingungen sowie die Kalibrierung und Validierung der Modellergebnisse sind in Arns et al. (2015, 2017) erläutert. Das Modell wird entsprechend aktuellster bathymetrischer Gezeiten und atmosphärischer Randbedingungen angepasst. Der wesentliche Unterschied in den Randbedingungen liegt in dem verwendeten meteorologischen Antrieb. Um die beprobten Landunter-Ereignisse, die während der Projektlaufzeit zwischen 2016 und 2020 erfasst wurden, in den Simulationen zu berücksichtigen, werden möglichst aktuelle Reanalysedaten der Atmosphäre benötigt. Für die vorliegenden Analysen werden die meteorologischen Daten des ERA5-Projekts des "European Centre for Medium-Range Weather Forecasts" (ECMWF) verwendet (C3S 2017). Die ERA5-Daten bestehen aus der reanalysierten und homogenisierten Kombination eines Wettermodells und Beobachtungen von Satelliten und Wetterstationen weltweit auf einem Gitter mit einer Auflösung von ca. 31 km. Für die HNM werden der Luftdruck sowie die u- und v-Komponenten der Windgeschwindigkeit aus dem ERA5-Datensatz verwendet. Die zeitliche Auflösung der meteorologischen Daten beträgt 60 Minuten. Der beobachtete

Anstieg des Meeresspiegels wird an den Randbedingungen über die beiden Pegelstandorte Aberdeen und Wick berücksichtigt.

Das Modell der Nordsee liefert schließlich die hydrodynamischen Randbedingungen für ein zweites und hochaufgelöstes Modell des Untersuchungsgebietes Hallig Langeneß (vgl. Abbildung 1). Um die benötigten Wasserstands- und Seegangsinformationen zu simulieren, wird ein zweidimensionales, tiefenintegriertes, barotropes HNM entwickelt. Die Simulation erfolgt gekoppelt für die Gezeiten und den atmosphärischen Antrieb, um entsprechend deren Wechselwirkung abbilden zu können. Die Modellerstellung erfolgt mit der Software MIKE21® vom Danish Hydraulic Institute (DHI; Warren und Bach 1992). Das Modell basiert auf der numerischen Lösung der zweidimensionalen Flachwassergleichungen in Form der tiefenintegrierten, inkompressiblen Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen unter Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung. Somit besteht das Modell aus Kontinuitäts-, Impuls-, Temperatur-, Salinitäts- und Dichtegleichungen. Die räumliche Diskretisierung der Gleichungen erfolgt mit einem zellzentrierten Finite-Volumen-Verfahren (DHI 2017a). Zusätzlich zu dem Hydrodynamik-Modul wird das MIKE21<sup>®</sup> "Spectral Wave Model FM (MIKE 21 SW)" zur Simulation windinduzierter Wellen verwendet. Dabei wird über Modelle das Aufwachsen, die Transformation und der Zerfall der Windwellen im Offshore- und Küstenbereich nach der "wave action conservation"-Gleichung simuliert (DHI 2017b). Die Steuerung und Auswertung der Simulationen erfolgt automatisiert über die Software Matlab<sup>®</sup>.



Abbildung 1: Darstellung der unterschiedlichen Datensätze zur Erstellung des Detailmodells der Hallig Langeneß.

Die höhenmäßige Erfassung der Hallig Langeneß mit umgebendem Wattenmeer im Detailmodell basiert auf unterschiedlichen Datensätzen (vgl. Abbildung 1). Die flächendeckende Topographie der Hallig Langeneß und der angrenzenden Wattflächen wird über digitale Geländemodelle aus den Jahren 2005 und 2014 auf einem kartesischen Gitter mit einer Auflösung von 1 m (DGM1) berücksichtigt. Weiterhin sind Vermessungsdaten von 2014 aus der Grundinstandsetzung und Erweiterung des Lorendammes zwischen den Halligen Langeneß und Oland eingeflossen. Die Daten wurden seitens des Landesbetriebs für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH) bereitgestellt. Nicht abgedeckte Bereiche der Wattflächen werden mit der Bathymetrie für das Jahr 2012 aus dem Bodenmodell des KFKI-Forschungsprojekts "Aufbau von integrierten Modellsystemen zur langfristigen Modellierung der Morphodynamik in der Deutschen Bucht" (AufMod; Heyer und Schrottke 2013) ergänzt. Zur detaillierten Abbildung des Grabensystems und der Halligkante (Deckwerk und Halligigel) wird der Bauwerkskatalog des LKN.SH herangezogen. Die unterschiedlichen Datensätze und das Rechengitter sind in Abbildung 1 zusammengetragen.

Die Simulationen werden insgesamt für zehn erfasste Landunter-Ereignisse zwischen September 2017 und März 2019 durchgeführt. Da in dem Zeitraum keine sehr schwere Sturmflut aufgetreten ist, werden zusätzlich vier Sturmflutereignisse aus der Vergangenheit betrachtet. Jedes Ereignis wird mit einer Vor- und Nachlaufzeit von je einer Woche simuliert. Die Modellergebnisse stellen schließlich die Basis für die Simulation des Sedimenttransports dar. Da die hydrodynamische Ausgabe und die Simulationsergebnisse auch als Prädiktorvariablen für die statistische Erfassung der Trübung dienen, werden zusätzlich die beiden Messzeiträume 2017/18 und 2018/19 vollständig simuliert. Die Zusammenstellung aller betrachteten Simulationen findet sich in Tabelle 1.

Datum	Тур	Simulationszeitraum	
24.11.1981	Sturmflut	17.11.1981 - 30.11.1981	
26.01.1990	Sturmflut	19.01.1990-01.02.1990	
28.01.1994	Sturmflut	21.01.1994-03.02.1994	
06.12.2013	Sturmflut	29.11.2013-12.12.2013	
13.09.2017	Landunter	06.09.2017-19.09.2017	
29.10.2017	Landunter	22.10.2017-04.11.2017	
08.12.2017	Landunter	01.12.2017-14.12.2017	
12.02.2018	Landunter	05.02.2018-18.02.2018	
08.12.2018	Landunter	01.12.2018-14.12.2018	
08.01.2019	Landunter	01.01.2019-14.01.2019	
09.02.2019	Landunter	02.02.2019-15.02.2019	
05.03.2019	Landunter	26.02.2019-11.03.2019	
10.03.2019	Landunter	03.03.2019-16.03.2019	
16.03.2019	Landunter	09.03.2019-22.03.2019	
	Saison 2017/18	01.09.2017-01.04.2018	
	Saison 2018/19	01.09.2018-01.04.2019	

Tabelle 1: Simulierte Landunter- und Sturmflutereignisse.

Für die Abschätzung von langfristigen Änderungen der Sedimentation für die Jahre 2030, 2050 und 2080 wird zusätzlich jedes Landunter- und Sturmflutereignis unter Berücksichtigung einer herabgesetzten Bathymetrie simuliert. Es werden an dieser Stelle allerdings keine dynamischen Effekte berücksichtigt, die einer veränderten Küstenlinie Rechnung tragen. Die Szenarienläufe basieren auf den regionalisierten Meeresspiegeländerungen aus Slangen et al. (2014) unter Berücksichtigung der RCP8.5 (*Representative Concentration Pathways*) Projektionen. Daraus ergeben sich relative Änderungen des mittleren Meeresspiegels von 0,10 m (2030), 0,24 m (2050) und 0,51 m (2080) im Vergleich zum Jahr 2008. Aufgrund der Unsicherheiten in Projektionen der meteorologischen Randbedingungen werden diese unverändert in die Modellkette eingesteuert.

### 2.2 Statistische Erfassung der Trübung

Die robuste statistische Erfassung und Beschreibung der gemessenen Trübung in der Wassersäule ist aufgrund der Vielzahl und Komplexität der ablaufenden physikalischen Prozesse eine herausfordernde Aufgabenstellung. Aufgrund dessen werden zwei gängige Verfahren der multivariaten Analysemethoden in Form der Regressionsanalyse und der künstlichen neuronalen Netze (KNN) herangezogen. Beide Verfahren bieten unterschiedliche Vor- und Nachteile. Während die Regressionsanalyse eine transparente Möglichkeit darstellt, eine Beziehung zwischen einer abhängigen und mehreren unabhängigen Variablen herzustellen, bleiben die ermittelten Wirkungsbeziehungen bei KNN unbekannt (Backhaus et al. 2016). Allerdings können über KNN Nichtlinearitäten in der Abhängigkeitsstruktur berücksichtigt werden, die bei der vorliegenden Aufgabenstellung von Interesse sein können. Im Idealfall wird eine Kombination beider Verfahren angestrebt, die sowohl die komplexen Abhängigkeitsstrukturen berücksichtigt als auch die physikalischen Prozesse nachvollziehbar macht. Für beide Ansätze wird entsprechend ein identischer Datensatz verwendet.

Die Regressionsanalyse erfolgt mittels multivariater, linearer Regressionsmodelle auf Basis schrittweiser Regression. Die lineare Regression erlaubt die Beschreibung des statistischen Zusammenhangs zwischen einer Zielvariable T(t) und einem oder mehreren Prädiktoren gi unter Entstehung eines Fehlerterms e(t). Die Größe des statistischen Zusammenhangs zwischen den Prädiktoren und der Zielvariable wird dabei durch den Regressionskoeffizienten ai ausgedrückt. Der entstehende Fehlerterm beinhaltet die normalverteilten Residuen zwischen der rekonstruierten Zielvariable aus dem Regressionsmodell und der beobachteten Zielvariable. Bei der schrittweisen Regression wird das Regressionsmodell erstellt, indem schrittweise Prädiktoren in das Modell aufgenommen und entfernt werden. Bei jedem Schritt werden die Prädiktoren mit der Nullhypothese auf statistische Signifikanz geprüft und nur diejenigen Prädiktoren gi in das Regressionsmodell übernommen, die die Beschreibung der Varianz der konstruierten Zielvariablen mit einer signifikanten Wahrscheinlichkeit verbessern. Entsprechend der Nullhypothese wird für jeden Prädiktor anfänglich unterstellt, dass keine Korrelation zwischen Prädiktor und Zielvariable besteht. Durch die Berechnung der Wahrscheinlichkeit (p-Wert), dass diese Nullhypothese zutreffend ist, wird die tatsächliche Signifikanz des jeweiligen Prädiktors bestimmt. In dem vorliegenden Fall wird der kritische p-Wert auf p  $\leq 0.05$  (5 %) festgelegt.

$$T(t) = \sum_{j=0}^{n} a_j g_j(t) + e(t)$$
(1)

Das Konstruktionsprinzip von KNN kann im Gegensatz zu Regressionsanalysen aufgrund deren Komplexität nicht verallgemeinert beschrieben werden. Über Sensitivitätsstudien sind entsprechend optimale Konfigurationen zu ermitteln. Generell bestehen KNN aus drei Komponenten: einer Eingangsschicht (*engl. Input Layer*), verdeckte Schicht(en) (*engl.*  *Hidden Layer*) und einer Ausgabeschicht (*engl. Output Layer*) (z. B. Backhaus et al. 2016). Die Eingabeschicht entspricht im vorliegenden Fall den unabhängigen Prädiktoren, während die Ausgabeschicht die abhängige Variable abbildet. Die Anzahl der verdeckten Schichten wird iterativ verändert, um eine optimale Beschreibung der Ausgabeschicht zu erreichen. Zu beachten ist allerdings, dass KNN auch zum sogenannten "Overfitting" führen können und somit ungeeignet für die Vorhersage auf Basis unbekannter Prädiktoren sind. Entsprechend wird die Eingabeschicht durch Erkenntnisse der Regressionsanalyse angepasst, um keine physikalisch unplausiblen Prädiktoren heranzuziehen.

Zur Beurteilung der Modellgüte (rekonstruierte Zielvariable und beobachtete Zielvariable) werden die im Kontext von Modellierungen gängigen Effizienzkriterien verwendet (vgl. Krause et al. 2005). Konkret werden das Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> (Perfekte Anpassung: 1) und der Root-Mean-Square Error (RMSE; Perfekte Anpassung: 0) verwendet. Das Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> wird beschrieben durch das Quadrat der Pearson-Korrelation R:

$$R^{2} = \left(\frac{C(x,y)}{\sqrt{C(x,x) \cdot C(y,y)}}\right)^{2}$$
(2)

C stellt dabei die Kovarianz zweier Zufallsvariablen x und y dar:

$$C(x, y) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \mu_x) \cdot (y_i - \mu_y)$$
(3)

Darin beschreibt n die Länge und  $\mu$  den Mittelwert der Zeitreihen x und y. Daraus folgt, dass R<sup>2</sup> sich zwischen 0 und 1 bewegt und die erklärte Variabilität der Zeitreihe y anhand der Zeitreihe x beschreibt. Das Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> gibt jedoch keine Auskunft darüber, wie groß die absoluten Abweichungen zwischen den Zeitreihen x und y sind. Deshalb wird zusätzlich der RMSE verwendet, worüber die mittlere Abweichung der beiden Zeitreihen x und y quantifiziert wird:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - y_i)^2}{n}}$$
(4)

Die Messwerte vom Teilprojekt Hallig-D liefern aus Trübedaten Werte für suspendierte Partikelmengen (SPM) in g/l von acht verschiedenen Standorten auf der Hallig Langeneß (Hache et al. 2019) und dienen bei der Modellerstellung als unabhängige Variablen. Da sich die Messstationen zur Trübungsmessung vor und auf der Hallig befinden, handelt es sich um eine Zeitreihe mit Lücken außerhalb der Landunter. Die zeitliche Auflösung der Trübedaten beträgt eine Minute. Die maximale zeitliche Ausdehnung der verwendeten Zeitreihen reicht vom 01.09.2017 bis zum 31.03.2019.

Insgesamt stehen 28 Prädiktoren zur Verfügung, die potentiell zur Beschreibung der Trübung herangezogen werden. Die Prädiktoren setzten sich aus je drei meteorologischen Datensätzen (Luftdruck sowie horizontale und vertikale Windgeschwindigkeit in der zentralen Deutschen Bucht auf Basis des ERA5-Datensatzes) und hydrodynamischen Datensätzen (Wasserstand sowie horizontale und vertikale Strömungsgeschwindigkeit) sowie 22 Seegangsparametern (z. B. signifikante Wellenhöhe, Wellenrichtung, Wellenperiode etc.) zusammen.

Für die Anwendung der multivariaten Analysemethoden müssen die unterschiedlichen Datensätze auf eine äquidistante Zeitskala transformiert werden. Dazu wird als Grundlage die äquidistante Zeitreihe der Hydrodynamik und des Seeganges mit einer Auflösung von 10 Minuten im Zeitraum der Trübungsmessungen verwendet. Die zeitliche Auflösung der meteorologischen Daten wird entsprechend mit einer kubischen Interpolation von 60 Minuten auf die angestrebte 10-minütige Auflösung interpoliert.

Im Rahmen der Datenaufbereitung der Trübedaten werden zunächst unplausible, negative Werte aus den Datensätzen entfernt und anschließend durch die Anwendung eines gleitenden Mittels geglättet. Es wird eine Glättung durchgeführt, da das Signal der Trübedaten aufgrund der minütlichen Auflösung eine hohe Variabilität mit hohen Frequenzanteilen aufweist. Für die Glättung werden unterschiedliche Fenstergrößen von einer Minute bis 60 Minuten geprüft, um die optimale Glättung im Sinne des geringsten Informationsverlustes zu identifizieren. Bei den Sensitivitätsstudien zur Festlegung der optimalen Fenstergröße werden jeweils die Bestimmtheitsmaße der geglätteten und gemessenen Trübedaten betrachtet. Als optimale Glättung wird eine Mittelung mit der Fenstergröße elf Minuten festgestellt. Die größeren Mittelungen können zwar infolge der stärkeren Glättung bessere Bestimmtheitsmaße liefern, entfernen sich jedoch zu stark von den Messgrößen und bilden somit die Maximalwerte in den Zeitreihen nicht ausreichend ab. Die Zeitreihen enthalten, je nach geografischer Lage der Messstelle, letztlich eine unterschiedliche Anzahl an Messwerten. Nach der Datenaufbereitung liegen acht Zeitreihen an den Trübemessstationen mit Längen zwischen 31.186 und 51 Datenpunkten vor.

Für die bestmögliche Modellierung von Trübedaten mittels multivariater Analyseverfahren werden sowohl ein separates Modell für jede Trübungsmessstelle als auch ein übergeordnetes Modell über alle Messstellen getestet. Ein übergeordnetes Modell würde eine Allgemeingültigkeit zur Bestimmung der Trübedaten im Projektgebiet innehaben und ist daher anzustreben. Von einzelnen Regressionsmodellen kann jedoch ein höheres Bestimmtheitsmaß erwartet werden. Des Weiteren wird ein zeitversetzter Einfluss der Prädiktoren auf die Trübung untersucht. Dafür wird ein Zeitversatz von zehn Minuten bis maximal 60 Minuten bei den Prädiktoren berücksichtigt. Es werden somit neun Regressionsmodelle mit je 196 Prädiktoren und maximal 31.186 Zeitpunkten erstellt. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse werden nicht signifikante Trübungswerte entfernt sowie die Auswirkungen von Quadrierung und Kubierung verschiedener Prädiktoren untersucht. Zudem werden die Auswirkungen von Interaktionen der Prädiktoren untereinander getestet. Zur Bewertung der statistischen Aussagekraft der Regressionsmodelle werden die Ergebnisse sowohl auf Heteroskedastizität ("Steuungsungleichheit") der Residuen als auch auf die Normalverteilung der Residuen geprüft.

### 2.3 Sedimenttransport

Besonders im Bereich der Binnengewässer wurden bereits 2D-HNM erfolgreich für die Simulation der Partikelpfade von Sedimentpartikeln verwendet. So wurde beispielweise in Thonon et al. (2007) die Änderung der Sedimentdynamik aufgrund verschiedener Einflüsse – wie der Klimawandel und anthropogene Eingriffe in die Flussmorphologie – betrachtet. In dem Projekt wurde die Sedimentdynamik an einer niederrheinischen Flussaue in den Niederlanden untersucht. Die modellierten Sedimentdepositionen vom HNM konnten dabei gute Übereinstimmung mit gemessenen Sedimentablagerungen erzielen. Auch in Küstengebieten konnte bereits erfolgreich die Dynamik von Sedimentpartikeln modelliert werden. In Allison et al. (2017) wurde die Effizienz lokaler Maßnahmen im Hinblick auf die Landgewinnung der West Bay am Mississippi-Delta (USA) analysiert. Im Fokus stand dabei die Frage, welche Pfade die im Mississippi-Delta entlassenen Partikel bis zur Mündung in den Golf von Mexiko nehmen und wo sie sich akkumulieren. In dem verwendeten lagrangeschen Partikeltransportmodell wurden dabei sowohl eine feine (Schluff) als auch eine grobe Sedimentklasse (Sand) simuliert. In der Studie konnten vor allem bei den modellierten feineren Sedimentpartikeln gute Übereinstimmungen mit den gleichzeitig mittels Farbtracern durchgeführten physikalischen Beobachtungen erzielt werden. Partikeltransportmodelle können auch im Bereich von Binnenmeeren angewendet werden. In Liubartseva et al. (2018) wurde die Dynamik von Kunststoffpartikeln im Mittelmeer modelliert. Verwendet wurde dabei ein lagrangesches 2D-HNM, das die Partikelbewegungen simuliert, um daraus Akkumulationen und Konzentrationen des Kunststoffs abzuleiten. In der Arbeit konnten dadurch Abhängigkeiten zwischen Ablagerungen an Land, auf der Meeressohle und den zugehörigen Quellen der Kunststoffe abgeleitet werden.

An dieser Stelle bildet das hochaufgelöste HNM der Hallig Langeneß die Basis zur Simulation der Sedimenttransportprozesse für die wichtigsten Sedimentfraktionen, die in den beobachteten Datensätzen gefunden werden (Hache et al. 2019, Abbildung 2). Zur Simulation der suspendierten Sedimentpartikel wird das "Particle Tracking"-Modul (PT) von MIKE21® verwendet. In dem Modul wird unter Verwendung der lagrangeschen diskreten Paketmethode unter anderem der Drift, die Dispersion sowie Sedimentation, Auftrieb und Erosion modelliert. Die simulierten Partikel können dabei individuellen Klassen zugeordnet werden, denen jeweils verschiedene Eigenschaften in Bezug auf Zerfall, Auftrieb, Erosion und maximales Alter zugeschrieben werden können (DHI 2017c). Durch die Verwendung des Moduls können die Pfade der einzelnen Partikel sowie deren Sedimentation und Erosion in dem HNM simuliert werden.

Für die Berechnung der Partikelmasse wird die Vereinfachung getroffen, dass es sich bei den Partikeln um Kugeln handelt. Obwohl Sedimente in der Regel nicht als Kugel vorkommen, wird auf die Korrektur mittels eines Formfaktors verzichtet, da nur von vernachlässigbar kleinen Formabweichungen ausgegangen wird. Darüber hinaus liegen keine Informationen über die Dichten der Partikel vor. Da die Dichten von Sedimenten üblicherweise jedoch nicht wesentlich von der des Quarzes abweichen, wird für die Dichte der Partikel  $\varrho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$  angenommen (Markl 2015, Soulsby 1997).

Die Sinkgeschwindigkeit w<sub>s</sub> wird nach Soulsby (1997) aus der Dichte  $\rho_w$  und der kinematischen Viskosität  $v_w$  von Wasser sowie dem Korndurchmesser D und der Gravitation g anhand des dimensionslosen Korndurchmessers D\*berechnet:

$$D_* = \left[\frac{g \cdot (s-1)}{\nu^2}\right]^{\frac{1}{3}} \cdot \tag{5}$$

$$w_s = \frac{v}{d} \left[ (10,36^2 + 1,049 \cdot D_*^3)^{\frac{1}{2}} - 10,36 \right]$$
(6)

Für weitere Details zur Berechnung des Sedimenttransportes in MIKE21<sup>®</sup> wird an dieser Stelle auf die Scientific Documentation (DHI 2017c) verwiesen.

Partikel- klasse	Name	Abkürzung	Sinkge- schwindigkeit [m/s]	krit. Sohlschub- spannung [N/m²]	Masse [g]	Durch- messer [m]
1	Schluff	U	0.0005	0.415	3.75E-08	3.00E-05
2	schluffiger Feinsand	fSU	0.0037	0.615	7.10E-07	8.00E-05
3	Feinsand	fS	0.0122	0.790	4.68E-06	1.50E-04
4	mittelsandiger Feinsand	fSms	0.0194	0.878	1.03E-05	1.95E-04
5	Mittelsand	mS	0.0270	0.954	1.92E-05	2.40E-04

Abbildung 2: Korngröße der Sedimentfraktionen, die neben den Messstationen befindlichen Sedimentfallen erfasst wurden. Die zugehörigen Sinkgeschwindigkeiten, die kritische Sohlschubspannung und die Einzelmasse sowie der Durchmesser eines Partikels sind ebenfalls dargestellt.

Neben der Simulation der hydrodynamischen Verhältnisse um und auf der Hallig Langeneß wird das Detailmodell verwendet, um den Transport von vorhandenen Sedimenten auf die Hallig bzw. von der Hallig zu betrachten. Als Eingabeparameter werden maßgeblich die beobachteten Trübedaten (Karius et al. 2020) benötigt. Da keine detaillierten Informationen über die Sedimentverfügbarkeit im Wattenmeer vorliegen, werden mittels der multivariaten Analyseverfahren die punktuell verfügbaren Trübedaten in die Fläche um und auf die Hallig Langeneß transferiert. Um die unterschiedlichen Sedimentfraktionen in den Simulationen berücksichtigen zu können, ist es erforderlich, die erfassten Trübedaten in die Anzahl der jeweiligen Partikel umzurechnen. Dafür wird aus der Trübung, die in g/l vorliegt, vereinfacht über die Dichte und die Größe bzw. das Volumen auf die Anzahl der einzelnen Sedimentfraktionen in der Wassersäule geschlossen. Aus den kalibrierten Trübungsmessungen kann darüber auf die Anzahl der Partikel rückgerechnet werden, die pro Zeitschritt an der jeweiligen Messstation in der Wassersäule erfasst wurde. Im nächsten Schritt werden die Auswertungen der Sedimentfallen (Karius et al. 2020) herangezogen, um die prozentuale Verteilung der in Abbildung 2 dargestellten Sedimentfraktionen zu berücksichtigen. Darüber wird gewährleistet, dass die Anzahl der eingesteuerten Sedimentfraktionen den an den acht Messstationen erfassten Partikeln entspricht. Im Mittel über die acht Messstationen entsprechen ca. 30 % der Sedimente der Klasse U (Minimum: 16 %; Maximum: 43 %), ebenfalls ca. 30 % der Klasse fSU (Minimum: 13 %; Maximum: 45 %), ca. 24 % der Klasse fS (Minimum: 10 %; Maximum: 41 %) und ca. 14 % der Klasse fSms (Minimum: 6 %; Maximum: 23 %). Mit lediglich 2 % im Mittel sind nahezu keine Partikel der Klasse mS erfasst worden. Durch die stark veränderlichen bathymetrischen Verhältnisse beim Übergang des flachen Wattbereiches um die Hallig Langeneß bis in die Norder- bzw. Süderaue nehmen die Unsicherheiten bei der flächigen Übertragung der Trübung deutlich zu. Im Rahmen des Projektes wird daher ein Gültigkeitsbereich bestimmt. Dieser wird in einem Bereich um die Hallig Langeneß festgelegt, an dem die bathymetrischen Verhältnisse eine Anwendung der multivariaten Analysemethoden erlauben. Dieser Bereich ist in Abbildung 3 dargestellt. Es werden insgesamt die dargestellten 118 Quellen verwendet, um Partikel in das Modell einzusteuern. Entsprechend können beispielsweise Aussagen darüber getroffen werden, aus welcher Quelle Partikel oder welche Sedimente bei welchem Ereignis auf die Hallig gelangen und ob und wo sie die Hallig wieder verlassen bzw. ob sie für ein vertikales Anwachsen der Hallig sorgen können.



Abbildung 3: Hallig Langeneß – Lage der Trübungsmessstationen und Sedimentfallen (rot; Hache et al. 2019) und Lage der 118 gewählten Quellen, an denen Sedimentfraktionen in die Simulation eingesteuert werden.

### 3 Ergebnisse

Das übergeordnete Ziel der im Folgenden beschriebenen Ergebnisse sind A-B-Vergleiche des IST-Zustandes der Sedimentationsraten auf der Hallig Langeneß mit den betrachteten Meeresspiegelprojektionen, um hierüber zukünftige Veränderungen ableiten zu können. Die im vorigen Kapitel 2 beschriebenen Methoden werden dazu zu einer Modellkette zusammengeführt. Aufgrund der Vielzahl der simulierten und betrachteten Ereignisse werden die Ergebnisse exemplarisch für relevante Erkenntnisse aufgeführt. In Kapitel 3.1 wird dafür im Wesentlichen auf die simulierten Wasserstandsganglinien der Landunter- und Sturmflutereignisse eingegangen. In Kapitel 3.2 werden die Ergebnisse der statistischen Erfassung der Trübung beschrieben, die auf den simulierten Parametern des HNM basieren. Im Kapitel 3.3 wird schließlich auf die aus der Kombination der statistischen und numerischen Verfahren gewonnenen Erkenntnisse zur Veränderung der Sedimentation auf und um die Hallig Langeneß eingegangen. Insgesamt werden drei Modelle (Nordseemodell/Detailmodell/Partikeltransportmodell) für 14 Ereignisse verwendet. Für jedes der 14 Ereignisse werden zudem, neben dem IST-Zustand, Projektionen für die Jahre 2030, 2050 und 2080 berechnet. Die Betrachtung der Sedimentation basiert auf fünf berücksichtigten Sedimentfraktionen sowie 118 Quellen auf der und um die Hallig Langeneß.

### 3.1 Hydrodynamisch-numerische Modellierung

In Abbildung 4 sind die simulierten Wasserstandsganglinien auf Höhe des Pegelstandortes Hilligenley im Südwesten der Hallig Langeneß (siehe Abbildung 1) dargestellt. Zudem ist die mittlere Geländeoberkante der Hallig Langeneß (vgl. Schindler et al. 2014a) als Referenz abgebildet. Es werden sowohl die Bandbreite an unterschiedlichen Ereignissen verdeutlicht als auch der Unterschied zwischen einem Landunter und einer schweren bis sehr schweren Sturmflut. Im vorliegenden Beispiel beträgt dieser Unterschied bis zu einem Meter im maximalen Wasserstand. Entsprechend stellen sich unterschiedliche Zeiträume ein, in denen die Hallig unter Wasser steht, und auch die resultierenden Strömungsgeschwindigkeiten weichen signifikant voneinander ab. Da das Hauptaugenmerk auf dem Vergleich der Ereignisse untereinander und in Bezug auf unterschiedliche Meeresspiegelprojektionen liegt, sind die Absolutwerte der simulierten Wasserstände von untergeordnetem Interesse. Es geht vielmehr darum, dass in den HNM die Wasserstandsverhältnisse auf der Hallig Langeneß adäquat abgebildet werden können. Das betrifft insbesondere Fragestellungen dazu, in welchen Bereichen beispielsweise die Wassermassen zuerst auf die Hallig gelangen und wie sich diese verteilen. Hierfür fand während der Projektlaufzeit ein Abgleich mit den Beobachtungen aus den Felduntersuchungen in enger Abstimmung mit den Bearbeitern des Teilprojektes Hallig-D statt. Es konnte ein wesentlicher Erkenntnisgewinn generiert werden, da die modellierten Verhältnisse während eines Landunters nahezu identisch mit den tatsächlichen Verhältnissen waren.

Auf Basis der Sturmflut "Xaver" vom 06.12.2013 verdeutlicht Abbildung 5 die Veränderung der Wasserstandsganglinien unter Berücksichtigung der Meeresspiegelprojektionen für die Jahre 2030, 2050 und 2080 gegenüber dem IST-Zustand. Ein wichtiger Aspekt ist, dass der maximale Wasserstand um bis zu 0,57 m höher aufläuft beim Vergleich des IST-Zustandes mit der Projektion für 2080. Durch den erhöhten Wasserstand können potentiell mehr Sedimente auf die Hallig gelangen. Ein weiterer Aspekt ist, dass sich die Dauer eines Landunters in Zukunft signifikant ändern wird. Wie in der oberen Abbildung 5 zu sehen ist, wird die Hallig bereits deutlich früher geflutet und der Wasserstand übersteigt mehrere Tidezyklen die mittlere Geländeoberkante. Die Auswertung der Landunter-Ereignisse zeigt eine identische Veränderung. Während ein gewöhnliches Landunter-Ereignis lediglich einen Tidezyklus dauern kann, muss in Zukunft davon ausgegangen werden, dass sich auch dieser Zeitraum verlängern wird.

Es kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass die Auswertungen der Simulationen auf Basis der HNM-Modellkette eine geeignete Möglichkeit darstellen, die Wechselwirkung zwischen hydrodynamischer Einwirkung auf den resultierenden Sedimenttransport sowie auf die zukünftige Veränderung der Sedimentationsraten auf der Hallig Langeneß zu analysieren.


Abbildung 4: Darstellung der simulierten Wasserstandsganglinien der 14 betrachteten Landunterund Sturmflutereignisse auf Höhe des Pegelstandortes Hilligenley im Südwesten der Hallig Langeneß. Die mittlere Geländeoberkante der Hallig Langeneß ist als gestrichelte Linie abgebildet.



Abbildung 5: Darstellung der simulierten Wasserstandsganglinien während der Sturmflut "Xaver" vom 06.12.2013 auf Höhe des Pegelstandortes Hilligenley im Südwesten der Hallig Langeneß (unten) und auf der Hallig Langeneß (oben) für den IST-Zustand sowie unter Berücksichtigung der Meeresspiegelprojektionen der Jahre 2030, 2050 und 2080. Die mittlere Geländeoberkante der Hallig Langeneß ist als gestrichelte Linie abgebildet.

# 3.2 Statistische Erfassung der Trübung

Alle Parameter zur statistischen Erfassung der Trübung sind den Simulationen des Nordseemodells entnommen oder sind Teil der Randbedingungen (z. B. die meteorologischen Prädiktoren). Vor deren Verwendung als Prädiktoren in den multivariaten Analysemethoden werden alle Parameter auf eine identische zeitliche Auflösung interpoliert und Bereiche ohne beobachtete Trübung an den Messstationen aus den Datenreihen eliminiert. In Abbildung 6 ist exemplarisch die Korrelation zwischen ausgewählten Prädiktoren und der beobachteten Trübung für vier Tidezyklen dargestellt. Es zeigt sich, dass die Trübedaten mit jedem Prädiktor statistisch signifikant auf dem 5 %-Signifikanzniveau positiv oder negativ korreliert sind. Besonders ausgeprägt sind die Korrelationen beispielsweise zwischen der Trübung und dem Wasserstand, den Seegangsparametern (Wellenrichtung und -periode) und der resultierenden Windgeschwindgeschwindigkeit.



Abbildung 6: Korrelation zwischen ausgewählten hydrodynamischen Variablen aus einer numerischen Modellstudie (*engl. modelled*) und der beobachteten (*engl. observed, obs.*) Trübung und Wassertiefe bei vier Tidezyklen. Nicht signifikante Korrelationen werden als weiße Kreise dargestellt.

Abbildung 6 verdeutlicht allerdings auch, dass die Prädiktoren untereinander korrelieren. Bei den verwendeten Prädiktoren muss entsprechend aufgrund der komplexen physikalischen Vorgänge in der Nordsee und der großen Anzahl an Prädiktoren von Multikollinearität ausgegangen werden. In der Forschungspraxis ist eine Multikollinearität in der Regel jedoch nicht zu vermeiden (Urban und Mayerl 2018). Auch in dem vorliegenden Fall muss die Multikollinearität bewusst toleriert werden, da sie aufgrund der Komplexität des hydrodynamischen Systems unvermeidbar ist und die verwendeten Prädiktoren verschiedene physikalische Systeme beschreiben. Um Spezifikationsprobleme weitestgehend ausschließen zu können, werden nur Prädiktoren in das Regressionsmodell aufgenommen, die in einem physikalisch begründeten Zusammenhang mit der Trübungsdynamik stehen. Darüber hinaus wird die Verwendung von Prädiktoren, die keinen ausreichenden Zusammenhang mit der Trübungsdynamik aufweisen, durch den schrittweisen Regressionsansatz vermieden.

Im ersten Schritt wird die Möglichkeit der multivariaten, linearen Regressionsmodelle auf Basis schrittweiser Regression analysiert. Es werden insgesamt neun Modelle aufgebaut (je ein Modell für jede der acht Trübemessstationen und ein Gesamtmodell). Bei der Sensitivitätsanalyse der neun Regressionsmodelle mit je 196 Prädiktoren (unter Berücksichtigung einer zeitversetzen Wirkung) werden nicht signifikante Trübungswerte entfernt sowie die Auswirkungen von Quadrierung und Kubierung verschiedener Prädiktoren untersucht. Außerdem werden die Auswirkungen der Interaktionen der Prädiktoren untereinander getestet. Durch die Sensitivitätsanalyse lassen sich jedoch keine signifikanten Verbesserungen der Parametermanipulation auf das Modellergebnis feststellen. Auch die Untersuchung eines zeitversetzten Wirkens der Prädiktoren auf die Trübung kann in den Modellen nicht nachgewiesen werden. Da keine signifikanten Verbesserungen der Bestimmtheitsmaße zu erkennen sind, wird der Ansatz der zeitversetzten Berücksichtigung der Prädiktoren verworfen. Die Anzahl der Prädiktoren reduziert sich somit auf die ursprünglichen 28.

Des Weiteren wird auch das übergeordnete Regressionsmodell über alle Messstellen verworfen, da lediglich ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,25$  erreicht wird. Dass die Trübung nicht mit hoher Abbildungsgenauigkeit durch ein übergeordnetes Regressionsmodell modelliert werden kann, ist auf die unterschiedliche Charakteristik und Inhomogenität der Trübungsverteilung (Hache et al. 2019) auf der und um die Hallig Langeneß und die komplexen physikalischen Vorgänge der Trübungsdynamik im Projektgebiet zurückzuführen.

Demgegenüber führt die statistische Erfassung der Trübung mit den acht individuellen Regressionsmodellen der einzelnen Trübemessstationen zu höheren Bestimmtheitsmaßen. Ein exemplarisches Ergebnis der Vorhersage der Trübungsdaten an der Messstation LT1 im Südosten der Hallig Langeneß (vgl. Abbildung 9) ist in Abbildung 7 dargestellt. Der linke Teil der Abbildung 7 zeigt den Vergleich der beobachteten (schwarz) mit der rekonstruierten (rot) Trübung. Im rechten Teil der Abbildung 7 sind die beobachteten und rekonstruierten Trübedaten als Regressionsplot abgebildet. Die farbliche Abstufung hebt die Anzahl der erfassten Trübedaten hervor, d. h. je dunkler, desto mehr Trübedaten wurden in den Felduntersuchungen gemessen. Die schwarze gestrichelte Linie beschreibt dabei die optimale Anpassung der Rekonstruktion an die Beobachtung. An der Trübemessstation LT1 werden Gütemaße von  $R^2 = 0,38$  und RMSE = 0,12 g/l erzielt. Im Rahmen der schrittweisen Regression werden die Prädiktoren "Maximum wave height", die "Mean wave period" und die "Mean wave direction" als statistisch signifikant vom Algorithmus gewählt. Aus physikalischer Sicht wird das Ergebnis als plausibel eingestuft, da der Seegang und die Wellenenergie die wichtigsten Parameter darstellen, die einen Erosionsprozess initiieren und somit eine Trübung in der Wassersäule hervorrufen. Im Vergleich zu den anderen Trübemessstationen zeigt sich ein überwiegend einheitliches Bild. Die Prädiktoren des Seegangs werden immer als statistisch signifikant bei der Erfassung der Trübung ausgewählt. An der Messstation LT2 im Südwesten der Hallig Langeneß beispielsweise werden zusätzlich der Wasserstand und die Strömungsgeschwindigkeiten sowie die induzierte Wellenergie als statistisch signifikante Prädiktoren ermittelt. Auch die meteorologischen Prädiktoren werden z. B. an der Messstation LT4 einbezogen und bestätigen die ermittelte Abhängigkeit aus Hache et al. (2019). Der RMSE variiert über alle Trübemessstationen zwischen 0,01 g/l und 0,12 g/l, während sich das R<sup>2</sup> in einer Spanne zwischen 0,1 und 0,5 bewegt. Aufgrund der geringen Anzahl an erfassten Trübewerten an den Messstationen LT7 und LT8, die sich auf der Hallig befinden, erreicht das R<sup>2</sup> sogar Werte über 0,8.



Abbildung 7: Ergebnisse der statistischen Erfassung der Trübung auf Basis der schrittweisen multiplen linearen Regressionsansätze, exemplarisch für die Trübemessstation LT1.

In Abbildung 7 fällt auf, dass insbesondere die "hohen" Trübungsmessungen im Bereich von größer 0,4 g/l nicht zufriedenstellend abgebildet werden. Bei Betrachtung der statistischen Verteilung der Residuen lässt sich jedoch weitestgehend eine Normalverteilung feststellen, d. h., es werden die relevanten physikalischen Prozesse berücksichtigt. Die Abbildungsgenauigkeit der Modelle ist dennoch mit Unsicherheiten behaftet, die sich auch in einer festgestellten Heteroskedastizität wiederspiegelt. Diese Unsicherheiten resultieren einerseits aus den komplexen physikalischen Vorgängen, die sich nur approximativ modellieren lassen, und andererseits aus Unsicherheiten infolge der Modellkette sowie der Datenaufbereitung. In Anbetracht der Unsicherheiten und der festgestellten Heteroskedastizität liefern die Regressionsmodelle, vor allem bei den mittleren Trübungswerten, ein im Sinne der aufgeführten Gütekriterien gutes Ergebnis. Um festzustellen, ob die Unterschätzung der höheren erfassten Trübedaten auf die geringere Anzahl der Messwerte zurückzuführen ist, werden zudem verschiedene Schwellenwerte untersucht. Entsprechend werden die hohen Trübedaten separat in individuellen Regressionsmodellen erfasst, während nicht signifikante Trübedaten aus dem Datensatz eliminiert werden. Allerdings führt auch dieser Ansatz zu keiner signifikanten Verbesserung der Ergebnisse.

Es lässt sich schlussfolgern, dass sich die statistische Erfassung der Trübung aufgrund der Komplexität der ablaufenden physikalischen Prozesse sowie der Unsicherheiten in den Trübungsmessungen nicht über den gewählten Regressionsansatz realisieren lässt. Allerdings bestätigen die gewonnenen Erkenntnisse aus Abbildung 6 und 7, dass ein physikalisch begründbarer statistischer Zusammenhang zwischen der erfassten Trübung und den gewählten Prädiktoren besteht. Auf dieser Basis werden im nächsten Schritt Sensitivitätsstudien mit KNN und unterschiedlichen Konfigurationen durchgeführt. Ein Beispiel für die Messstation LT1 ist in Abbildung 8 dargestellt. Der RMSE kann auf 0,08 g/l und das R<sup>2</sup> auf 0,76 optimiert werden. An den verbleibenden sieben Messstationen zeigt sich ein identisches Bild. Durch die Anwendung der KNN variiert der RMSE zwischen 0,03 und 0,08 g/l, während das R<sup>2</sup> auf 0,64 bis 0,89 verbessert werden kann. Die Möglichkeit, mit KNN ausgeprägte Nichtlinearitäten in der Abhängigkeitsstruktur zu berücksichtigen, liefert für die vorliegende Fragestellung somit eine geeignete Herangehensweise. Abbildung 8 verdeutlicht zudem, dass auch die hohen Trübedaten, abgesehen von einzelnen Ausreißern, im Rahmen der Unsicherheiten adäquat erfasst werden.



Abbildung 8: Ergebnisse der statistischen Erfassung der Trübung auf Basis der KNN, exemplarisch für die Trübemessstation LT1.

Für die Generierung der Randbedingungen zur Simulation des Sedimenttransportes werden im weiteren Verlauf die trainierten KNN der einzelnen Trübemessstationen verwendet. Abbildung 9 verdeutlicht schließlich anhand der eingefärbten Polygone die Zuordnung der in Abbildung 3 festgelegten Sedimentquellen zu den einzelnen KNN der acht Messstationen. Aus den in die Fläche transferierten Trübedaten können anhand der in Kapitel 2.3 beschriebenen Vorgehensweise die einzusteuernden Sedimentfraktionen und deren Anzahl bestimmt werden.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass die in den Felduntersuchungen auf der und um die Hallig Langeneß erfassten Trübedaten in Abhängigkeit von deren Lage eine unterschiedliche Charakteristik aufweisen (Hache et al. 2019, 2020). Die gemeinsame statistische Erfassung in einem Gesamtansatz führt entsprechend nicht zu zielführenden Ergebnissen. Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen zur statistischen Erfassung der Trübung mit multivariaten Analysemethoden kann allerdings ein signifikanter Zugewinn zum Prozessverständnis geleistet werden. Dies wiederum ist elementar für die Betrachtung des Sedimenttransportes, da über die Trübung auf die Sedimentfraktionen geschlossen wird und letztlich so die Anzahl eingesteuerter Partikel bestimmt wird. Aus der Komplexität der ablaufenden physikalischen Prozesse, den Unsicherheiten in den Trübungsmessungen und der vereinfachten Abbildung der Prozesse in den numerischen Modellen sowie deren zeitlicher Auflösung resultieren allerdings weiterhin Abweichungen zwischen den Beobachtungen und der statistischen Rekonstruktion. Zukünftig sollten insbesondere hochfrequente Prozesse detaillierter betrachtet werden. Eine weitere Einschränkung ergibt sich daraus, dass während der Projektlaufzeit überwiegend moderate Landunter-Ereignisse aufgetreten und erfasst wurden. Für die Betrachtung der Sturmflutereignisse müssen die Trübedaten bei der Anwendung der KNN entsprechend extrapoliert werden, woraus zusätzliche Unsicherheiten resultieren.



Abbildung 9: Zuordnung der 118 Sedimentquellen zu den zugehörigen Trübemessstationen für die flächige Übertragung der Trübewerte.

#### 3.3 Sedimenttransport

Zur Validierung des gewählten Ansatzes, den Sedimenttransport über das Partikeltransportmodell zu beschreiben, wird exemplarisch das Landunter-Ereignis vom 13.09.2017 herangezogen und ausgewertet. Das Resultat ist in Abbildung 10 qualitativ anhand der Anzahl sedimentierter Sedimentfraktionen dargestellt. Es wurde zur Validierung des Modells eine beliebige Anzahl an Partikeln im Modell simuliert und qualitativ ausgewertet, in welchen Bereichen Sedimentation stattfindet. Die einzelnen Punkte zeigen anhand ihrer Größe und Farbgebung an, an welchen Lokationen tendenziell mehr oder weniger Sedimentation stattfindet. Im Vergleich zur Herangehensweise von Schindler et al. (2014b) zeigen sich gute Übereinstimmungen in Bereichen mit erhöhten Sedimentationsraten. Es finden sich im westlichen und östlichen Langeneß Bereiche mit hohen Sedimentationsraten, die direkt binnenseitig hinter den Deckwerken gelegen sind. Bestätigt werden kann ebenfalls, dass Maximalwerte der Sedimentation in der Nähe der Siele erfasst werden und dass die Sedimentationsraten mit Entfernung zu den Deckwerken Richtung Halligmitte abnehmen. Entsprechend wird die gewählte Vorgehensweise zur Simulation der Wechselwirkung zwischen hydrodynamischer Einwirkung und resultierendem Sedimenttransport als plausibel eingestuft. Alle im Folgenden aufgeführten Resultate werden bewusst qualitativ dargestellt und ausgewertet, da es maßgeblich um den A-B-Vergleich unterschiedlicher Ereignisse und Szenarien geht. Für die quantitative Beschreibung von Aufwuchsraten werden weitere Daten sowie gesonderte Modelle benötigt.



Abbildung 10: Exemplarisches Ergebnis der Berechnung des Sedimenttransports und Validierung anhand von Schindler et al. (2014b).

Im Rahmen der Projektbearbeitung wurden unterschiedliche Betrachtungen durchgeführt. So stellt sich beispielsweise die Frage, ob sich ein Unterschied zwischen einem "normalen" Landunter und einer Sturmflut im Hinblick auf Sedimentation und Transportprozesse ergibt. Darüber hinaus werden im Folgenden die aufgelisteten Fragestellungen detaillierter betrachtet:

- Über welche Bereiche gelangen Partikel auf die Hallig Langeneß und wo verlassen sie diese wieder?
- Wo findet auf der Hallig Langeneß Sedimentation statt? Welche Sedimentfraktionen sedimentieren?
- Zeigen sich Gemeinsamkeiten oder Unterschiede bei verschiedenen Landunter- bzw. Sturmflutereignissen?
- Welche Veränderungen ergeben sich aus der Berücksichtigung der Meeresspiegelprojektionen für die Jahre 2030, 2050, 2080?

Bezugnehmend auf die erste Fragestellung verdeutlicht Abbildung 11 durch die Gegenüberstellung des Landunter-Ereignisses vom 13.09.2017 mit dem Sturmflutereignis vom 06.12.2013, dass die Bewegung und der Transport der Sedimentfraktionen auf die Hallig Langeneß maßgeblich über die südliche Halligkante erfolgt (vgl. Niehüser et al. 2019). Der Unterschied zwischen dem Landunter- und dem Sturmflutereignis zeigt sich im Wesentlichen darin, dass bei dem Sturmflutereignis auch Sedimentfraktionen weiter westlich und östlich auf die Hallig transportiert werden. Diese Erkenntnis kann einheitlich für alle 14 betrachteten Ereignisse festgestellt werden. Im Sinne der Plausibilität wird das Ergebnis als plausibel eingeschätzt, da zum einen die Halligkante auf Langeneß im Süden geringer ausfällt und zum anderen die Transportrichtung der hydrodynamischen Drehbewegung der Gezeiten gegen den Uhrzeigersinn durch die Deutsche Bucht entspricht. Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung 12 auf, wo die einzelnen Sedimentfraktionen von der Hallig Langeneß heruntertransportiert werden. Im Falle des Landunter-Ereignisses vom 13.09.2017 zeigt sich, dass die Partikel die Hallig hauptsächlich über die südliche Kante wieder verlassen. Das trifft auf alle simulierten Landunter-Ereignisse zu. Bei Betrachtung des Ereignisses vom 06.12.2013 wird der Unterschied des Wasserstandes zwischen einem Landunter und einer (sehr schweren) Sturmflut deutlich. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass der Sedimenttransport von der Hallig Langeneß über jede Stelle der Halligkante erfolgt.



Abbildung 11: Vergleich des Landunter- und Sturmflutereignisses vom 13.09.2017 und 06.12.2013 hinsichtlich der Fragestellung, über welche Bereiche die Sedimentfraktionen auf die Hallig Langeneß transportiert werden.



Abbildung 12: Vergleich des Landunter- und Sturmflutereignisses vom 13.09.2017 und 06.12.2013 hinsichtlich der Fragestellung, wo die Sedimentfraktionen von der Hallig Langeneß heruntertransportiert werden.

Bei der Berücksichtigung der Meeresspiegelprojektionen für die Jahre 2030, 2050 und 2080 (nicht dargestellt) ergeben sich im Falle der Sturmfluten keine wesentlichen Änderungen hinsichtlich der Sedimenttransportbewegungen. Für die Landunter-Ereignisse lässt sich jedoch feststellen, dass sich der Transport der Sedimente mit einer sukzessiven Erhöhung des Basiswasserstandes an die Ergebnisse der Sturmflutsimulationen angleicht.

Abbildung 13 zeigt den Vergleich, wo während der Ereignisse vom 13.09.2017 und vom 06.12.2013 auf der Hallig Langeneß Sedimentation stattfindet. Es wird verdeutlicht, dass ein signifikanter Unterschied zwischen einem Landunter- und einem Sturmflutereignis existiert. Während bei der Sturmflut im unteren Teil der Abbildung 13 nahezu auf der gesamten Langeneß Sedimentation stattfindet, beschränkt sich diese bei dem Landunter auf Bereiche entlang der südlichen Halligkante und auch nur im östlichen Teil. Hierbei spielt die Dauer der Ereignisse eine gewichtende Rolle, d. h., über wie viele Tidezyklen diese andauern. Entsprechend können bei einer Sturmflut mehr Sedimente auf die Hallig gelangen und sich bei entsprechend beruhigten Strömungsverhältnissen absetzen.



Abbildung 13: Vergleich des Landunter- und Sturmflutereignisses vom 13.09.2017 und 06.12.2013 hinsichtlich der Fragestellung, in welchen Bereichen Sedimentfraktionen auf der Hallig Langeneß sedimentieren.

Dieser Zusammenhang sowie der Einfluss des maximalen Wasserstandes auf die Sedimentfraktionen, die auf die Hallig Langeneß transportiert werden und dort sedimentieren, werden in Abbildung 14 verdeutlicht. Der Sedimenttransport und die Sedimentation auf der Hallig werden bei den erfassten Landunter-Ereignissen maßgeblich durch Schluff dominiert (Abbildung 14 oben links). Auch bei den Sturmflutereignissen wird der maßgebende Anteil an transportierten und sedimentierten Partikeln von der Klasse U dominiert. Allerdings werden hier, im Gegensatz zu den Landunter-Ereignissen, auch Partikel der Klasse fSU auf die Hallig transportiert, die sich wiederum in tiefliegenden Bereichen auf der Halligoberkante absetzen können. Bei den Landunter-Ereignissen findet dieser Prozess lediglich entlang der südlichen Halligkante statt. Darüber hinaus werden keine signifikanten Sedimentfraktionen größer der Klasse fSU während eines Landunters auf die Hallig transportiert. Bei dem Sturmflutereignis findet dieser Transport hingegen statt, wenn auch im Vergleich zu den anderen Sedimentfraktionen deutlich reduziert. Zudem beschränkt sich die Sedimentation auf die südliche Halligkante. Der Transport von Mittelsanden (mS) konnte in keiner der Simulationen beobachtet werden, was durch die sehr geringe Verfügbarkeit (< 2 %) zu erklären ist. Die Auswertung der 118 unterschiedlichen Sedimentquellen hat zudem gezeigt, dass die Sedimentfraktionen, die zu einer Sedimentation auf der Halligoberfläche führen, auch aus dem südlich gelegenen Bereich des Wattes stammen. Es finden dementsprechend keine signifikanten räumlichen Umverteilungen der Sedimente, beispielsweise aus dem nördlichen Bereich, statt. Die erzielten Ergebnisse wurden während der Projektlaufzeit in bilateralen Projekttreffen mit den Projektpartnern diskutiert und bestätigen die Plausibilität der Ergebnisse anhand von deren Beobachtungen. Hierbei ist hervorzuheben, dass die Beobachtungen und Erfahrungen der Bewohner\*innen der Hallig Langeneß zeigen, dass "gute" Sedimente, die zu einem Aufwuchs der Halligoberkante führen, nur im Sturmflutfall auf die Hallig transportiert werden, und diese Beobachtung mit den vorgestellten Simulationsergebnissen übereinstimmt.



Abbildung 14: Vergleich des Landunter- und Sturmflutereignisses vom 13.09.2017 und 06.12.2013 hinsichtlich der Fragestellung, welche Sedimentfraktionen auf der Hallig Langeneß sedimentieren (oben links: U; oben rechts: fSU; unten links: fS; unten rechts: fSms).

Im letzten Schritt zeigt die Abbildung 15 den Vergleich der Veränderung der Sedimentation auf der Hallig Langeneß unter Berücksichtigung der Meeresspiegelprojektionen für die Jahre 2030, 2050 und 2080 für Landunter-Ereignisse. Wie bereits oben für den Transport der Sedimente auf und von der Hallig festgestellt wird, gleichen sich die Ergebnisse der simulierten Landunter mit einer sukzessiven Erhöhung des Basiswasserstandes an die Ergebnisse der Sturmflutsimulationen an. Es kann entsprechend unter zukünftigen Bedingungen davon ausgegangen werden, dass auch moderate Landunter-Ereignisse gröbere Sedimentfraktionen auf die Hallig Langeneß transportieren werden und potentiell zu einem Aufwuchs führen können. Demgegenüber stehen allerdings Erosionsprozesse, die bei den bisherigen Betrachtungen vernachlässigt werden. Es ist auch von einer Erhöhung der erosionsfördernden Prozesse auszugehen, die eine nachhaltige Konsolidierung von Sedimentfraktionen verhindern können. Entsprechend sind Schutz- und Managementstrategien für die Halligen zu entwickeln, die einerseits das erhöhte Potential von Sedimenten, die auf die Hallig transportiert werden, nutzen und andererseits in der Lage sind, diese nachhaltig auf der Hallig zu konservieren.



Abbildung 15: Vergleich der Veränderung der Sedimentation auf der Hallig Langeneß unter Berücksichtigung der Meeresspiegelprojektionen für die Jahre 2030, 2050 und 2080 für Landunter-Ereignisse.

Zusammenfassend bestätigen die Simulationsergebnisse des Sedimenttransportes und der Sedimentation bekannte physikalische Prozesse und Erkenntnisse aus dem Vorgängerprojekt "ZukunftHallig" (Jensen et al. 2016). So kann beispielsweise bestätigt werden, dass Maximalwerte der Sedimentation in der Nähe der Siele auftreten. Durch die Modellkette ist es darüber hinaus möglich, Aussagen zu flächigen Betrachtungen und zukünftigen Veränderungen bei geänderten Randbedingungen hinsichtlich Meeresspiegelprojektionen zu tätigen. Es wird gezeigt, dass der Transport der Sedimente im Wesentlichen über die südliche Halligkante erfolgt, ungeachtet dessen, ob es sich um ein Landunter- oder Sturmflutereignis handelt. Bei der Sedimentation der betrachteten Partikelklassen wird ein signifikanter Unterschied zwischen Landunter- und Sturmflutereignis festgestellt. Bei Sturmfluten kommt mehr und gröberes Material auf die Hallig als bei moderaten Landunter-Ereignissen (siehe auch Hache et al. 2020). Eine wesentliche Erkenntnis ist zudem, dass sich durch die mögliche Erhöhung des Basiswasserstandes im Zuge des Klimawandels ein Angleichen des Sedimenttransportes und der Sedimentation zwischen moderaten Landunter- und Sturmflutereignissen einstellen wird.

#### 4 Schlussfolgerung und weiterer Forschungsbedarf

Die Halligen im nordfriesischen Wattenmeer als Reste früherer Inseln sind in den vergangenen Jahrhunderten durch Sedimentablagerungen bei Landunter mit dem Meerspiegelanstieg angewachsen. Dieser natürliche Prozess wurde durch verschiedene Schutzmaßnahmen (z. B. Verstärkung und Erhöhung der Halligkante) gestört. In Verbindung mit einem beschleunigten Meeresspiegelanstieg ist die zukünftige Existenz der Halligen bedroht, weshalb im Forschungsprojekt "Living CoastLab Halligen" Analysen zu deren nachhaltigem Schutz durchgeführt wurden.

Die Basis der vorgestellten Untersuchungen und der Ergebnisse bildet das Vorgängerprojekt "ZukunftHallig" (Jensen et al. 2016). Es konnte gezeigt werden, dass die Sedimentablagerungen auf der Halligoberfläche infolge regelmäßiger Überflutungen ein vertikales Anwachsen der Geländehöhen begünstigen (Schindler et al. 2014b). Demgegenüber wurde ein Anstieg der mittleren und extremen Wasserstände beobachtet. Für die Zukunft skizzieren aktuelle Projektionen darüber hinaus einen noch stärkeren Anstieg der Wasserstände (Church et al. 2013). Dabei ist fraglich, ob der Anstieg der Wasserstände vom derzeitigen vertikalen Aufwuchs durch Sedimentablagerungen kompensiert werden kann. Im Fokus der Untersuchungen standen dementsprechend langfristige Strategien zur Erhöhung der natürlichen Adaptionskapazität der Halligen. Ob dieser Anpassungsmechanismus ausreicht, den Anstieg der Wasserstände zu kompensieren, hängt im Wesentlichen von den Trübstoffkonzentrationen in der Wassersäule rund um die Halligen während eines Hochwasserereignisses, das zu einem Landunter führt, ab. Zudem muss der Transport der Sedimente auf die Hallig gewährleistet sein. Zur Abschätzung des Sedimenttransportes und der resultierenden Ablagerungsprozesse in Abhängigkeit von unterschiedlichen Maßnahmen und Eingriffen werden beobachtete und statistisch generierte Daten sowie eine Kombination verschiedener statistischer und numerischer Modelle herangezogen.

Die statistische Beschreibung der aus Naturmessungen gewonnenen Trübungswerte in der Wassersäule und die anschließende flächige Extrapolation zeigen, dass die Daten der einzelnen Messstationen unterschiedliche Charakteristiken aufweisen. Dies ist einerseits in der Komplexität der ablaufenden physikalischen Prozesse begründet und andererseits in den Unsicherheiten der Trübungsmessungen. Weitere Unsicherheiten resultieren aus den numerisch generierten Daten, die als Prädiktoren in die statistischen Modelle eingeflossen sind und eine vereinfachte Abbildung der in der Natur auftretenden hochfrequenten Prozesse darstellen. Auf Basis von künstlichen neuronalen Netzen konnten die Trübedaten allerdings für die vorliegende Fragestellung adäquat wiedergegeben (RMSE: 0,03 bis 0,08 g/l; R<sup>2</sup>: 0,64 bis 0,89) und auf das Untersuchungsgebiet angewendet werden. Verbleibende Unsicherheiten resultieren im Wesentlichen aus der Extrapolation für unbekannte Ereignisse.

Die anschließende numerische Simulation zur Beschreibung der Wechselwirkung zwischen hydrodynamischer Einwirkung und resultierendem Sedimenttransport auf der Hallig Langeneß hat gezeigt, dass bei moderaten Landunter-Ereignissen, wie sie während der Projektlaufzeit erfasst wurden, deutlich weniger Sedimente und nur feinere Sedimentfraktionen (maßgeblich Schluffe) auf die Hallig gelangen als beispielsweise bei einer sehr schweren Sturmflut (Schluff bis Feinsand). Diese Erkenntnisse werden gestützt durch die Beobachtungen aus den Felduntersuchungen und die Erfahrungen der Hallig-Bewohner\*innen. Insgesamt zeigt sich, dass der Sedimenttransport hauptsächlich im Süden der Hallig Langeneß stattfindet. Begünstigt wird dies durch die hydrodynamischen Verhältnisse (Strömungsgeschwindigkeit und -richtung) und die niedrigere Ausbildung der Halligkante. Die Sedimentation zeigte bei den durchgeführten Analysen Maximalwerte in der Nähe der Siele.

Die Abschätzung von langfristigen Änderungen der Sedimentation unter Berücksichtigung von Meeresspiegelprojektionen für die Jahre 2030, 2050 und 2080 hat gezeigt, dass sich die Differenzen zwischen einem moderaten Landunter und einer Sturmflut angleichen. Zu berücksichtigen ist dabei jedoch, dass bei erhöhtem Meeresspiegel auch die Strömungsgeschwindigkeiten und damit die Sohlschubspannungen zunehmen und einer nachhaltigen Konsolidierung der Sedimente gegenüberstehen könnten. Hierzu sind jedoch weitere systematische Analysen notwendig.

Die hier vorgestellte Modellkette wurde anschließend zur Entwicklung optimierter Schutz- und Managementstrategien für die Halligen herangezogen, um Vergleichsbetrachtungen und entsprechende Entscheidungen zum Erhalt der Halligen durchführen zu können (vgl. Karius et al. 2020). Auf Basis der hier entwickelten Modellkette können unterschiedliche Fragestellungen zum Erhalt bzw. zur Stabilisierung der Halligen durchgeführt werden, z. B. wie sich unterschiedliche Deckwerksstrukturen und -höhen sowie Sieltoranlagen, Halligpriele und Gräben auf den Transport und die Sedimentation der Trübstoffe auswirken. Hierbei ist es wichtig, die Erfahrungen der Hallig-Bewohner\*innen mit einzubeziehen und zu berücksichtigen. Diese Untersuchungen lassen u. a. den Schluss zu, dass die Halligkante einen "widersprüchlichen" Nutzen aufweist (siehe auch Hache et al. 2020). Einerseits können nur bei ausreichend hohen Wasserständen Sedimente auf die Hallig transportiert werden, die für einen vertikalen Aufwuchs erforderlich sind. Andererseits wird für die Sedimentation eine ausreichend lange Beruhigung der Strömungsprozesse benötigt; erhöhte Wasserstände tragen jedoch mehr Energie auf die Hallig und fördern somit die (Re-)Mobilisierung der Sedimente.

#### 5 Danksagung

Das Verbundprojekt *Living CoastLab Halligen* wurde vom 01. Oktober 2016 bis zum 30. September 2019 als eines von 12 Verbundprojekten mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Förderschwerpunkts "Küstenmeerforschung in Nord- und Ostsee (KüNO)" gefördert (BMBF-Förderkennzeichen: 03F0759A). Es wurde darüber hinaus eine kostenneutrale Verlängerung um fünf Monate, bis zum 29. Februar 2020, bewilligt.

Der Projektkoordinator, die Teilprojektleiter und Mitarbeiter bedanken sich für die intensive Betreuung durch den Projektträger Jülich und die fruchtbare Zusammenarbeit mit den Küstenschutzbehörden sowie der projektbegleitenden Gruppe.

Bei der Erstellung des hydrodynamisch-numerischen Modells kam das Softwarepaket MIKE21<sup>®</sup> zum Einsatz, dass von DHI-WASY zur Verfügung gestellt wurde.

# 6 Literaturverzeichnis

Allison, M. A.; Yuill, B. T.; Meselhe, E. A.; Marsh, J. K.; Kolker, A. S.; Ameen, A. D.: Observational and numerical particle tracking to examine sediment dynamics in a Mississippi River delta diversion, 2017.

Arns, A.; Dangendorf, S.; Jensen, J.; Talke, S.; Bender, J.; Pattiaratchi, C.: Sea-level rise induced amplification of coastal protection design heights. In: Scientific reports 7, S. 40171, https://doi.org/10.1038/srep40171, 2017.

Arns, A.; Wahl, T.; Haigh, I. D.; Jensen, J.: Determining return water levels at ungauged coastal sites: a case study for northern Germany. In: Ocean Dynamics 65 (4), 539–554, https://doi.org/10.1007/s10236-015-0814-1, 2015.

Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R.: Multivariate Analysemethoden. 14. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer Gabler, 2016.

Bartholomä, A.; Flemming, B. W.: Zur Sedimentdynamik in den ostfriesischen Rückseitenwatten und den Veränderungen durch natürliche und anthropogene Einflüsse. In: Schutzgemeinschaft Deutsche Nordseeküste e. V. (Hg.): Klimaänderung und Küste. Schriftenreihe der Schutzgemeinschaft Deutsche Nordseeküste, Heft 1, 70–90, 1996.

Bass, J.; Granse, D.; Hache, I.; Jensen, K.; Karius, V.; Minden, V.; Stock, M.; Suchrow, S.; Kleyer, M.: Plant traits affect surface elevation change in salt marshes: an example of biogeomorphic ecosystems. Eingereicht bei Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2020. (zur Veröffentlichung eingereicht/in review).

Church, J. A.; Clark, P. U.; Cazenave, A.; Gregory, J. M.; Jevrejeva, S.; Levermann, A.; Merrifield, M. A.; Milne, G. A.; Nerem, R. S.; Nunn, P. D.; Payne, A. J.; Pfeffer, W. T.; Stammer, D.; Unnikrishnan, A. S.: Sea Level Change. Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC. In: Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013.

Copernicus Climate Change Service (C3S): ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), 2017. Stand 14.04.2020: https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home.

DHI: MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM - Particle Tracking Module. Scientific Documentation. Hg. v. Danish Hydraulic Institute (DHI), 2017c.

DHI: MIKE 21 Flow Model FM. Hydrodynamic Module - User Guide. Hg. v. Danish Hydraulic Institute (DHI), 2017a.

DHI: MIKE 21 Spectral Waves FM. Spectral Wave Module - User Guide. Hg. v. Danish Hydraulic Institute (DHI), 2017b.

Figge, K.: Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht. Deutsches Hydrographisches Institut, Karte Nr. 2900 (mit Begleitheft), 1981.

Hache I.; Karius V.; von Eynatten H.: Suspended particulate matter for sediment accumulation on inundated anthropogenic marshland in the southern North Sea – Potential, thresholds and limitations. In: Continental Shelf Research, 207, https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104214, 2020.

Hache, I.; Karius, V.; Gutkuhn, J.; von Eynatten, H.: The development and application of an autonomous working turbidity measurement network: Assessing the spatial and temporal distribution of suspended particulate matter on tidal flats in the North Frisian Wadden Sea. In: Continental Shelf Research 176, 36–50, https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.02.010, 2019.

Heyer, H.; Schrottke, K.: 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. Unter Mitarbeit von TIB - Technische Informationsbibliothek Universitätsbibliothek Hannover und Technische Informationsbibliothek (TIB), 2013.

Jensen, J.: Genesis of the German North Sea Coastline in Context of Sea Level Rise and Storm Surges over the past 1000 years. In: Ping Wang, Julie D. Rosati und Mathieu Vallee (Hg.): Coastal Sediments 2019. International Conference on Coastal Sediments 2019. Tampa/St. Petersburg, Florida, USA, 27–31 May 2019: WORLD SCIENTIFIC, 2345– 2362, 2019.

Jensen, J.; Arns, A.; Schüttrumpf, H.; Wöffler, T.; Häußling, R.; Ziesen, N.; Jensen, F.; von Eynatten, H.; Schindler, M.; Karius, V.: ZukunftHallig – Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen unter Berücksichtigung des Klimawandels. In: Die Küste 84, 3–8, https://hdl.handle.net/20.500.11970/105210, 2016.

Karius, V.; Hache, I.; von Eynatten, H.: Messung und Bewertung von Trübstoffkonzentrationen - Schlussfolgerungen für einen die Sedimentakkumulation optimierenden Küstenschutz auf Hallig Langeness. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Living CoastLab Halligen – Teil Hallig-D, Geowissenschaftliches Zentrum Abtl. Sedimentologie/Umweltgeologie, Georg-August Universität Göttingen, 2020.

Krause, P.; Boyle, D. P.; Bäse, F.: Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. In: Advances in Geosciences, 5, 89–97, https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005, 2005.

Liubartseva, S.; Coppini, G.; Lecci, R.; Clementi, E.: Tracking plastics in the Mediterranean: 2D Lagrangian model, Marine Pollution Bulletin, Volume 129, Issue 1, https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.02.019, 2018.

Markl, G.: Minerale und Gesteine. Springer, Berlin, 2015.

Niehüser, S.; Arns, A.; Jensen, J.: Development of adaption strategies for barrier islands (Halligen) in the German Bight. European Geosciences Union General Assembly 2019. Vienna, Austria, 2019.

Nolte, S.; Jensen, K.; Schulze, D.: Untersuchung der Sedimentablagerung auf unterschiedlich gemanagten und exponierten Flächen der Hallig Langeneß. Abschlussbericht. Universität Hamburg. Hamburg, 2018.

Pietrzak, J.; Souza, A. J.; Huthnance, J.: Recent Change – North Sea: Suspended Particulate Matter and Turbidity. In: North Sea Region Climate Change Assessment. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39745-0, S. 109-116, 2016.

Quante, M.; Colijn, F.; Sterr. H.: North Sea and Bounding Countries – A General Overview. In: North Sea Region Climate Change Assessment, 2–7, https://doi.org/10.1007/978-3-319-39745-0, 2016.

Quedens, G.: Die Halligen. Breklumer Verlag, Breklum, 1992.

Ricklefs, K.; Arp, D.; Stage, M.: Zur zeitlichen Variabilität der Sedimentverteilung. In: Die Küste, 83, 77–102, https://henry.baw.de/handle/20.500.11970/101739, 2015.

Schindler, M.; Karius, V.; Arns, A.; Deicke, M.; von Eynatten, H.: Measuring sediment deposition and accretion on anthropogenic marshland - part II: The adaption capacity of the North Frisian Halligen to sea level rise. In: Estuarine, Coastal, and Shelf Science, 151, https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.08.027, 2014b.

Schindler, M.; Karius, V.; Deicke, M.; von Eynatten, H.: Measuring sediment deposition and accretion on marshland - part I: Methodical evaluation and Development. In: Estuarine, Coastal, and Shelf Science, 151, https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.08.029, 2014a.

Slangen, A. B. A.; Carson, M.; Katsman, C. A.; van de Wal, R. S. W.; Köhl, A.; Vermeersen, L. L. A.; Stammer, D.: Projecting twenty-first century regional sea-level changes. In: Climatic Change 124 (1–2), 317–332, https://doi.org/10.1007/s10584-014-1080-9, 2014.

Soulsby, R.: Dynamics of marine sands. New York, USA: American Society of Civil Engineers, Publications Sales Department, 1997.

Streif, H.: Sedimentary Record of Pleistocene and Holocene marine inundations along the North Sea coast of Lower Saxony, Germany. In: Quarternary International, 112, 3–28, https://doi.org/10.1016/S1040-6182(03)00062-4, 2004.

Temmerman S.; Govers G.; Wartel S.; Meire P: Spatial and temporal factors controlling short-term sedimentation in a salt and freshwater tidal marsh, Scheldt estuary, Belgium, SW Netherlands. In: Earth Surf Process Landforms, 28, 739–755, https://doi.org/10.1002/esp.495, 2003.

Thonon, I.; de Jong, K.; van der Perk, M.; Middelkoop, H.: Modelling floodplain sedimentation using particle tracking. In: Hydrol. Process., 21, 1402–1412, https://doi.org/ 10.1002/hyp.6296, 2007.

Urban, D.; Mayerl, J.: Angewandte Regressionsanalyse: Theorie, Technik und Praxis, 5, Springer VS, 2018.

van Beusekom, J.: Recent Change – North Sea: Wadden Sea. In: North Sea Region Climate Change Assessment, 124–127, https://doi.org/10.1007/978-3-319-39745-0, 2016.

Warren, I. R.; Bach, H. K.: MIKE 21: a modelling system for estuaries, coastal waters and seas. In: Environmental Software, 7 (4), 229–240, https://doi.org/10.1016/0266-9838(92)90006-P, 1992.

# Teilstationäre Hochwasserschutzmaßnahmen als kurzfristige Strategie zum Schutz der nordfriesischen Halligen – Einsatztests unter praxisnahen Bedingungen und Berücksichtigung sozialer Bedürfnisse der Bewohner\*innen

Verena Krebs<sup>1</sup>, Nenja Ziesen<sup>1</sup>, Theide Wöffler<sup>1</sup>, Roger Häußling<sup>2</sup> und Holger Schüttrumpf<sup>1</sup>

<sup>1</sup> RWTH Aachen University, Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft <sup>2</sup> RWTH Aachen University, Institut für Soziologie

#### Zusammenfassung

Jensen et al. (2016) definierten zwei Zeitskalen, die bei der Entwicklung von Strategien für den Küstenschutz und das Küstenmanagement der schleswig-holsteinischen Halligen berücksichtigt werden müssen: (i) kurzfristige Schutzmaßnahmen für die Bewohner\*innen, die sofort umgesetzt werden könnten, und (ii) langfristige Strategien zur Verbesserung der natürlichen Anpassungsfähigkeit an den Klimawandel.

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit der Frage, welche kurzfristigen Küstenschutzmaßnahmen und -strategien von den Hallig-Bewohner\*innen als sinnvoll erachtet werden, welche (technisch) umsetzbar sind und welche zentralen Aspekte dabei zu berücksichtigen sind. Hierzu wurde die Wirksamkeit kurzfristiger Maßnahmen im Labor unter Berücksichtigung von Vorschlägen bewertet, die im Vorläuferprojekt *ZukunftHallig (KfKI-Projekt mit Fördernummern 03KIS093-096, Laufzeit 2011-2013)* gemeinsam mit den Hallig-Bewohner\*innen entwickelt wurden. Im Zentrum standen innovative, mobile Hochwasserschutzmaßnahmen, die bislang vorwiegend im Binnenbereich Anwendung finden. Zur Untersuchung der Anwendbarkeit auf den Halligen wurden zwei Anwendungsfälle betrachtet: das Verschließen von Stöpen im Ringdeich der Warften und der Objektschutz auf der Warft. Die Maßnahmen wurden im Labor unter fünf Belastungsfällen (Einstau, Anströmen, Wellenanprall, Überströmen, Treibgutanprall) getestet und zusätzlich hinsichtlich der für die Hallig-Bewohner\*innen elementaren Kriterien (Platzbedarf, Wartungsaufwand, Aufbauzeit etc.) bewertet.

Die Berücksichtigung sozialer Aspekte (Bedürfnisse, Erwartungen, Anforderungen seitens der Bewohner\*innen) erfolgte durch einen Mixed-Method-Ansatz, bestehend aus qualitativen Interviews mit Bewohner\*innen und Zukunftswerkstätten (Ergebnisse aus *Zukunft-Halli*g), Expert\*innen-Interviews und Gruppendiskussionen. Die Zusammenführung der hieraus hervorgehenden Anforderungen mit technischen Aspekten (technisch umsetzbare Maßnahmen) ermöglichten eine ganzheitliche soziotechnische Perspektive.

Alle untersuchten mobilen Hochwasserschutzmaßnahmen erwiesen sich unter den küstenspezifischen Belastungen generell als hydrodynamisch wirksam und die meisten der Maßnahmen erscheinen für den Einsatz auf den Warften geeignet. Sie verfügen über das Potenzial, als kurzfristige Maßnahmen den bestehenden Sturmflutschutz zu ergänzen, an Schwachstellen zu verbessern und so die Zeit bis zu einer langfristig notwendigen Warftverstärkung zu überbrücken. In Gruppendiskussionen auf den Halligen wurden die Ergebnisse der Laboruntersuchungen vorgestellt. Meinungsbilder hinsichtlich der Akzeptanz der Maßnahmen seitens der Bewohner\*innen fielen heterogen – hallig- sowie warftspezifisch divers – aus.

#### Schlagwörter

Halligen, kurzfristige Küstenschutzstrategien, mobile Hochwasserschutzsysteme, teilstationäre Küstenschutzmaßnahmen, soziotechnischer Ansatz, partizipativer Technikgestaltungs- und Entwicklungsprozess

#### Summary

Jensen et al. (2016) defined two-time scales that have to be considered developing strategies for coastal protection and coastal management of the North Frisian Hallig islands: (i) short-term protection measures for the inhabitants, which could be implemented immediately, and (ii) long-term strategies to improve the natural adaptability of the islands to climate change.

This paper deals with the question which short-term coastal protection measures and strategies are considered reasonable by the islands' inhabitants, which ones are (technically) feasible and which central aspects have to be considered. For this purpose, the effectiveness of short-term measures was evaluated in the laboratory, considering suggestions that were developed together with the inhabitants in the predecessor project ZukunftHallig. The focus was on innovative, mobile flood protection systems, which have so far mainly been used in inland areas. To investigate the applicability of these systems, two application cases were considered: the closing of apertures in the ring dike of the dwelling mounds and the protection of objects on the dwelling mounds. The systems were tested in the laboratory under five load cases (pondage, upstream flow, wave impact, overflow, debris impact) and additionally evaluated with regard to criteria elementary for the islands' inhabitants (space requirement, maintenance effort, construction time, etc.).

The consideration of social aspects (needs, expectations, requirements on the part of the residents) was carried out by a mixed-method approach, consisting of qualitative interviews with residents and future workshops (results from ZukunftHallig), expert interviews and group discussions. The combination of the resulting requirements with technical aspects (technically feasible measures) enabled a holistic socio-technical perspective.

All investigated mobile flood protection measures proved to be hydrodynamically effective under the coastspecific loads and most of the measures appear to be suitable for the use on the Hallig islands. As shortterm measures, they have the potential to complement existing storm surge protection, to improve at potentially weak points, and thus to bridge the time span until long-term reinforcements of the mounds are implemented. The results of the laboratory investigations were presented in group discussions on the Hallig islands. Opinions regarding the acceptance of the measures by the residents were heterogeneous – island and mound specific diverse.

# Keywords

Hallig islands, short-term coastal protection strategies, mobile flood protection systems, semi-stationary coastal protection measures, socio-technical approach, participatory technology design and development process

# 1 Einleitung

Der besondere Lebensraum der Halligen ist geprägt durch eine einzigartige und exponierte Lage mit Sturmflut- und Landunterrisiken, die sich im Kontext des Klimawandels verstärken werden. Bereits im Verbundprojekt "Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutzund Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen unter Berücksichtigung des Klimawandels – ZukunftHallig" wurde deutlich, dass – infolge regelmäßiger Überflutungen – auf den Halligen verbleibende Sedimentablagerungen zwar ein vertikales Anwachsen der Geländehöhen begünstigen, jedoch gleichzeitig ein stärkerer Trend im Anstieg der mittleren und extremen Wasserstände beobachtet werden kann (Jensen et al. 2016). Es ist nicht davon auszugehen, dass die natürlichen Sedimentablagerungen die Anstiege dauerhaft kompensieren, sodass zum dauerhaften Schutz der Halligen langfristige wie auch kurzfristige Schutzmaßnahmen ergriffen werden müssen.

Um einen partizipativen Technikgestaltungs- und Entwicklungsprozess zu gewährleisten, ist eine interaktive Beteiligung der Bewohner\*innen unabdingbar (vgl. u. a. Weyer 1997, Abels und Bora 2004, Haug et al. 2017). Mit einem solchen partizipativen Verfahren wird durch eine Integration der Bürger\*innen in den Lösungsprozess das kommunikative, diskursive Handeln in den Mittelpunkt der Technikgestaltung gestellt – in diesem Fall der Gestaltung von Küstenschutzmaßnahmen. Vor allem, wenn räumliche Aspekte berührt werden und Bürger\*innen selbst betroffen sind, bieten sich partizipative Verfahren an, um eine Perspektivenvielfalt und Akzeptanz späterer Anwender\*innen zu erhalten (vgl. Schmidt 2003: 159, Haug et al. 2017: 582 ff.).

In Zukunft-Workshops wurde im Jahr 2013 gemeinsam mit den Bewohner\*innen der Halligen ein umfangreicher Katalog möglicher Maßnahmen zum langfristigen Schutz und Erhalt der Halligen erarbeitet (Häußling et al. 2016), im Anschluss fand eine Bewertung ausgewählter Maßnahmen aus wasserbaulicher Perspektive statt (Wöffler und Schüttrumpf 2016). Bei der Evaluation der einzelnen Maßnahmen waren insbesondere Faktoren wie die Wirkung auf den Wellenüberlauf an der Warft, die Betriebssicherheit, der Bauaufwand, der Einfluss auf das Landschaftsbild sowie der Naturschutz ausschlaggebend. Neben Warftverstärkungen und der Errichtung geeigneter Schutzräume, die als wirkungsvollste Maßnahme für den langfristigen Schutz der Halligbewohner\*innen und -häuser identifiziert wurden, konnte auch für eine mobile Schutzmaßnahme ("mobiler Deichschlauch") eine hohe hydrodynamische Wirksamkeit gezeigt werden. Die Betriebssicherheit des sich automatisch aufbauenden, wassergefüllten Schlauchsystems wurde jedoch als fehleranfällig beurteilt (Wöffler und Schüttrumpf 2016). Die Bewertung der Maßnahmen fußte dabei auf numerischen Simulationen sowie theoretischen Betrachtungen, praktische Untersuchungen unter Berücksichtigung der hallig-spezifischen Bedingungen und zur Praktikabilität der Maßnahmen lagen bislang nicht vor.

Im Rahmen des Folgeprojekts Living CoastLab Halligen (KfKI-Projekt mit Förderkennzeichen: 03F0759B, Laufzeit: 2016-2019) wurden die vorausgegangenen theoretischen Betrachtungen nun um praktische Untersuchungen ergänzt. Während Warftverstärkungen als erforderliche Maßnahmen zum langfristigen Schutz der Halligen unstrittig sind und deren Umsetzung mit Beschluss des 30 Mio. € schweren Warftverstärkungsprogramms bereits begonnen hat (MELUND SH, 2016), stehen hier mobile Hochwasserschutzsysteme (HWS-Systeme) als kurzfristige Schutzmaßnahmen im Fokus. Zentral sind dabei die Fragen: Verfügen mobile HWS-Systeme über das Potential, den Küstenschutz kurzfristig zu verbessern? Wie können sie existierende Schwachstellen verstärken, um die Zeit bis zu einer Warftverstärkung zu überbrücken? Im Rahmen der Untersuchungen wurden vier mobile HWS-Systeme in hydraulischen Modellversuchen unter realitätsnahen, küstenspezifischen Belastungen getestet und ihre Eignung für einen Einsatz auf den Halligen anhand acht verschiedener Kriterien bewertet.

Die begleitende soziologische Teilstudie forciert eine Verknüpfung zwischen wissenschaftlichen Konzepten und sozialen Bedürfnissen. Ziel ist die Entwicklung eines Anforderungskatalogs zur Bewertung technisch möglicher Maßnahmen unter Einbezug der Bedürfnisse, Erfahrungen und Erwartungen der Hallig-Bewohner\*innen. Das Vorgehen folgt dabei der Leitfrage: Welche Küstenschutzmaßnahmen und -strategien werden von den Bewohner\*innen als sinnvoll erachtet, welche sind (technisch) umsetzbar und was sind zentral zu berücksichtigende Aspekte? Zudem werden aus soziologischer Perspektive erfahrungsgeneriertes Wissen sowie stattfindende Wandlungsprozesse betrachtet.

#### 2 Mobile Hochwasserschutzsysteme

#### 2.1 Definition und Eigenschaften

Mobile HWS-Systeme sind temporär aufgestellte, wasserdichte Konstruktionen aus Stahl, Holz, Leichtmetall, Kunststoff oder Gummi. Sie werden dort installiert, wo das Landschaftsbild nicht beeinträchtigt werden soll, wo kein Platz zur Verfügung steht oder Verkehrsbeziehungen beibehalten werden sollen. Gegenüber stationären HWS-Systemen (z. B. Deiche, Warften, Mauern) besteht ein erhöhtes Risiko: Da die Systeme erst im Hochwasser- bzw. Sturmflutfall manuell aufgestellt werden, besteht bereits vor dem eigentlichen Einsatz die Gefahr des Versagens von Mensch und/oder Technik. Zudem sind mobile Konstruktionen meist leichter als stationäre Systeme. Dadurch sind sie unter Umständen bei gleichen Abmessungen weniger widerstandsfähig. Es wird in planmäßige und notfallmäßige Systeme unterschieden (BWK 2005).

*Planmäßige (oder auch teilstationäre) HWS-Systeme* sind örtlich gebunden, da sie stationäre, feste Installationen benötigen. Sie bedürfen einer Genehmigung durch die örtlichen Aufsichtsbehörden, unterliegen deren Sicherheitskriterien und werden für die Anforderungen und Rahmenbedingungen des spezifischen Orts bemessen. Es wird in Standardsysteme (S-Systeme), welche sich durch häufigen Einsatz unter verschiedenen Bedingungen bewährt haben, und Sondersysteme (So-Systeme) unterschieden. Sondersysteme sollten nur errichtet werden, falls sie zuvor an einem Funktionsmodell unter gleichen Bedingungen wie denen des Einsatzes getestet worden sind (BWK 2005).

Notfallmäßige HWS-Systeme (auch: Sandsackersatzsysteme) sind flexibel und ortsunabhängig. Primäres Einsatzgebiet ist der Katastrophenschutz, in besonderen Fällen kann eine stationäre Verwendung erfolgen, um z. B. Genehmigungszeiträume von planmäßigen Systemen zu überbrücken. Sie werden auf allgemeine Anforderungen bemessen und in verschiedenen Ausführungen angeboten.

Das Merkblatt BWK (2005) beschreibt die Planung und den Einsatz von mobilen HWS-Systemen und stellt Grundlagen zu Standsicherheitsnachweisen für die verschiedenen Systeme zusammen. Technische Anforderungen und Vorschriften zur Zertifizierung mobiler HWS-Systeme liegen in Deutschland jedoch im Gegensatz zum englischsprachigen Raum (z. B. FM Approvals 2014) bislang nur bedingt vor. Der Europaverband Hochwasserschutz e.V. (2014) legt zwar Güte- und Prüfbestimmungen zur Klassifizierung mobiler Hochwasserschutzsysteme fest, als Kriterium zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Anlagen wird jedoch lediglich die Dichtigkeit herangezogen. Wagenhuber (2016) fordert eine Zertifizierung mit weitreichenderen Tests, die neben der abdichtenden Wirkung auch die Standsicherheit bei Treibgutanprall, Strömung und Wellen sowie die Überströmbarkeit der Systeme sicherstellen. Ferner gilt es, Qualität bzw. Lebensdauer und eine Mindestsicherheit gegen Vandalismus zu prüfen.

#### 2.2 Einsatzmöglichkeiten auf den Halligen

Auf den Halligen bzw. insbesondere den Warften existieren verschiedene Möglichkeiten zum Einsatz mobiler HWS-Maßnahmen. Im Folgenden werden insbesondere zwei Einsatzorte betrachtet: Warften, die über einen Ringdeich mit Stöpen verfügen, können im Bereich der Stöpen durch mobile HWS-Systeme vor Wellenüberlauf geschützt werden (Abbildung 1). In diesem Bereich des Warftrandes setzt sich die zu erwartende Belastung der HWS-Systeme aus *Einzelwellen* und *Windlast* zusammen.



Abbildung 1: Möglicher Einsatz einer mobilen HWS-Maßnahme zum Verschluss einer Stöpe.

Der zweite Einsatzbereich befindet sich im zentralen Bereich der Warft: Hier können die mobilen HWS-Maßnahmen als Objektschutz eingesetzt werden und die Gebäude vor Wasser schützen, das in Folge von Wellenüberlauf auf die Warft gelangt (Abbildung 2). Neben der Windlast ist im zentralen Warftbereich vor allem mit den Lastfällen "*Einstau"* und "*Anströmen"* zu rechnen. In beiden Einsatzbereichen ist zusätzlich der Lastfall "*Treibgutan-prall"* möglich.



Abbildung 2: Mobile HWS-Maßnahme als Objektschutz im zentralen Warftbereich sowie geometrische und hydraulische Parameter an einer Warft (nach Wöffler und Schüttrumpf 2017).

#### 2.3 Betrachtete mobile HWS-Systeme

Im Rahmen des Projektes werden zwei planmäßige (*Aquawand* und *HWS-mobil*) sowie zwei notfallmäßige (*Hydrobaffle* und *Sandsackdeich*) HWS-Systeme hinsichtlich ihrer Einsatzfähigkeit auf einer Hallig bewertet. Bei den Systemen handelt es sich außer bei den Sandsäcken um Sonderlösungen, die von den herstellenden Unternehmen für hydraulische Tests kostenlos zur Verfügung gestellt wurden. Tabelle 1 stellt die wesentlichen Merkmale der untersuchten Systeme zusammen, Abbildung 3 zeigt die für Praxistests in einer Versuchsrinne des IWW eingesetzten Maßnahmen. Zusätzlich wurde auf Wunsch der Hallig-Bewohner\*innen ein planmäßiges, vollautomatisches System (*Klappschott*) in die Bewertung aufgenommen. Hierzu fanden jedoch keine Praxistests statt.



Abbildung 3: Untersuchte mobile Hochwasser- bzw. Küstenschutzmaßnahmen während der Testphase in der wasserbaulichen Versuchshalle.

Planmäßige mobile HWS-Systeme				
Aquawand	System aus Kunststoffplane, Edelstahlnetz, Edel-			
Aquaburg Hochwasserschutz GmbH,	stahlpfosten, alle Bestandteile miteinander verbunden			
Münster	und vor Ort in einer im Boden installierten Beton-			
	rinne versenkbar, Höhen von 0,7–2 m verfügbar,			
	Aufbauzeit: 100 m in 45 Minuten (2 Personen)			
HWS-mobil	Montage der Stützen an im Boden betonierte An-			
HOWATEC GmbH, Siegen	schlusshülsen, Einbau gewölbter, verzinkter Stahlble-			
	che zwischen Stützen, Höhen von 0,64–1,3 m ver-			
	fügbar (ab 0,7 m zusätzliche Abstützung			
	erforderlich),			
	Aufbauzeit: 100 m in ca. 7–12 h (2 Personen)			
CHT-Klappschott	vollautomatischer Aufbau bei ansteigendem Wasser-			
Chiemgauer Hochwasser Technik	stand mittels Gasdruckzylinder, geeignet zur Abdich-			
Hochwasserschutz Reitthaler GmbH,	tung von Türen und Garageneinfahrten, bis 50 cm			
Bergen/Bernhaupten	Einstauhöhe verfügbar			
	Aufbauzeit: < 1 Minute			
Notfal	lmäßige mobile HWS-Systeme			
Hydrobaffle	mit Wasser befülltes Schlauchsystem (gewebte Poly-			
Hochwasserschutz Agentur, Frankfurt	estermembran, PVC-beschichtet) mit internem Stabi-			
	lisierungsglied, in Höhen von 0,31–2,44 m verfügbar,			
	max. Wassertiefe (1,83 m)			
	Aufbauzeit abhängig von Wasserförderleistung			
Sandsackdeich	mit Sand gefüllte Kunststoffgewebesäcke, Höhe,			
	Breite und Form variabel, für 100 m Länge (1 m			
	Höhe) ca. 350 m <sup>3</sup> Sand erforderlich,			
	Aufbauzeit: 100 m (0,5 m hoch) in 1 h (20 Personen)			

Tabelle 1: Für den Einsatz auf einer Hallig-Warft betrachtete mobile HWS-Systeme (alle Angaben zur Aufbauzeit sind Herstellerangaben).

# 3 Vorgehen zur Bewertung der mobilen HWS-Maßnahmen

# 3.1 Bewertungskriterien

Die Bewertung der mobilen HWS-Systeme hinsichtlich ihrer Einsatzfähigkeit zur Verbesserung des Küstenschutzes auf den Halligen erfolgt anhand von acht Kriterien (Tabelle 1). Für den Einsatzfall zum *Verschließen der Stöpen* werden jeweils Systeme mit 20 m Breite und 1 m Schutzhöhe verglichen. Für den *Objektschutz* wird ein Haus mit drei zu verschließenden Türöffnungen betrachtet. Ziel ist ein möglichst objektiver Vergleich der Maßnahmen, wozu sie für jedes Kriterium analog zu Wöffler (2017) auf einer Skala von 0 (schlechteste) bis 1 (beste Bewertung) bewertet werden. Die Gesamtbewertung erfolgt durch Bildung des geometrischen Mittels, sodass eine Maßnahme, die in einem Kriterium mit 0 Punkten bewertet wird, eine Gesamtbewertung von 0 Punkten erhält. Aufgrund ihrer hohen Bedeutung gehen die *hydrodynamische Wirksamkeit* sowie die *Betriebssicherheit* jeweils mit doppelter Gewichtung in die Bewertung ein.

		Bewertung					
		0	0,25	0,5	0,75	1	
	Hydrodynamische						
	Wirksamkeit						
	(1)Reduzierung Was- sertiefe auf Warft	<0 %	1–25 %	26–50 %	51-75 %	76–100 %	
	(2)Leckagerate	sehr hoch	hoch	mittel	niedrig	keine	
	Betriebssicherheit	Mittelwert o	l. Tabelle 3)				
	Bauaufwand		2 000	1.000.2.000	500–1.000 €/m <sup>2</sup>	<500 €/m <sup>2</sup>	
kriterien	System-, Bau- + Pla-	>5.000 €/m <sup>2</sup>	5.000 €/m <sup>2</sup>	1.000–2.000 €/m <sup>2</sup>			
	nungskosten [€/m²]			-	-		
	Landschaftsbild/	hohe Beeinträchtigung		niedrige Beeinträchtigung		keine	
ß	Naturschutz	none beentraentigung		incurige Decintracitugung			
rtur	Wartungsaufwand	sehr hoch	hoch	mittel	niedrig	sehr niedrig	
wei	(in Abbildung 4 er-	(0-5)	(6-10)	(11–15)	(16–20)	(>20)	
$\mathbf{Be}$	reichte Punktzahl)	()			( )		
	Bereitstellungszeit	>20 h	5–20 h	1–5 h	0–1 h	1 .	
	[h] für die zwei An- wendungsfälle	(zu groß)	(groß)	groß) (mittel) (nied		Keine	
	Lagerung						
	Platzbedarf in [m <sup>3</sup> ]						
	(1) Verschluss der	>20 $m^3$	10–20 m <sup>3</sup>	5–10 m <sup>3</sup>	0–5 m <sup>3</sup>	_	
	Stöpen						
	(2) Objektschutz	>10 m <sup>3</sup>	5–10 m <sup>3</sup>	3–5 m <sup>3</sup>	0–3 m <sup>3</sup>		
	Akzeptanz         Bewertung erfolgt durch soziologische Teilstudie (vgl. Abschnitt						

Tabelle 2: Bewertungskriterien und -schema zum Vergleich der mobilen HWS-Systeme.

Die Bewertung der *hydrodynamischen Wirksamkeit* erfolgt auf Grundlage des in Wöffler und Schüttrumpf (2017) vorgeschlagenen Sicherheitskriteriums: die maximale, während eines Sturmflutereignisses auftretende Wassertiefe an den Türschwellen der Warft (*h<sub>Warft,max</sub>*). Hierzu wird beispielhaft die Süderhörn-Warft auf Langeneß betrachtet, auf der sich im Osten zwei niedrig gelegene Toreinfahrten befinden, die durch mobile HWS-Maßnahmen verschlossen werden können. Der Einbau der mobilen HWS-Systeme wird durch eine Erhöhung der Warft im Bereich der Stöpen berücksichtigt und die Maßnahmen gehen als Kronenmauer in die Formeln zur Berechnung des Wellenüberlaufs (gemäß EurOtop 2016) ein. Die veränderten Wellenüberlaufraten werden in ein numerisches Modell (Software: *Delft3D*, für Modellaufbau siehe Wöffler und Schüttrumpf 2017) der Warft als Randbedingungen eingesteuert, der Verlauf des Wasserstands an den Türschwellen ausgewertet und mit dem Wasserstand des Referenzzustands (Stöpen unverschlossen) verglichen. Für den Objektschutz ist die Dichtigkeit der Maßnahmen (Leckagerate) entscheidend, die Beurteilung erfolgt hier qualitativ aus den Ergebnissen der Laborversuche (Kapitel 3.2). Die Beurteilung der *Betriebssicherheit* erfolgt anhand der Bewertung verschiedener Gefährdungsszenarien (nach BWK 2005) unter Berücksichtigung ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit sowie der Vulnerabilität des Systems gegenüber der jeweiligen Gefährdung (Tabelle 3). Zur Ermittlung der Vulnerabilität der Systeme erfolgt die Durchführung von Belastungstests an den Maßnahmen (vgl. Abschnitt 3.2 und 4.1).

Tabelle 3: Betrachtete Gefährdungsszenarien und Vorgehen zur Bewertung der Betriebssicherheit.

Gefährdungsszenarien	Bewertung					
<u>Äußere Einwirkungen</u> : Treibgutanprall (A),			Vulnerabilität			
Schiffsanprall (B), Fahrzeuganprall (C), Über-		HWS-System		gering	mittel	hoch
strömen (D)			Marginal	1	1	0,75
<u>System</u> : Geschiebe/Verlegung (E), Korro-		ition	Gering	1	0.75	0.5
sion/Alterung (F), technischer Ausfall (G)		sody	Mittel	0.75	0.5	0.25
<u>Sicherheit:</u> Sabotage/Diebstahl (H)		E	Hoch	0.5	0.25	0
Logistik: Aufbau/Abbau (I), Transport (J)				-,0	-,20	

Eine Beeinträchtigung von Landschaftsbild und Naturschutz ist durch mobile HWS-Systeme nur sehr geringfügig gegeben, die Bewertung wird daher an dieser Stelle nicht weiter erläutert. Zur Beurteilung des *Wartungsaufwands* wird eine einmal jährlich stattfindende Überprüfung betrachtet, die Bewertung der Systeme erfolgt dabei nach Abbildung 4.



Abbildung 4: Fließdiagramm zur Bewertung des Wartungsaufwands, Punkte sind zu summieren.

# 3.2 Laboruntersuchungen zur Betriebssicherheit mobiler HWS-Systeme

Zur Bewertung der Betriebssicherheit unter möglichst realitätsnahen Bedingungen fanden Versuche zur hydraulischen Belastbarkeit der mobilen HWS-Systeme in einer Strömungsrinne in der wasserbaulichen Versuchshalle des IWW statt (Abbildung 5). Insgesamt wurden die Maßnahmen fünf Belastungen unterzogen: *Einstan, Anströmen, Überströmen, Einzelwellen* und *Treibgutanprall* (vgl. Tabelle 4).



Abbildung 5: Versuchstand in der wasserbaulichen Versuchshalle des IWW.

Die Maßnahmen werden für die Untersuchungen im Bereich des Deichfußes eingebaut (Abbildung 6). Die Strömungsrinne verfügt über 2,00 m lichte Breite und der Deich über ein überströmsicheres Deckwerk. Der Zufluss in den Einlaufbereich kann mittels eines elektronisch steuerbaren Schiebers reguliert werden, übersteigt der Wasserstand im Einlaufbereich die Kronenhöhe des Deiches (2,00 m) fließt das Wasser über die Deichböschung in den Versuchstand, an dessen Ende die mobilen HWS-Systeme eingebaut sind. Ein Bodenablauf hinter der Maßnahme dient dazu, austretendes oder überströmendes Wasser abzuführen. Vor der Maßnahme ist ein seitlicher Ablauf vorhanden, der für die Lastfälle "*Einstan"* und "*Überströmen"* mit einem Deckel verschlossen wird. Für den Lastfall "*Einzelwellen"* wird das Wasser durch eine Klappe bis zu 35 cm oberhalb der Deichkrone zurückgestaut, bevor die mit Elektromagneten gehaltene Klappe schlagartig geöffnet wird (Abbildung 7).



Abbildung 6: Versuchstand (links: Blickrichtung von Deichkrone, rechts: polderseitiger Blick).



Abbildung 7: Wellenklappe in geschlossenem (links) und geöffnetem (rechts) Zustand.

An den HWS-Systemen werden folgende Messgrößen aufgezeichnet:

- Druck in fünf verschiedenen Höhen,
- Strömungsgeschwindigkeit,
- Pegelstand jeweils vor dem HWS-System sowie
- die Auslenkung des HWS-Systems.

Die Druckmessung erfolgt durch fünf Druckmessdosen (Messbereich: 0 bis 400 mbar). Diese sind senkrecht an einer Stange im Abstand von 0,25 m montiert, die unterste Dose befindet sich 0,024 m über dem Rinnenboden. Die Anströmgeschwindigkeit wird auf Höhe der untersten Druckmessdose über einen Messflügel (Modell *Mini Water6 Micro*) bestimmt. Die Bestimmung des Pegelstandes erfolgt für Testphase 1 bis 3 über eine Ultraschallsonde, aufgrund der zu erwartenden schnellen Veränderung der Wasseroberfläche wird in Testphase 4 ein Wellenpegelmesser *GHM Wave Height Meter* verwendet.



Abbildung 8: Anordnung der Messgeräte.

Die Verschiebung bzw. Rotation der HWS-Systeme wird mit Hilfe eines Laser-Distanzsensors gemessen (Abbildung 9). Der Laser ist hinter der Maßnahme angebracht und misst die Verschiebung  $\Delta x$ . Die Versuche werden zusätzlich durch drei Videokameras aufgezeichnet.



Abbildung 9: Laser-Distanzsensor zur Bestimmung der Verschiebung bzw. Rotation.

Testphase 5 erfolgt mit einem Anprallkörper aus Holz (Abbildung 13). Mit Hilfe der angebrachten Markierungen kann aus den Videoaufnahmen die Geschwindigkeit des Anprallkörpers ermittelt werden. Während der Anpralltests ist das HWS-System eingestaut, der Anprallkörper wird auf die Wasseroberfläche gebracht und mit einem Seil gegen die instabilste Stelle der Maßnahme gezogen. Tabelle 4 stellt die Versuchsbedingungen für alle Testphasen zusammen. Abbildung 10 bis Abbildung 13 zeigen Eindrücke der fünf Testphasen an den verschiedenen HWS-Systemen.

Testphase	Versuchsbedingungen
1: Einstau ₹	<ul> <li>linearer Anstieg des Wasserspiegels</li> <li>bis zum Versagen oder Volleinstau</li> <li>je drei Wiederholungen</li> </ul>
2: Anströmen <sup>™</sup>	<ul> <li>senkrechte Anströmung</li> <li>Steigerung des Abflussvolumens in fünf Stufen von 820 l/s auf 1.730 l/s</li> <li>Belastungsdauer je Stufe: 3 Minuten</li> </ul>
3: Überströmen ∑	<ul> <li>max. Überströmhöhen von 5–26 cm</li> <li>Steigerung der Überströmhöhen für <i>HWS-mobil</i> und <i>Aqua-wand</i> bis OK Versuchsrinne, für <i>Sandsackdeich</i> und <i>Hydrobaffle</i> bis zum Versagen</li> </ul>
4: Einzelwellen	<ul> <li>je acht Schwallwellen mit bis zu 35 cm Schwallhöhe</li> <li>vor Belastung ca. 20 cm Einstauhöhe</li> </ul>
5: Treibgutanprall	<ul> <li>nur für <i>HWS-mobil</i> und <i>Aquawand</i> durchgeführt</li> <li>80 kg Anprallkörper, Anprallgeschwindigkeit bis zu 2,1 m/s</li> <li>20 cm Freibordhöhe während Versuch</li> <li>je fünf Wiederholungen</li> </ul>

Tabelle 4: Versuchsbedingungen für die fünf Testphasen.



Abbildung 10: Testphase 1 und 2 - Einstau und Anströmen an HWS-mobil und Aquawand.



Abbildung 11: Testphase 3 – Überströmen von Sandsackdeich, HWS-mobil und Aquawand.



Abbildung 12: Testphase 4 – Wellenanprall auf HWS-mobil, Hydrobaffle und Aquawand.



Abbildung 13: Anprallkörper (links) und Anprallversuch an der Aquawand (rechts).

## 3.3 Einbindung der Hallig-Bewohner\*innen durch Mixed-Method-Ansatz

Das soziologische Vorhaben setzte sich insgesamt aus den folgenden Bestandteilen zusammen:

- qualitative Analyse der Erhebungen und des Datenmaterials aus dem Vorgängerprojekt *ZukunftHallig* zur Filtrierung zentraler Aspekte für Küstenschutzmaßnahmen (Analyse von qualitativen Interviews und Zukunftswerkstätten mit Bewohner\*innen),
- qualitative Expert\*innen-Befragung zu Wandlungsprozessen auf den Halligen sowie zu bestehenden und potenziellen Küstenschutzmaßnahmen,
- Gruppendiskussionen mit den Hallig-Bewohner\*innen und Expert\*innen, um verschiedene Perspektiven bezüglich einer Evaluation getesteter Hochwasserschutzsysteme einzubeziehen.

Anschließend wurden die wissenschaftlichen Erkenntnisse zu den getesteten Maßnahmen, zu der Akzeptanz der Bevölkerung und der Übertragbarkeit zusammengeführt. Ziel des Vorgehens war ein Anforderungskatalog, der zentrale Aspekte (Bedürfnisse, Erwartungen, Akzeptanz) zu Küstenschutzmaßnahmen beinhaltet.

Der auf den lokalen Kontext zugeschnittene Ansatz ermöglichte eine Berücksichtigung sozialer Aspekte (Bedürfnisse, Erwartungen, Anforderungen) und deren Zusammenführung mit technischen Aspekten (technisch umsetzbare Maßnahmen) im Rahmen einer Evaluation seitens des Küsteningenieurwesens, im Sinne einer ganzheitlichen interdisziplinären, soziotechnischen Perspektive. Im Folgenden werden als zwei zentrale Facetten des soziologischen Vorhabens die durchgeführten Expert\*innen-Interviews und die Gruppendiskussionen herausgegriffen und zentrale Erkenntnisse dargestellt.

# 3.3.1 Expert\*innen-Interviews

Die Auswahl der Expert\*innen für die qualitativen Interviews erfolgte im Hinblick auf deren vorhandene Expertise vor Ort, da diese, als Teil des zu untersuchenden Handlungsfeldes, über repräsentative, besondere Informationen verfügen (vgl. Meuser 1989, Meuser und Nagel 2005). So leben die Interviewten auf einer der Halligen und/oder sind diesen aus beruflichen Gründen, beispielsweise durch eine Tätigkeit im Küstenschutz, stark verbunden.

Insgesamt wurden 18 Expert\*innen angefragt und es konnten 16 Interviews realisiert werden. Eine angefragte Person hat eine Gesprächsteilnahme verweigert, bei einer Person konnte das Interview aufgrund technischer Schwierigkeiten (fehlender Telefonanschluss) nicht umgesetzt werden. Unter Rücksprache mit Vertreter\*innen der Halligen sowie Projektpartner\*innen wurde der folgende Expert\*innen-Kreis ausgewählt: Sieben Gemeindevertreter\*innen der Halligen; fünf Vorarbeiter\*innen im Küstenschutz; vier Personen aus der Verwaltung und/oder aus Projekten zum Biosphärenreservat der Halligen.

Die Expert\*innen wurden zweimalig via E-Mail Anfang sowie Mitte November 2017 angefragt. Bei ausbleibender Rückmeldung wurde telefonisch Kontakt aufgenommen. An diese Kontakt- und Akquisezeit schloss dann die Interviewphase ab Dezember 2017 an. Die Interviews wurden telefonisch durchgeführt und aufgezeichnet, wobei die Zustimmung zur Gesprächsaufzeichnung zu Anfang des Interviews abgefragt wurde, unter Zusicherung eines Schutzes der Daten durch eine vertrauliche Behandlung sowie eine Anonymisierung. Insgesamt fanden die Telefoninterviews in einem Zeitfenster von circa 26 Minuten bis zu einer Stunde statt.

## 3.3.2 Gruppendiskussionen

Um eine Partizipation seitens der Hallig-Bewohner\*innen zu gewährleisten, wurden zwei Gruppendiskussionen auf der Hallig Hooge (27.08.2018) und der Hallig Langeneß (28.08.2018) in enger Kooperation mit den dortigen Vertreter\*innen initiiert.

Als eine Erhebungsmethode der empirischen Sozialforschung bieten Gruppendiskussionen eine Möglichkeit, um thematische Aussagen, Meinungen, Sichtweisen und Einstellungen, aber auch die Kommunikation, Geschichten und Selbstrepräsentationen in einem kulturellen sowie kollektiven Kontext zu erfassen (vgl. Mäder 2013: 24). Zentrale Charakteristiken von solch qualitativen Methoden sind die Offenheit, Kommunikativität, Naturalistizität und Interpretativität (vgl. Lamnek 1995: 17 ff.). Gruppendiskussionen geben zudem einen Einblick in die Konstitution und Konstruktion von Wirklichkeit sowie in den Prozesscharakter von Alltagsinteraktionen (vgl. Kutscher 2002: 59). Dabei sind Meinungsbildungsprozesse und Gruppendynamiken - nachvollziehbar anhand des Diskussionsverlaufs - von zentralem Interesse (vgl. Lamnek 2005: 69-77) sowie die Rekonstruktion von deutungsund handlungsgenerierenden Strukturen (vgl. Mruck und Mey 2005: 7). So stellt die Gruppendiskussion eine Erhebungsmethode dar, um Fragestellungen sowie sensible bzw. komplexe Themen aus der Perspektive zentraler Beteiligter zu untersuchen oder neue Forschungsgebiete zu explorieren (vgl. Mäder 2013: 29). Entsprechend ist hiermit eine Gleichwertigkeit sowie Ergänzung in Mixed-Methods-Ansätzen – mit (Expert\*innen-) Interviews (vgl. Kutscher 2002: 75) und/oder (teilnehmenden) Beobachtungen, aber auch mit quantitativen Ansätzen – gegeben (vgl. Mäder 2013: 29 ff.).

Da die Entstehung eines Meinungsbildes – vor dem Hintergrund eines geteilten Erfahrungskontexts und auf Basis eines Austauschs bzw. der Rekonstruktion eines Diskussionsverlaufs – zu sensiblen und komplexen Themen mittels Gruppendiskussionen erfassbar ist, wurden entsprechend der hier dargelegten Methodik die Gruppendiskussionen auf der Hallig Hooge und der Hallig Langeneß durchgeführt und ausgewertet. Besonders der Aspekt, dass hiermit eine Partizipation von Betroffenen gewährleistet sein kann, begründet den Einbezug dieses Erhebungsinstruments in das Forschungsdesign. Zudem erscheint vorteilhaft, dass es sich bei den Teilnehmer\*innen um eine *Realgruppe* handelt und eine Übertragbarkeit auf weitere Prozesse gegeben ist.

Für die geplanten Diskussionen auf der Hallig Hooge und der Hallig Langeneß wurden Flyer als Einladung und Information für die Bewohner\*innen erstellt sowie in enger Kooperation mit den Vertreter\*innen der Halligen abgestimmt und in Umlauf gebracht. An dieser Stelle gilt besonderer Dank den Kooperationspartner\*innen auf den Halligen für die gegenüber der Soziologie entgegengebrachte Offenheit und Unterstützung.

Zu Beginn der Gruppendiskussionen wurden das Projekt Living CoastLab Halligen vorgestellt und Bezüge zu dem Vorgängerprojekt ZukunftHallig seitens der Soziologin Nenja Ziesen hergestellt, mit einem kurzen Rekurs auf zentrale Ergebnisse. Dabei wurde auch um eine kritische Diskussion gebeten. Zudem wurde betont, dass jegliche Anmerkungen, Überlegungen und Kritikpunkte offen geäußert werden können. Anschließend wurde der Ablauf der Gruppendiskussion erläutert: Zunächst stellte die Geologie aus Göttingen, vertreten durch Ingo Hache, Ergebnisse zur Sedimentation vor. Im Anschluss präsentierte Theide Wöffler, als Vertreter des *Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW)* der *RWTH Aachen University*, Naturmessungen auf Hooge sowie mobile Hochwasserschutzsysteme, die in der Versuchshalle des *IWW* getestet wurden. Nach Verständnisfragen zu den jeweiligen Vorträgen konnten kritische Aspekte diskutiert werden.

Insgesamt dienten beide Vorträge als Grundreiz und Grundlage für die folgende Diskussion. Abschließend wurde um eine Bewertung gebeten bezüglich zentraler Aspekte, die Schutzmaßnahmen auf den Halligen erfüllen sollten, sowie der vom IWW vorgestellten Maßnahmen. Dabei wurde ein eigens erstelltes Bewertungssystem erläutert und auf die seitens der Soziologie durchgeführten Interviews im November/Dezember 2017 mit Expert\*innen verwiesen, aus denen die benannten zentralen Aspekte hervorgingen. So wurde für eine explizite Bewertung durch die Bewohner\*innen eine Tabelle erstellt, welche eine Bewertung der Maßnahmen anhand der – in den Interviews bestätigten – zentralen Aspekte gewährleistet. Zudem wurden Aspekte in die Tabelle aufgenommen, die für die Testung der Maßnahmen seitens des IWW bedeutsam sind (hydrodynamische Wirksamkeit, Betriebssicherheit, Wartungsaufwand und Bereitstellungszeit). Den Bewohner\*innen wurde die Möglichkeit gegeben, jeder Maßnahme für jeden Aspekt einen Wert von 0 bis 4 zuzuordnen (0 = Der Aspekt wird gar nicht erfüllt; 1 = Der Aspekt wird eher nicht erfüllt; 2 = Der Aspekt wird teils erfüllt und teils nicht; 3 = Der Aspekt wird eher erfüllt; 4 = Volle Erfüllung des Aspektes). Während der abschließenden Bewertungsphase konnten die Bewohner\*innen weiterhin frei miteinander diskutieren sowie den anwesenden Expert\*innen Fragen stellen.

#### 4 Ergebnisse

#### 4.1 Auswertung der hydraulischen Belastungstests

Im Rahmen der Modellversuche wurden die mobilen HWS-Maßnahmen hinsichtlich ihrer Vulnerabilität gegenüber verschiedenen Belastungen bzw. Gefährdungsszenarien untersucht. Die Ergebnisse der Modellversuche sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Für die Maßnahmen Aquawand und HWS-mobil ist ein Einstau (Testphase 1) bis zur Oberkante der Maßnahme möglich, ohne dass es zu einer erhöhten Leckage durch die Maßnahmen kommt. Leichte Undichtigkeiten zeigen sich hier jedoch im unteren Bereich der Wand- und Stützenanschlüsse sowie für das System HWS-mobil zwischen Blech und Boden. Auch der Sandsackdeich hält einem Volleinstau stand, allerdings ergeben sich hier im Vergleich deutlich höhere Sickerwassermengen. Der Hydrobaffle konnte über die vom Hersteller angegebene Einstauhöhe hinaus belastet werden, ohne dass es zu einem Versagen kam. Eine Freibordhöhe von 10–20 % der Gesamthöhe ist jedoch in jedem Fall einzuhalten: Bei einer weiteren Erhöhung des Wasserspiegels nimmt die Lageänderung des Hydrobaffle derart zu, dass dieser durch Wegrollen plötzlich versagt. Beim Hydrobaffle zeigten sich Undichtigkeiten an den Seitenwänden der Betonrinne. Dieser Modelleffekt wird jedoch je nach Einsatzort in der Natur weniger stark ins Gewicht fallen, wenn die Anschlussflächen im Verhältnis zur Gesamtlänge der Maßnahme geringer sind.

Tabelle 5: Ergebnisse der Belastungstests für die untersuchten mobilen HWS-Maßnahmen; ein grüner Haken bedeutet, dass das System die Belastung unbeschadet überstanden hat, die Zeile darunter gibt die maximal getestete Belastung an, ein Kreuz steht für ein Versagen der Maßnahme während der Belastungstests, ein Kreis für eine eingeschränkte Leistungsfähigkeit.

	Aquawand	Hydrobaffle HWS-mobil		Sandsackdeich*	
	*	Ο	<b>v</b>	О	
Testphase 1: Einstau (erforderliches Freibord)	Volleinstau (100 mbar)	10 % Freibord erfoderlich	Volleinstau (100 mbar)	Volleinstau, hohe Leckagerate	
	×	~	×	¥	
Testphase 2: Anströmen (Anströmvolumina)	0,85 m <sup>3</sup> /(s·m)	0,85 m <sup>3</sup> /(s·m)	0,85 m <sup>3</sup> /(s·m)	0,85 m <sup>3</sup> /(s·m)	
ž	*	×	¥	О	
Testphase 3: Überströmen (Überströmhöhe)	mind. 0,15 m	Überströmung bei Kombination mehrerer Elemente möglich	mind. 0,11 m	< 0,16 m, danach Versagen	
	*	×	¥	×	
Testphase 4: Einzelwellen (Schwallhöhe)	0,35 m	Wellenanprall stabil, Versagen inf. anschl. Überströmung	0,35 m	Wellenanprall stabil, Versagen inf. anschl. Überströmung	
	<b>v</b>	×	¥	×	
Testphase 5: Anprall (max. Impuls)	≈ 160 (kg·m)/s	nicht durchgeführt, da Versagen erwartbar	≈ 160 (kg·m)/s	nicht durchgeführt, da Versagen erwartbar	

\* Für den Sandsackdeich wurden drei verschiedene Aufbauten getestet. Gezeigt sind hier nur die Ergebnisse des stabilsten Aufbaus. Entscheidend insbesondere für den Widerstand während Überströmung ist die Lage der oberen Sandsackreihen; die Aufbauten mit einer Längsausrichtung der Sandsäcke waren stabiler, erfordern jedoch auch eine höhere Anzahl an Sandsäcken.

Einer Anströmung (Testphase 2) konnten alle Maßnahmen widerstehen, sofern es nicht in ihrer Folge zu einer zu starken Erhöhung des Wasserspiegels oder einer Überströmung kam, die zumindest für *Sandsackdeich* und *Hyrobaffle* eine kritische Belastung darstellen können (vgl. Testphase 1 und 3).

Eine Überströmung (Testphase 3) war für *Aquawand* und *HWS-mobil* ohne Beeinträchtigung der Funktionstüchtigkeit möglich. Eine Erhöhung der maximal getesteten Überfallhöhen (vgl. Tabelle 5) war im Versuchsaufbau nicht möglich, da das Wasser sonst über die seitlichen Wände der Versuchsrinne geströmt wäre. Die Auswertung der Videoaufnahmen sowie der Daten des Laserscanners zeigt, dass beide Maßnahmen während der Überströmung weder in Schwingung geraten noch die Auslenkung der Mittelstützen durch die Überströmung verstärkt wird. Beim Überströmen des *Hydrobaffle* kam es durch eine Drehbewegung zum schlagartigen Versagen und damit einem plötzlichen Wegfall der wasserrückhaltenden Funktion. Die Kombination aus zwei hintereinander gereihten *Hydrobaffle* hat hingegen einer Überströmhöhe von 0,26 m standhalten können.

Während der Wellenanprallversuche konnte der Hydrobaffle den Belastungen des Wellenanpralls standhalten, die anschließend stattfindende Überströmung ließ die Maßnahme jedoch wie oben beschrieben versagen. Das gleiche Verhalten ließ sich bei der Schwallwellenbelastung des Sandsackdeichs beobachten. Die Maßnahmen *HWS-mobil* und *Aquawand* hielten dem Wellenanprall ohne Probleme stand. Während der dynamischen Belastung ließ sich aus der Distanzmessung an der Mittelstütze eine Auslenkung der Systeme von bis zu 10 mm (*HWS-mobil* ohne zusätzliche Abstützung) und bis zu 20 mm (*Aquawand*) beobachten (Abbildung 14), nach der Belastung kehrten beide Systeme wieder in ihren Ausgangszustand zurück und zeigten keine Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit.



Abbildung 14: Verlauf des Wasserstands unmittelbar vor dem System und Auslenkung der Mittelstütze während Wellenanprall auf die Maßnahmen *HWS-mobil* (ohne zusätzliche Abstützung, links) und *Aquawand* (rechts).

Die durchgeführten Anpralltests verursachten bei der Maßnahme *HWS-mobil* eine Lageveränderung der Stütze, die sich mit jedem Anprall vergrößerte (bis zu 20 mm, vgl. Abbildung 15). Traf der Anprallkörper anstelle der Stütze auf die gebogenen Stahlbleche, wurde der Anprall gedämpft, hier kam es jedoch teils zu irreversiblen Verformungen (Beulen im Blech, Abbildung 15 rechts). Weder die Standsicherheit noch die Funktionstüchtigkeit des Systems wurden durch die Verschiebungen und Verformungen beeinträchtigt. Auch an der *Aquawand* führten die Anpralltests zu einer deutlichen Verschiebung der Stütze (bis zu 10 cm). Traf der Anprallkörper anstelle der Stütze auf die Plane, so kam es an einer Stelle zu einem Riss im Stahlnetz, dies hatte jedoch kein Versagen der Maßnahme zur Folge, da die Plane unbeschädigt blieb. Auch nach den Anpralltests verlief ein erneuter Auf- und Abbau beider Systeme ohne Schwierigkeiten und beide Systeme waren weiterhin funktionstüchtig.



Abbildung 15: Auslenkung der Mittelstütze infolge Treibgutanprall an der Maßnahme *HWS-mobil* (ohne zusätzliche Abstützung) und Verformungen am Stahlblech nach Abschluss der Anprallversuche.

Für die Maßnahme *HWS-mobil* kann eine erhöhte Stabilität durch den Einbau einer zusätzlichen Abstützung (vom Hersteller ab einer Höhe von 0,7 m empfohlen) erreicht werden. Alle Testphasen wurden mit und ohne Zusatzstütze durchgeführt. Das System ohne Zusatzstütze wurde zwar stärker ausgelenkt, diese Auslenkung hatte jedoch keine Auswirkungen auf die Standsicherheit. Das System ist somit auch ohne die Zusatzstütze standsicher und gebrauchstauglich.

Die Ergebnisse der Modellversuche erlauben eine Bewertung der Vulnerabilität der Maßnahmen gegenüber Treibgutanprall und Überströmung, welche in die Ermittlung der Betriebssicherheit der Maßnahmen eingeht (Tabelle 6). Die Dichtigkeit der Maßnahmen sowie die Widerstandsfähigkeit gegenüber Wellenanprall ist für die Ermittlung der hydrodynamischen Wirksamkeit relevant (vgl. Abschnitt 3.1). Ferner wurde im Rahmen der Untersuchungen die Aufbauzeit der einzelnen Maßnahmen überprüft, die im Wesentlichen mit den Angaben der Hersteller (Tabelle 1) übereinstimmte.

Tabelle 6: Einschätzung der Vulnerabilität gegenüber ausgewählten Gefährdungsszenarien. Die Bewertung ergibt sich jeweils aus der Kombination von Exposition und Vulnerabilität (s. Tabelle 3), die Gesamtbewertung der Betriebssicherheit (unterste Zeile) bildet sich aus dem geometrischen Mittel der Einzelbewertungen aller Gefährdungsszenarien nach Tabelle 3. Auf eine Darstellung aller Einzelbewertungen wird aus Platzgründen verzichtet.

<b>Gefähr-</b> dungsszenario Exposition	Aquawand	HWS-mobil	Klappschott*	Hydrobaffle	Sandsäcke
Treibgutanprall (A) mittel	mittel / 0,5	gering / 0,75	gering / 0,75	hoch / 0,25	mittel / 0,5
Überströmen (D) gering	gering / 1,00	gering / 1,00	gering / 1,00	hoch / 0,5	mittel / 0,75
Verlegung (E) mittel	gering / 0,75	gering / 0,75	hoch / 0,25	gering / 0,75	gering / 0,75
		•••			
Gesamtbewertung Betriebssicherheit	0,70	0,75	0,67	0,63	0,63

\* Maßnahme wurde nicht getestet, die Bewertung erfolgt auf einer Einschätzung auf Grundlage der zum System öffentlich zugänglichen Informationen.

#### 4.2 Bewertung der mobilen HWS-Systeme

Die Bewertung der *hydrodynamischen Wirksamkeit* bei Einsatz der mobilen Maßnahmen zum *Verschluss von Stöpen* im Ringdeich erfolgt für alle Maßnahmen identisch und wie unter Abschnitt 3.1 erläutert. Im Folgenden wird hierzu sowohl das HW<sub>100</sub> als auch das HW<sub>20</sub> betrachtet. Abbildung 16 zeigt beispielhaft das Ergebnis der Berechnung für die Warft Süderhorn auf Langeneß.



Abbildung 16: Während HW<sub>20</sub> und HW<sub>100</sub> maximal berechnete Wasserstände an den Türschwellen (h<sub>Warft,max</sub>) am Beispiel der Warft Süderhorn auf Langeneß für den Ist-Zustand, bei Verschließen der Stöpen mit einer 1 m hohen mobilen HWS-Maßnahme und einem Stöpenverschluss bei gleichzeitiger Ringdeicherhöhung im Süden, Südosten und Südwesten der Warft.

Im Ist-Zustand ohne Maßnahme werden die Grenzwerte für das Sicherheitskriterium nach Wöffler und Schüttrumpf (2017) (für HW<sub>20</sub>: h<sub>Warft,max</sub><0,2 m, für HW<sub>100</sub>: h<sub>Warft,max</sub><0,5 m) für beide Hochwasserereignisse nicht erfüllt. Durch ein Verschließen der Stöpen mit einer 1 m hohen mobilen HWS-Maßnahme wird der resultierende Wasserstand an der Türschwelle während eines 20-jährlichen Hochwassers auf 0 m gesenkt, für das 100-jährliche Hochwasser zeigt sich jedoch eine Erhöhung des berechneten Wasserstands, da sich das durch Wellenüberlauf auf die Warft gelangte Wasser höher einstauen kann. Während auch hier im Bereich der nun verschlossenen Stöpen die Wellenüberlaufraten auf 0 1/s reduziert werden können, läuft die Warft durch den an anderen Stellen unveränderten Wellenüberlauf voll. Der Verschluss der Stöpen bewirkt, dass das Wasser nur bedingt ablaufen kann, resultiert so in einer Erhöhung der Wasserstände auf der Warft und hat in diesem Beispiel einen negativen Einfluss. Eine iterative Berechnung ergibt, dass für die betrachtete Warft eine Erhöhung des Ringdeichs im Süden der Warft um 0,3 m erforderlich ist, damit durch Verschließen der Stöpen die Wasserstände an den Türschwellen während eines HW<sub>100</sub> soweit gesenkt werden können, dass das Sicherheitskriterium eingehalten wird.

Die Berechnungen sind nicht auf andere Warften übertragbar und die Warften sind in Abhängigkeit ihrer jeweiligen Geometrie und hydrodynamischen Belastung einzeln zu betrachten. Dennoch zeigten Berechnungen für andere Warften einen ähnlichen Trend und es wird deutlich, dass die abschnittsweise Verwendung von mobilen HWS-Systemen für extreme Hochwasserereignisse nur bei gleichzeitiger Warftverstärkung erfolgsversprechend ist. Die hydrodynamische Wirksamkeit der mobilen Maßnahmen für ein HW<sub>100</sub> wird somit für alle betrachteten Systeme mit "0 *(keine hydrodynamische Wirksamkeit)"* bewertet,
woraus ein Ausschluss aller Maßnahmen für diesen Anwendungsfall folgt. Die Maßnahmen eignen sich jedoch für die Abwehr kleinerer Hochwässer, wie das hier betrachtete HW<sub>20</sub>. Bei diesem kann die mobile Maßnahme den Wellenauflauf in der Stöpe erfolgreich kehren (die hydraulischen Belastungstests bestätigen eine Stabilität gegenüber Wellenanprall für alle Maßnahmen), ein Volllaufen der Warft verhindern und den resultierenden Wasserstand auf der Warft signifikant reduzieren. Die Wirksamkeit der Maßnahmen wird für ein HW<sub>20</sub> mit "1" bewertet. Damit erfüllen die Maßnahmen die angestrebte kurzfristige Schutzwirkung: Durch mobile HWS-Maßnahmen kann ein Schutz vor Hochwässern mit niedriger Jährlichkeit geschaffen werden, bis langfristige Warftverstärkungen zur Abwehr von seltenen Extremereignissen abgeschlossen sind.

Bei Einsatz als *Objektschutz* (zum Verschließen von Tür- und Fensteröffnungen oder umlaufend) sind die Maßnahmen auch während eines HW<sub>100</sub> wirksam. Entscheidend für die Wirksamkeit ist hier die Dichtigkeit sowie die Standsicherheit der Systeme bei Volleinstau, weshalb die Bewertung für die verschiedenen Maßnahmen getrennt (und auf Grundlage während der Belastungstests gesammelter Erfahrungen) erfolgt. Hier können mobile Maßnahmen dazu beitragen die Güter auf der Hallig bereits vor Abschluss der Warftverstärkungen auch vor extremen Ereignissen zu schützen.

Stöpenverschluss*/	Assessment		Vlannahatt	I Induch offic	San da "alaa
Objektschutz	Aquawand	Hw5-mobil	Kiappschott	Hydrobame	Sandsacke
Hydrodynamische	1 / 0 75	1 / 0 75	1 / 0 75	1 (05	1 / 0 25
Wirksamkeit	1 / 0,/5	1 / 0,/5	1 / 0,/5	1 / 0,5	1 / 0,25
Betriebssicherheit	0,7	0,75	0,67	0,63	0,63
Bauaufwand	0,75	0,5	0,25	1	1
Landschaftsbild	0.00 / 1	0.04 / 1	0.00 / 1	1 / 1	1 / 1
bzw. Naturschutz	0,89 / 1	0,94 / 1	0,89 / 1	1 / 1	1 / 1
Wartungsaufwand	0,75	1	0,75	1	0,75
Zeitaufwand	0,75 / 0,75	0,5 / 0,75	1 / 1	0,25 / 0,5	0,25 / 0,5
Lagerung	1 / 1	0,75 / 0,75	1 / 1	0,75 / 0,75	0 / 0,25
Gesamtbewertung					
(Stöpenverschluss*/	0,83 / 0,78	0,77 / 0,77	0,75 / 0,71	0,75 / 0,69	0 / 0,5
Objektschutz)					
Akzeptanz <sup>**</sup> (Hooge/Langeneß)	_/_	+/_	+/_	_/_	+/+

Tabelle 7: Bewertung der mobilen HWS-Systeme für die Anwendungsfälle Stöpenverschluss/Objektschutz (1 – beste Bewertung, 0 – schlechteste Bewertung) für alle Bewertungskriterien sowie Gesamtbewertung (durch Bildung des geometrischen Mittels, hydrodynamische Wirksamkeit und Betriebssicherheit mit doppelter Gewichtung).

<sup>\*</sup> Der Anwendungsfall Stöpenverschluss bezieht sich, wie oben dargestellt, nur auf Hochwässer geringer Jährlichkeit (HW<sub>20</sub>).

\*\* Die Bewertung (- negative / + positive Beurteilung) erfolgt auf Grundlage der im August 2018 stattgefundenen Gruppendiskussion auf Hooge und Langeneß (vgl. Kapitel 4.3).

Die resultierende Bewertung der betrachteten Maßnahmen für alle Kriterien ist in Tabelle 7 zusammengefasst; für die hydrodynamische Wirksamkeit, für Landschaftsbild/Naturschutz sowie Zeitaufwand und Lagerung ergeben sich je nach Anwendungsfall (Stöpenverschluss/Objektschutz) unterschiedliche Bewertungen.

Aus technischer Sicht (hydrodynamische Wirksamkeit, Betriebssicherheit) können insbesondere die Systeme HWS-mobil und Aquawand, aber auch das Klappschott (keine hydraulischen Belastungstests, die Bewertung stützt sich nur auf öffentlich zugängliche Informationen des Herstellers) für den Einsatz auf der Hallig empfohlen werden. Auch bei Berücksichtigung weiterer hallig-spezifischer Aspekte können die drei Systeme überzeugen. Unterschiede ergeben sich hier hinsichtlich des Bauaufwands (Kosten) sowie der Lagerung und des Wartungsaufwands: Die Systeme Klappschott und Aquawand werden vor Ort im Boden gelagert. Dies ist zwar hinsichtlich des Zeitaufwands und möglicher Fehlerquellen bei Transport und Aufbau (unter Betriebssicherheit berücksichtigt) positiv zu beurteilen, kritisch wirkt sich dies jedoch auf Alterung und Korrosion (ebenfalls unter Betriebssicherheit berücksichtigt) sowie auf den Wartungsaufwand aus. Die etwas schlechtere Gesamtbewertung des Klappschotts lässt sich auf die hohen Investitionskosten sowie die Gefahr des Versagens der automatischen Teile (z. B. infolge Verlegung, schlägt sich in der Bewertung der Betriebssicherheit nieder) zurückführen. Für das System HWS-mobil müssen die Bauteile erst zum Einsatzort transportiert werden. Die gebogenen Stahlbleche sind sehr leicht und können unter normalen Witterungsverhältnissen ohne Schwierigkeiten von 1 bis 2 Personen getragen und aufgebaut werden. Während eines starken Sturms könnten Transport und Aufbau der Stahlbleche herausfordernd sein. Aufgrund fehlender Praxistests vor Ort kann hierzu jedoch keine fundierte Einschätzung gegeben werden.

Auch der Hydrobaffle eignet sich prinzipiell zu einer temporären Freiborderhöhung und damit zum Schutz vor Wellenanprall und -überlauf, sein Einsatz ist allerdings nur zu empfehlen, wenn ein erhöhter Einstau ausgeschlossen oder der Hydrobaffle zusätzlich durch andere Maßnahmen vor Wegrollen geschützt werden kann. Die Verwendung einer Dichtungsfolie auf der Oberseite des wassergefüllten Systems, wie in Wagenhuber (2016) beschrieben, empfiehlt sich für einen Einsatz auf den Halligen aufgrund der hohen zu erwartenden Windgeschwindigkeiten nicht. Der Vorteil des Hydrobaffle liegt in seiner flexiblen und mobilen Anwendungsmöglichkeit, da keine Anschlüsse im Boden oder an angrenzender Bebauung erforderlich sind. Es ist allerdings in jedem Fall zu klären, woher das Füllwasser für den Hydrobaffle bezogen werden kann. Eine Bezugsmöglichkeit bilden gegebenenfalls nahegelegene Priele sowie die Fethinge. Sollte das Füllwasser hier entnommen werden, so ist für einen ausreichenden Schutz gegen Verstopfen der Schläuche und der Pumpe zu sorgen. Zusätzlich sollte eine Ersatzpumpe zur Verfügung stehen, da bei Ausfall der Pumpe das gesamte System nicht einsatzfähig ist. Eine Befüllung über die Hausanschlüsse auf einer Warft wird zu langen Füllzeiten führen. Ferner ist unklar, wie sich das gleichzeitige Befüllen mehrerer Hydrobaffles auf einer Warft oder Hallig auswirkt.

Als konventionelle mobile Schutzmaßnahme ist zusätzlich ein *Sandsackdeich* betrachtet worden. Hinsichtlich der Betriebssicherheit und hydrodynamischen Wirksamkeit ist diese Maßnahme mit dem *Hydrobaffle* vergleichbar. Allerdings besteht hier eine geringere Gefahr des schlagartigen Versagens, dafür kommt es bei einem Volleinstau zu höherer Leckage. Für den betrachteten Anwendungsfall *Stöpenverschluss* scheidet die Maßnahme aufgrund des hohen Platzbedarfs für die Lagerung aus. Ein Einsatz im *Objektschutz* ist denkbar, allerdings müssen die hohen Leckageraten in Kauf genommen werden. Ferner gilt stets zu bedenken, dass für größere Sandsackmengen eine hohe Anzahl an einsatzfähigen Helfern für den Aufbau erforderlich sind. Als zusätzliche Verstärkung oder zur schnellen Abdichtung von Fehlstellen bieten Sandsäcke jedoch eine sinnvolle Ergänzung.

# 4.3 Auswertung der soziologischen Teilstudie

## 4.3.1 Expert\*innen-Interviews

Die Transkription und Auswertung der Interviews verlief ohne die Personalien in pseudonymisierter Form, sodass alle Expert\*innen ein Kürzel erhielten (E1 bis E16). Die verschriftlichten Transkripte umfassen insgesamt circa 236 Seiten und dienten als Basis für die qualitative Auswertung mittels der Software MaxQDA (Kuckartz 2012). Im Folgenden sind die zentralen Ergebnisse der qualitativen Interviewauswertung entlang der vier Themenblöcke aus dem konzipierten Leitfaden wiedergegeben.

Themenblock 1: Eigene Erfahrungswerte

- Merkmale der Halligen: einzigartige geografische Lage, Leben mit der Natur und den Gezeiten, Leben auf Warften, Ruhe.
- Besonderheiten des alltäglichen Lebens: durch geografische Lage und Verkehrsanbindungen geprägt, an Wetter sowie Gezeiten angepasste Struktur, mit Einschränkungen verbunden, Gleichzeitigkeit von regelmäßiger Planung und Flexibilität, Arbeit vor allem bezogen auf Küstenschutz, Tourismus und Land- bzw. Viehwirtschaft.
- Umgang mit den vorherrschenden Bedingungen: Unterscheidung zwischen *normalen* Landunter-Situationen und Sturmfluten, Gewohnheit und gelassener Umgang bei Landunter, größere Sorge und Vorsicht bei Sturmfluten.
- Charakterisierung der Hallig-Bewohner\*innen: heterogen und dennoch gemeinsame Grundmerkmale wie Gelassenheit, Besonnenheit, Naturverbundenheit, Bodenständigkeit und Stolz sowie Unterscheidung zwischen Zugezogenen und Alteingesessenen (begründet mit unterschiedlichen Erfahrungswerten).
- Spezifische Wissens- und Erfahrungsbestände: implizites *Halligwissen*, verbunden mit Erfahrungen aus Natur- und Wetterbeobachtungen, sowie generationenübergreifende Traditionen, angepasst an die exponierte Lage.

Themenblock 2: Einschätzung der Entwicklungen und Wandlungsprozesse

- Entwicklungen auf den Halligen: Meeresspiegelanstieg, Veränderungen in der Häufigkeit und Intensität von Landunter und Sturmfluten, Wandlungsprozesse im Watt, in der Tierwelt und in der Vegetation.
- Weitere (zukünftige) Entwicklungen: unterschiedliche Antizipationen, keine konkreten zukünftigen Prognosen, demografischer Wandel und Sorge bezüglich der Umsetzung von Schutzmaßnahmen.
- Umgang mit Entwicklungen und Reaktionen: heterogene Umgangsweisen mit den klimatischen Entwicklungen, Gelassenheit und Ruhe-Bewahren, Sensibilisierung und Fokussierung auf (präventive) Schutzmaßnahmen, Differenzen in der Perspektive (Kurzfristigkeit vs. Langfristigkeit).
- Einlassen auf Wandlungsprozesse: heterogen/divers, Einbezug der Bewohner\*innen für Akzeptanz/Offenheit notwendig.
- Allgemeines und verändertes Bewusstsein: gestiegene Aufmerksamkeit, Bewusstseinsschärfung und Sensibilisierung im Kontext schwerer Stürme, wie Anatol (1999), Xaver und Christian (2013).

- Unterschiede zwischen den Generationen sowie zwischen Alteingesessenen und Zugezogenen bezüglich der Wahrnehmung, des Bewusstseins und des Umgangs mit Wandlungsprozessen, kein einheitliches Bild innerhalb dieser Differenzierungen.
- "Neues Denken" im Küstenschutz: Wandlungstendenzen in Form neuer Maßnahmen (wie Klimadeiche) und Initiativen, stärkerer Einbezug der Bewohner\*innen als positiver Aspekt, Langwierigkeit von Genehmigungsverfahren als Kritik.

Themenblock 3: Bewertung bisheriger Maßnahmen

• Bewertung der traditionellen Maßnahmen: Alle bisherigen Maßnahmen erfahren weiterhin einen hohen Stellenwert, vor allem Warften, geschlossene Deckwerke und Lahnungen:

Maßnahme/	Wichtig bis	Weniger wichtig bis	Keine Ein-
Wichtigkeit	sehr wichtig	nicht wichtig	schätzung
Warften	16 (100 %)	0	0
Deckwerke (geschlossene bzw.	16 (100 %)	0	0
Steindecke)			
Buschlahnungen	16 (100 %)	1	0
Holzlahnungen	16 (100 %)	1	0
Steinlahnungen	16 (100 %)	1	0
Buhne	15 (93,75 %)	1	1
Schleuse	15 (93,75 %)	1	0
Schotten	15 (93,75 %)	1	0
Stöpe	15 (93,75 %)	1	0
Deckwerke	14 (87,5 %)	0	2
(offene)			
Igel	14 (87,5 %)	3	0
Schutzraum	14 (87,5 %)	2	0
Ringdeiche	13 (81,25 %)	2	1
Damm	12 (75 %)	3	1
Sandsäcke	11 (68,75 %)	4	1
Bauweise der	10 (62,5 %)	5	1
Hallighäuser			
Sommerdeich	10 (62,5 %)	4	2
Elastocoast	6 (37,5 %)	9	1

Tabelle 8: Bewertung bisheriger Schutzmaßnahmen.

- Hoher bis sehr hoher Stellenwert der bisherigen, traditionellen Schutzmaßnahmen insgesamt.
- Veränderungs- und Optimierungsbedarf: diverse Vorschläge, vor allem Warften betreffend, aber auch bezüglich der Bauweise der Hallighäuser, der Genehmigungsverfahren und Arbeitsplätze im Küstenschutz sowie hinsichtlich eines intensivierten Einbezugs der Hallig-Bewohner\*innen.
- Zentrale Aspekte, die Schutzmaßnahmen auf den Halligen erfüllen sollten: mit Boden-, Wind-, Wasser- und Strömungsverhältnissen verträglich, zur gegenseitigen Ergänzung kombinierbar und kompatibel, generationsübergreifend nachhaltig, den demografischen Wandel/Personenkraft berücksichtigend, einfach technisch anwendbar.

Zentrale Aspekte/	Wichtig bis sehr wichtig	Weniger wichtig bis	
Wichtigkeit		nicht wichtig	
Verträglichkeit mit Boden-,	16 (100 %)	0	
Wind-, Wasser- und Strömungs-			
verhältnissen			
Kombination von Maßnahmen zur	16 (100 %)	0	
gegenseitigen Ergänzung			
Kompatibilität von Maßnahmen	16 (100 %)	0	
Generationenübergreifende Nachhal-	16 (100 %)	0	
tigkeit			
Personenkraft/	16 (100 %)	0	
Berücksichtigung des demografischen			
Wandels			
Einfache technische Anwendbar-	16 (100 %)	0	
keit/Anwendung			
Halligtypisches beibehalten	15 (93,75 %)	1	
Aktiver Einbezug/Partizipation	15 (93,75 %)	1	
Naturverträglichkeit/	14 (87,5 %)	2	
Vereinbarkeit von Küsten- und Natur-			
schutz			
Objektschutz im Fokus	13 (81,25 %)	3	
Material- und platzsparend	13 (81,25 %)	3	
Kostenaspekt	11 (68,75 %)	5	

Tabelle 9. Zentrale Asi	nekte die	e Schutzmaßnahmen	für die H	allioen er	füllen sol	lten
rabelle 7. Zentrale 115	perie, un	c Schutzmaimaimen	iui uic i i	amgen ei	runen son	ittii.

Themenblock 4: Bewertung zukünftiger und alternativer Maßnahmen

- Sinnvolle alternative Küstenschutzmaßnahmen: Bedeutung der Fortführung traditioneller Maßnahmen, Kompatibilität sowie Ergänzung von Maßnahmen, beispielsweise auch Wasserabfluss auf den Halligen oder den Erhalt des Wattgebiets aufgreifen.
- Präferierte alternative Maßnahmen: *HWS-mobil*, jedoch wurde die Erfüllung zentraler Aspekte generell bezweifelt (Verträglichkeit mit Boden-, Wind-, Wasser- und Strömungsverhältnissen, mangelnde Personenkraft, Anwendungsaufwand, Lagerprobleme, Haltbarkeitsschwierigkeiten, aufwendige Wartung).
- Keine Veränderungen der Lebenssituation auf den Halligen, da vorgeschlagene Maßnahmen so dauerhaft nicht umsetzbar seien; ansonsten erhöhte Sicherheit als positive Veränderung und zusätzliche Aufwände sowie Einschränkungen im Alltag als negative Auswirkungen.
- Stehenlassen von Seewasser und Böden-Produktivität: heterogenes Meinungsbild, Skepsis bezüglich des Sinns und der Zweckmäßigkeit, kritische Betrachtung vermuteter Einschränkungen sowie der Quantität/Qualität der Sedimentationsablagerungen nach einem gewöhnlichen Landunter (im Gegensatz zu denen nach einer Sturmflut).
- Grundlegende **Bedeutung des Hallig-Anwachsens** für die Bewohner\*innen, aber auch heterogenes Meinungsbild; Zweifel bezüglich eines hinreichenden Wachstums der Halligen durch Sedimentablagerungen, verbunden mit starken Einschränkungen in der alltäglichen Lebensführung.

- Bereitschaft zur Sedimentationserhöhung: heterogen/divers, keine allzu großen Einschränkungen in der alltäglichen Lebensführung/im Wirtschaften, Begründung der Sinnhaftigkeit und Transparenz notwendig, unter Einbezug der Bewohner\*innen.
- Mitnahme und Partizipation der Bewohner\*innen wird auch nochmals in den freien Anmerkungen der Expert\*innen unterstrichen.

Die Bedeutung eines Einbezugs der Bewohner\*innen ist in den qualitativen Interviews insgesamt deutlich geworden. Um eine partizipative Einbringung final zu ermöglichen, wurde als letztes Element im Mixed-Method-Ansatz das qualitative Instrument der Gruppendiskussion umgesetzt.

## 4.3.2 Gruppendiskussionen

Bei den Gruppendiskussionen auf der Hallig Hooge und der Hallig Langeneß haben die gesetzten *Grundreize* (siehe Kapitel 3.3.2) in Form zweier Vorträge aus der Geologie und dem Küsteningenieurwesen eine freie sowie ungezwungene Beteiligung der Bewohner\*innen angeregt. Zudem hat es sich als vorteilhaft für eine vertraute sowie offene Diskussion erwiesen, dass es sich bei den Teilnehmer\*innen um eine *Realgruppe* handelte und eine Übertragbarkeit auf weitere Prozesse gegeben ist, mit einem direkten Bezug zum eigenen Lebensraum.

Bei einer Betrachtung der Ergebnisse der Gruppendiskussionen auf der Hallig Hooge und der Hallig Langeneß offenbaren sich sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede. Bezüglich der vorgestellten Messungen und Ergebnisse zur Sedimentation zeigen die Bewohner\*innen von Langeneß ein besonderes Interesse, da die Untersuchungen direkt auf ihrer Hallig stattfanden und ihre Lebens- sowie Wirtschaftsgrundlage betreffen. Entsprechend konnte mit den präsentierten Inhalten eine Transparenz für die Bewohner\*innen zu Sedimentationsentwicklungen geschaffen werden. Auf Hooge zeigen sich hingegen bestehende offene Fragen: Insgesamt werden generell Maßnahmenvorschläge zur Erhöhung der Sedimentation auf Hooge sowie zum Erhalt der Sandbänke als wünschenswert erachtet. Auch die Frage, wie die Ergebnisse zur Sedimentation von der Hallig Langeneß auf Hooge übertragen werden können, ist in diesem Kontext zentral. Zudem wird eine intensivere Zusammenarbeit von Küsten- und Naturschutz gewünscht.

Zusammenfassend kann bezüglich der Hochwasserschutzsysteme auf den Halligen festgehalten werden, dass die Aspekte Verträglichkeit mit Boden-/ Wind-/ Wasser- und Strömungsverhältnissen, eine (zeitlich) einfache technische Anwendbarkeit/Anwendung, Personenkraft/Berücksichtigung des demografischen Wandels und Halligtypisches beibehalten/Landschaftsbild unter den zentralen Aspekten eine besonders wichtige Position einnehmen. Aber auch die Verwendung von einfachem Material, der Kostenfaktor und die Wartungsintensität bzw. Lagerung, so im Verlauf der Diskussionen deutlich geworden, nehmen eine herausragende Bedeutung ein, verbunden mit der Sorge um eine finanzielle Belastung und im Vergleich zu bestehenden Systemen, die weiterhin einen zentralen Stellenwert für die Bewohner\*innen haben (siehe auch Kapitel 4.3.1). Zudem wird als bedeutsam der Objektschutz und der Schutz der gesamten Warft hervorgehoben. Darüber hinaus zeigt sich eine Parallele zu den Ergebnissen aus ZukunftHallig dahingehend, dass individuelle Lösungen für die einzelnen Halligen bzw. Warften und Häuser als sinnvoll erachtet werden.

Bezüglich der vorgestellten Maßnahmen haben sich deutliche Unterschiede im Meinungsbild der Bewohner\*innen ergeben: Während die Diskussionsteilnehmer\*innen von Langeneß und Nordstrandischmoor generell allen vorgestellten Systemen ablehnend gegenüberstehen, erscheint das automatische System *Klappschott* für die Bewohner\*innen von Hooge am geeignetsten, aber auch *HWS-mobil* wird hier bezüglich einer Erfüllung zentraler Aspekte positiv gewertet. Allerdings kann – aus beiden Diskussionen hervorgehend – bezüglich *Klappschott* auch ein weiterer Handlungs- bzw. Testungsbedarf mit Blick auf die Faktoren Starkregen, Salzwasser und Seeluft identifiziert werden. Zudem zeigen sich Übereinstimmungen in der Kritik der Schutzsysteme, beispielsweise *Hydrobaffle* betreffend: Diese Maßnahme würde einen zu geringen Wasserdruck gewährleisten und sei mit den bestehenden Leitungsrohren sowie angesichts der vorherrschenden Maßnahmen in der Versuchshalle, beispielsweise ein Test der herkömmlichen Schotten oder Dammbalken als Einsatz in der Stöpe, für einen Vergleich als wünschenswert erachtet. In beiden Diskussionen wurden weiterführende, zu untersuchende Vorschläge getätigt, wie automatisch fungierende Stöpen, Gabionen für eine Sicherheitsgewährleistung, einsetzbare Wellenbremser oder eine Betonmauer als festinstalliertes System.

# 4.3.3 Fazit: Anforderungskatalog

Der auf den lokalen gesellschaftlichen und sozialen Kontext zugeschnittene Ansatz des Teilprojektes *Hallig-B* ermöglichte eine Berücksichtigung sozialer Aspekte (Bedürfnisse, Erwartungen, Anforderungen seitens der Bewohner\*innen) und deren Zusammenführung mit technischen Aspekten (technisch umsetzbare Maßnahmen) im Sinne einer ganzheitlichen *soziotechnischen* Perspektive.

Aus dem vorangegangenen Mixed-Method-Ansatz, bestehend aus qualitativen Interviews mit Bewohner\*innen und Zukunftswerkstätten (Ergebnisse aus *ZukunftHallig*), Expert\*innen-Interviews (Kapitel 4.3.1) und Gruppendiskussionen (Kapitel 4.3.2), werden im Folgenden zusammenfassend zum einen Maßnahmenvorschläge katalogisiert, die in den Erhebungen artikuliert wurden. Zum anderen wird final ein Anforderungskatalog formuliert, basierend auf den Bedürfnissen, Erwartungen und der Akzeptanz seitens der Hallig-Bewohner\*innen. Diese Anforderungen ermöglichen zum einen eine Orientierung bei der Testung und Implementierung von – auch zukünftigen – Schutzmaßnahmen. Zum anderen sind Transfermöglichkeiten aufgrund des Abstraktionsniveaus gegeben. Weiterhin ist der Anforderungskatalog nicht als abgeschlossen und endgültig zu betrachten, sondern es sind weitere Anschluss- und Ergänzungsmöglichkeiten gegeben. Die aufgeführten Aspekte stehen zudem nicht in einer klaren abstufenden Rangordnung zueinander.

Tabelle 10: Maßnahmen-Tableau, aggregiert aus ermittelten Vorschlägen des soziologischen Mixed-Method-Ansatzes.

Generelle Bedeutung	
Traditionelle, bestehende Maß-	vor allem die folgenden: Warften, Deckwerke, Lah-
nahmen ausbauen/optimieren	nungen, Buhnen, Schleusen, Schotten, Stöpen, Igel,
	Schutzräume, Ringdeiche, Sandsäcke (Ergebnis aus
	Bewohner*innen- und Expert*innen-Interviews)

Ideen aus Zukunftswerkstätten seitens der Bewohner*innen und deren Beurteilung			
(Ergebnis aus ZukunftHallig)			
Um die gesamte Warft verlaufen-	wirksam und technisch machbar		
der Ringdeich			
Raupflasterung der Warften	wirksam und technisch machbar		
Mobiler Deichschlauch	wirksam und technisch machbar		
Abflachung der Warft/	wirksam und technisch machbar		
Ringdeich auf der Warftkrone			
Einrichtung geeigneter Schutz-	wirksam und technisch machbar		
räume			
Aufwarftung	wirksam und technisch machbar		
Verbindung und Bepflanzung der	keine Wirksamkeit auf den Wellenüberlauf		
Außensände			
Hydraulische Hochwasserschutz-	hoher Bauaufwand/gering einzustufende		
wand	Betriebssicherheit		
Hydraulische Warft	nicht wirksam und nicht technisch machbar, u. a. ho-		
	her Bauaufwand, Veränderung des Landschaftsbildes		
	und Inkompatibilität mit dem Naturschutz		
Eindeichung des Wattenmeers	nicht wirksam und nicht technisch machbar, u. a. ho-		
	her Bauaufwand, Veränderung des Landschaftsbildes		
	und Inkompatibilität mit dem Naturschutz		

Weitere Vorschläge aus Expert*innen-Interviews					
Glaswandschutz um die Warften	individueller Schutz der Warften, vergleichbar beim				
	Klimadeich auf Nordstrand				
Neue/zusätzliche Warften	Schaffung neuen Lebens- und Wohnraumes sowie				
	weiterer Infrastruktur				
Schacht in Warftkrone mit veran-	hier würden unterhalb Rohre herausführen zur Was-				
kertem Plastikblock	serableitung; abfließendes Wasser füllt Schacht, drängt				
	Plastikblock nach oben und führt zu einer Warfterhö-				
	hung				
Anlegung verteilter Siele	Verbesserung des Wasserabflusses auf den Halligen				
	mittels der Anlegung kleiner, verteilter Siele für ein				
	schnelles und strukturiertes Hinauslaufen des Wassers				
Schaffung kleiner Löcher als Se-	Ziel: bessere Ablagerung von Sedimenten				
dimentsammler					
Lahnungen im Watt als Schlick-	Ziel: Abnahme des Wattgebiets entgegenwirken und				
fänger	Ablagerung von Sinkstoffen vor den Halligen errei-				
	chen/Anwachsen der Halligen				

Zusätzliche Vorschläge von den Bewohner*innen (aus Gruppendiskussionen)			
Automatische Stöpe	Vorschlag aus Gruppendiskussion Hooge		
Gabionen	Vorschlag aus Gruppendiskussion Hooge		
Wellenbremser	Vorschlag aus Gruppendiskussion Hooge		
Hochleistungspumpe	Vorschlag aus Gruppendiskussion Hooge		
Betonwand/-mauer	Vorschlag aus Gruppendiskussion Langeneß		

Wertung der getesteten mobilen HWS-Maßnahmen seitens der Bewohner*innen			
Klappschott	präferiertes System in der Gruppendiskussion auf Hallig		
	Hooge, abgelehnt in der Gruppendiskussion auf Langeneß		
HWS-mobil	positive Wertung in der Gruppendiskussion auf Hallig Hooge,		
	abgelehnt in der Gruppendiskussion auf Langeneß		
Aquawand	negative Wertungen in der Gruppendiskussion auf Hallig		
	Hooge und Hallig Langeneß		
Hydrobaffle	negative Wertungen in der Gruppendiskussion auf Hallig		
	Hooge und Hallig Langeneß		

Tabelle 11: Anforderungskatalog zu Hochwasserschutzmaßnahmen auf den Halligen.

Zentrale Aspekte	Erläuterungen
Partizipation	Maßnahmen spiegeln bestehende, artikulierte Bedürfnisse und Erwartungen wieder
Umgebungsverträglichkeit	Berücksichtigung der regionalen/spezifischen Boden-/Wind-/
	Wasser- und Strömungsverhältnisse
Personenkraft	Vorhandene Personenkraft vor Ort und demografischen Wan-
	del bzw. eine älter werdende Bevölkerung berücksichtigen
einfache Anwendung	einfacher Auf- und Abbau von Maßnahmen, geringer Zeitauf- wand
Kostenaspekt	wand Berücksichtigung finanzieller Belastungen sowie vorhandener
Rostenaspert	Einkommens-/Vermögensverhältnisse
Kombination	Einsatz von Maßnahmen zur gegenseitigen Ergänzung
Kompatibilität	Kompatibilität/Vereinbarkeit mit weiteren (bestehenden)
	Maßnahmen, beispielsweise auch mit notwendigen Vorkeh-
	rungen bei Landunter-/Sturmflutereignissen
Materialaspekt	Verwendung von einfachem Material (auch mit Blick auf be-
	reits Verwendetes bei bestehenden Maßnahmen/Kostenfaktor)
Nachhaltigkeit	langfristige und generationenübergreifende Perspektive
Landschaftsbild	geringfügige Veränderungen des bestehenden Landschaftsbil-
	des, beispielsweise Halligtypisches (markante Charakteristiken)
	beibehalten
Naturverträglichkeit	Vereinbarkeiten von Natur- und Küstenschutz
Objektschutz	im Fokus des Schutzes stehen einzelne Objekte, wie Häuser
Flächenschutz	weitreichender Schutz, wie der gesamten Warft
Individualität bzw.	Berücksichtigung individueller/heterogener Gegebenheiten
Heterogenität	und Bedürfnisse/Präferenzen (auch zur Gewährleistung einer
	adäquaten Anwendung, Pflege und Lagerung)
Lagerung	material- und platzsparend, wenig Aufwand sowie Haltbarkeit
	gewährleisten
Wartung	geringer Wartungs- und Pflegeaufwand sowie Gewährleistung
	dessen; zentraler Aspekt aus wasserbaulicher Sicht (IWW)
Hydrodynamische	zentraler Aspekt aus wasserbaulicher Sicht (IWW)
Wirksamkeit	
Betriebssicherheit	zentraler Aspekt aus wasserbaulicher Sicht (IWW)
Bereitstellungszeit	zentraler Aspekt aus wasserbaulicher Sicht (IWW)

An dieses Maßnahmen- und Anforderungstableau können zukünftige Forschungsvorhaben anknüpfen und gegebenenfalls eine praktische Umsetzung erfahren. Das Erfahrungswissen

der Hallig-Bewohner\*innen hinsichtlich ihrer speziellen, ökonomischen und landuntergefährdeten Lage wird in der längerfristigen, wechselseitigen Praxis im Umgang mit Materialien – wie Schutzmaßnahmen – und konkreten Situationen gewonnen. Um eine Bezugnahme neuer potenzieller Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien auf die bereits etablierten, weitergegebenen sowie beherrschten Kompetenzen zu gewährleisten, erscheint es sinnvoll, die Bewohner\*innen – bzw. allgemein direkt Betroffene – als *erfahrene Praktiker\*innen* im Umgang mit Sturmflut- und Landunterrisiken zu betrachten und diese partizipativ einzubeziehen.

## 5 Fazit und Ausblick

Die Landesregierung Schleswig-Holsteins hat im Jahr 2016 zum langfristigen Schutz und Erhalt der nordfriesischen Halligen ein Programm zur Verstärkung und Entwicklung der Warften beschlossen (MELUND SH, 2016). Dabei wird für die Anpassung der 32 bewohnten Warften über einen Zeitraum von bis zu 25–30 Jahren mit jährlichen Kosten von etwa 1 Mio. € gerechnet. Da für die geplanten Warftverstärkungsmaßnahmen Priorisierungen vorgenommen werden müssen, ergeben sich bei einigen Warften längere Zeiträume bis zur Warftverstärkung, die es durch kurzfristig umsetzbare Hochwasserschutzmaßnahmen zu überbrücken gilt.

Vor diesem Hintergrund fand die Suche nach möglichen kurzfristigen Schutzmaßnahmen statt. Hierzu erfolgte die Bewertung fünf verschiedener mobiler HWS-Systeme hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf den Halligwarften. Bei der Beurteilung der mobilen Maßnahmen sind neben Funktionalität, Betriebssicherheit und hydrodynamischer Wirksamkeit auch die Anwendbarkeit (Platzbedarf, Bereitstellungszeit, Akzeptanz seitens der Bewohner\*innen) sowie der Einfluss auf das Landschaftsbild berücksichtigt worden.

Die Untersuchungen zeigen, dass sich die betrachteten mobilen HWS-Systeme prinzipiell zur Ergänzung des Hochwasserschutzes auf den Warften eignen. Betrachtet wurde jeweils der Einsatz zum Verschließen der Stöpen im Ringdeich und damit einer temporären Freiborderhöhung und der Einsatz zum Objektschutz. Bei Verwendung in den Stöpen des Ringdeichs dienen die Maßnahmen vor allem zur Abwehr kleinerer Hochwässer. Während extremer Ereignisse kann ein Verschließen der Stöpen ohne begleitende Warftverstärkungsmaßnahmen negative Folgen haben, dies ist jedoch für jede Warft einzeln zu betrachten. Im Objektschutz bieten die Maßnahmen auch bei Extremereignissen und ausbleibender Warftverstärkung eine Erhöhung der Schutzwirkung.

Unterschiede zwischen den verschiedenen HWS-Systemen zeigten sich hinsichtlich des Bau-, Wartungs- und Zeitaufwands, aber auch in der Betriebssicherheit. Die neuartigen Systeme können durch höhere Materialbeständigkeit, einfacheren (teilweise automatischen) Aufbau sowie geringeren Platzbedarf Vorteile gegenüber herkömmlichen Systemen bieten und so Problemen im Zuge des demographischen Wandels und der abnehmenden Personenzahl je Warft begegnen.

Untersuchungen zur Akzeptanz der neuartigen HWS-Systeme seitens der Bewohner\*innen fielen heterogen aus: Während prinzipiell die Forderung nach möglichst einfach aufzubauenden Systemen besteht (insbesondere die vollautomatische Maßnahme erscheint reizvoll), gibt es Bedenken hinsichtlich der Beständigkeit unter küstenspezifischer Witterung und des Risikos infolge eines technischen Ausfalls. Ferner werden erhöhte Kosten im Vergleich zu traditionellen Systemen befürchtet und es wurden weitere vergleichende Tests herkömmlicher, vermeintlich günstigerer Systeme vorgeschlagen (Schotten und Dammbalken aus Holz).

Für weiterführende Untersuchungen werden Probeeinsätze der mobilen HWS-Systeme auf den Halligen empfohlen, die die durchgeführten Labortests sinnvoll ergänzen. Diese können zum einen die Akzeptanz neuartiger Maßnahmen erhöhen, des Weiteren können so Randbedingungen, die in den hydraulischen Modellversuchen in der Versuchshalle nicht abgebildet werden konnten, Berücksichtigung finden. Hierzu zählt unter anderem der Einfluss von Salzwasser und Seeluft sowie der Aufbau der Maßnahmen unter Sturmbedingungen.

# 6 Danksagung

Das Vorhaben wurde als Teil des Verbundprojekts *LivingCoastLab Halligen* vom 01. Oktober 2016 bis zum 30. September 2019 mit Mitteln des *Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)* im Rahmen des Förderschwerpunkts *Küstenmeerforschung in Nord- und Ostsee (KüNO)* gefördert (BMBF-Förderkennzeichen: 03F0759B).

Die Autor\*innen danken für die Betreuung durch den Projektträger Jülich sowie dem BMBF für die Förderung und Ermöglichung des Projekts. Weiterer Dank gilt allen Projektpartner\*innen und dem Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH) für die gute Zusammenarbeit. Ferner wird den Firmen Aquaburg Hochwasserschutz GmbH, Hochwasserschutz Agentur und HOWATEC GmbH für die kostenlose Bereitstellung der getesteten, mobilen Hochwasserschutzsysteme gedankt.

#### 7 Literaturverzeichnis

Abels, G.; Bora, A.: Demokratische Technikbewertung. transcript-Verlag, Bielefeld, 2004.

BWK: Merkblatt BWK-M 6: Mobile Hochwasserschutzsysteme – Grundlagen für Planung und Einsatz. Sindelfingen: Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK) e.V., Sindelfingen, 2005.

Europaverband Hochwasserschutz e.V.: Herstellung, Lieferung und Erstmontage von technischen Hochwasserschutzprodukten – Durchführungsbestimmungen für Systemprüfungen. In: Güte- und Prüfbestimmungen zur Erlangung und Verleihung der Gütezeichen Technischer Hochwasserschutz, VR-Nr. 20890, Europaverband Hochwasserschutz e.V., 2014.

EurOtop: Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. Van der Meer, J. W., Allsop, N. W. H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P.; Zanuttigh, B., 2016. Online verfügbar: www.overtopping-manual.com.

FM Approvals: American National Standard for Flood Abatement Equipment. ANSI/FM Approvals 2510, Approved American National Standard, 2014.

Haug, S.; Weber, K.; Vernim, M.: Soziale und planerische Aspekte der energetischen Gebäudemodernisierung. Partizipative Planung, Zielkonflikte und Akzeptanz; In: Grossmann, K.; Schaffrin, A.; Smigiel, C. (Hg.): Energie und soziale Ungleichheit. Zur gesellschaftlichen Dimension der Energiewende in Deutschland und Europa. Springer VS-Verlag, Wiesbaden, 579-608, 2017.

Häußling, R.; Ziesen, N.; Dorgeist, M.; Kaip, E.: Eine partizipative und interdisziplinäre Gestaltung von Küstenschutzmaßnahmen auf den Halligen. In: Die Küste, 84, 45–65, https://hdl.handle.net/20.500.11970/105212, 2016.

Jensen, J.; Arns, A.; Schüttrumpf, H.; Wöffler, T.; Häußling, R.; Ziesen, N.; Jensen, F.; von Eynatten, H.; Schindler, M.; Karius, V.: ZukunftHallig – Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen unter Berücksichtigung des Klimawandels. In: Die Küste, 84, 3–8, https://hdl.handle.net/20.500.11970/105210, 2016.

Kuckartz, U.: Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung. Beltz-Verlag, Weinheim/Basel, 2012.

Kutscher, N.: Moralische Begründungsstrukturen professionellen Handelns in der Sozialen Arbeit. Eine empirische Untersuchung zu normativen Deutungs- und Orientierungsmustern in der Jugendhilfe. Bielefeld University, Bielefeld, 2002.

Lamnek, S.: Gruppendiskussion. Theorie und Praxis. 2. Auflage. Beltz-Verlag, Weinheim/Basel/Stuttgart, 2005.

Lamnek, S.: Qualitative Sozialforschung. Band 2: Methoden und Techniken. 3. Auflage. Psychologie Verlags Union, Weinheim, 1995.

Mäder, S.: Die Gruppendiskussion als Evaluationsmethode – Entwicklungsgeschichte, Potenziale und Formen; In: Zeitschrift für Evaluation, 12 (1), 23–51, 2013.

MELUND SH (Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung): Sichere Zukunft für die Halligen: Landesregierung beschließt Programm zur Verstärkung der Warften. Pressemitteilung vom 02.02.2016, Kiel. Stand 31.03.2020: www.schleswig-holstein.de/DE/Landesregierung/V/Presse/PI/2016/0216/MELUR\_ 160202\_Halligen\_Wattverstaerkungen.html

Meuser, M.; Nagel, U.: ExpertInneninterviews – vielfach erprobt, wenig bedacht. Ein Beitrag zur qualitativen Methodendiskussion; In: Bogner, A.; Littig, B.; Menz, W. (Hg.): Das Experteninterview. Theorie, Methode, Anwendung. 2. Auflage. VS-Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 71–93, 2005.

Meuser, M.: Gleichstellung auf dem Prüfstand: Frauenförderung in der Verwaltungspraxis. Centaurus, Pfaffenweiler, 1989.

Mruck, K.; Mey, G.: Qualitative Forschung: zur Einführung in einen prosperierenden Wissenschaftszweig; In: Historical Social Research, 30(1), 5–27, 2005.

Schmidt, J. C.: Die Gestaltungskette der Technikentwicklung. Ein Beitrag zu möglichen Angriffspunkten einer politischen Gestaltung von Technik. In: Mensch, K.; Schmidt, J. C. (Hg.): Technik und Demokratie. Zwischen Expertokratie, Parlament und Bürgerbeteiligung. Leske+Budrich, Opladen, 131–156, 2003.

Wagenhuber, W.: Zertifizierung von Katastrophenschutz Systemen – Warum die Zertifizierung von mobilen Hochwasserschutz-Systemen notwendig ist. In: Mobil oder Nicht-Mobil? Konventioneller und innovativer Hochwasserschutz in Praxis und Forschung. 46. Internationales Wasserbausymposium Aachen (IWASA), 7./8. Januar 2016. Shaker-Verlag, Aachen, 2016.

Weyer, J.: Partizipative Technikgestaltung. Perspektiven einer neuen Forschungs- und Technologiepolitik; In: Weyer, J.; Kirchner, U.; Riedl, L.; Schmidt, J. F. (Hg.): Technik, die Gesellschaft schafft: Soziale Netzwerke als Orte der Technikgenese. Edition Sigma, Berlin, 329–346, 1997.

Wöffler, T.: Optimierung des Küsten- und Hochwasserschutzes auf den Halligen. Dissertation, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen University, 2017. Online vefügbar: http://publications.rwth-aachen.de/record/689764/files/689764.pdf.

Wöffler, T.; Schüttrumpf, H.: Risikoanalysen und Entwicklung neuer Küstenschutzkonzepte für die Halligen. In: Die Küste, 84, 67–93, https://hdl.handle.net/20.500.11970/ 105213, 2016.

Wöffler, T.; Schüttrumpf, H.: Ein Sicherheitskriterium für Halligwarften. In: Porth, M.; Schüttrumpf, H. (Hg.): Wasser, Energie und Umwelt, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 467–475, 2017.

# Messung, Bewertung und Einflussfaktoren der Trübung in der Wassersäule – Schlussfolgerungen für einen die Sedimentakkumulation optimierenden Küstenschutz auf Hallig Langeneß

#### Ingo Hache<sup>1</sup>, Volker Karius<sup>2</sup> und Hilmar von Eynatten<sup>2</sup>

- <sup>1</sup> Georg August Universität Göttingen; Geowissenschaftliches Zentrum, Abteilung Sedimentologie und Umweltgeologie, ingo.hache@uni-goettingen.de
- <sup>2</sup> Georg August Universität Göttingen; Geowissenschaftliches Zentrum, Abteilung Sedimentologie und Umweltgeologie

# Zusammenfassung

Auf Hallig Langeneß wurde ein Trübemessnetzwerk errichtet, welches aus sechs Stationen im Watt und zwei Stationen auf der Hallig von Februar 2017 bis März 2020 insbesondere in den Wintermonaten kontinuierlich Trübedaten geliefert hat. Ausgehend von den meteorologischen Parametern, wie Windrichtung und Windgeschwindigkeit, konnten die zeitliche und räumliche Variabilität des SPM (suspended particulate matter) um die Hallig bestimmt werden.

Es wurden bis zu elf "Land unter" im Zeitraum von Dezember 2017 bis Februar 2020 einzeln erfasst und die Sedimentakkumulation auf der Hallig zeitgleich bestimmt. Mit Sedimentfallen konnten Sedimentakkumulationsraten hinter unterschiedlich hohen Halligrauhstreifen ("Igel") gemessen werden. Im Ergebnis konnten SPM-Gehalte vor der Halligkante gemessen werden, die zwar potentiell zur Sedimentakkumulation auf der Hallig beitragen könnten, aber – bedingt durch die jeweiligen Küstenschutzmaßnahmen – nur teilweise ausgeschöpft werden.

Der Einfluss der Halligrauhstreifen konnte durch Messung einerseits und Sedimenttransportmodellierung anderseits quantifiziert werden. Eine Anpassung der Küstenschutzbauwerke im Süden der Hallig hat das Potential, die Sedimentakkumulation auf der Hallig zu verdoppeln.

# Schlagwörter

Trübemessung, SPM, Sedimentakkumulation, Sedimenttransportmodellierung, Deckwerk, Halligen

# Summary

An autonomously operating network for turbidity measurements was developed and installed on Hallig Langeneß. Six units were placed on the tidal flats in front of the Hallig and additional two units were installed on the Hallig. Data were generated from February 2017 until March 2020. The spatial and temporal variability of the turbidity was assessed under consideration of meteorological and hydrodynamic

parameters. Up to eleven inundation events were recorded between December 2017 and February 2020 and for each event the sediment accumulation was measured with sediment traps on the Hallig. The influence of the coastal revetments, especially the height of the revetments, could be quantified by sediment trapping and sediment transport modelling. The suspended particulate matter which is available outside of the Hallig is only partially transported onto the Hallig during an inundation. An adjustment of the coastal revetments in the south of Langeneß may potentially increase the sediment accumulation by a factor of two.

# Keywords

turbidity measurement, suspended particulate matter, SPM, sediment transport modelling, revetment, Halligen

# 1 Einleitung

Die nordfriesischen Halligen (Abbildung 1) sind Teil eines weltweit einzigartigen Okosystems. Menschen, Tiere und Pflanzen bilden dort eine über mehrere Jahrhunderte gewachsene Einheit, die mitten im National Park Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer liegt. Seit 2009 gehört das Wattenmeeer zum UNESCO Weltnaturerbe und die Halligen zur Entwicklungszone des UNESCO Biosphärengebietes Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer und Halligen. Der beschriebene Status dieser Region rechtfertigt vielfältige Forschungsaktivitäten, die auf den Erhalt des Gebietes zielen, die aber auch grundlegende Erkenntnisse zu dem Verhalten von unbedeichten Küstenvorländern im Kontext von sich ändernden Wasserständen liefern. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den Höhenänderungen der Landoberfläche, die durch die Ablagerung von Sedimenten hervorgerufen werden. Zumeist in den Wintermonaten kommt es auf den größeren Halligen bis zu 15-mal zu "Land unter" genannten Überflutungen (Schindler und Willim 2015). In den Projekten SAHall (Deicke et al. 2009) und ZukunftHallig (Schindler 2014, Schindler et al. 2014b, Schindler et al. 2014a) konnten die Sedimentakkumulation und die sedimentationsbedingten Höhenänderungen (Aufwuchsraten) für ausgewählte Halligen quantifiziert werden. Die Aufwuchsraten betragen demnach 1 bis 3 mm/Jahr und können somit den Anstieg des regionalen mittleren Tidehochwassers (MTHW) derzeit nicht kompensieren. Es ist möglich, dass bei weiter steigendem globalem Meeresspiegel die Wasserstände bei Extremereignissen im Wattenmeer sogar überproportional ansteigen werden (Arns et al. 2015a). Deshalb stellt sich die Frage, wie die Halligen mittelfristig gegenüber dieser Gefahrenlage abgesichert werden sollen. Während eines "Land unters" wird das Überleben von Mensch und Vieh durch die Warften (auf Langeneß Warfen) sichergestellt. Dies sind Wohnhügel, deren Oberfläche ca. 3,5 m über MTHW liegt. Die notwendige Höhe der Warften hängt nicht nur von den Extremwasserständen ab, sondern auch vom Wellenauflauf während eines Sturmes. Der Wellenauflauf hängt dabei wiederum auch von dem Wasserstand auf der Hallig über der Geländeoberkante (GOK) ab. Insofern trägt ein Sedimentaufwuchs zu einer verbesserten Sicherheit für Mensch und Vieh auf den Halligen bei. Vier grundsätzlich unterschiedliche Strategien zur Sicherung des Habitats Hallig erscheinen denkbar:

• Erhöhung der Küstenschutzbauten bzw. Bau von Deichen (Minimierung des Überflutungsrisikos)

- Erniedrigung der Küstenschutzbauten (Erhöhung der Anzahl von "Land untern" und damit der Sedimentation)
- Künstliche Erhöhung der Halligoberfläche durch Aufspülung von Sediment
- Steigerung des Sedimenttransportes auf die Hallig während eines "Land unters", ohne die Anzahl von "Land untern" nennenswert zu erhöhen.



Abbildung 1: Karte des Arbeitsgebietes. Die Halligen sind in grün dargestellt. Die Arbeiten fanden ausschließlich auf Hallig Langeneß (gestrichelt) statt (nach Hache et al. 2021).

Die im Rahmen des vom BMBF geförderten Forschungsprojekts "Living Coast Lab" vom Geowissenschaftlichen Zentrum, Göttingen, Abteilung Sedimentologie/Umweltgeologie auf der Hallig Langeneß durchgeführten Arbeiten dienen dazu, festzustellen, ob es ein ungenutztes Potential von Sedimenten gibt, die während eines "Land unters" auf die Hallig transportiert werden könnten und damit zur Erhöhung der Halligoberfläche gegenüber dem Meeresspiegel beitrügen. Als Arbeitshypothese wird angenommen, dass dieses Potential wegen der aktuellen Strategien zum Küstenschutz und der momentanen Wasserhaltung auf der Hallig nicht voll ausgeschöpft werden kann, weil die Trübstoffe nicht vollständig auf die Hallig gelangen oder dort nicht abgelagert bzw. wieder erodiert werden. Im Einzelnen sollen folgende Fragen beantwortet werden:

• Wie lassen sich Trübedaten um Langeneß mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung erfassen, um durch geeignete Kalibration Feststoffgehalte (SPM) zu bestimmen?

- Wie werden SPM-Gehalte durch meteorologische und hydrodynamische Bedingungen beeinflusst?
- Wie korreliert SPM mit der Sedimentakkumulation auf der Hallig?
- Welchen Einfluss nehmen die Küstenschutzbauwerke auf die Sedimentakkumulation?
- Welche Maßnahmen können die Sedimentakkumulation auf der Hallig erhöhen?

## 2 Material und Methoden

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurde im Winter 2016/2017 ein Trübemesssystem entwickelt und um und auf Langeneß aufgebaut. In der Folge wurden schwerpunktmäßig in den Wintermonaten kontinuierliche Trübemessungen durchgeführt. Durch Sedimentsammler wurden bei "Land unter"-Bedingungen Sedimente in situ gewonnen, die zur Kalibration der Trübemessdaten verwendet wurden. Zeitgleich wurde mit Sedimentfallen an ausgewählten Punkten der Hallig die Sedimentakkumulation erfasst. Dabei wurden "Land unter"-Ereignisse jeweils separat beprobt. Mit einem numerischen Detailmodell wurden schließlich verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Änderungen an den bestehenden Küstenschutzbauwerken und deren Einfluss auf die potentielle Sedimentakkumulation simuliert.

#### 2.1 Trübemesssystem

Das Messsystem besteht aus 6 autonom arbeitenden Messeinheiten, die im Watt innerhalb der Buhnenfelder, die Langeneß umgeben, installiert sind. Auf der Hallig befinden sich zwei weitere Messstationen, die während eines "Land unters" Daten von dem Überflutungswasser liefern. Alle Stationen messen im Minutenabstand je einen Wert, und zwar in der Phase, in der sich der Messsensor vollständig unter Wasser befindet. Dies wird durch einen Wasserstandssensor gewährleistet. Sobald der Wasserstand unter das Niveau des Trübemesssensors gesunken ist, endet der jeweilige Messzyklus und die Daten werden per Funk (ISM Band, 869 MHz) zu einer Zentralstation in der Halligmitte übertragen. Abbildung 2 zeigt exemplarisch eine Messstation.

Der Trübesensor ist ein OBS-3+ (campbell© scientific) und arbeitet nach dem IR-Rückstreu-Prinzip (Optical Back Scatter). Die Daten werden bis zur Funkübertragung im Datenlogger CR200X (campbell© scientific) gespeichert, der sich zusammen mit der Funkeinrichtung im Elektronikgehäuse befindet. Die Reinigungseinheit wischt zweimal zu Beginn des Messzyklus über den OBS-Sensor, um anhaftenden Schmutz zu entfernen. Von der Zentralstation werden die Daten über ein GSM-Modul an einen Server übertragen, von dem sie in Echtzeit abrufbar sind. Eine weitergehende Beschreibung geben Hache et al. (2019).

Eine Übersicht über die Lage aller Stationen und sonstigen Messeinrichtungen ist in Abbildung 3 dargestellt.



Abbildung 2: Messeinheit, bestehend aus Pfahl (1), Schutzkäfig mit Sensoreinheit (2), Elektronikeinheit (3), OBS3+ Trübesensor (4), Wischereinheit (5), Wasserstandssensor (6) und Sedimentsammler (7). Die Ziffern 8-11 bezeichnen Höhenmarken, die gegen NHN nivelliert wurden (nach Hache et al. 2019).



Abbildung 3: Digitales Höhenmodell von Langeneß mit Standorten von Pegeln, Sedimentfallen und Trübemessstationen (nach Hache et al. 2020).

Da die Zeiten der Wasserüberdeckung der Sensoren standortabhängig erheblich voneinander abweichen, sind die Gesamtmesszeiten der einzelnen Stationen sehr unterschiedlich (Tabelle 1). Die Wattflächen liegen im Norden der Hallig um bis zu zwei Meter höher als im Süden, was sich in den deutlich geringeren Messzeiten der Stationen T-5 und T-6 widerspiegelt. Die Station T-4 liegt direkt an einem Ausläufer des südlich an der Hallig vorbeilaufenden Prieles Süderaue (Abbildung 3) und weist daher die längste Messdauer auf. Die Anzahl der erfassten "Land unter" variiert geringfügig zwischen den Stationen T-1 bis T-6, was an gelegentlichen Ausfällen aufgrund von Wartung zu erklären ist. Auf der Hallig erfassen die Stationen T-7 und T-8 nur die "Land unter", deren Wasserstand ausreicht, um den OBS-Sensor zu bedecken. Es wurden daher insgesamt elf "Land unter" vollständig erfasst.

Station	Messzeit [Tage]	Anzahl "Land unter"
T-1	253	16
T-2	304	13
Т-3	305	15
T-4	392	15
T-5	90	17
T-6	74	17
T-7	2	13
T-8	2	11

Tabelle 1: Messzeiten und Anzahl der erfassten "Land unter" pro Messstation.

#### 2.2 Kalibration der Trübesensoren

OBS-Sensoren müssen für eine möglichst präzise Messung von SPM-Werten regelmäßig mit dem in situ vorhandenen Material kalibriert werden (Sternberg et al. 1986, Downing und Beach 1989, Kineke und Sternberg 1992), da die gemessenen Trüberohdaten stark von der Korngröße der rückstreuenden Partikel abhängen (Down und Lehr 2005, Downing 2006). Dabei reicht es nicht aus, abgelagertes Sediment vor Ort zu beproben, da dieses teilweise um bis zu 5-mal gröber ist als das unter Messbedingungen suspendierte Material (Poerbandono und Mayerle 2005). Eigene Messungen konnten dies bestätigen.

Für eine regelmäßige Kalibration der Trübesensoren werden Sedimente benötigt, die den vor Ort in der Wassersäule vorhandenen Partikeln entsprechen. Diese Sedimente wurden in mehreren Sedimentsammlern aufgefangen, die in Höhe des OBS-Sensors an jeder Messstation angebracht wurden (Abbildung 2 und Abbildung 4). Die Sedimentsammler wurden nach dem Design IM+P (Ingenieur Büro Dr.-Ing. Manzenrieder und Partner GbR, http://www.imp-ol.de) in der Werkstatt des GZG gefertigt.

Zusätzlich zu den Sedimentsammlern in Höhe der OBS-Sensoren (Bottom) wurde jeweils ein Sammler am oberen Ende des Messpfahls befestigt (Top) um die Homogenität der Wassersäule bezüglich der Korngröße suspendierter Partikel zu untersuchen.

Die Sedimentsammler haben eine Kapazität von 350 cm<sup>3</sup>. Durch sechs kreisförmig angeordnete 8-mm-Einlassöffnungen im nach oben abgeschlossenen Sammler werden Partikel eingesammelt und sedimentieren im Sammler. Das Aspektverhältnis der zylindrischen Sammler beträgt 3:6 und erfüllt damit die Empfehlungen von Gardner (1980a, 1980b) um Resuspendierung weitestgehend zu vermeiden. Unter normalen Wetterbedingungen konnten die Sammler ca. einen Monat betrieben werden, bis sie geleert werden mussten. Während Sturmflutbedingungen waren die Sammler innerhalb weniger Stunden bis Tage gefüllt. Um die Sensoren mit den entsprechenden Sedimenten kalibrieren zu können, wurden die Sammler jeweils vor und nach jedem "Land unter" beprobt. Die eigentliche Kalibration der individuellen Sensoren wurde unter Laborbedingungen in einem zylindrischen Tank durchgeführt, in dem eine Suspension kontinuierlich umgewälzt wurde und der definierte Aliquote des zu kalibrierenden Sedimentes hinzugefügt wurde (Hache et al. 2019). Dieser Vorgang wurde für nahezu jedes beprobte "Land unter" wiederholt. Die ermittelten Kalibrationsgeraden sind exemplarisch in Abbildung 5 dargestellt.



Abbildung 4: Sedimentsammler nach Manzenrieder & Partner (nach Hache et al. 2019). A: Skizze des Sammlers mit innerem Prallrohr (gestrichelt), B: geschlossener Sammler, C: geöffneter Sammler.



Abbildung 5: Kalibrationsergebnis für sechs Messstationen. Die Geraden decken den maximal vorkommenden SPM-Bereich ab (nach Hache et al. 2019).

# 2.3 Sedimentfallen

In den Wintermonaten wurde die Sedimentakkumulation in ausgewählten Bereichen der Hallig im räumlichen Bezug zu den Trübemessstellen mit Sedimentfallen bestimmt. Dazu wurden 14 Fallenfelder mit jeweils fünf 1L-LDPE-Flaschen sowie fünf Kunstrasenmatten angelegt (Abbildung 6). Eine ausführliche Beschreibung der Methode geben Schindler et al. (2014b). Die Fallenfelder wurden ca. 10 bis 500 m von der Halligkante entfernt installiert, in der Regel zwischen Halligrauhstreifen (Igel) und Sommerdeich (Abbildung 3), zusätzlich zwei Fallenfelder an den Trübemessstationen T-7 und T-8 und zwei Cluster jeweils im östlichen und westlichen Teil von Langeneß, welche schon im Projekt Zukunft Hallig betrieben wurden und repräsentativ für die durchschnittliche Sedimentakkumulation in diesem Bereich (Alt-Langeneß) sind (Schindler 2014).

In Bereichen, wo unterschiedlich hohe Igel aufeinandertreffen, wurden zwei Felder jeweils hinter dem höheren und dem niedrigeren Igel angelegt. Die Flaschen wurden unmittelbar vor einem "Land unter" geleert und unmittelbar nach dem "Land unter" beprobt. Die Matten wurden jeweils nach Ablauf einer Sturmflut-Saison (Oktober bis April) beprobt. Im Labor wurden die Sedimente entsalzt, getrocknet, gewogen, der Glühverlust bestimmt und die Partikelgrößen analysiert. Die Korngrößenanalytik wurde mit einem Laser Particle Sizer (LS 13320 Fa. Beckman & Coulter) durchgeführt. Dabei wurde ein Messbereich von 0,4 bis 2000 mm gemessen und die Beugungsdaten mit dem Fraunhofer-Modell in Kornverteilungen umgerechnet. Weitere Informationen zu den angewendeten Methoden geben Schindler et al. (2014b) und Hache et al. (2020).



Abbildung 6: Sedimentfallenfeld mit 1L-LDPE-Flasche und Kunstrasenmatte (nach Hache et al. 2020).

# 2.4 Hydrologische und Meteorologische Daten

Wasserstandsdaten wurden an drei Pegelstandorten erhoben. Der Außenpegel Hilligenley liegt im Südwesten der Hallig Langeneß, direkt am Fähranleger, zwei Binnenpegel stehen auf der Hallig, einmal im Westen an der Kirchhofswarf und im Osten an der Kirchwarf (vgl. Abbildung 3). Signifikante Wellenhöhen werden an einer Wellenboje in der Süderaue gesammelt. Die Pegel- und Wellendaten wurden vom LKN-SH für diese Studie zur Verfügung gestellt. Winddaten werden vom Deutschen Wetterdienst an der Wetterstation Strucklahnungshörn auf der Insel Nordstrand ca. 22 km südöstlich vom Pegel Hilligenley erhoben und wurden für diese Studie zur Verfügung gestellt.

# 2.5 Korngrößenkartierung

Um für die Modellierung des Sedimenttransportes notwendige Korngrößeninformationen zu erlangen, wurde eine Kartierung des Wattes um Langeneß durch Fingerprobe durchgeführt. Dazu wurden im Oberflächensediment zwischen den Buhnen die Hauptkomponente sowie bis zu zwei Nebenkomponenten bestimmt (Carstens und Rüßmann 2018). Dabei wurde in Anlehnung an die Bodenkundliche Kartieranleitung vorgegangen (Bodenkundliche Kartieranleitung 2005). Einzelne Transsekte wurden bis in 5 cm Tiefe beprobt und im Labor mittels Laser-Diffraktion analysiert. Somit wurde auch die Korngrößeninformation mittels Fingerprobe überprüft.

# 2.6 Sedimenttransportmodell

Um Auswirkungen von Höhenänderungen von Küstenschutzbauwerken, insbesondere Igelhöhen, auf Sedimenttransport und Sedimentablagerung zu modellieren, wurde die Software MIKE21® vom Danish Hydraulic Institute (DHI, Warren und Bach 1992) verwendet. Mit dieser wurde am Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen ein Detailmodell der Hallig Langeneß erstellt. Die hydrodynamischen Randbedingungen für das Detailmodell generierte ein bereits entwickeltes Regionalmodell der Nordsee und von Teilen des Nordatlantiks (Arns et al. 2015b, Arns et al. 2017). Diese Randbedingungen sind für jeden betrachteten Zeitraum individuell erzeugt worden und wurden ebenfalls vom fwu zur Verfügung gestellt. Folglich war es möglich, die hydrodynamischen Bedingungen von "Land unter"-Ereignissen im Detailmodell zu simulieren (detailliert in Hache et al. 2021). Jedes "Land unter" wurde mit einer Woche spin-up Zeit bis einschließlich dem ersten auf das "Land unter" folgenden Tidenzyklus simuliert. Anschließend konnten bei jeder betrachteten Simulation mit dem particle tracking (PT) Modul von MIKE21® Partikel eingesteuert werden, um suspendierte Sedimente und deren Verteilung während eines "Land unters" zu simulieren. Diese Art der Partikelverfolgung hat sich zu einer bewährten Methode entwickelt, die erst kürzlich von Stanev et al. (2019) genutzt wurde, um die Ausbreitungswege von Meeresmüll in der südlichen Nordsee zu untersuchen.

Das verwendete hydrodynamische Modell, welches die Randbedingungen für das Detailmodell liefert, tendiert dazu, Sturmflutwasserstände zu unterschätzen (Arns et al. 2015b). Deshalb wurden für den angestrebten Vergleich zwischen moderatem "Land unter" und "Land unter" bei Sturmflutbedingungen und deren Auswirkung auf die Partikelakkumulation nach unterschiedlichen Höhenanpassungen der Küstenschutzbauwerke zwei historische Ereignisse ausgewählt, deren modellierte Wasserstände den angestrebten Randbedingungen entsprechen. Für ein moderates "Land unter" betragen die Scheitelwasserstände zwischen 0,92 und 1,5 m über MTHW und für Sturmfluten zwischen 1,5 und 2,5 m über MTHW. Das moderate "Land unter" vom 05. März 2019 zeigte im Modell einen Scheitelwasserstand von 1,30 m über MTHW und die Sturmflut vom 24. November 1981 lieferte 1,83 m über MTHW. Als Referenz wurde der Pegel Dagebüll vom BSH mit einem MTHW von 1,42 m über NHN gewählt. Für diese beiden Ereignisse wurden die hydrodynamischen Bedingungen nach jeder Höhenanpassung der Küstenschutzbauwerke neu simuliert, um anschließend die Partikel einzusteuern und auszuwerten.

## 3 Ergebnisse

Im Rahmen der Studie konnten Erkenntnisse über die räumliche und zeitliche Verteilung der Trübe um Hallig Langeneß während unterschiedlicher meteorologischer Bedingungen gewonnen werden (Hache et al. 2019; Hache et al. 2020). Ergänzt werden diese Informationen um Korngrößendaten vom Wattboden, der als potentielle Quelle für die in Suspension befindlichen Partikel angesehen werden kann. Weiterhin konnten die Unterschiede bezüglich der Korngrößen im Watt, in der Wassersäule und in den Sedimentfallen aufgezeigt werden. Diese Daten lassen Rückschlüsse über den Sedimenttransport während eines "Land unters" von außerhalb der Hallig auf die Hallig zu. Schließlich konnten Zusammenhänge hergestellt werden zwischen den Trübedaten vor der Hallig und den Sedimentakkumulationsraten auf der Hallig.

# 3.1 Trübedaten

Die von den OBS-Sensoren gemessenen Rohdaten wurden durch Kalibration in Konzentrationen von suspendiertem Material umgerechnet. Daher werden im Folgenden die Begriffe Trübe und SPM gleichbedeutend verwendet.

Es gibt wie erwartet deutliche Unterschiede zwischen der Trübe bei normalen Wetterbedingungen und bei stürmischen Bedingungen während eines "Land unters". Es zeigen sich aber auch ausgeprägte Unterschiede in der räumlichen Verteilung, sowohl was die SPM-Konzentration als auch was die relativen Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Wetterbedingungen angeht (Abbildung 7). Alle Stationen zeigen einen deutlichen Anstieg der Trübe bei "Land unter"-Bedingungen. Dieser ist im Südwesten an der Station T-2 am geringsten und an den Stationen im Nordwesten (T-4) und Südosten (T-1) am stärksten ausgeprägt. Während die Trübewerte bei Schönwetter relativ konstant an den einzelnen Stationen sind, kommt es während stürmischem Wetter zu stärkeren Schwankungen.



Abbildung 7: Häufigkeitsverteilungen von SPM-Konzentrationen während jeweils zwei Tidenzyklen bei unterschiedlichen Wetterbedingungen. In hellgrau dargestellt ruhiges Wetter (30.11.2017) in dunkelgrau "Land unter"-Bedingungen am 11.02.2018 (nach Hache et al. 2019).



Abbildung 8: Dichteverteilung von SPM-Konzentrationen in Abhängigkeit von der Windrichtung. Es sind Daten aus dem Zeitraum 01.10.2017–15.02.2018 für sechs Trübemessstationen im Watt dargestellt (nach Hache et al. 2019).



Abbildung 9: Zusammenhang von über einen Tidezyklus gemittelten Windgeschwindigkeiten und SPM-Konzentrationen. Es sind Daten aus zwei Wintern, 01.10.2017–15.02.2018 und 01.09.2018–01.03.2019, für drei Trübemessstationen im Watt dargestellt. R<sup>2</sup> ist der Korrelationskoeffizient nach Pearson und n die Anzahl der Messungen (nach Hache et al. 2020).

Betrachtet man die Windverhältnisse (Abbildung 8 und Abbildung 9), so zeigen die Dichteverteilungen der Trübe und der Windrichtung für alle Stationen Maxima bei Windrichtungen um W–SW. Die häufigsten SPM-Konzentrationen unterscheiden sich allerdings. Die Stationen T-1, T-4, und T-6 zeigen vergleichsweise hohe Werte zwischen 0,2 und 0,4 g/l, während die Stationen T-3 und T-5 nur Werte um 0,1 g/l zeigen. Die Trübe an der Station T-2 ist unter den hauptsächlich auftretenden Windrichtungen mit Werten deutlich unter 0,1 g/l am geringsten. An den Stationen T-1, T-3, T-5 und T-6 treten die maximalen SPM-Gehalte bei Windrichtungen auf, die auch im Maximum der Dichteverteilung vorliegen. Bei den Stationen im Westen der Hallig (T-3, T-4) sind die SPM-Werte deutlich weniger von der Windrichtung beeinflusst und zeigen auch bei anderen Windrichtungen als W–SW Maxima. Lediglich bei der Station T-2 treten die maximalen SPM-Werte abweichend von den vorherrschenden Windrichtungen auf. Hier spielt die geschützte Lage innerhalb des Buhnenfeldes, in dem die Station steht, die entscheidende Rolle. Da sich das Feld nach Südosten öffnet, treten die maximalen SPM-Werte bei der entsprechenden Windrichtung auf.

Die Windgeschwindigkeit beeinflusst die Trübe an den Stationen sehr unterschiedlich, sowohl bezüglich des Standorts als auch der Windrichtung (Abbildung 9). Während die Stationen im Süden der Hallig (T-1, T-2) bei Winden aus nordwestlicher Richtung kaum einen Zusammenhang mit der Windgeschwindigkeit zeigen, so steigt bei südwestlicher Windrichtung die Trübe mit zunehmender Windgeschwindigkeit an. Die Station T-4 zeigt unabhängig von der Windrichtung nur einen schwachen Zusammenhang zwischen Trübe und Windgeschwindigkeit.

Die Unterschiede zwischen den Stationen können durch die an den jeweiligen Stationen herrschenden Strömungsverhältnissen erklärt werden. So liegen die Stationen T-4, T-3 und T-1 jeweils in der Nähe eines zur Süderaue führenden Prieles, während sich die Stationen T-5 und T6 in größerer Entfernung zur Norderaue befinden und daher wahrscheinlich stärker durch Seegang beeinflusst werden als durch Strömung. Die Station T-2 liegt in einem besonders engen Buhnenfeld in unmittelbarer Nähe zu einer Buhne und ist damit sowohl gegen Seegang als auch gegen Strömung relativ geschützt.

Aus diesen Informationen lässt sich zusammenfassend ableiten, dass es ein hohes Potential an Trübe bei südwestlicher Windrichtung gibt, welches insbesondere im Südosten der Hallig mit zunehmender Windgeschwindigkeit ansteigt. Die Trübewerte im Westen und Nordwesten der Hallig sind generell weniger stark vom Wettergeschehen beeinflusst.

#### 3.2 Sedimentakkumulation

Die in drei Messwintern erfassten "Land unter" sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 dargestellt. Die Anzahl der erfassten "Land unter" entspricht der Anzahl an vollständigen "Land unter" nach der Definition von Schindler und Willim (2015) d.h. die Binnenpegel zeigen einen maximalen Wasserstand oberhalb der mittleren Höhe der nicht permeablen Deckwerke (>2,34 m NHN). Die Sedimentakkumulation pro "Land unter" ist als Mittelwert über alle Sedimentfallen dargestellt. Die Werte gruppieren sich in zwei Kategorien. Werte zwischen 99 und 225 g/m<sup>2</sup> gehören zu den häufig vorkommenden "normalen" "Land unter"-Ereignissen, die mit moderaten Wasserständen einhergehen. "Land unter", die mit Sturmfluten einhergehen (Scheitelwasserstände > MTHW + 1,5 m) zeigen hier Sedimentakkumulationen zwischen 572 und 2112 g/m<sup>2</sup>. Die Sturmfluten traten ausschließlich im Messwinter 2019/2020 auf, was sich auch an den deutlich erhöhten Sedimentaufwuchsraten von 5,9 ± 3,8 mm/a in diesem Jahr zeigt.

Der Mittelwert aller Sedimentaufwuchsraten im Projektzeitraum beträgt 2,4  $\pm$  1,8 mm/a und liegt damit deutlich über dem Wert von 1,2  $\pm$  0,8 mm/a, der als Mittelwert (2010– 2013) für Langeneß angegeben ist (Schindler et al. 2014a). Die Diskrepanz ist dadurch zu erklären, dass in dieser Studie absichtlich nahezu alle Sedimentfallen in unmittelbarer Nähe zur Halligkante platziert wurden, während in der Arbeit von Schindler et al. (2014a) die Fallen gleichmäßig über Langeneß verteilt waren. Die Sedimentation ist kantennah deutlich höher als in der Halligmitte. Zusätzlich wurden aber auch zwei zentral gelegene Fallencluster beprobt, die nach Schindler et al. (2014a) als repräsentativ für die Hallig anzusehen sind. Der 4-Jahres-Mittelwert der zentralen Fallenfelder FF1 und FF2 beträgt 1.17  $\pm$  0.22 mm/a und ist damit vergleichbar mit den Werten der älteren Arbeit.

Inundation	wind speed [m/s]	wind direction [degree]	significant wave height [m]	av SPM [g/l]	mean M <sub>s</sub> accu- mulation [g/m <sup>2</sup> ]	mean inun- dation height [m above m.s.l]
1. (08.12.2017)	8.1 ±	268.9 ±	$0.41 \pm 0.11$	$0.19 \pm$ 0.12	132.8 ± 90	$2.46 \pm 0.01$
2. (04.01.2018)	10.7 ± 3.8	$280.6 \pm 8.7$	0.48 ± 0.19	0.12 $0.28 \pm$ 0.17	158.6 ± 84.4	$2.74 \pm 0.02$
3. (12.02.2018)	14.2 ± 1.7	243.3 ± 11	$0.69 \pm 0.11$	0.39 ± 0.15	$179.6 \pm 118.5$	$2.61 \pm 0.01$
4. (08.12.2018)	14.6 ± 1.5	239.5 ± 12 5	$0.72 \pm 0.13$	$0.19 \pm 0.13$	$100.6 \pm 71.7$	$2.49 \pm 0.04$
5. (08.01.2019)	14.5 ±	332.1 ±	$0.62 \pm 0.11$	$0.16 \pm$	$99.2 \pm 50.2$	$2.79\pm0.05$
6. (09.02.2019)	17.3 ±	$227.1 \pm 7$	$0.74 \pm 0.14$	$0.32 \pm 0.18$	$224.8 \pm 206.5$	$2.3\pm0.16$
7. (05.03.2019)	15.4 ±	$251.6 \pm 3.7$	$0.77 \pm 0.14$	$0.23 \pm 0.18$	$172.8 \pm 167.5$	$2.51\pm0.04$
8. (10.03.2019)	$11.4 \pm 10.8$	256 ± 3.6	$0.54 \pm 0.25$	$0.13 \pm 0.09$	$79.9 \pm 58.5$	$2.49 \pm 0.06$
9. (15.12.2019)	16 ± 4 7	245.3 ±	NaN	NaN	1154.2 ± 833.9	$3.37 \pm 0.12$
10. (15.01.2020)	$15.5 \pm$	$201 \pm 3.1$	NaN	NaN	572 ± 419.2	$3.16 \pm 0.08$
11. (10- 13.02.2020)	15.9 ± 0.8	263.7 ± 5.4	NaN	NaN	2112.2 ± 1127.6	$3.32 \pm 0.37$

Tabelle 2: Hydrodynamische, meteorologische und sedimentologische Charakteristika der erfassten "Land unter" im Zeitraum 08.12.2017–13.02.2020.

Tabelle 3: Sedimentaufwuchs der erfassten "Land unter" (LU) im Zeitraum 08.12.2017– 13.02.2020 und Überflutungshöhen an den Binnenpegeln Kirchhofswarf (KHK) und Kirchwarf (KW).

Winter	Erfasste LU	$\Delta H \ [mm/a]$	Mittlere Überflu-	Mittlere Überflu-
			tungshöhe KHW	tungshöhe KW
			[m NHN.]	[m NHN.]
16/17	6	$1.9 \pm 1.9$	$2.9 \pm 0.41$	$2.94 \pm 0.45$
17/18	3	$0.9 \pm 0.5$	$2.5 \pm 0.21$	$2.44 \pm 0.35$
18/19	5	$1 \pm 0.9$	$2.46 \pm 0.2$	$2.56 \pm 0.15$
19/20	3	$5.9 \pm 3.8$	$3.24 \pm 0.33$	$3.36 \pm 0.31$
Mittelwert		$2.4 \pm 1.8$	$2.78 \pm 0.29$	$2.83\pm0.32$

# 3.2.1 Einfluss der Halligrauhstreifen

Assoziiert zu den Trübemessstationen T-1, T-2 und T-3 befinden sich jeweils zwei Sedimentfallencluster, die hinter unterschiedlich hohen Igeln liegen. Die Igelhöhen wurden den entsprechenden Katastern des LKN-SH entnommen und sind zusammen mit der mittleren Sedimentakkumulation in Tabelle 4 dargestellt. Eine nach einzelnen "Land untern" differenzierte Darstellung der Sedimentakkumulation zeigt Abbildung 10.

trap cluster	barrier height [m]	distance to Hallig margin [m]	average Ms accumulation [g/m <sup>2</sup> ]	average inun- dation SPM [g/l]
1H	2.69±0.14	30	263±132	$0.34 \pm 0.12$
1L	2.22±0.04	40	329±151	$0.34 \pm 0.12$
2H	$3.58 \pm 0.23$	32	75±32	$0.06 \pm 0.05$
2L	3.2±0.11	33	149±49	$0.06 \pm 0.05$
3Н	$3.24 \pm 0.06$	120	43±21	$0.14 \pm 0.07$
3L	$2.87 \pm 0.11$	121	176±46	$0.14 \pm 0.07$

Tabelle 4: Sedimentologische und morphologische Merkmale der Sedimentfallencluster hinter unterschiedlich hohen Halligrauhstreifen (H = hoch, L = niedrig) im Süden der Hallig Langeneß.

Die Differenz zwischen den jeweiligen Igelhöhen beträgt 37 bis 47 cm und ist damit in etwa vergleichbar hoch. Sowohl die mittlere als auch die individuellen Sedimentakkumulationen sind immer höher hinter dem jeweils niedrigeren Igel. Dabei profitieren offenbar besonders die Regionen, in den eher geringe Sedimentakkumulationen vorliegen (T-2, T-3) prozentual stärker, wenn die Igelhöhe geringer ist. Die absolute Höhe der Igel korreliert offenbar negativ mit der mittleren Sedimentakkumulation, so werden z. B. die höchsten Sedimentakkumulationen in der Region T-1 hinter den niedrigsten Igeln gemessen und die niedrigsten Akkumulationen hinter den deutlich höheren Igeln in der Region T-2 und T-3.



Abbildung 10: Sedimentakkumulation hinter unterschiedlich hohen Halligrauhstreifen "Igel" bei einzelnen "Land untern" im Zeitraum 08.12.2017–10.03. 2019 (nach Hache et al. 2020).

Die Igelhöhe wirkt sich auch auf die Korngröße des abgelagerten Sedimentes aus. Die durchgeführte Wattkartierung erbrachte das Ergebnis, dass das Watt um Langeneß im Wesentlichen von Feinsand mit leicht variierenden Siltanteilen dominiert ist. Lediglich an der Station T-2 liegen tonig Silte vor und an der Station T-4 Mittelsande. Während unter Schönwetterbedingungen hauptsächlich die Siltanteile in Suspension gehen, werden unter Wetterbedingungen, die zu "Land untern" führen, verstärkt auch die Sandanteile des Sedimentes resuspendiert. Abbildung 11 zeigt die einzelnen Kornfraktionen exemplarisch

an der Messstation T-1 und den assoziierten Sedimentfallenclustern während der "Land unter" 3 und 6 (vgl. Tabelle 2). Die dominierende Korngröße in den Sedimentsammlern ist hier Feinsand. Der geringe Unterschied zwischen den jeweiligen Sammlern "Top" und "Base" zeigt, dass die Wassersäule wahrscheinlich gut durchmischt ist in Bezug auf die Korngröße der suspendierten Partikel. In Sedimentfallen hinter den Halligrauhstreifen dominieren gleichzeitig Grobsilt und Feinsand. Allerdings zeigt sich hier ein deutlicher Unterschied zwischen Sedimentfallen hinter hohem und niedrigem Igel. Während hinter dem hohen Igel Grobsilt die häufigste Korngröße ist, so ist es hinter dem niedrigen Igel Feinsand. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Halligkante generell ein Hindernis für den Sedimenttransport darstellt und dass insbesondere grobe Partikel sowohl von der Halligkante als auch von den Halligrauhstreifen davon abgehalten werden, auf die Hallig zu gelangen. Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmender Igelhöhe.



Abbildung 11: Korngrößenverteilung der Sedimentsammler (links), differenziert nach Top (ST) und Base (SB) an der Messstation T-1 bei zwei ausgewählten "Land untern" (vergl. Tabelle 2) und der Sedimentfallencluster (rechts) hinter unterschiedlichen hohen Halligrauhstreifen "Igel" im Bereich der Messstation T-1 (nach Hache et al. 2020).

# 3.3 Sedimentverfügbarkeit

Die zentrale Frage der Studie lautet, ob es ein Potential an verfügbaren Sedimenten gibt, die zwar im Watt resuspendiert werden, aber nicht auf die Hallig transportiert werden. Da die Untersuchungen zur räumlichen Verteilung der Trübe gezeigt haben, dass die Trübewerte rund um die Hallig stark variieren und auf der Hallig nur zwei Messstationen zur Verfügung stehen, wurden die Trübewerte der Stationen auf der Hallig nur mit den dazu räumlich assoziierten Messstationen im Watt verglichen. Dementsprechend wurden Messungen des SPM-Gehaltes an den Stationen T-1 mit denen der Station T-8 bzw. T-4 mit T-7 (vgl. Abbildung 3) verglichen, die während der erfassten "Land unter" gewonnen wurden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 12 dargestellt. Mit steigenden Trübewerten im Watt erhöhen sich auch die SPM-Gehalte im Überflutungswasser auf der Hallig. Es zeigt sich aber, dass die Messstationen auf der Hallig nur in etwa 10 bis 50 % der im Watt gemessenen Trübe detektieren. Die "Effektivität" eines "Land unters" bezüglich des Sedimenttransportes steigt dabei offenbar mit der Stärke des "Land unters", wenn als Maß dafür die Trübewerte im Watt herangezogen werden.



Abbildung 12: Verhältnis zwischen an den Messstationen außerhalb der Hallig Langeneß verfügbarem Gehalt an suspendiertem Material (SPM) und dem zeitgleich auf die Hallig transportierten SPM. Die gestrichelten Linien zeigen unterschiedliche Perzentilwerte der auf der Hallig gemessenen Trübe in Relation zu den Werten im Watt (modifiziert nach Hache et al. eingereicht).

Gleichzeitig besteht eine gute Korrelation zwischen SPM-Werten der jeweiligen Messstation auf der Hallig und der genau dort resultierenden Sedimentakkumulation (Abbildung 13). An der Station T-7 im Westen der Hallig werden allerdings insbesondere bei hohen SPM Gehalten wesentlich geringe Sedimentakkumulationen gemessen als an der Station T-8 im Osten von Langeneß. Dieser Unterschied geht vermutlich auf einen Korngrößeneffekt zurück. Der Zusammenhang zwischen Korngröße und Sedimentakkumulation ist in Abbildung 14 dargestellt. Je gröber die abgelagerten Sedimente sind, desto höher ist auch die Sedimentakkumulation insgesamt. Die Korngrößen der an der Station T-7 abgelagerten Sedimente sind aufgrund der Entfernung der Station zur Halligkante und des gegenüber der Station T-8 deutlich höheren Igels geringer als an der Station T-8.



Abbildung 13: Korrelation zwischen SPM-Gehalten und Sedimentakkumulation an den Trübemessstationen auf der Hallig Langeneß. Zwischen dem 10.02 und dem 13.02.2020 kam es während des Sturms Sabine zu fünf aufeinanderfolgenden "Land unter"-Tiden. Im Westen von Langeneß (T-7) war eine Beprobung des Fallenfeldes zwischen den einzelnen Tidezyklen nicht möglich. Daher erfolgt bei T-7 für diese Sturmflut eine Mittelung über alle fünf Tidenzyklen. Im Osten konnte das Fallenfeld bei Station T-8 jeweils tagsüber beprobt werden und somit erfolgt hier eine Mittelung von jeweils zwei Tidezyklen (modifiziert nach Hache et al. eingereicht).



Abbildung 14: Zusammenhang zwischen Sedimentakkumulation und medianer Korngröße in Sedimentfallen auf der Hallig bei Station T-8 im Westen der Hallig.

# 3.4 Sedimenttransportmodellierung

Die Modellierung verfolgt das Ziel, den Einfluss von Veränderungen in der Höhe der Halligraustreifen (Igel) auf den Sedimenttransport sowie die Ablagerung und Resuspendierung individueller Partikel zu zeigen (detailliert in Hache et al. 2021). Abbildung 15 zeigt das verwendete Modellgitter und die Punkte außerhalb der Hallig, an denen fortwährend bei jedem Modellschritt Partikel eingesteuert wurden. Die Auflösung des Gitters ist an die Morphologie des Geländes angepasst. Insbesondere die Halligpriele sind sehr hoch aufgelöst.



Abbildung 15: Modellgitter und die Punkte, an denen im Modelllauf fortwährend Partikel eingesteuert wurden (rote Kreise) (modifiziert nach Hache et al. 2021).

Eine Änderung der Deckwerkshöhen wurde in denselben Bereichen untersucht wie bei der Messung der Sedimentakkumulation mit Sedimentfallen (Hache et al. 2021) (vgl. Abbildung 10). Dabei wurde in den rot markierten Bereichen (Abbildung 16) die Deckwerkslinie auf die jeweils niedrigste dort aktuell bestehende Höhe angeglichen.



Abbildung 16: Drei Szenarien zur Deckwerkslinie von Langeneß (A = Ist-Zusatand). Rot markierte Stellen in B und C wurden während der Modellierung in der Höhe herabgesetzt (modifiziert nach Hache et al 2021).

Anschließend wurden drei Szenarien modelliert. Dabei wurde als Partikelgröße die auf der Hallig vorherrschende mediane Korngröße verwendet (Silt, 30 µm). Es wurde zunächst der Ist-Zustand (A) bezüglich der Deckwerkshöhen für jeweils ein moderates "Land unter" und eine Sturmflut modelliert. Im zweiten Szenario wurden die Deckwerkshöhen an ausgewählten Stellen angepasst (B) und im dritten wurde die gesamte Deckwerkslinie im Süden der Hallig herabgesetzt (C). Da mit dem Modell keine realen Sedimentakkumulationen berechnet werden können, sind die Ergebnisse nur vergleichend zu interpretieren. Die Anzahl der abgelagerten Partikel für die unterschiedlichen Szenarien sind in Abbildung 17 dargestellt. Während bei einem moderaten "Land unter", wie es relativ häufig vorkommt, im ersten Szenario nur wenige Partikel vorwiegend nahe der Halligkante im Süden abgelagert werden, erhöht sich die Anzahl während einer Sturmflut deutlich und die Partikel verteilen sich gleichmäßiger über die Halligfläche. Dies entspricht den mit Sedimentfallen erfassten Daten weitgehend und zeigt, dass das Modell realistische Werte liefert. Im zweiten Szenario zeigt sich eine deutliche Erhöhung der abgelagerten Partikelmenge im Bereich des Osterwehls und nur eine sehr geringe Erhöhung im westlichen Bereich der Hallig. Auch das entspricht weitgehend den realen Daten (vgl. Abbildung 10). Dabei nimmt die Partikelanzahl am Osterwehl einerseits zu, andererseits werden die Partikel auch weiter Richtung der Hallig Mitte transportiert. Der Unterschied ist besonders bei moderaten "Land unter" zu beobachten, während bei Sturmfluten der Effekt des Igels offenbar geringer ist (siehe Vergleich A2 vs. B2 in Abbildung 17). Eine Anpassung des Igels im gesamten Süden der Hallig (Szenario C) wirkt sich bei moderaten Events besonders im Osten der Hallig aus, während bei Sturmflut die Partikel deutlich weiter in den Norden der Hallig transportiert werden als im Ist-Zustand (Vergleich A2 vs. C2).

Abbildung 18 zeigt die kumulierte Anzahl von transportierten, abgelagerten und wieder erodierten Partikeln.



Abbildung 17: Ablagerungsort modellierter Silt-Partikel (30 µm) bei verschiedenen Szenarien. Die Höhen der Deckwerkslinie von Langeneß sind farbig markiert. A: Ist-Zustand der Deckwerke, B: Anpassung nur im Bereich des Sieles am Osterwehl und an der Deichlinie im Westen, C: Anpassung im gesamten Süden der Hallig. A1-C1: moderates "Land unter", A2-C2: Sturmflut (nach Hache et al. 2021).

Die Modellergebnisse zeigen, dass sich die Sedimentakkumulation besonders bei moderaten "Land untern" durch Änderung der Deckwerkshöhe in etwa verdoppeln lässt (C1 vs. A1 in Abbildung 18), während sich bei Sturmfluten die Anpassung der Deckwerke auf die Anzahl der transportierten Partikel kaum auswirkt. Es konnte allerdings auch gezeigt werden, dass bei Sturmfluten ein erheblicher Teil (ca. 20 bis 35 %) der hohen Anzahl an auf die Hallig gelangenden Partikel dort nicht abgelagert wird, sondern mit dem ablaufenden Wasser wieder von der Hallig entfernt wird, während es beim moderaten Ereignis zu keinem Partikelverlust kam. Hier zeigt sich ein weiterer Ansatzpunkt für die Erhöhung der Sedimentakkumulation. Es steht zu vermuten, dass der Sedimentverlust verringert werden könnte, wenn nach Sturmfluten das ablaufende Wasser gebremst würde.



Abbildung 18: Kumulierte modellierte Silt-Partikelanzahl (30 µm) für unterschiedliche Szenarien, normiert auf die höchste Säule (A2). A: Ist-Zustand der Deckwerke, B: Anpassung nur im Bereich des Sieles am Osterwehl, C: Anpassung im gesamten Süden der Hallig. A1–C1: moderates "Land unter", A2–C2: Sturmflut (nach Hache et al 2021).

#### 4 Schlussfolgerung und weiterer Forschungsbedarf

Die Studie zeigt gute und in sich konsistente Ergebnisse bezüglich der gemessenen Trübewerte in der Wassersäule, der gemessenen Sedimentakkumulation auf der Hallig sowie der Modellierung des Partikeltransportes. Die eingangs gestellten Fragen konnten weitgehend beantwortet werden. Das entwickelte Trübemessnetzwerk hat über annährend 3,5 Jahre bei nur geringen Ausfallzeiten kontinuierlich Daten in überzeugender Qualität geliefert. Aus den Rohdaten konnten durch individuelle Kalibration der einzelnen Sensoren an den jeweiligen Stationen SPM-Daten erzeugt werden, die die räumliche und zeitliche Variation der suspendierten Sedimentmenge um Hallig Langeneß abbilden. Insbesondere Stürme aus südwestlicher Richtung sorgen mit zunehmender Windgeschwindigkeit für ein gesteigertes SPM-Potential in der Wassersäule, das im Falle eines "Land unters" auf die Hallig transportiert werden kann. Im Westen der Hallig werden die SPM-Gehalte weniger stark von den meteorologischen Bedingungen beeinflusst als im Süden und Norden der Hallig. Der Einfluss der Strömung in dem westlich an der Hallig entlanglaufenden Priel dominiert hier offenbar die Trübewerte. Es zeigte sich eine sehr gute Korrelation zwischen gemessenen SPM-Gehalten und der realen Sedimentakkumulation am Ort der Messung auf der Hallig. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass sich während eines "Land unters" die SPM-Gehalte im Überflutungswasser auf der Hallig deutlich von denen des Wassers außerhalb der Hallig unterscheiden. Nur etwa 10 bis 50 % des zur Verfügung
stehenden SPM-Potentials gelangt tatsächlich auf die Hallig und sorgt dort für eine Sedimentakkumulation. Dabei stellt die Halligkante mit den darauf befindlichen Deckwerken offenbar die entscheidende Hürde da. Sowohl Korngröße als auch Menge der abgelagerten Sedimente sind hinter höheren Igeln durchgehend geringer als hinter niedrigeren. Die Ergebnisse der Modellierung zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen. Dies legt den Schluss nahe, dass besonders bei den häufig auftretenden moderaten "Land untern" eine deutliche Steigerung der Sedimentakkumulation um das doppelte möglich wäre, wenn die Deckwerke auf der Südseite der Hallig herabgesetzt würden. Die Modellergebnisse legen weiterhin den Schluss nahe, dass unabhängig von der Veränderung der Deckwerkshöhen bei den seltener auftretenden Sturmfluten ein erhebliches Potential an Sedimenten zur Verfügung steht, das durch das ablaufende Überflutungswasser von der Hallig gespült wird.

Die Ergebnisse der Modellierung sollten unter natürlichen Bedingungen getestet und validiert werden. Dazu könnten an strategischen Stellen der Hallig die Raustreifen niedriger gestaltet und eine angepasste Steuerung des ablaufenden Wassers bei Sturmfluten umgesetzt werden. Es sollten weiterhin Maßnahmen getroffen werden, die bei kleinen "Land untern" das Überflutungswasser ungehindert auf die Hallig strömen lassen und bei Sturmfluten das ablaufende Wasser bremsen. Denkbar wäre eine variable Verbauung der Priele vor den Sieltoren und/oder eine variable Sieltorsteuerung.

### 5 Danksagung

Die Autoren danken allen Bewohner\*innen von Langeneß für ihre freundliche Unterstützung. Ohne die Gewährung von Zutrittsrechten für Fennen und Warfen wäre diese Studie nicht möglich gewesen. Insbesondere danken wir Hans-Werner Johannsen für die Versorgung unserer Zentralstation mit Strom. Wir möchten uns bei Britta und Honke sowie Helgard und Frerk Johannsen für ihre Gastfreundschaft und für vielfältige Hilfestellungen bei der Durchführung der Geländearbeiten bedanken. Dem BMBF wird für die finanzielle Förderung gedankt (Projekt *Living Coast Lab Hallig*, 03F0759C) und dem KFKI und den Mitgliedern der Projektbegleitenden Gruppe für ihre konstruktiven Anregungen. Für die Durchführung von "Land unter"- und Sturmflutsimulationen kam das Softwarepaket MIKE21<sup>®</sup> zum Einsatz, das uns freundlicherweise von DHI-WASY zur Verfügung gestellt wurde. Jörg Gutkuhn (Fa. Argus) und Lothar Laake sowie allen Mitarbeitern der Metallwerkstatt des Geowissenschaftlichen Zentrums Göttingen gebührt Dank und Anerkennung für herausragende technische und handwerkliche Arbeiten an dem Trübemesssystem.

### 6 Literaturverzeichnis

Arns, A.; Wahl, T.; Dangendorf, S.; Jensen, J.: The impact of sea level rise on storm surge water levels in the northern part of the German Bight. In: Coastal Engineering, 96, 118–131. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.12.002, 2015a.

Arns, A.; Wahl, T.; Haigh, I. D.; Jensen, J.: Determining return water levels at ungauged coastal sites. A case study for northern Germany. In: Ocean Dynamics, 65 (4), 539–554. https://doi.org/10.1007/s10236-015-0814-1, 2015b. Arns, A.; Dangendorf, S.; Jensen, J.; Talke, S.; Bender, J.; Pattiaratchi, Ch.: Sea-level rise induced amplification of coastal protection design heights. In: Scientific reports, 7, 40171. https://doi.org/10.1038/srep40171, 2017.

Carstens, J. S.; Rüßmann, A.-L.: Wattkartierung um Hallig Langeneß - Bestimmung der Korngrößenverteilung, Karbonatgehalt und organischem Kohlenstoff an ausgewählten Profilen. Bachelorarbeit im Studiengang Geowissenschaften der Georg-August-Universität Göttingen, 2018.

Deicke, M.; Karius, V.; Eynatten, H. von: Bestimmung der Sedimentaufwachsraten auf den Halligen Hooge, Langeneß, Nordstrandischmoor und Süderoog Sedimentakkumulation Halligen (SAHALL). Endbericht. Georg-August Universität Göttingen, 2009.

Down, R. D.; Lehr, J. H.: Environmental Instrumentation and Analysis Handbook. Chapter 24. Turbidity Monitoring, 511–547. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2005.

Downing, J. P.: Twenty-five years with OBS sensors. The good, the bad, and the ugly. In: Continental Shelf Research, 26, (17-18), 2299–2318. https://doi.org/10.1016/j.csr.2006.07.018, 2006.

Downing, J. P.; Beach, R. A.: Laboratory apparatus for calibrating optical suspended solids sensors. In: Marine Geology, 86 (2-3), 243–249. https://doi.org/10.1016/0025-3227(89)90053-4, 1989.

Gardner, W. D.: Field assessment of sediment traps. In: Journal of Marine Research, 38, 41–52, 1980a.

Gardner, W. D.: Sediment trap dynamics and calibration: a laboratory evaluation. In: Journal of Marine Research, 38, 17–39, 1980b.

Hache, I.; Karius, V.; Eynatten, H. von: Storm surge induced sediment accumulation on marsh island in the southeastern North Sea: Implications for coastal protection. In: Estuarine, Coastal and Shelf Science, eingereicht.

Hache, I.; Niehüser, S.; Karius, V.; Arns, A.; Eynatten, H. von: Assessing sediment accumulation at inundated anthropogenic marshland in the southeastern North Sea: using particle tracking on modified coastal protection structures. In: Ocean and Coastal Management, 208. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105631, 2021.

Hache, I.; Karius, V.; Eynatten, H. von: Suspended particulate matter for sediment accumulation on inundated anthropogenic marshland in the southern North Sea – Potential, thresholds and limitation. In: Continental Shelf Research, 207, 1–14. https://doi.org/ 10.1016/j.csr.2020.104214, 2020.

Hache, I.; Karius, V.; Gutkuhn, J.; Eynatten, H. von: The development and application of an autonomous working turbidity measurement network: Assessing the spatial and temporal distribution of suspended particulate matter on tidal flats in the North Frisian Wadden Sea. In: Continental Shelf Research, 176, 36–50. https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.02.010, 2019.

Kineke, G. C; Sternberg, R. W: Measurements of high concentration suspended sediments using the optical backscatterance sensor. In: Marine Geology, 108 (3-4), 253–258. https://doi.org/10.1016/0025-3227(92)90199-R, 1992.

Poerbandono, P.; Mayerle, R.: Composition and Dynamics of Sediments in Tidal Channels of the German North Sea Coast. In: Die Küste, 69, 63–91, 2005.

Schindler, M.: Challenges and perspectives of the North Frisian Halligen Hooge, Langeneß and Nordstrandischmoor. Marshland accretion and adaptation capacity to sea-level-rise. Dissertation. University Göttingen, Göttingen, 2014.

Schindler, M.; Karius, V.; Arns, A.; Deicke, M.; Eynatten, H. von: Measuring sediment deposition and accretion on anthropogenic marshland – Part II. The adaptation capacity of the North Frisian Halligen to sea level rise. In: Estuarine, Coastal and Shelf Science, 151, 246–255. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.08.027, 2014a.

Schindler, M.; Karius, V.; Deicke, M.; Eynatten, H. von: Measuring sediment deposition and accretion on anthropogenic marshland – Part I. Methodical evaluation and development. In: Estuarine, Coastal and Shelf Science, 151, 236–245. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.08.029, 2014b.

Schindler, M.; Willim, K.: Berechnung langjähriger Überflutungshäufigkeiten für die Halligen Hooge, Langeneß und Nordstrandischmoor auf Basis regionaler Pegeldaten. In: Coastline Reports, 24, 53–65, 2015.

Bodenkundliche Kartieranleitung. Mit 103 Tabellen. With assistance of Herbert Sponagel. 5., verb. und erw. Aufl. Stuttgart: Schweizerbart, 2005.

Stanev, E. V.; Badewien, T. H.; Freund, H.; Grayek, S.; Hahner, F.; Meyerjürgens, J. et al.: Extreme westward surface drift in the North Sea. Public reports of stranded drifters and Lagrangian tracking. In: Continental Shelf Research, 177, 24–32. https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.03.003, 2019.

Sternberg, R. W.; Johnson, R. V.; Cacchione, D. A.; Drake, D. E.: An instrument system for monitoring and sampling suspended sediment in the benthic boundary layer. In: Marine Geology, 71, (3-4), 187–199. https://doi.org/10.1016/0025-3227(86)90069-1, 1986.

Warren, I. R.; Bach, H. K.: MIKE 21: a modelling system for estuaries, coastal waters and seas. In: Environmental Software, 7(4), 229–240. DOI: 10.1016/0266-9838(92)90006-P, 1992.

# Bestimmung biogeomorphologischer Rückkopplung zwischen Pflanzen und Sedimentation

Julia Bass<sup>1</sup> und Michael Kleyer<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universität Ulm, Institut für Evolutionsökologie und Naturschutzgenomik, julia-1.bass@uni-ulm.de

<sup>2</sup> Carl von Ossietzky Universität Oldenburg; Landscape Ecology Group Institut für Biologie und Umweltwissenschaften (LÖK)

### Zusammenfassung

Die Halligen vor der Schleswig-Holsteinischen Festlandküste sind von großer soziokultureller und ökologischer Bedeutung. Gleichzeitig sind sie besonders durch einen steigenden Meeresspiegel bedroht, da sie größtenteils nur knapp über dem mittleren Tidehochwasser liegen und keine Möglichkeit der landwärtigen Migration haben. Die einzige Möglichkeit für ein langfristiges Fortbestehen der Halligen ist eine ausreichende Sedimentdeposition und ein daraus resultierendes Aufwachsen der Hallig-Salzwiesen. Die Veränderung der Oberflächenhöhe resultiert aus dem Höhenzuwachs durch Sedimentation und der Höhenabnahme durch Erosion und Verdichtung. Diese Prozesse werden durch abiotische und biotische Faktoren beeinflusst - die Interaktionen sind aber noch nicht ausreichend verstanden. Wir untersuchen mit Hilfe von multiplen Regressionsanalysen wie die Rauheit der Vegetation und die Entfernung zur Halligkante den Aufwuchs der Halligen beeinflussen. Die Analysen zeigten, dass die ausgeprägten lokalen Unterschiede im Aufwuchs der Hallig-Salzwiesen durch die Entfernung zur Halligkante und die Höhe der Vegetation erklärt werden konnten. Den höchsten Aufwuchs gab es nahe der Salzwiesenkante in hoher Vegetation. Diese Ergebnisse legen nahe, die Vegetation in Modellierungen zu den Entwicklungen der Salzwiesen zu berücksichtigen und die Vegetation als zusätzlich Möglichkeit der Regulation der Sedimentation zu nutzen.

### Schlagwörter

Salzwiesen, traits, Sedimentaufwuchs, Sedimentation, Aufwuchs, Rauheit, biologische Merkmale

### Summary

The Halligen off the mainland coast of Schleswig-Holstein are of great socio-cultural and ecological importance. At the same time, they are particularly threatened by rising sea levels, as they are mostly only just above the mean high tide and have no possibility of landward migration. The only possibility for a longterm survival of the Hallig is a sufficient accretion of the Hallig salt marshes. The change in surface elevation results from a positive surface elevation change through sedimentation and a negative surface elevation change through erosion and compaction. These processes are influenced by abiotic and biotic factors. However, the interactions are not yet sufficiently understood. Therefore, we use multiple regression analyses to investigate the effect of vegetation roughness and distance to the Hallig edge on salt marsh accretion. The analyses showed that there are pronounced local differences in accretion rates on Hallig salt marshes. These can be explained by distance to the Hallig edge and vegetation height. The highest accretion rates were found near the salt marsh edge in high vegetation. These results suggest that vegetation should be considered when modelling the development of the salt marshes under climate change scenarios. It also shows that vegetation of the Hallig salt marshes.

### Keywords

salt marsh, accretion, sediment accumulation, sedimentation, roughness, traits, biological properties

### 1 Einleitung

### 1.1 Salzwiesen im Klimawandel

Salzwiesen sind weltweit durch einen steigenden Meeresspiegel bedroht (Murray et al. 2014, Watson et al. 2017). Der Weltklimarat IPCC (in press) sagt einen Anstieg des mittleren Meeresspiegels von 0,29 m bis 1,1 m bis zum Ende dieses Jahrhunderts voraus. Dies würde im gleichen Zeitraum zu einem Verlust von 20 bis 50 % der weltweiten Salzwiesen führen (Craft et al. 2009, McFadden et al. 2007). Besonders gefährdet sind die Salzwiesen der nordfriesischen Halligen, kleine Marschinseln, die größtenteils nur knapp über dem mittleren Tidehochwasser (MThw) liegen (Schindler et al. 2014a). Während historisch gesehen Salzwiesen auf den Anstieg des Meeresspiegels mit Aufwuchs und/oder einer landwärtigen Migration reagiert haben (Donnelly und Bertness 2001), werden die Halligen nur fortbestehen können, wenn das Höhenwachstum der Salzwiesen das des Meeresspiegelanstiegs übersteigt. Sie haben keine Möglichkeit der landwertigen Migration – genau wie zahlreichen Festlandsalzwiesen, deren Hinterland heute durch Deiche begrenzt ist (Morris et al. 2002). Ein Verlust der Halligen ist besonders besorgniserregend, da die Halligen wichtige soziokulturelle und ökologische Funktionen erfüllen und eine wichtige Rolle beim Schutz der Schleswig-Holsteinischen Festlandküste spielen.

### 1.2 Biogeomorphologische Prozesse in Salzwiesen

Die Zu- und Abnahme der Oberflächenhöhe von Salzwiesen wird durch Sedimentation und Erosion bzw. Bodenverdichtung bedingt. Abiotische Faktoren wie die Konzentration von Schwebstoffen und die Sedimentablagerung sind positiv mit einer Zunahme der Oberflächenhöhe korreliert (Anderson et al. 2011). Der Abstand zur Salzwiesenkante, die Entfernung zu Prielen sowie die Höhe sind negativ mit einer Abnahme der Oberflächenhöhe korreliert (Cadol et al. 2014, Esselink et al. 1998, Kirwan et al. 2016, Kolker et al. 2010). Auch biotische Faktoren werden hinsichtlich ihres Einflusses auf die Höhenänderung von Salzwiesen diskutiert. Salzwiesen sind ein klassisches Beispiel für biogeomorphologische Ökosysteme, in denen die Wechselwirkungen zwischen Pflanzen und geomorphologischen Prozessen die Form und Funktion des Ökosystems bestimmen (Corenblit et al. 2015). Es wird angenommen, dass die Salzwiesenvegetation den Aufwuchs auf drei Wegen beeinflusst. Zum einen wird der Aufwuchs direkt verstärkt, da die Vegetation durch die Produktion organischer Substanz zur Bodenbildung beiträgt (Schile et al. 2014). Des Weiteren wird durch die Rauheit der oberirdischen Vegetationsstrukturen bei Überflutungen, sogenanntem Land unter, die Wellenenergie gedämpft und die Fließgeschwindigkeit verlangsamt, was das Absinken von mineralischen Sedimenten verstärkt (Mudd et al. 2010). Zuletzt wird durch die Verringerung der Schleppspannung und die Verankerung der Wurzeln auch die Resuspension abgelagerter Sedimente auf Salzwiesenoberflächen sowie die direkte Erosion der Oberflächen reduziert (Francalanci et al. 2013, Temmerman et al. 2012).

### 1.3 Biologische Merkmale der Pflanzen

Die Einbeziehung der Vegetation in hydrodynamischen Modelle hat eine lange Tradition (Manning 1891, Strickler 1923). Mithilfe des Rauheitsbeiwert kann die Vegetation in Berechnungen berücksichtigt werden. Allerdings wird die Vegetation hier lediglich in grobe Kategorien eingeteilt, wie z. B. "kurzes Gras" oder "hohes Gras" für Grasflächen ohne Büsche. Dies lässt viel Raum für subjektive Interpretationen (Chow 1959). Für ein mehr mechanistisches Verständnis der Rauheit kann die Vegetation durch biologische Merkmale der Pflanzen beschrieben werden (Lavorel et al. 1997). Dies sind messbare Eigenschaften der Pflanzen, die auch die Rauheit der Vegetation beeinflussen (Garnier et al. 2007, Kleyer 1999). Dieser Ansatz folgt der funktionelle Vegetationsökologie, in der Pflanzen nicht anhand ihrer Phylogenie klassifiziert werden, sondern anhand der Ausprägung ihrer biologischen Merkmale ("traits"). Ein Merkmal ist jedes morphologische, physiologische oder phänologische vererbbare Merkmal, das auf der individuellen Ebene von der Zelle bis zum gesamten Organismus messbar ist (Garnier et al. 2016). Aus den Merkmalskombinationen können auch Pflanzenstrategien abgeleitet und Pflanzen in "funktionelle Typen" gruppiert werden. Dies ist eine nicht-phylogenetische Gruppierung von Arten, die als Reaktion auf abiotische und biotische Bedingungen ähnliche Merkmale aufweisen. Die Arten sind dem gleichen Maß an Stress und Störungen ausgesetzt, so dass gleiche Pflanzenstrategien auch bei taxonomisch unterschiedlichen Arten entstehen.

### 1.4 Merkmal-basierter Ansatz in Salzwiesen

Bis jetzt haben nur wenige Studien einen merkmal-basierten Ansatz verfolgt, um den biologisch vermittelten Aufwuchs und die Wellendämpfung in Salzwiesen zu bewerten (Bouma et al. 2005, Mudd et al. 2010). Diese Studien kommen allerdings zum Teil zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen: So wurde z. B. festgestellt, dass die Wellendämpfung positiv mit der Blatt- und Sprosssteifigkeit (Paul et al. 2012, Rupprecht et al. 2017), der Vegetationshöhe (Rupprecht et al. 2017) sowie der Sprossdichte und der Sprossmasse (Paul et al. 2012) korreliert ist. Reef et al. (2018) hingegen fanden keinen signifikanten Einfluss der Vegetationshöhe und der Biomasse auf den Aufwuchs, obwohl sie bei Flut die Ablagerung von Sediment auf den Pflanzen und dem Boden nachweisen konnten. Sogar negative Auswirkungen der Vegetation auf den Aufwuchs von Salzwiesen wurden gefunden, wenn die Bewegungen der Pflanzen bei Einwirkung von Wellen und Strömungen die Turbulenz der Wasserbewegung verstärken und damit die Bodenoberfläche erodieren lassen (Temmerman et al. 2007). Dies gilt für eine lückenhafte Vegetation, wie sie in den Pionierzonen und entlang der seewärtigen Salzwiesenkante zu finden ist. Widdows et al. (2008) wiesen zudem darauf hin, dass sich die kleinräumigen Effekte der Vegetation auf den Aufwuchs der Salzwiesen nicht zwingend auf großflächige Veränderungen in der Salzwiese übertragen lassen.

Diese gegensätzlichen Ergebnisse zeigen ein mangelndes Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Vegetation und Aufwuchs in Salzwiesen. Das derzeitige fragmentierte Wissen mag dazu beitragen, dass viele Modelle zur Salzwiesenresistenz gegenüber dem Meeresspiegelanstieg biogeomorphologische Rückkopplungen nicht berücksichtigen.

Um ein besseres Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Vegetation und Aufwuchs in Salzwiesen zu bekommen, soll diese Studie die Auswirkungen von biologischen Merkmalen auf den Aufwuchs in Hallig-Salzwiesen untersuchen. Folgende Hypothesen sollen getestet werden: (1) Der Aufwuchs der Hallig-Salzwiesen nimmt mit der Entfernung zur Salzwiesenkante ab. (2) Der Aufwuchs der Hallig-Salzwiesen wird durch eine raue Vegetation, bestehend aus Pflanzen mit hoher Wuchshöhe, großen Stängel- und Blattmassen, steifen Stängeln und großen Blattflächen, verstärkt.

### 2 Methoden

### 2.1 Untersuchungsgebiet

Um die Wirkung von biologischen Merkmalen auf den Aufwuchs von Hallig-Salzwiesen zu klären, haben wir insgesamt 113 Flächen auf den Halligen Hooge, Langeneß und Nordstrandischmoor untersucht. Die Flächen sind gleichmäßig über die Halligen und in unterschiedlichen Entfernungen zur Halligkante verteilt. Das Überflutungsregime auf den Halligen führt dazu, dass die Hallig-Salzwiesen größtenteils durch Arten der oberen Salzwiese charakterisiert sind.

### 2.2 Datenerhebung

### 2.2.1 Aufwuchs

Als erklärende Variable sollte der Aufwuchs in die Regressionsanalyse eingehen. Dieser wurde von der Abteilung Sedimentologie und Umweltgeologie des Geowissenschaftliches Zentrum der Georg-August-Universität Göttingen auf den Halligen mit Sedimentfallen gemessen. Zum einen wurden Daten von Langeneß, Hooge und Nordstrandischmoor der Jahre 2010 bis 2013 genutzt (veröffentlicht in Schindler et al. 2014a), zum anderen wurden Daten von Langeneß der Jahre 2016 und 2017 genutzt (Hache, unveröffentlichte Daten). Eine genaue Beschreibung der Methode ist Schindler et al. (2014b) zu entnehmen.

### 2.2.2 Biologische Merkmale

Als eine der unabhängigen Variablen sollten die biologischen Merkmale der Arten in die Regressionsanalyse eingehen. Dazu wurde die Vegetation in der Nähe der Sedimentfallen mit einer Frequenzanalyse auf einem 1 m × 1 m großen Quadrat kartiert. Die Nomenklatur folgte Jäger (2016). Um die Rauheit der Vegetation mit den funktionellen Merkmalen beschreiben zu können, wurden folgende Merkmale der Arten gemessen: Kronenhöhe (Abstand zwischen dem höchsten ausgewachsenen Blatt und der Bodenoberfläche; cm), Stängelmasse (mg), Blattmasse (mg), Blattfläche (mm<sup>2</sup>) und spezifische Stängellänge (Länge eines Stängels geteilt durch seine Masse; mm/mg). Die spezifische Stängellänge beschreibt die Biegsamkeit des Stängels, da steifere Stängel dichtere, verholzte Strukturen ausbilden als flexible Stängel und daher eine höhere Masse pro Längeneinheit haben. Alle Merkmale der Salzwiesenarten wurden von zufällig ausgewählten Individuen im Feld nach den in Knevel et al. (2005) und Kleyer et al. (2019) beschriebenen Standards gesammelt, wenn auch nicht auf den gleichen Flächen wie die Kartierungen. Die meisten Pflanzen wurden auf Festland- und Inselsalzweisen in Niedersachsen gesammelt (Mellum, Spiekeroog, Leybucht, Norderland, Jadebucht). Wir gingen davon aus, dass aufgrund der regionalen Nähe dieser Flächen zu den Halligen und ihres ähnlichen Umweltregimes Merkmale, die von Populationen in anderen Salzwiesen gesammelt wurden, den Populationen auf den Halligen zugeordnet werden konnten.

Die biologischen Merkmale werden an vollentwickelten Individuen gemessen, die kurz vor der Samenreife stehen. Um die lokale Biomasseentnahme durch Rinder und Schafe zu berücksichtigen, mussten die größenabhängigen Merkmalswerte entsprechend der Bewirtschaftungsintensität angepasst werden. Diese ging aus Interviews mit Landwirten und anderen Landnutzern hervor. Durch Beweidung, die auf den Halligen in unterschiedlichen Intensitäten vorkommt, werden die Pflanzenhöhe und die oberirdische Biomasse verringert (Davidson et al. 2017). Das "Hallig-Programm", ein Landesprogramm zur Unterstützung der Halligbauern bei gleichzeitiger Förderung des Naturschutzes, beschränkt die Anzahl der Vieheinheiten pro Hektar (GVE) auf ca. 1 GVE\*ha-1, so dass die Beweidungsintensität hauptsächlich mit den Weidetagen und nicht mit den Besatzzahlen variiert. Die Untersuchungsflächen wurden entsprechend der erfassten Weideintensität in drei Gruppen eingeteilt: nicht beweidet, mittlere Weideintensität (< 300 Weidetage\*LSU) und hohe Weideintensität (> 300 Weidetage\*LSU). Auf der Grundlage eigener Beobachtungen wurde die Kronenhöhe der Individuen, die auf Flächen mit mittlerer und hoher Beweidungsintensität wachsen, auf 14±0,5 cm bzw. 7±0,5 cm reduziert. Anschließend wurden Stängel- und Blattmasse zu gleichen Anteilen reduziert.

### 2.2.3 Abstand zur Halligkante

Als abiotischer Faktor für die Analyse wurden die Abstände zur Halligkante (m) aus Luftbildern bestimmt.

### 2.3 Statistische Analyse

Mithilfe einer multiplen linearen Regression wurde der Einfluss der Entfernung zur Halligkante sowie der Rauheit der Vegetation auf den Aufwuchs der Salzwiesen bestimmt. Um die Voraussetzungen des Modells zu erfüllen, wählten wir geeignete Transformationen unter Verwendung des "bestNormalize"-Pakets (Peterson 2017) (siehe Tabelle 1 für angewandte Transformationen). Tabelle 1: Abhängige und unabhängige (abiotische und biotische) Variablen. Angegeben sind die funktionellen Eigenschaften der Pflanze, die in dieser Studie verwendeten Abkürzungen sowie die aggregierten Variabel, die auf einer Hauptkomponentenanalyse basieren (bei korrelierten biologischen Merkmalen) und die in die multiple lineare Regression einbezogen werden. Angegeben sind auch Einheiten und angewandte Transformation; ORQ, "ordered quantile normalization transformation".

Variable		Abk.	Aggr. Variable	Einheit	Transform.
abhängig	Aufwuchs	Aufw		mm	-
unabhängig; abiotisch	Distanz zur Halligkante	Dist		m	boxcox
unabhängig; biotisch	Kronenhöhe	KH		cm	ORQ
	Stängelmasse	SBM		mg	boxcox
	Blattmasse	BBM	'Spross-	mg	arcsin
	Blattfläche	BF	masse'	mm <sup>2</sup>	ORQ
	spezifische Stängellänge	SSL		mm/mg	ORQ



Abbildung 1: Zweidimensionale Illustrationen der Hauptkomponentenanalyse. Die Werte der ersten Achse (PC1) sind im Regressionsmodell als 'Sprossmasse' enthalten. BBM, Blattmasse; SBM, Stängelmasse; SSL, spezifische Stängellänge; BF, Blattfläche.

Hochkorrelierte biologische Merkmale wurden mit einer Hauptkomponentenanalyse aggregiert (siehe Abbildung 1 und Tabelle 2), um Multikollinearität im Regressionsmodell zu vermeiden. Die oberirdischen Merkmale Stängelmasse (SBM), Blattmasse (BBM), spezifische Stängellänge (SSL) und Blattfläche (BF) wurden unter Verwendung der Werte der ersten HKA-Achse, die 66 % der Variation der vier Variablen erklärten, zur 'Sprossmasse' aggregiert. SBM, BBM und BF waren positiv und SSL negativ mit der ersten HKA-Achse korreliert. Somit weisen steigende Werte der HKA-'Sprossmasse' auf eine zunehmende Rauheit der Vegetation hin (die Werte für häufige Salzwiesenarten liegen zwischen +3,06 und -2,27; siehe Tabelle 2 und Abbildung 1). Salzwiesenarten mit hohen 'Sprossmasse'-Werten waren *Limonium vulgare* (Mill.), *Aster tripolium* (L.), *Spartina anglica* (C.E. Hubb.), *Atriplex prostrata* (D.C.) und *Halimione portulacoides* (L.). Die Kronenhöhe war nicht mit den anderen Merkmalen korreliert und erfüllte somit die Annahme der Unabhängigkeit und ging direkt, d. h. ohne Aggregation, in die statistische Analyse ein.

Tabelle 2: Biologische Merkmale und die aggregierte Variable 'Sprossmasse' häufiger Salzwiesenarten entlang der Nordseeküste. KH, Kronenhöhe (cm); SBM, Stängelmasse (mg); BBM, Blattmasse (mg); SSL, spezifische Stängellänge (mm/mg); BF, Blattfläche (mm<sup>2</sup>).

Art	'Spross masse'	KH	SBM	BBM	SSL	BF
Agrostis stolonifera (L.)	-0,64	31,08	233,36	50,17	3,57	207,70
Armeria maritima (Mill.) Willd.	-0,38	5,88	197,30	353,11	3,94	68,30
Artemisia maritima (L.)	1,87	33,25	1765,65	675,61	0,66	208,50
Aster tripolium (L.)	2,89	60,84	10074,12	1174,96	0,60	663,90
Atriplex littoralis (L.)	2,37	70,13	17259,26	509,12	0,69	494,60
Atriplex prostrata (D.C.)	2,64	42,07	9519,62	2354,47	1,51	815,80
Cochlearia danica (L.)	-0,52	7,40	374,18	145,27	4,71	127,70
<i>Elytrigia atherica</i> (Link.)	1,41	38,90	1036,67	314,35	0,98	773,60
Elytrigia repens (L.) Gould	1,05	51,25	720,52	241,33	1,88	904,60
Festuca rubra (L.)	-0,96	37,42	144,79	228,60	6,86	126,10
Festuca rubra litoralis (G.F.W. Meyer)	-2,27	26,83	91,32	28,74	7,21	94,00
Glaux maritima (L.)	-1,97	8,10	72,94	67,14	4,48	17,00
Halimione portulacoides (L.) Aellen	2,51	28,71	9183,15	2869,74	0,95	186,20
Juncus gerardii (Lois.)	-1,36	24,72	129,48	54,96	5,04	139,40
Limonium vulgare (Mill.)	3,06	14,51	1193,61	4172,17	0,75	1681,30
Lolium perenne (L.)	0,35	34,18	620,65	99,19	2,16	461,60
Lotus corniculatus (L.)	-0,56	27,80	135,99	116,48	4,29	374,60
Plantago maritima (L.)	1,73	13,15	688,29	1239,13	3,08	1401,70
Poa pratensis (L.)	-0,52	31,09	213,71	86,00	4,42	285,70
Potentilla anserina (L.) Rydb.	-0,54	19,94	209,64	386,61	9,28	773,30
Puccinellia maritima (Huds.) Parl.	-1,17	28,82	209,93	62,52	4,63	76,20
Salicornia europaea (L.)	1,11	17,24	719,96	799,62	1,49	162,40
Spartina anglica (C.E. Hubb.)	2,83	44,27	1425,34	764,80	0,51	1380,20
Spergularia maritima (L.)	-1,15	26,75	548,28	126,09	1,93	46,55
Spergularia media (L.) C. Presl	-0,58	7,72	261,52	173,81	7,08	446,10
Suaeda maritima (L.) Dumort.	0,80	25,02	1602,82	494,34	1,27	32,00
Trifolium repens (L.)	-1,34	10,96	75,27	56,77	5,82	474,60
Triglochin maritimum (L.)	1,11	22,57	380,47	574,31	2,25	931,50
Vicia cracca (L.)	-0,87	27,50	112,19	162,58	4,51	142,10

Für jede Untersuchungsfläche wurde der mit der Abundanz der Arten gewichtete Mittelwert berechnet (community weighted mean, CWM; d. h. der durchschnittliche Merkmalswert oder aggregierte Score aller in einer Fläche vorkommenden Arten, gewichtet nach ihrer Häufigkeit; siehe Garnier et al. 2007).

Um die besten Prädikatoren für den Aufwuchs der Hallig-Salzwiesen auszuwählen und nicht signifikante auszuschließen, wurde eine stufenweise Variablenauswahl verwendet, um so das Modell mit dem niedrigsten AIC (Akaike Information Criterion) zu identifizieren. Alle statistischen Analysen wurden in R (Version 3.5.2) durchgeführt.

### 3 Ergebnisse

Die Salzwiesen der drei untersuchten Halligen zeigten einen Aufwuchs zwischen 0,4 bis 8,9 mm/a mit einem Mittelwert von 2,1 mm/a. Die Stärke des Aufwuchses konnte durch die Distanz zur Halligkante und durch die Kronenhöhe der Vegetation erklärt werden. Die Regression zeigte eine lineare Beziehung des Aufwuchses mit der Entfernung zur Halligkante und eine wannenförmige Beziehung mit der Kronenhöhe. Der Aufwuchs war auf Flächen nahe der Halligkante mit hoher Vegetation am höchsten (Abbildung 2 und Tabelle 3). Das Modell hat mit einem  $R^2 = 0,30$  (korrigiertes = 0,29) eine moderate Anpassungsgüte (Cohen 2013) (Abbildung 2, Tabelle 3).



Abbildung 2: Faktoren, die den Aufwuchs der Hallig-Salzwiesen erklären. Die Entfernung zur Halligkante ist boxcox-transformiert, ein Wert von -1 entspricht 77 m, ein Wert von +1 entspricht 431 m. Die Kronenhöhe (KH) ist ORQ-transformiert, ein Wert von -1 entspricht 6,8 cm, ein Wert von +1 entspricht 28,2 cm.

Tabelle 3: Ergebnisse des multiplen linearen Regressionsmodells und der schrittweisen Variablenauswahl. Angegeben sind Schätzungen, Standardfehler (SE), t-Werte und Signifikanzniveaus. Signifikante p-Werte unter  $\alpha = 0,05$  sind fettgedruckt dargestellt. Zusätzlich ist das Maß der Modellleistung gezeigt.

	Schät-	SE	t	D		
	zungen		-	r		
Konstante	1.70	0.15	11.669	< 0.001	***	
Distanz zur Halligkante	-0.68	0.14	-5.016	< 0.001	***	
CH <sup>2</sup>	0.82	0.19	4.195	< 0.001	***	
Adj. $R^2 = 0.29$ ; $F(2,110) = 23.7$ , $p < 0.001$						

### 4 Diskussion

Die Salzwiesen der Halligen sind besonders durch einen Anstieg des Meeresspiegels gefährdet, da sie nur knapp über dem mittleren Meeresspiegel liegen und keine Möglichkeit zur landwärtigen Migration haben. Um die Halligen langfristig zu erhalten, muss die Oberflächenhöhe der Salzwiesen durch Sedimentation stärker ansteigen als der Meeresspiegel. Der Interquartilsbereich des gemessenen Aufwuchses reicht von 0,9 bis 2,8 mm/a. Diese Streuung ist zum Teil auf den stochastischen Beitrag von Sturmfluten zurückzuführen. Im Gegensatz zum deterministischen tageszeitlichen Gezeitenregime, das auf den Halligen nicht zur Sedimentation beiträgt, kann eine einzelne Sturmflut große Mengen an Sedimenten oder organischem Material ablagern. Der Aufwuchs kann je nach dem Zusammentreffen von Hochwasser, Wellenenergie, Wasserströmung und Windrichtung stark variieren (Hache et al. 2019). So könnten auch Flächen in einem Jahr von hoher, in einem anderen Jahr von geringer Sedimentation profitieren. Darüber hinaus hängt die Sedimentation von der Schwebstoffkonzentration im Meerwasser ab (French 2006), ein Parameter, den wir nicht in die Modelle einbeziehen konnten. Die räumlich-zeitliche Stochastizität der Überflutungsintensität und des Sedimenttransports könnte die moderate Anpassungsgüte unserer Modelle erklären. Dies stimmt mit anderen Studien überein. So fanden beispielsweise Boorman et al. (1998) eine Korrelation zwischen der Vegetationshöhe und dem Aufwuchs in einem Salzwiesengebiet aber nicht in einem anderen. Dennoch zeigen unsere Ergebnisse, dass der Aufwuchs mit dem Abstand zur Halligkante und mit den biologischen Eigenschaften der Salzwiesenvegetation zusammenhängt. Die Rauheit der Vegetation verstärkt die Sedimentation auf nichtlineare Weise und unterstützt daher den Anstieg der Oberflächenhöhe.

### 4.1 Abiotische Faktoren

Die Entfernung zur Halligkante war eine signifikante Erklärungsvariable für den Aufwuchs der Hallig-Salzweisen, wobei der Aufwuchs weiter landeinwärts abnahm. Dies steht im Einklang mit früheren Arbeiten, die die höchste Sedimentation in der Nähe von Salzwiesenkanten zeigten (Cadol et al. 2014, Schindler et al. 2014a, Suchrow et al. 2012). Der Hauptgrund dafür dürfte eine starke Abnahme der Wellenenergie und der Strömungsstärke an der Grenze zwischen Wattenmeer und Salzwiesen sein, wo die Salzwiese die Energie dissipiert (Möller und Spencer 2002). Allerdings tritt das Wasser bei Sturmfluten nicht an

allen Stellen gleichstark über den Sommerdeich, so dass auch die Entfernung zu den Prielen einen Effekt haben wird (Temmerman et al. 2005), der hier aber nicht untersucht wurde.

### 4.2 Biotische Faktoren

Die Rauheit der Vegetation erhöhte signifikant den Aufwuchs der Hallig-Salzwiesen. Die Rauheit ist eine zusammengesetzte Eigenschaft, die durch die Kronenhöhe, die Blattfläche und -masse, die Stängelmasse und die Biegsamkeit des Stängels bestimmt wird.

Die Vegetation der Halligen ist hauptsächlich durch Vegetationsgemeinschaften der oberen Salzwiese mit unterschiedlicher Beweidungsintensität gekennzeichnet. Starke Beweidung verändert die Kronenhöhe, was zu einer niedrigen, homogenen Grasnarbe am Ende der Vegetationsperiode, wenn die Sturmflutsaison beginnt, führt. Brachliegende oder weniger stark beweidete Flächen können eine ähnliche Artenzusammensetzung wie die beweideten Teile aufweisen (hauptsächlich vom Typ Juncus gerardii-Festuca rubra), aber mit ausgewachsenen, oft alternden Stängeln. Daher war der wichtigste Rauheits-Indikator, der die Sedimentation auf Salzwiesen der Halligen erklärt, die Höhe der Vegetation. In Salzwiesen der Festlandküste, die einer natürlichen Sukzession von Pionierzone, Untere- und Obere Salzwiese mit sehr unterschiedlichen Arten folgen, wird der Aufwuchs besser durch Stängelmasse, Blattmasse, Blattfläche und Biegsamkeit des Stängels beschrieben (Bass et al., unveröffentlichte Daten). Ähnliche Ergebnisse zum Einfluss der Vegetation auf den Aufwuchs in Salzwiesen fanden Bouma et al. (2010) die zeigten, dass starre und aufrechte Stängel zu mehr Sedimentation führten. Zudem konnte gezeigt werden, dass Beweidung zu einer Änderung der Vegetation führt und dies wiederum eine Änderung in der Sedimentation bedingt (Andersen et al. 2011, Stock 2011).

Unsere Ergebnisse unterstützen das Konzept des 'ecosystem-engineering' in biogeomorphologischen Ökosystemen wie den Salzwiesen. Lebensraumgestaltende Arten (ecosystem engineers) sind in der Lage, die physikalischen Umweltbedingen ihrer unmittelbaren Umgebung zu modifizieren, was wiederum in einer Vielzahl Habitat-relevanter Prozesse resultiert. Eine Salzwiesenart, die besonders für ihren Effekt auf geologische Prozesse bekannt ist, ist *Spartina spp*. (Christiansen et al. 2000). In unserer Studie wiesen die Stängeleigenschaften von *Spartina anglica* auf eine hohe Stammsteifigkeit (*S. anglica* SSL: 0,51 mm/mg; Mittelwert aller Salzwiesenarten: 3,39 mm/mg) und eine hohe Blattfläche (*S. anglica* LA: 1380,2 mm<sup>2</sup>; Mittelwert aller Salzwiesenarten: 514,19 mm<sup>2</sup>) hin.

### 4.3 Implikationen für den Schutz der Halligen

Wir konnten zeigen, dass der Aufwuchs der Hallig-Salzwiesen durch biologische Merkmale der Pflanzen und die Entfernung zur Halligkante beeinflusst wird. Wir kommen daher zu dem Schluss, dass das Management der Vegetation geeignet sein kann, um den Aufwuchs der Salzwiesen zu modifizieren. Die Verwendung von biologischen Merkmalen anstelle von Artenidentitäten erhöhte die Vorhersagbarkeit, da Studien, die die Artenzusammensetzung als Prädiktor verwendeten, keine schlüssigen Auswirkungen auf den Aufwuchs fanden (Brown 1998, Silva et al. 2009). Empirisch gemessene biologische Merkmale beschreiben die Rauheit der Vegetation auf eine mechanistischere Art und Weise als die in der Hydraulik weit verbreiteten Rauheitsbeiwerte der Gauckler-Manning-Strickler-Formel (Chow 1959). Unsere Regressionsfunktion erlaubt es, in Verbindung mit den biologischen Merkmalen der Salzwiesenarten und Vegetationskarten, die für die Wattenmeerregion verfügbar sind, räumlich explizite Aufwuchsraten zu modellieren, um den Aufwuchs von Salzwiesen zu steuern. Auf den Halligen beispielsweise wäre eine niedrige Pflanzenhöhe nahe dem Halligrand und eine höhere Höhe in der Halligmitte günstig, um Sediment vom Halligrand ins Halliginnere zu verteilen. Dies könnte durch die Beweidungsintensität bewusst gesteuert werden. Hohe Beweidungsintensität insbesondere im Spätsommer und Herbst führt zu niedriger Vegetation während der Sturmflutsaison und damit zu geringer Sedimentation. Würden die Landwirte die Beweidung am Ende der Vegetationsperiode zur Halligkante hin verstärken und die Salzwiesen in der Halligmitte hochwachsen lassen, so könnte ein gleichmäßigerer Aufwuchs der Halligen erreicht werden. Vor der Umsetzung sollte diese Empfehlung mit Management-Experimenten und Sedimentationsmessungen geprüft werden.

### 5 Literaturverzeichnis

Andersen, T. J.; Svinth, S.; Pejrup, M.: Temporal variation of accumulation rates on a natural salt marsh in the 20th century – the impact of sea level rise and increased inundation frequency. In: Marine Geology, 279 (1–4), 178–187, 2011.

Anderson, M. E.; Smith, J. M.; McKay, S. K.: Wave dissipation by vegetation: US Army Engineer Research and Development Center Coastal and Hydraulics, 2011.

Boorman, L. A.; Garbutt, A.; Barratt, D.: The role of vegetation in determining patterns of the accretion of salt marsh sediment. In: Geological Society, London, Special Publications, 139 (1), 389–399, 1998.

Bouma, T.; De Vries, M.; Low, E.; Peralta, G.; Tánczos, I. v.; van de Koppel, J.; Herman, P. M. J.: Trade-offs related to ecosystem engineering: A case study on stiffness of emerging macrophytes. In: Ecology, 86 (8), 2187–2199, 2005.

Bouma, T. J.; de Vries, M. B.; Herman, P. M. J.: Comparing ecosystem engineering efficiency of two plant species with contrasting growth strategies. In: Ecology, 91 (9), 2696–2704, 2010.

Brown, S. L.: Sedimentation on a Humber saltmarsh. In: Geological Society, 139 (1), 69-83, 1998.

Cadol, D.; Engelhardt, K.; Elmore, A.; Sanders, G.: Elevation-dependent surface elevation gain in a tidal freshwater marsh and implications for marsh persistence. In: Limnology and Oceanography, 59 (3), 1065–1080, 2014.

Chow, V. T.: Open-channel hydraulics. New York, USA: McGraw-Hill New York. 1959.

Christiansen, T.; Wiberg, P. L.; Milligan, T. G.: Flow and sediment transport on a tidal salt marsh surface. In: Estuarine, Coastal and Shelf Science, 50 (3), 315–331, 2000.

Cohen, J.: Statistical power analysis for the behavioral sciences: Academic press. 2013.

Corenblit, D.; Baas, A.; Balke, T.; Bouma, T. J.; Fromard, F.; Garófano-Gómez, V.; González, E.; Gurnell, A. M.; Hortobágyi, B.; Julien, F.: Engineer pioneer plants respond to and affect geomorphic constraints similarly along water-terrestrial interfaces world-wide. In: Global Ecology and Biogeography, 24 (12), 1363–1376, 2015.

Craft, C.; Clough, J.; Ehman, J.; Joye, S.; Park, R.; Pennings, S.; Guo, H.; Machmuller, M.: Forecasting the effects of accelerated sea-level rise on tidal marsh ecosystem services. In: Frontiers in Ecology and the Environment, 7 (2), 73–78, 2009.

Davidson, K. E.; Fowler, M. S.; Skov, M. W.; Doerr, S. H.; Beaumont, N.; Griffin, J. N.: Livestock grazing alters multiple ecosystem properties and services in salt marshes: a metaanalysis. In: Journal of Applied Ecology, 54 (5), 1395–1405, 2017.

Donnelly, J. P.; Bertness, M. D.: Rapid shoreward encroachment of salt marsh cordgrass in response to accelerated sea-level rise. In: Proceedings of the National Academy of Sciences, 98 (25), 14218–14223, 2001.

Esselink, P.; Dijkema, K. S.; Reents, S.; Hageman, G.: Vertical accretion and profile changes in abandoned man-made tidal marshes in the Dollard estuary, the Netherlands. In: Journal of Coastal Research, 14 (2), 570–582, 1998.

Francalanci, S.; Bendoni, M.; Rinaldi, M.; Solari, L.: Ecomorphodynamic evolution of salt marshes: Experimental observations of bank retreat processes. In: Geomorphology, 195, 53–65, 2013.

French, J.: Tidal marsh sedimentation and resilience to environmental change: exploratory modelling of tidal, sea-level and sediment supply forcing in predominantly allochthonous systems. In: Marine Geology, 235 (1–4), 119–136, 2006.

Garnier, E.; Lavorel, S.; Ansquer, P.; Castro, H.; Cruz, P.; Dolezal, J.; Eriksson, O.; Fortunel, C.; Freitas, H.; Golodets, C.; Grigulis, K.; Jouany, C.; Kazakou, E.; Kigel, J.; Kleyer, M.; Lehsten, V.; Lepš, J.; Meier, T.; Pakeman, R.; Papadimitriou, M.; Papanastasis, V. P.; Quested, H.; Quétier, F.; Robson, M.; Roumet, C.; Rusch, G.; Skarpe, C.; Sternberg, M.; Theau, J.-P.; Thébault, A.; Vile, D.; Zarovali, M. P.: Assessing the effects of land-use change on plant traits, communities and ecosystem functioning in grasslands: a standard-ized methodology and lessons from an application to 11 European sites. In: Annals of Botany, 99 (5), 967–985, 2007.

Garnier, E.; Navas, M.-L.; Grigulis, K.: Plant functional diversity: Organism traits, community structure, and ecosystem properties. Oxford, UK: Oxford University Press. 2016.

Hache, I.; Karius, V.; Gutkuhn, J.; von Eynatten, H.: The development and application of an autonomous working turbidity measurement network: Assessing the spatial and temporal distribution of suspended particulate matter on tidal flats in the North Frisian Wadden Sea. In: Continental Shelf Research, 176, 36–50, 2019.

IPCC. Summary for Policymakers. In: Pörtner, H.-O.; Roberts, D. C.; Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Tignor, M.; Poloczanska, E.; Mintenbeck, K.; Alegria, M.; Nicolai, M.; Okem, A..; Petzold, J.; Rama, N. M. (Eds.), IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change: Geneva, Switzerland. in press.

Jäger, E. J.: Rothmaler-Exkursionsflora von Deutschland. Gefäßpflanzen: Grundband. Heidelberg, Germany: Springer Spektrum. 2016.

Kirwan, M. L.; Temmerman, S.; Skeehan, E. E.; Guntenspergen, G. R.; Fagherazzi, S.: Overestimation of marsh vulnerability to sea level rise. In: Nature Climate Change, 6 (3), 253–260, 2016.

Kleyer, M.: Distribution of plant functional types along gradients of disturbance intensity and resource supply in an agricultural landscape. In: Journal of Vegetation science, 10 (5), 697–708, 1999.

Kleyer, M.; Trinogga, J.; Cebrián-Piqueras, M. A.; Trenkamp, A.; Fløjgaard, C.; Ejrnæs, R.; Bouma, T. J.; Minden, V.; Maier, M.; Mantilla-Contreras, J.: Trait correlation network analysis identifies biomass allocation traits and stem specific length as hub traits in herbaceous perennial plants. In: Journal of Ecology, 107 (2), 829–842, 2019.

Knevel, I. C.; Bekker, R. M.; Kunzmann, D.; Stadler, M.; Thompson, K.: The LEDA traitbase collecting and measuring standards of life-history traits of the Northwest European Flora. Groningen, Netherlands: University of Groningen, Community and Conservation Ecology Group, 2005.

Kolker, A. S.; Kirwan, M. L.; Goodbred, S. L.; Cochran, J. K.: Global climate changes recorded in coastal wetland sediments: empirical observations linked to theoretical predictions. In: Geophysical Research Letters, 37 (14), L14706, 2010.

Lavorel, S.; McIntyre, S.; Landsberg, J.; Forbes, T. D. A.: Plant functional classifications: from general groups to specific groups based on response to disturbance. In: Trends in Ecology & Evolution, 12 (12), 474–478, 1997.

Manning, R.: On the flow of water in open channels and pipes. In: Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland 20, 161–207, 1891.

McFadden, L.; Spencer, T.; Nicholls, R. J.: Broad-scale modelling of coastal wetlands: what is required? In: Hydrobiologia, 577 (1), 5–15, 2007.

Möller, I.; Spencer, T.: Wave dissipation over macro-tidal saltmarshes: Effects of marsh edge typology and vegetation change. In: Journal of Coastal Research, 36 (1), 506–521, 2002.

Morris, J. T.; Sundareshwar, P. V.; Nietch, C. T.; Kjerfve, B.; Cahoon, D. R.: Responses of coastal wetlands to rising sea level. In: Ecology, 83 (10), 2869–2877, 2002.

Mudd, S. M.; D'Alpaos, A.; Morris, J. T.: How does vegetation affect sedimentation on tidal marshes? Investigating particle capture and hydrodynamic controls on biologically mediated sedimentation. In: Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 115, F03029, 2010.

Murray, N. J.; Clemens, R. S.; Phinn, S. R.; Possingham, H. P.; Fuller, R. A.: Tracking the rapid loss of tidal wetlands in the Yellow Sea. In: Frontiers in Ecology and the Environment, 12 (5), 267–272, 2014.

Paul, M.; Bouma, T. J.; Amos, C. L.: Wave attenuation by submerged vegetation: combining the effect of organism traits and tidal current. Marine Ecology Progress Series, 444, 31–41, 2012.

Peterson, R. A.: Estimating normalization transformations with bestNormalize. 2017.

Reef, R.; Schuerch, M.; Christie, E. K.; Möller, I.; Spencer, T.: The effect of vegetation height and biomass on the sediment budget of a European saltmarsh. In: Estuarine, Coastal and Shelf Science, 202, 125–133, 2018.

Rupprecht, F.; Möller, I.; Paul, M.; Kudella, M.; Spencer, T.; Van Wesenbeeck, B. K.; Wolters, G.; Jensen, K.; Bouma, T. J.; Miranda-Lange, M.: Vegetation-wave interactions in salt marshes under storm surge conditions. In: Ecological Engineering, 100, 301–315, 2017.

Schile, L. M.; Callaway, J. C.; Morris, J. T.; Stralberg, D.; Parker, V. T.; Kelly, M.: Modeling tidal marsh distribution with sea-level rise: evaluating the role of vegetation, sediment, and upland habitat in marsh resiliency. In: Plos One, 9 (2), e88760, 2014.

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

Schindler, M.; Karius, V.; Deicke, M.; von Eynatten, H.: Measuring sediment deposition and accretion on anthropogenic marshland–Part I: Methodical evaluation and development. In: Estuarine, Coastal and Shelf Science, 151, 236–245, 2014b.

Silva, H.; Dias, J.; Caçador, I.: Is the salt marsh vegetation a determining factor in the sedimentation processes? In: Hydrobiologia, 621 (1), 33–47, 2009.

Stock, M.: Patterns in surface elevation change across a temperate salt marsh platform in relation to sea-level rise. In: Coastline Reports, 17 (3), 33–48, 2011.

Strickler, A.: Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauhigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen. Bern, Schweiz: Eidg. Amt für Wasserwirtschaft, 1923.

Suchrow, S.; Pohlmann, N.; Stock, M.; Jensen, K.: Long-term surface elevation changes in German North Sea salt marshes. In: Estuarine, Coastal and Shelf Science, 98, 71–83, 2012.

Temmerman, S.; Bouma, T. J.; Govers, G.; Wang, Z. B.; De Vries, M. B.; Herman, P. M. J.: Impact of vegetation on flow routing and sedimentation patterns: three-dimensional modeling for a tidal marsh. In: Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 110, F04019, 2005.

Temmerman, S.; Bouma, T. J.; Van de Koppel, J.; Van der Wal, D.; De Vries, M. B.; Herman, P. M. J.: Vegetation causes channel erosion in a tidal landscape. In: Geology, 35 (7), 631–634, 2007.

Temmerman, S.; Moonen, P.; Schoelynck, J.; Govers, G.; Bouma, T. J.: Impact of vegetation die-off on spatial flow patterns over a tidal marsh. Geophysical Research Letters, 39 (3), L03406, 2012.

Watson, E. B.; Wigand, C.; Davey, E. W.; Andrews, H. M.; Bishop, J.; Raposa, K. B.: Wetland loss patterns and inundation-productivity relationships prognosticate widespread salt marsh loss for southern New England. In: Estuaries and Coasts, 40 (3), 662–681, 2017.

Widdows, J.; Pope, N. D.; Brinsley, M. D.: Effect of Spartina anglica stems on near-bed hydrodynamics, sediment erodability and morphological changes on an intertidal mudflat. In: Marine Ecology Progress Series, 362, 45–57, 2008.

### Tools for the Improvement of the Efficiency and Sustainability of Shore Nourishments – Results of the research project STENCIL

Franziska Staudt<sup>1</sup>, Johanna Wolbring<sup>2</sup>, David Schürenkamp<sup>2</sup>, Benedikt Bratz<sup>2</sup>, Rik Gijsman<sup>3</sup>, Jan Visscher<sup>3</sup>, Huichen Zhang<sup>1</sup>, Finn Mielck<sup>4</sup>, H. Christian Hass<sup>4†</sup>, Caroline Ganal<sup>5</sup>, Björn Deutschmann<sup>6</sup>, Stefan Schimmels<sup>1</sup>, Torsten Schlurmann<sup>3</sup>, Nils Goseberg<sup>2</sup>, Holger Schüttrumpf<sup>5</sup>, Henner Hollert<sup>6</sup> and Karen Wiltshire<sup>4</sup>

- <sup>1</sup> Forschungszentrum Küste, Leibniz University Hannover and Technische Universität Braunschweig
- <sup>2</sup> Technische Universität Braunschweig, Leichtweiß-Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources
- <sup>3</sup> Leibniz University Hannover, Ludwig Franzius Institute of Hydraulic, Estuarine and Coastal Engineering
- <sup>4</sup> Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Wadden Sea Research Station
- <sup>5</sup> RWTH Aachen University, Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management
- <sup>6</sup> RWTH Aachen University, Institute for Environmental Research

### Summary

Shore nourishments have been carried out worldwide for several decades and are nowadays seen as an almost routine coastal protection measure. However, the recent paradigm shift to an Integrated Coastal Zone Management (ICZM) and to an Ecosystem Approach to Management (EAM) requires new concepts, models and tools for the implementation of more sustainable and environmentally friendly shore nourishments. The interdisciplinary research project STENCIL aimed at making a first step towards the long-term goal of establishing an EAM for shore nourishments. Joining the expertise of coastal engineers, geologists and ecologists, the project has provided improved tools and methods for the prediction of coastal hydro- and morphodynamics and related ecological impacts. A combination of field measurements, laboratory experiments and analytical as well as numerical models has resulted in valuable new data sets. This paper summarizes the most important scientific outcomes of the project, like the use of Artificial Neural Networks (ANN) to overcome weaknesses of current hydrodynamic numerical modelling tools; the analysis and interpretation of long-term beach profile data using a newly developed datadriven methodology, allowing for a better assessment of the morphological development of beach and foreshore nourishments; the improvement of a sediment transport model for mixed sand based on a unique large-scale experiment in the Large Wave Flume (GWK) carried out within the project; an impact assessment of dredging activities around Sylt, based on six extensive survey cruises at the sand extraction sites "Westerland II & III"; and the application of the hydrotoxicology method for the same study site to determine the influence of sand extraction on chemical-physical water quality parameters and the ecotoxicological potential. These interdisciplinary project results were combined with a comprehensive state of the art review in a SWOT analysis for shore nourishments, which shall provide a tool for decision-makers and a basis for upcoming research projects addressing the identified knowledge gaps.

### Keywords

coastal protection, shore nourishment, coastal zone management, sustainability, environmental impacts, ecosystem approach

### Zusammenfassung

Seit mehreren Jahrzehnten werden weltweit Sandaufspülungen durchgeführt, die heute entsprechend zu den gängigen Küstenschutzmaßnahmen zählen. Der aktuelle Paradigmenwechsel, hin zu einem Integrierten Küstenzonenmanagement (IKZM) und einem "Ecosystem Approach to Management" (EAM), erfordert jedoch neue Konzepte, Modelle und Werkzeuge, um Sandaufspülungen nachhaltiger und umweltfreundlicher umzusetzen als bisher. Mit dem interdisziplinären Forschungsprojekt STENCIL sollte ein erster Schritt in Richtung des langfristigen Ziels der Etablierung eines EAM für Sandaufspülungen geleistet werden. Durch die gemeinsame Expertise von Küsteningenieuren, Geologen und Ökologen lieferte das Projekt Werkzeuge und Methoden zur verbesserten Vorhersage der Hydro- und Morphodynamik an der Küste sowie zur Abschätzung der ökologischen Auswirkungen. Weiterhin entstanden wertvolle Datensätze aus Feldmessungen und Laborexperimenten sowie aus der Anwendung analytischer und numerischer Modelle. Dieser Artikel fasst die wesentlichen wissenschaftlichen Ergebnisse des Projekts zusammen: die Anwendung Künstlicher Neuronaler Netzwerke (KNN), um Schwächen aktueller hydrodynamisch-numerischer Modelle auszugleichen; die Analyse und Interpretation langfristiger Strandprofildaten mit einer neuen datengetriebenen Methode, die eine bessere Bewertung der morphologischen Entwicklung von Strand- und Vorstrandaufspülungen erlaubt; die Verbesserung eines Sedimenttransportmodells für gemischte Sande, basierend auf einem einzigartigen großmaßstäblichen Modellversuch, der im Rahmen des Projekts im Großen Wellenkanal (GWK) durchgeführt wurde; eine Abschätzung der Auswirkungen von Sandentnahmen vor Sylt, auf Grundlage von sechs umfangreichen Messfahrten zu den Sandentnahmegebieten "Westerland II & III"; sowie die Anwendung hydrotoxikologischer Methoden zur Bestimmung des Einflusses von Sandentnahmen auf die chemisch-physikalischen Wasserqualitätsparameter und auf das ökotoxikologische Potential. Diese interdisziplinären Projektergebnisse wurden mit einer umfangreichen Studie zum aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik kombiniert und in einer SWOT-Analyse für Sandaufspülungen zusammengefasst, welche eine Entscheidungsunterstützung für die Praxis und eine Grundlage für zukünftige Forschungsprojekte darstellt.

### Schlagwörter

Küstenschutz, Sandaufspülung, Küstenzonenmanagement, Nachhaltigkeit, Umweltverträglichkeit, Ökosystemansatz

### 1 Introduction

Shore nourishments, i.e. refilling of the natural beach profile with imported or recycled sediment, are an important part of coastal protection and management strategies worldwide. Over the past few centuries, sound practical experience has been gathered by many countries, based on monitoring of morphological shoreline changes and scientific studies on beach erosion.

Although coastal engineers consider nourishments to be "soft" or "low-regret" coastal protection measures - in contrast to "hard", fixed measures like breakwaters or seawalls the sediment extraction and nourishment activities may have significant large-scale and long-term impacts on the coastal environment: Sediment extraction and dumping activities disturb or destroy marine habitats (e.g. Greene 2002, De Jong et al. 2015, Rosov et al. 2016). Regular activities within the same coastal areas inhibit the regeneration of benthic communities, which can take up to several years depending on the species and local conditions (Speybroeck 2007, Leewis et al. 2012, Rosov et al. 2016, Wooldridge et al. 2016). In case the sediment characteristics are significantly altered, a shift in benthic species occurs (Speybroeck et al. 2006, Vanden Eede et al. 2014, Wooldridge et al. 2016). Large management schemes with regular re-nourishments change the sediment composition and morphology along whole coastal stretches (Armstrong and Lazarus 2019). Despite several known deteriorating impacts on the marine environment, nourishments are often preferred over concrete structures, as they are perceived to be more "natural". However, many ecological impacts, especially those that only surface in the longer term, are not fully understood; their consequences could e.g. significantly affect the food web and subsequently local and regional fisheries (Essink et al. 1997, Vanden Eede et al. 2014).

In order to reach the UN's Sustainable Development Goals (e.g. Goal 14: Oceans) or the goals of the EU's Marine Strategy Framework Directive (good environmental status), coastal protection strategies must adhere to the ecosystem approach, i.e. offer efficient and sustainable protection of people and infrastructure, while at the same time maintaining or improving the environmental status of the coastline. To successfully implement sustainable coastal management strategies, it is thus crucial 1) to improve the understanding of the morphological and ecological impacts, and 2) to optimize the extraction and nourishment activities in order to maximize their efficiency while minimizing their ecological impact. To approach this demand, the research project STENCIL (Strategies and Tools for Environment-friendly Shore Nourishments as Climate Change Impact Low-Regret Measures), which was funded by the German Ministry for Education and Research from 2016 to 2019 (contract no. 03F0761 A-D), aimed to develop new tools for the design of sustainable nourishments and to provide the next step towards an ecosystem approach for shore nourishments.

This paper describes the most important outcomes of the project, which covered six work areas, combining the expertise of coastal engineers, geologists and ecologists. Five work areas (chapters 2–6) focused on the development of new tools and methods (e.g. numerical models, laboratory methods or protocols) that support the planning of physically and ecologically sustainable sediment extraction and nourishment activities. In addition, the research results are used to improve the understanding of hydrodynamic, morphodynamic and biological processes in the coastal zone. While chapter 2 investigates hydrodynamic processes in the coastal zone, chapters 3 and 4 address coastal morphodynamics on meso- and microscales, respectively (with time scales ranging from seconds to years). Chapter 5 in turn investigates regional refill processes at sediment extraction sites. Chapter 6 combines knowledge about sediment dynamics with ecotoxicology to investigate potential impacts of fine sediment on marine organisms. In the overarching sixth work area (chapter 7), all project partners collaborated in the development of a comprehensive,

interdisciplinary tool to help decision-makers and coastal managers to choose a suitable nourishment type (i.e. location, repetition rate etc.) for their application.

### 2 Assessment and modeling of storm-tides and nearshore waves/currents

The first part of STENCIL aims to identify methods for the modelling of processes which are relevant for the development of physically sustainable sand nourishments for coastal protection. Detailed knowledge about coastal hydrodynamics is essential for assessment and classification of coastal morphologic processes. Especially the processes driving sediment transport – such as sea state, tides, winds and currents – should be understood to apply well-directed coastal protection measures. A main question regarding the design of sand nourishment concerns the ideal placement within the coastal profile and the effect of the nourishment body on the coastal hydrodynamics. As part of STENCIL, different sand nourishment strategies were investigated regarding their impacts on hydrodynamic processes in coastal areas, storm surge-induced current properties, and the potential lifetime of sand nourishments.

The different nourishment measures are classified – regarding the placement location – as supralittoral nourishments, beach nourishments and shoreface nourishments. The deduction of an appropriate modelling system for analyzing the processes mentioned above is an integral part of the project's objective. The main intention is to identify an optimal sand nourishment strategy, which extends the nourishment lifetime and protects the shore from storm surge-induced erosion.

### 2.1 Methodology: Pilot Study Data Acquisition, Analysis and Modelling

In the framework of STENCIL, a comprehensive database of hydrologic data sets (water levels, sea states, currents, meteorological data, and bathymetry) within the pilot study domain west of Sylt was assembled. Data from the following measurement stations was used for the analysis: wave buoy 'Sylt' (~38 km west of Westerland, operated by HZG), wave buoy 'Westerland' (~5 km west of Westerland, operated by LKN.SH), measuring pile 'Westerland' (<2 km west of Westerland, operated by LKN.SH), and the wave buoy 'Bunkerhill' (in the southern area of Sylt, <1 km away from the coast, operated by HZG). The data was provided by the German institutions LKN.SH (Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein), HZG (Helmholtz-Zentrum Geesthacht) and WSV (Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung).

Extreme events were analyzed statistically to determine magnitudes which are relevant for the design of sand nourishments. The long-term data of the buoy 'Westerland' is used as input data and for boundary conditions in the simulation models. *Storm surge conditions* and *mean conditions* are differentiated.

In a first step, numerical model results were validated and compared with experimental results (chapter 2.2). Subsequently, we set up a modelling system which combines processbased hydrodynamic modelling and data-based modelling (chapter 2.3). Additionally, physical experiments with a fixed bed were conducted in order to measure resulting currents within the surf zone – induced by different sand nourishment strategies (chapter 2.4).

#### 2.2 Numerical Model: Assessment and Validation

The performance of two common open source numerical models *XBeach* (https://oss.deltares.nl/web/xbeach/) and *Delft3D* (https://oss.deltares.nl/web/delft3d) was evaluated focusing on the representation of 3D surf zone processes. The model results were validated and compared with available data sets of large-scale flume experiments by van der A et al. (2017) in order to determine the models' advantages and applicability. The hydrodynamic parameters and the bathymetry of the experiments are similar to those of the pilot study of STENCIL. The research focused on the detailed investigation of hydrodynamics – vertical flow profile, including the ground-level boundary layer and turbulence – in the case of plunging breakers (fixed bed, regular waves). The water level, mean flow velocity and turbulent kinetic energy were measured. Details about the experimental setup can be found in van der A et al. 2017.

Figure 1 shows the graphs of measured and numerically calculated (best adjustments) wave heights  $\overline{H}$ . Offshore, where the water depth is constant, both *XBeach* and *Delft3D* calculate the given wave heights. However, discrepancies between measurement and calculations were observed. Both models give an inadequate result for the energy dissipation due to wave breaking. While *XBeach* (non-hydrostatic mode) is able to reproduce the wave shape, it does not manage to model the wave breaking process in detail at the same time. The lower energy dissipation is affecting the other hydrodynamic parameters, such as the undertow. The 'roller model' in *Delft3D* achieves a substantially better magnitude of energy dissipation but cannot reproduce the wave shape properly. These results underline the models' limitations in the coastal area. The shortcomings of existing models have led to the development of a combined data- and process-based model for reproducing the coastal processes in the pilot study domain.



Figure 1: Curves of measured (blue, data source: van der A et al. 2017) and calculated wave heights (orange: Delft3D, yellow: XBeach) alongside wave flume axis.

### 2.3 Combined Data- and Process-based Model for the Pilot Study

The measured sea state parameters of the buoy 'Bunkerhill' differ from those of buoys 'Sylt' and 'Westerland' due to the bathymetry's impact. An artificial neural network (ANN) was configured to predict the sea state parameters at the location of buoy 'Bunkerhill'. The sea state parameters of buoy 'Sylt' ( $H_{m0}$  and  $\theta$ ) and measuring pile 'List' ( $u_{10}$  and  $\theta_{wind}$ ) are used as input data. Thus, the ANN's capability of transforming sea state parameters into nearshore conditions can be evaluated. The ANN does not model the bathymetry's impact explicitly, but implicitly by considering the weighted functional connectivity of input and output data (Browne et al. 2007). Since the calculation is based on time series, a nonlinear autoregressive model with exogenous input (NARX) is used (Beale et al. 2018). Recurrent networks with backpropagation are appropriate, especially for this kind of prediction (Mandal and Prabaharan 2006). The NARX model includes not only exogenous input values (buoy 'Sylt' and measuring pile 'List') but also past values of the intended output (buoy 'Bunkerhill'), and thus considers the sea state's temporal evolution.

For model evaluation, both the hydrodynamic model and the neural network calculated the resulting sea state conditions at buoy 'Bunkerhill' for selected individual storm surge events. Both models received data of buoy 'Sylt' as input (wave height  $H_{m0}$  and wave angle  $\theta$ ) and additional information from the *CoastDat* database about wave period  $T_p$  and wave angle variance. The selection criteria for the storm surge events was a significant wave height that satisfies an exceeding probability of P = 1 % at least.

A regression analysis showed the large statistical variation of estimated magnitudes vs. physically measured values. Both the ANN and the *Delft3D* calculation overestimate lower wave heights ( $H_{m0} < 2 \text{ m}$ ), while both models generally underestimate higher waves. In general, the ANN achieves a better approximation.

The discrepancies of the *Delft3D* model are induced i.a. by the input data: the modelbased *CoastDat* database contains good sea state estimations, but calculated water levels during storm surges are not sufficiently accurate. As soon as the *EasyGSH* database is entirely available, this is expected to improve the boundary condition control. In near-shore areas, a better sea state prediction is obtained by the data-based model. The buoy 'Bunkerhill' is already located in the transition zone, so that nonlinear processes are relevant for the sea state development here.

### 2.4 Physical Experiments

Systematic studies about the vertical current profile within the surf zone, which can be typically found along Sylt's west coast, are either unavailable or not detailed enough for investigating the effectiveness of different sand nourishment strategies. For this reason, scaled experiments were conducted in the wave flume of LWI (Leichtweiß-Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources) in Braunschweig. The experiments were designed according to the pilot study. The objective was to investigate the effectiveness of various nourishment strategies. The experiments' scaling is based on the Froude similarity (scaling factor 1/20). The following beach profiles and nourishment strategies were investigated (cf. Figure 2):

- 1. The **Baseline Profile (Setup 0, S0)** is derived from long-term measurements during winter (October to March) at the cross-profile km 0+600 around Westerland.
- 2. The **Outer Shoreface Nourishment (Setup 1, S1)** is based on actual nourishments from 2017 at the location mentioned above.
- 3. The Inner Shoreface Nourishment (Setup 2, S2) enlarges the reef towards the coast.
- 4. The **Beach Nourishment (Setup 3, S3)** increases the sand volume within the zone of fluctuating water levels.



Figure 2: Model Setup: Cross Profiles of tested Nourishment Strategies and Wave Gauges.

The test parameters are derived from the model results for buoy and gauge 'Westerland'. Since nourishments in the pilot study domain are repeated once a year, the water levels and wave parameters are based on annual indexes (see Table 1). Storm surge events induce higher seaward currents; subsequently, the tests focused on extreme values with an exceedance of 1 % or an annuality of 1 a. In each test run, a JONSWAP spectrum with a minimum of 1000 waves was generated.

No.	water level scenario*	water level (m NHN)	scenario	wave height H <sub>m0</sub> (m)	peak period T <sub>p</sub> (s)
1.1	MHWL	0.84	mean conditions	0.87	6.1
1.2	MSL	0.00	mean conditions	0.87	6.1
1.3	MLWL	-0.97	mean conditions	0.87	6.1
2.1	MHHWL	2.58	P = 1 %	3.50	11.0
2.2	MHLWL	0.97	P = 1 %	3.50	11.0
3.1	MHHWL	2.58	1 a max.	4.71	13.0

Table 1: Physical Experiments of STENCIL-B: Test Series (prototype scale).

\* MHWL = mean high water level, MSL = mean sea level, MLWL = mean low water level, MHHWL = mean highest high water level, MHLWL = mean highest low water level

At three locations, velocity sensors measured the horizontal flow velocity alongside the flume axis: on the **reef top**, in the **reef trough** ( $x \sim 13$  m) and on the **reef slope** in between ( $x \sim 18$  m). Five sensors were placed at each location, allocated equidistantly in the vertical to record the vertical current profile. All measuring devices sampled at a rate of 60 Hz. During post-processing of velocity data, a low pass filter was used to remove frequencies

above 50 Hz, thus reducing noise and improving data reliability. Furthermore, data with correlation < 70 % (Sulaiman et al. 2013) and signal-to-noise ratio SNR < 10 (Strom and Papanicolaou 2007) were eliminated. The phase-space method by Goring and Nikora (2002) was applied to find and eliminate spikes.



Figure 3: Normalised velocity profiles on the reef top of all tested nourishment strategies and scenario 1.1.

For each sensor in the vertical, the **time-averaged velocity**  $\bar{\mathbf{u}}$  (perpendicular to shoreline) was calculated for delineation of the vertical current profiles. As an example, Figure 3 shows the resulting velocity profiles above the reef for each nourishment strategy under mean conditions (scenario 1.1).

Both, the vertical sensor positions (vertical axis) and the mean velocities (horizontal axis) are referred to the local water depth and thus dimensionless. The measured averaged values of each sensor are connected in the plot for better visualization.

The measurements allow an undertow comparison of all nourishment strategies. In the example shown above – mean high tide (MHWL) and moderate wave conditions – the beach nourishment (S3) causes the highest undertow velocity above the reef. Hence, its transport capacity is higher than the reference (baseline profile, S0) under mean conditions which can cause more disadvantageous conditions regarding transport capacity and morphodynamic evolution. The other strategies' velocities have similar magnitudes at the lowest measuring position, but their curves diverge upwards.

The post-processed results enable us to assess the nourishment strategies in respect to undertow velocity and transport capacity, referring to the baseline profile (S0) as reference. The mean velocities of the lowest sensor serve as an assessment criterion. If the nourishment undertow is similar to the reference undertow, it is classified as neutral ( $\circ$ ); accordingly, the nourishments are classified into undertow velocities that are higher (–) or lower (+, ++) than in the reference case. For the reef top and the reef slope, the classifications of all nourishment measures (S1 – S3) are listed in Table 2. The undertow velocities in the reef trough (not shown in the table) differ only slightly under moderate conditions (scenarios 1.1 – 1.3). In the case of storm surges and high water levels (scenarios 2.1 and 3.1), the beach nourishment (S3) causes higher undertow velocity in the trough.

		Reef Top			Reef Slope		
conditions	<b>S</b> 1	<b>S</b> 2	<b>S</b> 3	<b>S</b> 1	<b>S</b> 2	<b>S</b> 3	
mean	1.1 MHWL	0	0	_	0	_	0
mean	1.2 MSL	0	0	0	0	_	0
mean	1.3 MLWL	_	0	0	0	_	0
storm surge	2.1 MHHWL	0	_	++	++	0	0
storm surge	3.1 MHHWL	0	_	+	++	++	0
extreme	2.2 MHLWL	+	0	+	++	++	0

Table 2: Nourishment assessment based on baseline profile (S0) velocities.

deviation less than 7.5 % (°), velocity < 92.5 % of baseline velocity (+), < 80 % (++), > 107.5 % (–)

In general, at mean low tide (MLWL) the outer shoreface nourishment (S1) leads to the highest undertow velocity on the reef top. In the case of mean wave conditions and mean high tide (MHWL), the beach nourishment (S3) results in a significantly increased mean near-bed velocity above the reef referring to the baseline profile (S0). For extreme events and high water levels (scenarios 2.1 and 3.1), the beach nourishment (S3) results in lower mean near-bed velocities than reference, while the inner shoreface nourishment (S2) exceeds the reference velocities above the bar. In general, the outer shoreface nourishment (S1) seems to lead to the largest reduction in undertow velocities and transport capacity, therefore appearing to be the most efficient measure with equal sand volume.

### 2.5 Conclusions

The investigations showed that common 2D-models like *Delft3D* and *XBeach* cannot appropriately model the undertow current. The insufficient modelling of hydrodynamic processes has a direct effect on the storm surge-induced erosion and morphodynamics. Databased modelling with ANN resulted in significantly better sea state prediction in the pilot study domain than hydrodynamic modelling on its own.

### 3 Drivers and effects of morphological developments of beach and foreshore nourishments on meso-scale domain – data mining and modeling

Although regular beach profiles are collected along many nourished coastal stretches to derive the efficiency of the nourishment activities, the morphological behavior of different nourishment types (i.e. beach vs. shoreface nourishment) is still not fully understood. To improve this understanding and to provide the next step towards the optimization of nourishment design, the morphological behavior and the effects of beach and shoreface nourishments on sandy coastal profiles were studied with a newly developed data-driven methodology, following Zorndt et al. (2010) and Zorndt et al. (2011).

### 3.1 Data mining and setup of a data basis

The elevation (z) of sandy coastal profiles of several islands in the Wadden Sea has been measured for several decades. The work within this part of the project was focused on data sets from two Wadden Sea islands: 1) Ameland in the Netherlands and 2) Sylt in Germany. Since 1965, Rijkswaterstaat (RWS) has collected regular coastal profiles of Ameland by combining aerial photogrammetry (emerged part of the profile) with echosounding (submerged part of the profile). Starting in 1972, the coastal profiles on Sylt have been collected regularly by the Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH), using a combination of RTK-GPS (emerged part of the profile) and echosounding (submerged part of the profile).

To develop a data-driven methodology, important characteristics of the data set were the cross-shore extent of the measurements ( $\Delta x$ ), the spatial interval in cross-shore ( $\partial x$ ) and longshore ( $\partial y$ ) direction, and the measurement frequency ( $f_s$ ). Figure 4 presents these characteristics of the two data sets by means of two example transects.



Figure 4: Typical data set characteristics of a coastal profile along Ameland (left) and Sylt (right) (Gijsman et al. 2018).

The coastal profiles of Ameland were collected with  $f_s = 1 \text{ yr}^{-1}$ . In time,  $\partial x$  decreased from 20 m to 5 m and  $\Delta x$  increased from 800 m to 3000 m from the shoreline (cross-shore coordinate x = 0 m). The transects in Ameland were separated by  $\partial y = 200$  m (Gijsman et al. 2019c). In Sylt the monitoring frequency was higher, between 1 and 4 measurements were performed per year.  $\partial x$  typically ranged between 20 m and 1 m while the maximum  $\Delta x$  was 1700 m, often depending on the nourishment that was measured (Gijsman et al. 2018). Transects on Sylt were separated by  $\partial y = 50$  m (LKN.SH 2015). In general, the Ameland data set was measured to evaluate the long-term morphological development of the shoreline, while the Sylt data set was collected to assess the direct necessity of a beach and/or shoreface nourishment as well as their behavior.

Table 3: The nourishment strategies at the two field study sites between 1965 and 2017 (adapted from Gijsman et al. 2018), showing nourishment lifetime  $L_n$ , nourishment density  $c_n$  and the horizontal alongshore coordinate  $y_n$  of the nourishments.

	Beach nourishments				Shoreface nourishments				
	No.	L <sub>n</sub> (a)	$c_n$ (m <sup>3</sup> /m)	yn (km)	No.	L <sub>n</sub> (a)	$c_n$ (m <sup>3</sup> /m)	yn (km)	
Ameland	5	4-5	180-240	4-8	7	3-5	250-560	2-8	
Sylt	147	1	50-675	0.2-5	10	1-2	150-450	0.5-2	

Beach nourishments were placed on the emerged part of the profile between z = 2 m and z = 5 m above mean sea level (z = 0 m). Shoreface nourishments were placed on the submerged part of the profile between z = -3 m and z = -6 m. The general ranges of the design characteristics of these nourishments are summarized in Table 3.

Different design strategies were used in the two nourishment areas (Wilmink et al. 2017). While a total of 5 beach nourishments and 7 shoreface nourishments were constructed on Ameland until 2017, 147 beach nourishments and 10 shoreface nourishments were constructed on Sylt. These different approaches allowed for studying the effects of different nourishment types.

### 3.2 Natural morphological processes

Before reporting on the morphological behavior and effects of the nourishments, the natural long-term morphological behavior of the coastal profiles at the two study sites is presented. Two characteristic profiles in Ameland (transect 1600) and Sylt (transect 0+205) indicated significant differences in morphological evolution and long-term equilibrium. Figure 5 presents the individual measurements between the beginning of the data set and 2017 (grey lines), as well as the average profile (thick black line) and standard deviation (thin black line).



Figure 5: Long-term morphological behavior at two transects on Ameland (left) and Sylt (right) (Gijsman et al. 2018).

Between elevations of z = 0 m and z = 2 m, the average Ameland profile was more gently sloped (±1:50) than the Sylt profile (±1:17.5) (Gijsman et al. 2018). Furthermore, the Ameland profile is characterized by 2-3 consecutive sandbars that migrate in offshore direction on the timescale of years (Ruessink et al. 2003). This can also be observed in Figure 4, as well as by the increasing standard deviation in the submerged part of the profile. In Sylt, the present sandbar was relatively stable and the deviations in the emerged and submerged parts of the profile were the direct result of beach and shoreface nourishments and the preceding beach erosion. The Wright and Short (1984) beach state model classifies the beaches as intermediate-dissipative (Ameland) and intermediate-reflective (Sylt). The difference in natural morphology affects both the analysis of nourishment interventions as well as the behavior of the nourishments.

### 3.3 Data-driven methodology to assess nourishment lifetimes

In the recent design practice of nourishments, usually a certain nourishment lifetime ( $L_n$ ) was projected (Hanson et al. 2002). The nourishment lifetime indicates the period of time in which the nourishment is expected to have a positive contribution to the beach profile. For beach nourishments, this means that the nourishment leads to a larger volume of sand on the emerged part of the beach, either compared to the pre-nourishment volume or to a defined reference volume. For shoreface nourishments, this means a larger volume of sand in the submerged part of the profile. However, since shoreface nourishments are placed in the morphologically active part of beach profile, they continuously interact with ongoing natural morphological processes such as the migration of nearshore sandbars (Gijsman et al. 2019c). Therefore, the period of time that the nourishment interferes with the natural behavior of the nearshore sandbar has also been used as a definition of the shoreface nourishment lifetime (Ojeda et al. 2008).

Present design guidelines (Verhagen 1992, Dette et al. 1994) indicated that the nourishment lifetime mainly depends on the nourished volume (v<sub>n</sub>) in combination with the local erosion rates (e). According to Verhagen (1992) the local erosion rates can be assumed constant and independent of the nourished volume. His approach, however, applies a 40 % reduction of the nourishment lifetime to include possible increased erosion rates and other uncertainties. The approach by Dette et al. (1994) describes that local erosions rates may initially increase with increasing nourishment volume. Apart from the nourishment volume, effects of other design parameters such as the alongshore length  $(y_n)$  and the nourishment elevation  $(z_n)$  have not been included. Furthermore, the intra-nourishment lifetimes have not been reported, thereby incorrectly assuming a constant nourishment lifetime in the alongshore dimension (Dean 2002). The objective of this study was therefore to develop a data-driven methodology 1) to quantify nourishment lifetimes in different data sets and different morphological systems and 2) to relate the nourishment lifetimes to the nourishment design parameters. The aim is to provide additional design support for nourishments by an improved understanding of the most influential design parameters for the nourishment lifetime. In order to quantify the nourishment lifetime, the study applied/developed:

- 1. A profile-based approach, to study nourishment lifetimes based on their effect on the natural morphological processes
- 2. A volume-based approach, to study nourishment lifetimes based on the sand volume

### 3.4 Profile-based approach to study shoreface nourishment lifetimes

The profile-based approach was developed to study the interferences of nourishments on natural morphological processes, more specifically the interference of shoreface nourishments on the migration of nearshore sandbars, as is present on Ameland (see also Table 3, Figure 4 and Figure 5).

A first step in the approach was the application of the Complex Principal Component Analysis (Joliffe 2002) to the data sets of, amongst others, the Ameland coastal profiles (Gijsman et al. 2018, 2019c). The statistical methodology aims to describe the complete data set of 52 coastal profiles (i.e. one per year between 1965 and 2017) with single 'components.' These components aim to describe most of the variance in the coastal profiles and consist of a spatial function  $(f_k)$  and temporal weights  $(w_k)$ . The spatial function describes the 'statistically most-present' coastal profile in the data set, the weights its variation in time. Since the method was performed complexly (i.e. on the Hilbert transformed profiles), the components can be used to describe migrating patters. While the natural migration of the sandbars characterized most of the profiles in the data set, the first component was able to describe this natural behavior. Since the shoreface nourishments interrupted this behavior, the first component did not describe these effects. Hence, the periods of interruption (i.e. the shoreface nourishments lifetimes) were filtered from the data sets and could be quantified.

The methodology was applied to the coastal profiles in which nourishments were constructed on Ameland and other parts of the Dutch shoreline (Gijsman et al. 2019c). A relation between the design of 21 shoreface nourishments and their lifetime could not be identified. When the shoreface nourishment lifetimes were related to both nourishment design and the characteristics of the sandbar migration itself, using a linear system, a goodness-of-fit of  $r^2 = 0.67$  could be reached. These findings indicate the influence of both natural processes and nourishment design on the shoreface nourishment lifetime. The most influential parameters in the relation were the nourishment density ( $c_n$ ) and the nourishment depth location ( $d_n$ ), which both increased the shoreface nourishment lifetime. The density of the migrating sandbars ( $c_b$ ) and the bar cycle return period ( $T_r$ ) (i.e. the timescale on which the sandbar migrate) affected the nourishment lifetime negatively (Gijsman et al. 2019c).

The developed methodology cannot interpret underlying physical processes, owing to its purely statistical character. The quantification of the shoreface nourishment lifetime in data sets with in-stationary morphological evolution was therefore hampered. The same holds for the data sets in which the behavior of different shoreface nourishments interacted with each other.

### 3.5 Beach nourishment lifetimes on Sylt

In the study of Gijsman et al. (2018) the profile based approach was applied to study the lifetime of beach nourishments placed in a single coastal transect on Sylt (transect 0+205, see Figure 5). Since no cross-shore migrating patters were present in the Sylt profile, the profile deviation from the mean was described with a standing wave pattern in the first spatial component. The first component described 88 % of the variance in the profiles and indicated that the profile deviation from the mean was similar in the cross-shore direction. Figure 6 presents the temporal weights of the first component, which indicates how much the profile deviated from the mean in meters. Temporal weights larger than zero indicate above-average profiles, and vice versa.

In this study, the beach nourishment lifetime is defined relative to a long-term average reference profile. Indicated nourishment lifetimes (grey areas in Figure 6) end at the zero-downcrossing of this reference. By relating these lifetimes with the nourishment design characteristics 1) density, 2) alongshore length, 3) elevation and 4) relative alongshore location ( $rl_n$ ) for the 14 beach nourishments that were placed in this profile, with a linear system, a goodness-of-fit of  $r^2=0.89$  was reached. The system, although based on a limited number of beach nourishments, identified that the nourishments with larger density, larger alongshore length and higher elevation increased the beach nourishment lifetime, while an

increasing relative location reduced the beach nourishment lifetime. This shows that, for a certain nourishment, the nourishment lifetime decreases in the direction of alongshore sediment transport (Gijsman et al. 2018).



Figure 6: Temporal weights (Gijsman et al. 2018).

To increase the reliability of the abovementioned findings, the methodology was applied to the 691 coastal transects along Sylt (Gijsman et al. 2019b). Figure 6 shows the 691 coastal transects along Sylt (y) in combination with the timing of the measurements (grey crosses) and the beach nourishments (black lines). In total, 3290 transect-nourishment interactions were present in the data set. Since the beach nourishments on Sylt did not affect processes of natural migration, the volume-based approach was used. Hence, beach volumes were calculated for each measurement instead of temporal weights.

The beach volumes were calculated between horizontal limits, where the long-term average profile was equal to z = 0 m (mean sea level) and z = +4 m (dune foot). Values were interpolated linearly spatiotemporally on a grid with resolution of  $\partial t = 7$  days and  $\partial y = 50$  m. As a result of the spatiotemporal variability of the measurements in relation to the nourishments, the computation of the beach nourishment lifetimes was affected. Therefore, the following requirements were imposed for which the calculated lifetime was disregarded in the following cases:

- 1. If another nourishment was constructed in the same transect before the end of the nourishment lifetime.
- 2. If the calculated nourishment lifetime was shorter than 1 month or longer than 4 years.
- 3. If the lifetime-averaged erosion rate exceeded  $150 \text{ m}^3/\text{m}/\text{year}$ .

For the complete data set of Sylt, 899 nourishment lifetimes were calculated in this way. With the linear system a goodness-of-fit of  $r^2 = 0.45$  could be reached, indicating that not all of the variability in nourishment lifetimes was described by the nourishment design parameters. With the focus on the Westerland coastal area alone, a linear system could describe the 153 nourishments lifetimes with goodness-of-fit of  $r^2 = 0.70$ . This indicates that the nourishment lifetime calculation is affected by 1) the nourishment design 2) the local morphological behavior and 3) the quality of the data set. Not only the quality of the data set varies along Sylt, but also the morphological evolution of the shoreline and nearshore sandbar varies between the north and the south (Gijsman et al. 2019a). This morphological variation was not included in the presented approach and reduces the capability to project the nourishment lifetimes. For the complete island as well as for Westerland, however, it

was found that the nourishment density, alongshore length and profile elevation increase the nourishment lifetime, while the intra-nourishment lifetime decreases in the direction of alongshore sediment transport. For more details reference is made to Gijsman et al. (2019b).



Figure 7: Spatiotemporal variability in measurements and nourishments along Sylt (Gijsman et al. 2019b).

		Linear system characteristics							
	no.	$\frac{k_1}{(d/m^3)}$	$k_2$ (d/m)	$k_3$ (d/m <sup>3</sup> )	k4 (d)				
Sylt	899	1.05	0.0673	3.57	-69.4				
Westerland	153	0.58	0.171	2.72	-139				

Table 4: Number of computed nourishment lifetimes for Sylt and the Westerland coastal section, in combination with the fitted values of the linear system (Gijsman et al. 2019b).

## 4 Improved methods for morphological changes under storm surge conditions

Existing models for coastal hydro- and morphodynamics (cf. chapters 2 and 3) use various parameterizations to estimate sediment erosion. For the simulation of morphodynamics, these models usually assume a uniform grain-size distribution, i.e. the erosion threshold and transport behavior of the sediment is governed by the median grain size D<sub>50</sub>. In contrast, natural coastal sediment is usually widely graded (Holland and Elmore 2008), leading to complex interactions between different grain sizes. Several models have incorporated simple hiding-exposure coefficients, which lead to a modification of the erosion threshold in a bimodal mixture: Fine grains (hiding between larger grains) are harder to entrain from a mixed bed than from a uniform bed, whereas coarse grains (protruding into the flow) are easier to entrain than from a uniform bed. However, the interactions between different grain sizes have a variety of effects on the sediment matrix, near-bed flow velocities and erosion behavior (e.g. van Ledden et al. 2004, Venditti et al. 2010, Houssais and Lajeunesse 2012, Staudt et al. 2017, 2019b), and can subsequently affect the erosion stability of the bed. The processes underlying these effects are not fully understood, and the accuracy of existing sediment transport models remains limited.

Due to the complexity of the coastal environment, sediment transport under full-scale wave action is difficult to investigate in the field. Many studies have investigated sediment transport in the laboratory, especially in so-called oscillatory flow tunnels (OFT): These facilities mimic the oscillatory horizontal flow above the sediment bed, but neglect e.g. the variation of the flow profile with depth, the vertical flow component and undertow, i.e. flow processes which are induced by full-scale free-surface waves. Van der Werf et al. (2009) provide an overview of large-scale laboratory experiments that have investigated wave-driven sand transport until 2009 (the so-called SANTOSS database). Only 4 of the 26 studies covered in the database have investigated the transport of mixed sand (Inui et al. 1995, Hamm et al. 1998, Hassan 2003, O'Donoghue and Wright 2004a, b, Hassan and Ribberink 2005) - all of them conducted in oscillatory flow tunnels (OFTs). To account for all wave-induced processes and to avoid scale effects, experiments need to be carried out in large-scale wave flumes. Previous experiments with uniform sediment in the Large Wave Flume (GWK) in Hannover have shown that transport rates under free-surface waves can be 2-2.5 times higher than those measured in OFTs (Ribberink et al. 2000, Dohmen-Janssen and Hanes 2002). However, up to date, no experimental data for sand mixtures under full-scale free-surface waves is available.

If fine sediment is entrained under wave action or in a current it tends to develop the so-called sheet flow, a thin layer of moving grains above the bed. Coarser sediment tends to develop bed forms or ripples, which are washed out at very high flow velocities. It is assumed that sheet-flow conditions, e.g. caused by large waves and orbital flow velocities during storm-surge conditions, lead to significant erosion of the coastline. While the transition between ripple and sheet-flow regime and the resulting sediment transport rates can be determined with some accuracy for unimodal sediment, they are unknown for mixed sediment.

### 4.1 Laboratory experiments with mixed sand under full-scale wave action

To broaden the database and to systematically investigate the transport behavior of different sand mixtures in a controlled environment, experiments under full-scale free-surface waves were conducted in the Large Wave Flume (GWK) in Hannover in spring 2018. Fine (D<sub>50</sub> = 0.21 mm) and coarse sand (D<sub>50</sub> = 0.58 mm) was mixed in four different ratios (100:0, 68:32, 46:54, 26:74 %) and subjected to two different, regular wave conditions (WC1: H<sub>1</sub> = 1.5 m; WC2: H<sub>2</sub> = 1.0 m; T = 7 s; h = 3.5 m). Each experiment comprised five intervals with 200 waves each. A range of instrumentation was used to investigate nearbed flow velocities, sediment transport processes and bed morphology in the middle of the 30 m long test section. The overall changes in bed morphology, as recorded by an echosounder before and after each wave interval, were used to derive the net transport rates. Table 5 shows that the net transport rate generally decreased with a decrease of fines (i.e. an increase of D<sub>50,mix</sub>) and, as expected, transport rates under the high waves (1.5 m) were larger than under the low waves (1.0 m). The experimental procedure and first results are outlined in further detail in Van Der Werf et al. (2019).

Experiment	Sand	Fine frac-	D <sub>50,mix</sub>	LI (m)	T(a)	Net transport rate $q_s (mm^2/s)$		
No.	Sand	tion (%)	(mm)	) 11 (11)	1 (8)	Experiment	SANTOSS	
0516	Δ	100	0.217	1.5	7.0	$76 \pm 11$	67	
0518	Λ		0.217	1.0	7.0	$38 \pm 12$	23	
0525	D	69	0.238	1.5	7.0	$101 \pm 22$	77	
0530	D	00	0.238	1.0	7.0	$31 \pm 27$	26	
0605	C	16	0.439	1.5	7.0	$64 \pm 24$	64	
0608	C	40	0.439	1.0	7.0	$13 \pm 16$	69	
0615	D	D 26	0.566	1.5	7.0	$48 \pm 6$	95	
0620			0.566	1.0	7.0	$8 \pm 10$	5	

Table 5: Experimental conditions, resulting net transport rates and net transport rates as calculated by the SANTOSS model (van der A et al. 2013).



Figure 8: Final bed profiles (after 1000 waves) at transect y = 3 m for all experiments (mod. after Van Der Werf et al. 2019). The Large Wave Flume is 5 m wide.

As can be seen in Figure 8, the bed morphology changed depending on the sediment mixture: The addition of coarser sediment resulted in the development of bed forms, which became smaller and more regular with increasing content of coarse sand. Sand A and B (100 and 68 % fines) were mostly transported in the sheet-flow and transitional regime (where sheet flow develops on top of large, irregular bed forms). Sand C and D (46 and 26 % fines) showed ripple development; sheet flow could no longer be detected by the instrumentation in the middle of the test section.

### 4.2 Improvement of a sediment transport model

The net transport rates from the wave-flume experiments were used to test and optimize the existing SANTOSS model (van der A et al. 2013) for sediment transport under fullscale wave action. The model is based on OFT experiments and two studies with unimodal sediment that were conducted in the GWK. In contrast to other equations which average the sediment transport over the wave cycle, the SANTOSS model resolves the transport for each half-cycle (crest and trough) and can account for the phase-lag, which describes the exchange of suspended sediment from crest to trough half-cycle and vice versa. If required, the model uses a simple hiding-exposure formulation to account for changes in grain entrainment for sediment mixtures.

In a first step, the experimental parameters and measurements (e.g. wave height, orbital flow velocities, grain sizes) were used as model input in an attempt to reproduce the net transport rates of the experiments (Van der Werf et al. 2019). Both hiding-exposure as well as the phase-lag effect was used in this calculation. A comparison of the model results with the experimental observations shows several shortcomings (Figure 9a).


Figure 9: Measured (incl. standard deviation) vs. calculated net transport rates using different input velocities and calibration coefficients: a) original model with ADV velocities as input (cf. Van der Werf et al. 2019), b) modified  $U_{on}$  and  $U_{off}$  (cf. text), modified  $U_{on}/U_{off}$  and calibration coefficients  $\alpha_r$  and  $\alpha_s$  (phase-lag), d) modified  $U_{on}/U_{off}$  and calibration coefficients  $\alpha_r$ ,  $\alpha_s$ , m and n.

The general trend of increasing net transport with an increase in fine sediment is not reproduced by the model. Instead the model results for H = 1.5 m show an almost exponential decrease in net transport with increasing fine content. For H = 1.0 m the model underestimates the measured transport rates in most cases and shows no clear tendency.

For this first estimate of the model performance (Figure 9a) the orbital flow velocities from a point ADV at 1.30 m above the bed were used as input parameters, as the near-bed velocity profiles (which were recorded using an ACVP; Hurther et al., 2011) were still being processed. Due to boundary-layer streaming, the near-bed flow velocity is expected to be slightly larger than the free-stream velocity. In a second step, the model calculations were therefore repeated with higher input velocities, which were estimated according to the initial ACVP results for Sand A (1.5 m). The modified input velocities ( $U_{1,on} = 1.44 \text{ m/s}$ ,  $U_{1,off} = 1.07 \text{ m/s}$ ;  $U_{2,on} = 1.09 \text{ m/s}$ ,  $U_{2,off} = 0.78 \text{ m/s}$ ) yield a better fit between model and experimental result (Figure 9b). The transport rate is increased and shows a trend that is similar to the experimental observations. Different indicators for model performance and thus the reliability of the model results (e.g. the number of model results that lie within a factor 2, 5 and 10 of the measurements, coefficient of determination R<sup>2</sup>, Brier Skill Score BSS, root-mean-square error RMSE) are shown in the statistical analysis (Table 6).

$U_{\text{input}}$	$\alpha_r=\alpha_s$	m	n	fac2	fac5	fac10	R <sup>2</sup>	BSS	RMSE
ADV1	8.2	10.9	1.2	37.5	87.5	87.5	0.276	0.631	34.026
modified	8.2	10.9	1.2	87.5	100	100	0.553	0.863	20.746
modified	9	10.9	1.2	100	100	100	0.581	0.865	20.605
modified	9	11.5	1.35	100	100	100	0.635	0.873	19.966
modified	9	12.5	1.35	87.5	100	100	0.635	0.856	21.287

Table 6: Statistical analysis for SANTOSS model results and experimental results depending on input velocity and calibration coefficients  $\alpha_r$ ,  $\alpha_s$ , m and n.

The SANTOSS model can be calibrated with a variety of coefficients, which have been determined using the SANTOSS database (van der A et al. 2013). As this database contains mostly OFT experiments, it is expected that the original calibration tends to underestimate sediment transport under full-scale waves. The calibration coefficients  $\alpha_r$  and  $\alpha_s$  affect the phase-lag parameter: if this parameter exceeds 1, entrained sediment is exchanged between crest and trough half-cycle. Subsequently, if  $\alpha$  is increased, the sediment exchange between half-cycles rises. If there is a lot of suspended material in the water column, the phase-lag can lead to an offshore sediment transport, as fine material which has been entrained under the wave crest is transported seawards under the wave trough. This negative transport leads to a lower total transport rate. A re-calibration of  $\alpha_r = \alpha_s = 9$  leads to very good fit between model results and experiment measurements of H = 1.0 m (Figure 9c). Using this calibration coefficient, 100 % of the model results lie within a factor 2 (fac2) of the measurements (Table 6).

In the SANTOSS model, the sediment load  $\Omega_i$  during each half-cycle i is proportional to the excess shear stress at the sediment bed:

$$\Omega_i = m(|\theta_i| - \theta_{cr})^n \tag{4.1}$$

where  $\theta_i$  is the effective Shields number at the bed,  $\theta_{cr}$  is the critical Shields number of the sediment in question, and m and n are calibration coefficients (m = 10.97, n = 1.2 in the original model). If the coefficients are adjusted slightly to m = 11.5 and n = 1.35, the performance of the model for mixed sediment under full-scale waves can be further improved (Figure 9d). For the larger wave condition, 50 % of the model results are within the standard deviation of the measurements. For the smaller waves, the model yields a result that lies within the standard deviation in 75 % of the cases. However, the calculated transport rate for Sand D (26 % fines) under 1.5 m waves still exceeds the experimental result by far. If m is increased to > 11.5, the performance for the other scenarios can be further improved; however, also the discrepancy for Sand D becomes stronger.

While the re-calibrated SANTOSS model yields plausible results for sheet-flow conditions (68, 100 % fines) and low orbital flow velocities, there are still strong deviations for high orbital flow velocities (H = 1.5 m). The ongoing analysis of the other experimental data will provide additional input for the improvement of the model. The database used for the calibration of the SANTOSS model contains only two other experiments with progressive surface waves, both conducted with uniform sand (Dohmen-Janssen and Hanes 2002, Schretlen 2012). In the last step of the project, the transport rates from these experiments were reproduced using the improved model (Figure 10). The transport rates for the fine sand experiments by Schretlen (2012) are systematically underestimated, while the transport rates for the medium sand experiments are overestimated. The transport rates for Dohmen-Janssen and Hanes's (2002) experiments are slightly underestimated, but are within a factor 2 of the measured results. The ongoing data analysis will provide further results to improve the calibration of the SANTOSS equation.



Figure 10: Comparison of STENCIL results with other experimental results with full-scale waves (Dohmen-Janssen and Hanes 2002, Schretlen 2012).

# 5 Monitoring sedimentary behavior of benthic habitats at a marine extraction site: Westerland II/III (German Bight, North Sea)

Information regarding the sustainability and the impact of sand mining in the North Sea off the West Coast of Sylt are sparse. Zeiler et al. (2004) and Mielck et al. (2018) revealed that the dredging pits serve as sediment traps where fine-grained material (mud) accumulates. As the fine material is unsuitable for beach nourishment, no further extraction activity at the upper layers is possible in these areas. In order to get more precise information about the impacts of sand extraction activities on benthic habitats, the largest marine sediment extraction site in the German Bight, "Westerland II & III", was monitored over a period of three years using hydroacoustics as well as direct measurements such as underwater videos and grab samples.

### 5.1 Methods and study site

The study site is located approx. 7 km off the western coast of the island of Sylt and has a size of ca. 15 km<sup>2</sup> including both the dredging area itself and the adjacent unaffected sea-floor as a reference for pre-dredging conditions (Figure 11).



Figure 11: The study site "Westerland II & III" located west of the North Frisian Island of Sylt.

The research vessels "Mya II", "Heincke" and "Alkor" were used to collect hydroacoustic data as well as sediment samples and underwater videos in the study area. Table 7 shows all used devices and their specifications.

During the surveys, sidescan sonars with different frequencies and multibeam echosounders were used to map the prevailing seafloor conditions. For ground truth purposes, sediment samples and underwater videos were taken to obtain more detailed information about the habitat characteristics. In order to investigate short-term back-filling processes at the fresh excavation pits, gapless bathymetric mapping was conducted approximately semiannually between 2016 and 2019.

Vessel	Date	Devices	Frequency	Grab Samples (Van Veen)	Underwater videos
RV Mya II	Sep. 2016	SB YEL* STA*	180 kHz 330 kHz 1000 kHz	10	4
RV Mya II	Apr. 2017	SB	180 kHz	-	-
RV Mya II	Aug. 2017	-	-	8	2
RV Heincke	Dec. 2017	KON	100 kHz	-	-
RV Mya II	Mar. 2018	SB	180 kHz	-	-
RV Mya II	Nov. 2018	SB	180 kHz	-	-
RV Alkor	Jan. 2019	SB YEL* STA*	180 kHz 330 kHz 1000 kHz	53	-

Table 7: Data	acquisition	in	the y	vears	2016	to	2019.
Table 1. Data	acquisition	111	une	ycars	2010	ω	2017.

**SB** = SeaBeam 1180 multibeam echosounder; **KON** = Kongsberg EM710 multibeam echosounder; **YEL** = Imagenex YellowFin 872 sidescan sonar; **STA** = StarFish 990F sidescan sonar. \*raw data are not presented in this article

# 5.2 Results

The results of our bathymetric mapping campaign within the framework of STENCIL are shown in Figure 12. Backfilling processes within the freshly dredged pits are clearly visible at 54°54'N und 8°10'E. Mining in these pits was terminated in September 2016. The excavation of a new pit started in 2017 in the center of the study site (54°54'N und 8°11'E). Over a 2-year period, a depression of approx. 500 m width and 20 m depth (below seafloor) was created.

The investigation revealed a slight backfilling, which occurred a few weeks after the sand mining had started. This was mainly caused by slope failures, which appeared at the steep slopes of the pits in this early stage (Mielck et al. 2018, 2021). The material involved generally consisted of fine sand. After the pit's walls had stabilized, mud accumulated within the pit due to the decreased current speed (resulting from the greater water depth, i.e. a greater hydraulic diameter). Sand transport ceased at the rims of the depressions. Our monitoring activities confirmed that the mud accumulation within the pits is very slow. For example, in the excavation pit in the north of the investigated area (54°55'N und 8°10'E), which was exploited in the 1980s and 1990s, no backfilling could be detected in our

С в Α 8°10'E 8°11'E 8°10'E 8°11'8 8°10'E 8°11'E 54°56'N D Е 6 54°55'N 54°55'N 54°54'N 54°54'N wate epth [m] 8°10'E 8°11'E 8°11'E 8°10'E

bathymetric data. The same applies for the dredging area in the south of the study area where sand mining was discontinued in 2008.

Figure 12: Bathymetry of the study site. All visible depressions are caused by sand mining since 1984. Data was collected in September 2016 (A); April 2017 (B); December 2017 (C); March 2018 (D); November 2018 (E) und January 2019 (F). Changed after Mielck et al. (2021).

### 5.3 Discussion

Using sidescan sonars, underwater footage and sediment samples for grain-size and benthos-analyses, it was possible to create habitat maps of the investigated area. These maps show no more coarse material in the deeper areas of the pits. The removal of coarse sand from the dredging sites triggered a long-term or maybe also permanent change in sediment composition and the associated benthic communities (Mielck et al. 2021). While the dredging process is still active, turbulent conditions prevent the establishment of a lasting habitat and fauna. After termination of the activities, slope failures maintain a sandy environment; however, soon after, sluggish mud accumulation starts which significantly changes the habitat. Since the coarse material is rather immobile on the seafloor (Tabat 1979, Werner 2004, Mielck et al. 2015), a natural regeneration is deemed unlikely in the coming decades or centuries. This is in accordance with Zeiler et al. 2004, who conclude that the benthic communities will not recover before the native sediment characteristics are restored. However, when the habitat disturbance continues, domination of opportunistic species and predators may occur resulting in a complete change of the habitat (Greene 2002, de Jong et al. 2015).

Our analyses revealed that the sand extraction significantly reduced both the macrozoobenthic abundance and the species diversity. Moreover, a change in the community composition was observed: mud-preferring species profited from the habitat change while sand-preferring species became less abundant or even disappeared. A deeper analysis of these effects is was conducted in Mielck et al. (2021).

From a holistic point of view, the regeneration potential of the study area towards the pre-dredging conditions is difficult to assess. As a matter of fact, the first sand mining activities are still visible on the seafloor after 35 years. If the sedimentation rates within the pits were similar to e.g. those of depressions east of Helgoland (2–18 mm/year, ca. 80 km south of the study area), a complete refill would take many decades to centuries (Dominik et al. 1978, von Haugwitz et al. 1988) while the coarse-sand characteristics are lost. However, the dredging area offshore of Sylt is quite small and a wider-ranging disturbance of the surrounding environment was not observed.

The bathymetric maps showed that there is still mineable material between the already exploited dredging pits (Figure 12). Hence, it might be possible to continue dredging in this designated area in order to keep the extraction area as small as possible. Based on estimations by Temmler (1983, 1994), approx. 1500 Mm<sup>3</sup> of suitable sediment for beach nourishment is available in an area of ca. 100 km<sup>2</sup> around the study site. This is enough material to protect the island for the next centuries and to budge from the current approach might not be recommendable. However, facing a near-future sea-level rise with increasing erosion rates, to protect the coastline with nourishments in a sufficient and cost-effective way may become difficult and only hard coastal protection measures (such as dikes, sea walls or concrete units) are an alternative.

# 6 Experimental assessment of hydrotoxicological impacts of dredging activities and shore nourishments

Sand extractions and sand nourishments and the associated relocation of sediments can lead to morphodynamic, sedimentological and ecotoxicological processes and interactions. Therefore an interdisciplinary approach, based on the hydrotoxicology method developed by Cofalla (2015), was applied to assess the combined effects of sediment dynamics and ecotoxicological processes due to anthropogenic interventions of sand nourishments and dredging. Especially the extraction sites are prone to ecotoxicological effects due to the deposition of fine sediments, which can bind organic as well as inorganic pollutants. To investigate possible hydrotoxicological effects of sand mining activities, extensive sampling was conducted at the extraction area Westerland II in cooperation with AWI during two measurement campaigns in August 2016 and February 2019. A Van Veen grab sampler was used to take the sediment samples at water depths between 15 and 20 meters. More than 1000 kg of sediment were collected during both measurement campaigns. The sediment samples were taken at locations where dredging has been carried out as well as at undisturbed locations for reference. In addition, comparative investigations were carried out with ecotoxicologically relevant sediment samples from the port of Hamburg and fluvial reference sediments from the river Rhine, which has representative sediment properties for natural fine sediments (Höss et al. 2010, Hudjetz et al. 2014). The sampled sediments were filled into barrels with a capacity of 80 l. To reduce the biological activity, the barrels were stored at 4°C in a cooling chamber at the Institute of Hydraulic Engineering of RWTH Aachen University (IWW).

The interactions between suspended and deposited sediments, pollutants and the surrounding water are influenced by a wide range of different physical-chemical parameters. To determine the interactions, a comprehensive characterization of the sediments with regard to components, mineralogical composition and particle size distribution is necessary (Bryan and Langston 1992, Mitchener and Torfs 1996, Black et al. 2002). Therefore, extensive sediment analyses were carried out to characterize the considered sediments.

The water content was determined by oven drying the samples at 105 °C until mass consistency was reached (DIN EN ISO 17892-1) and ranged between 60 and 75 %. The particle size distribution was determined by laser diffraction according to ISO 13320. The results confirmed previous investigations by Mielck et al. (2018) and Zeiler et al. (2004), which showed that the morphological changes due to sand dredging at the extraction sites have led to a deposition of fine materials in the extraction pits. These fine sediments affect the consolidation behavior of the sampled sediments, which was measured by means of an Ultra High Concentration Meter (UHCM). While the sediment concentration of the reference sediments show a constant concentration with increasing depth of the sediment bed, the fine sediments sampled inside the extraction pits exhibit an increasing compaction over depth. This in turn affects the resuspension behavior and simultaneously influences transport processes at the sediment-water interface and inside the seabed. Together with altered digging and burrowing properties of the seafloor, this leads to effects on benthic communities. Another important parameter for sediment transport behavior and the calculation of erosion rates is the critical bottom shear stress,  $\sigma_{crit}$ , which defines incipient motion for sediment beds and was determined with the help of the EROSIMESS measurement system. A motor-driven propeller generates a flow in a test cylinder, which induces a defined shear stress on the sediment bed depending on the rotational speed of the propeller. The critical bottom shear stress is determined by gradually increasing the bottom shear stress levels until sediment motion sets in.

The results for particle size distribution, critical bottom shear stress as well as total organic carbon and sulfur content of the sediment samples taken from a dredging pit and four reference sites at extraction area Westerland II in August 2016 are given in Table 8 together with results for samples from the port of Hamburg and river Rhine, which were used in previous studies (e.g. Höss et al. 2010, Hudjetz et al. 2014) and therefore represented well examined reference sediments. All experiments in the flume were performed using salinated tap water.

Sediment	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	σ <sub>crit</sub> (N/m²)	TOC (%)	Sulfur (%)
Westerland II	16.17	50.19	33.64	0.3	3.04	0.498
Westerland II R1	1.6	13.1	85.3	0.156	0.12	0.028
Westerland II R2	1.2	8.2	90.7	0.23	0.04	0.027
Westerland II R3	12.4	72.4	15.2	0.15	0.46	0.084
Westerland II R4	0.9	3.5	95.6	0.21	0.11	0.037
Port of Hamburg	6.04	48.15	45.81	0.05	0.05	0.199
River Rhine	15.03	64.00	20.97	0.15		

Table 8: Clay, silt and sand content, critical shear stress, total organic carbon and sulfur content of investigated sediments from Westerland II (August 2016), port of Hamburg and river Rhine.

 $\sigma_{crit}$ : Critical bottom shear stress; TOC: Total Organic Carbon

Effects on chemical-physical water quality parameters due to resuspension of the deposited fine material at the extraction sites were investigated in an annular flume (d = 3.25 m; w = 0.25 m) where an infinite, stationary and turbulent flow is generated by opposite rotation of a lid on top of the water and the flume itself. After the sediment bed was installed in the flume, it was left for a 5-day consolidation phase before the actual experiments begun. The flow, i.e. the bottom shear stress, was gradually increased in steps of  $0.1 \text{ N/m}^2$  over a total duration of 18 hours. Water turbidity was continuously measured via redundant turbidity sensors and environmental parameters (pH value, redox potential, electrical conductivity, oxygen content) were monitored in an external measuring cell which is continuously flown through. Additionally, discrete samples were taken regularly during the experiments to determine the suspended matter concentration.

All tested sediments showed beginning erosion at bottom shear stresses between 0.2–0.3 N/m<sup>2</sup>, in agreement with the values of  $\sigma_{crit}$  determined with the EROSIMESS measurements (cf. Table 8). The resuspension of fine sediments interacts with the surrounding fluid and already at low erosion rates, a strong reduction in light transmission was observed, which can lead to negative effects on marine flora and fauna. Also chemical-physical water quality parameters, like redox potential and dissolved oxygen content, showed high correlation with the suspended particulate matter content (SPM). With increasing bottom shear stress, i.e. increasing SPM, dissolved oxygen decreased, demonstrating the very high oxygen consumption due to sediment resuspension. Thus, if deposited sediments from the extraction pits are resuspended, effects on chemical-physical water quality parameters and therefore on the entire aquatic system have to be expected.

To assess the ecotoxicological potential of the characterized sediments the teratogenic effects on fish eggs of *Danio rerio* have been analyzed according to DIN 38415-6 (DIN 2001). *Danio rerio* is a standard organism in ecotoxilogical studies and used for freshwater as well as brackish and marine sediments (Johann 2020). Sediments were freeze-dried and analyzes were performed in sediment contact tests (Hollert et al. 2003, Zielke et al. 2011). Table 9 shows the 'no observed effect concentration' (NOEC), 'lowest observed effect concentration' (LOEC) and the lethal concentration when 50 % of the fish eggs died (LC<sub>50</sub>), in percent sediment. Corresponding to the increase of total organic carbon (TOC), the toxic effects on fish embryos was highest at the former sand dredging area of Westerland II, compared to three different reference sites outside of this area (Table 9). This

applies also compared to sediment from the Port of Hamburg, an area which is historically highly polluted by contaminant loads from the river Elbe.

Sediment	NOEC (% sediment)	LOEC (% sediment)	LC <sub>50</sub> (% sediment)	LC <sub>50</sub> (mg/ml)
Westerland II	10	12,5	16,18	8,9
Westerland II R1	≥100	100	n.t.	n.t.
Westerland II R2	≥100	100	n.t.	n.t.
Westerland II R3	25	50	82,13	430,7
Westerland II R4	≥100	100	n.t.	n.t.
Port of Hamburg	25	50	61,56	32,8

Table 9: Effect values of the teratogenic toxicity on fish eggs of *Danio rerio* assessed in the sediment contact test after 96 hours of exposure.

No observed effect concentration (NOEC), lowest observed effect concentration (LOEC) and lethal concentration when 50 % of the fish eggs were dead (LC<sub>50</sub>). n.t.: No toxicity.

One criterion of validity in the fish egg test is a constant oxygen concentration of  $\geq 3 \text{ mg/l}$  of the test medium to ensure a proper development of the organisms (Strecker et al. 2011). Marine sediments and sediments with high sulfur contents in general tend to result in oxygen deficiencies in the test medium, which was also observed in the erosion tests in the annular flume with the sediment from the dredging zone Westerland II. By using an optical measuring method with a micro oxygen sensor, the oxygen levels during the sediment contact test were constantly recorded. Figure 13 shows the oxygen levels for different sediment concentrations mixed with quartz sand.

For the sediment of Westerland II a rapid decrease of the oxygen concentration for all sediment concentrations within the first 24 h was observed, with a following stabilization above the required values for the sediment contact test after approximately 24 h. The results confirmed the potential of oxygen deficiency conditions at dredging sites, which might result in negative impacts on marine organisms.

To exclude the influence of oxygen consumption on the development of fish embryos and to depict a worst-case scenario regarding the ecotoxicological potential, additional fish egg tests (FET) with *Danio rerio* were performed with sediment extracts obtained by using Pressurized Liquid Extraction (PLE). The results for the lethal concentration LC<sub>50</sub> (in mg sediment equivalent (SEQ) in ml test medium) are given in the last column of Table 9 and are in accordance with the results of the sediment contact tests. Since oxygen consumption could be excluded under these test conditions, toxic potential could be attributed to pollution loads in the sediments at the dredging site.



Figure 13: Oxygen concentration of the test medium (mg/l) of the sediment contact test with Danio rerio for different sediment concentrations of the Westerland II sediment (%) mixed with quartz sand over 120 h.

The results of the potential of teratogen effects on fish eggs and oxygen deficiency go hand in hand with investigations of benthic organisms of the described sediments. In contrast to the reference sediments, no benthic invertebrates were observed in the sediment of Westerland II.

The sediment campaign performed in 2019 provided an opportunity for the assessment of different extraction holes of the dredging area Westerland II, with different time points of termination of dredging activities within the last 36 years. Sediment extracts obtained via PLE were used to assess potential toxic effects on in vitro cell viability. Cytotoxicity was investigated by means of the Neutral Red Assay with permanent fish liver cells (RTL-W1) according to Borenfreund (Borenfreund and Puerner 1985, Borenfreund and Shopsis 1985) and modifications by Keiter et al. (2006) and Klee et al. (2004).

The results (EC50 values in mg SEQ/l test medium) are given in Table 10 and indicate higher cytotoxic effects for sediments of the former dredging sites compared to the reference sites. Since sampling site 2 – where dredging activities ended in 2017 – showed values comparable to the reference sites, it can be assumed that pollution pressure increases over time due to deposits of carbon bound chemicals in the dredging holes.

Sediment	EC <sub>50</sub> (mg/l)	TOC (%)	Sulfur (%)
RS1	36.47	0.04	0.03
1 (1984)	0.19	2.63	0.43
RS2	2041.74	0.06	0.03
2 (2017)	7.50	0.16	0.05
3 (2009)	0.12	3.13	0.46
4 (2009, Depth: 30 m)	0.21	3.26	0.50
RS3	2.34	0.08	0.05
RS4	54.44	0.10	0.04

Table 10: Cytotoxicity (EC50 values in mg SEQ/l test medium), total organic carbon (TOC) and sulfur content (%) of the investigated sediments of the year 2019.

This assumption is supported by the TOC content in the sediments (Table 10). Except for sampling site 2, the highest TOC concentrations were found in dredging areas from 1989 to 2009 (sites 1, 3 and 4). However, slightly elevated TOC values compared to reference sites indicate the beginning of organic deposit at site 2 within the following two years after the dredging. Moreover, the TOC contents positively correlate with the sulfur content. For the dredging sites the sulfur and TOC contents were comparable to the sediment of 2016 (Table 8). Therefore, embryo toxic effects and oxygen consumption conditions at sites 1, 3 and 4 are presumable.

Table 11 presents the sum concentrations of 7 indicator PCBs (PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153 and 180) and 14 prominent PCBs (acenaphthene, acenaphthylene, anthracene, benzo(a)anthracene, benzo(a)pyrene, benz(e)acephenanthrylene, benzo(ghi)perylene, benzo(k)fluoranthene, chrysene, dibenz(a,h)anthracene, fluoranthene, indeno[1,2,3-cd]pyrene, phenanthrene and pyrene) obtained by chemical analysis. It can be stated that the former dredging holes accumulated organic chemicals, represented by the analyzed PCBs and PAHs, compared to reference site over time. Unexpectedly, reference site 1 showed the highest values for the sum of PCBs and high values for the sum of PAHs. The reason for such high concentrations of organic pollution at this site remains unclear. However, for site 2 the values for organic chemicals in the sediment were comparable to the chemical loads of the reference sites 2–4. Hence, chemical deposition at the dredging sites can be considered as steady process over time.

		Reference	sediments	5		Sampli	ng sites	
	RS1	RS2	RS3	RS4	1 (1984)	2 (2017)	3 (2009)	4 (2009)
Total PCBs [ng/g]	1393.58	746.44	720.68	690.19	1219.57	715.08	1070.86	1060.64
Total PAHs [ng/g]	2.07	0.76	0.16	0.21	2.52	0.15	2.10	2.27

Table 11: Sum concentrations of 7 indicator PCBs and 14 PAHs in ng per g dry weight sediment [ng/g dw sediment].

Site 4 (2009) had a depth of 30 m.

In general, it has been proven that dredging activities offshore Sylt negatively impact the marine ecosystem. The consequences for aquatic organisms are manifold and range from altered benthic structures to potential ecotoxicological effects. Additionally, former dredging areas tend to severe oxygen depletion close to the bottom surface (Greene 2002). After termination of dredging activities the remained excavation holes act as a sink for organic pollution due to the accumulation of fine material with high contents of organic carbon and carbon-bound substances. This poses risk under conditions which promote remobilization of sediment and results in higher turbidities, oxygen deficiency and the potential bioavailability of environmental relevant chemicals in particular.

#### 7 Towards an EAM for shore nourishments

#### 7.1 Review of current practice

In the overarching, interdisciplinary part of STENCIL, the physical and ecological sustainability of nourishments as coastal protection measures was analyzed based on a comprehensive review of beach nourishments and marine sediment extractions in different countries (Staudt et al. 2020). A comparison of nourishment practice in several EU countries, the USA and Australia showed several differences in management strategies, legislative frameworks and technical aspects. Especially the countries neighboring the North Sea in mainland Europe have developed national long-term management strategies involving frequent beach and shoreface nourishments (sometimes complemented by dune nourishment/reinforcement). Other countries rely on remedial (one-off) nourishment activities or sediment recycling (i.e. transferring sediment from downdrift, accumulative areas to updrift, erosive areas) to restore the coastline for flood defense and touristic purposes.

Although beach nourishments have a number of advantages over "hard" coastal protection measures and are frequently referred to as "nature-based" or "green", they still present a significant disturbance of the environment. In order to control the disturbance of the natural environment, initial extraction or nourishment activities exceeding a critical size or volume require an Environmental Impact Assessment (EIA). The EIA should provide a comprehensive study of possible short- and long-term impacts of the project construction and operation on the natural environment and is evaluated by the responsible environmental authorities before the project is licensed (Carroll and Turpin 2002). However, the critical size/volume differs significantly between countries. As an example: nourishment activities in Spain require an EIA if they exceed a volume of 500 000 m<sup>3</sup> per proposed project, whereas nourishments in the Netherlands can be conducted without an EIA if they stay below an effective volume of 1.25 million m<sup>3</sup>. In both countries the majority of nourishment activities thus do not require an EIA. In addition, regular re-nourishments of initial projects (e.g. as part of long-term nourishment strategies) are considered "maintenance" instead of new projects and can be conducted without further environmental assessment. The effectivity of the EIA as a tool to control negative environmental impacts of sediment extraction and nourishment activities therefore has to be reconsidered (Staudt et al. 2020). Several other studies have criticized EIAs due to a number of shortcomings (Peterson and Bishop 2005, Jay et al. 2007, Jha-Thakur and Fischer 2016), concluding that the EIA strategy itself is not capable of preventing environmental damage. For shore nourishments, especially the long-term environmental effects remain unknown and are not monitored except for few research projects. The gap in knowledge therefore remains, which hinders the development of long-term coastal management strategies that are in line with the EAM and a "good environmental status" as demanded by the Marine Strategy Framework Directive.

#### 7.2 Analysis of current and future benefits and shortcomings

Despite the large uncertainties regarding the long-term ecological and morphological impacts of the activities, nourishments have become an integral part of coastal protection schemes across the world. Hence, they need to be designed and monitored carefully in order to understand their behavior and their possible impacts on the coastal and marine environment. As shown in the preceding chapters, several tools were developed or improved within the project STENCIL. Based on the review of nourishment practice and environmental monitoring (Staudt et al. 2020) and the work conducted within the individual subprojects (chapters 2-6), the strengths, weaknesses, opportunities and threats for various extraction and nourishment measures were identified and compared. While the strengths and weaknesses are based on the current state of knowledge, the opportunities and threats describe the possible long-term development and effects, considering other external factors. This so-called SWOT analysis can support practitioners and decision-makers to choose a suitable measure for their individual application. The SWOT analysis was conducted for a variety of extraction (i. deep extraction from the seafloor, i.e. static dredging; ii. seafloor surface dredging, i.e. dynamic dredging; iii. terrestrial sediment extraction) and nourishment measures (i. beach nourishment; ii. shoreface nourishment, iii. dune reinforcement; iv. mega-nourishment). The analysis focused on the physical (i.e. hydro- and morphodynamic) and ecological sustainability of the nourishment activities as well as on societal aspects (e.g. economy, tourism). This chapter presents a brief overview of the SWOT results for the different nourishment measures: beach nourishments, shoreface nourishments and dune nourishments (cf. Table 12 to Table 14). The full breakdown of the SWOT analysis for extraction and nourishment activities can be found in a freely-available German brochure (Staudt et al. 2019a).

Beach nourishments (Table 12) are placed directly on the beach, i.e. between the swash zone and the dune toe. The sand is distributed in the beach profile using e.g. loaders or bulldozers (Bird and Lewis 2015). The nourishment is usually designed to approximate the natural beach profile to maintain a natural beach slope and the associated wave breaking (Dean 2002). The sediment grain size and grading should be similar to the natural material: If the grading of the borrow material is too wide, steep cliffs can develop (McFarland et al. 1994). Both the construction and the finished nourishment can be directly seen by the public, which increases the public awareness for nourishments as coastal protection measures. As a beach nourishment widens the beach that is available to visitors, it increases the area's attractiveness. The sediment budget of the beach-dune system is directly increased, strengthening the protection function of the system as well as the function as a sandy habitat. The nourishment efficiency can be easily monitored using regular beach profiles. The environmental effects of beach nourishments vary with the location in the beach profile. The placement of sediment on the beach as well as the use of construction equipment (machines, pipelines) directly disturbs the local habitats, e.g. by burying. However, especially in the highly dynamic swash zone, several key species recover quickly from these disturbances (Menn et al. 2003, Leewis et al. 2012, Schlacher et al. 2012, Wooldridge et al. 2016). In the upper, dry parts of the beach profile, recovery rates are lower (Rakocinski et al. 1996, Janssen and Mulder 2005). The installation of pipelines and the subsequent profiling of the beach slope make beach nourishments more expensive and time-consuming than shoreface nourishments. In addition, the beach must be closed during the construction phase and cannot be used by the public. As beach nourishments are directly impacted by the waves, a strong storm event can erode large amounts of the nourishment volume, resulting in shorter lifetimes than for shoreface nourishments. In coastal management plans, beach nourishments are therefore designed for a lifetime of years to decades. The sudden erosion of a (new) nourishment can however lead to a negative public perception of the measure and lower the acceptance of nourishments as coastal protection measures.

Table	12:	SWOT	analysis	for beach	nourishments,	i.e.	the	nourishment	volume is	placed	on	the
beach.			-							-		

Strengths	Weaknesses
• Increases the sediment budget of the ac-	• No reduction of wave energy at the beach
tive coastal profile	Temporary construction site required
• Limited impact on benthic organisms in	Relatively large effort, high costs
the surf zone, as these are resilient to	• Disturbances of the beach ecosystem
strong morphodynamics	through construction at the beach
Immediate public perception of coastal	• Low potential for full recovery of the eco-
protection measures	system in the upper, dry parts of the
Increasing recreational value	beach profile
	r · · ·
Opportunities	Threats
<ul><li>Opportunities</li><li>Beach maintains its natural appearance</li></ul>	<ul> <li>Threats</li> <li>Wrong sediment composition can result</li> </ul>
<ul> <li>Opportunities</li> <li>Beach maintains its natural appearance</li> <li>Additional sediment for adjacent beaches</li> </ul>	<ul> <li>Threats</li> <li>Wrong sediment composition can result in development of cliffs</li> </ul>
<ul> <li>Opportunities</li> <li>Beach maintains its natural appearance</li> <li>Additional sediment for adjacent beaches (longshore sediment transport)</li> </ul>	<ul> <li>Threats</li> <li>Wrong sediment composition can result in development of cliffs</li> <li>Sudden loss of nourished material, e.g.</li> </ul>
<ul> <li>Opportunities</li> <li>Beach maintains its natural appearance</li> <li>Additional sediment for adjacent beaches (longshore sediment transport)</li> <li>Public engagement and awareness for</li> </ul>	<ul> <li>Threats</li> <li>Wrong sediment composition can result in development of cliffs</li> <li>Sudden loss of nourished material, e.g. following storm events, can lead to nega-</li> </ul>
<ul> <li>Opportunities</li> <li>Beach maintains its natural appearance</li> <li>Additional sediment for adjacent beaches (longshore sediment transport)</li> <li>Public engagement and awareness for coastal processes and protection measures</li> </ul>	<ul> <li>Threats</li> <li>Wrong sediment composition can result in development of cliffs</li> <li>Sudden loss of nourished material, e.g. following storm events, can lead to nega- tive public perception</li> </ul>
<ul> <li>Opportunities</li> <li>Beach maintains its natural appearance</li> <li>Additional sediment for adjacent beaches (longshore sediment transport)</li> <li>Public engagement and awareness for coastal processes and protection measures</li> <li>Enhancement of the ecosystem as the</li> </ul>	<ul> <li>Threats</li> <li>Wrong sediment composition can result in development of cliffs</li> <li>Sudden loss of nourished material, e.g. following storm events, can lead to nega- tive public perception</li> <li>Changes of sediment composition and</li> </ul>

Shoreface nourishments (Table 13) are placed on the submerged part of the coastal profile (Mangor et al. 2017). The borrow material is usually dumped at the nourishment site directly from a dredging vessel. As construction activities at the beach are avoided, the activity is cheaper than the construction of a beach nourishment. In addition, the beach can still be used by the public during the construction phase. Shoreface nourishments reinforce offshore sandbanks, stabilize the coastal foundation and provide long-term sediment supplement to the coastal sediment budget (Sørensen et al. 2014). The nourishments facilitate offshore wave breaking, thus reducing the wave energy that arrives at the beach. The hydrodynamic effect of a shoreface nourishment is therefore similar to the effect of a breakwater (Hoekstra et al. 1997, van Duin et al. 2004, Sørensen et al. 2014). However, it is difficult to predict the morphodynamic behavior of the nourishment volume (Gijsman et al. 2019c). In addition, the hydrodynamic effects are reduced during high water levels, which dampen the effectiveness of the nourishment during extreme events like storm surges. At the same time, a shoreface nourishment is usually more resilient towards extreme events, whereas a beach nourishment can erode during a single strong storm event. Shoreface nourishments are considered an effective protection measure for tidally influenced coastlines (e.g. the North Sea), whereas they are less efficient in coastal areas with lower wave energy (Furmanczyk 2004, van Rijn 2010).

With increasing water depth, sediment grain size decreases and species abundance and diversity increase. Benthic organisms in these habitats are less resilient to strong sediment dynamics (e.g. burial) than species in the highly dynamic shoreline habitats, leading to longer recovery times after a disturbance (Rakocinski et al. 1996, Janssen and Mulder 2005).

Habitats located in between several sandbanks or reefs are especially sensitive, as they usually offer high diversity and abundance (Janssen and Mulder 2005). Studies investigating the long-term impacts of shoreface nourishments are rare, as a monitoring of ecological processes in these areas is especially complex.

Table 13: SWOT	analysis for shore	face nourishme	nts, i.e. the not	urishment volun	ne is placed below
mean water level					

Strengths	Weaknesses
<ul> <li>Reduction of wave energy at the beach (during normal water levels)</li> <li>Lower effort than shore nourishment (construction site, vessel transit time)</li> <li>No construction equipment at the beach</li> </ul>	<ul> <li>No wave damping during extreme water levels</li> <li>No additional sediment at the beach</li> <li>No direct increase of beach width, but possible long-term effects</li> <li>Benthic organisms at greater water depth are not adapted to strong sediment dy- namics</li> <li>Low public visibility</li> </ul>
Opportunities	Threats
<ul> <li>Possibility to influence local hydro- and morphodynamics</li> <li>In contrast to shore nourishment: Higher stability during extreme events</li> </ul>	<ul> <li>Changes in morphodynamics can cause hydrodynamic side effects (e.g. rip currents)</li> <li>Long-term disturbance of habitats at the nourishment site</li> </ul>

*Dune nourishment* or dune reinforcement includes the placement of sediment in the upper beach profile or at the toe of the dune, i.e. directly increasing the width of the dune system (Mangor et al. 2017). With a larger sediment buffer, the dune system is protected from breaching during storm surges. Even in the event of erosion, the infrastructure behind the dunes is still protected from flooding. Unlike shoreface nourishments, dune reinforcements do not affect the wave energy at the beach. The morphodynamics of a dune depend merely on the wind and the related aeolian sediment transport. In contrast to beach and shoreface nourishments, designing and monitoring a dune reinforcement is comparatively simple. Planting additional vegetation (e.g. marram grass) can contribute to the stability of the dune, which safeguards the long-term coastal protection functions. However, additional vegetation also prevents the natural dynamics of a dune, which affects the ecosystem on the long term and could lead to a loss of biodiversity (de Groot et al. 2017).

The construction of a dune reinforcement is more expensive and time-consuming than for beach or shoreface nourishments. The initial influence on the beach width is low, as the nourished material only adds to the beach width through aeolian transport or through dune erosion in a severe storm event. Dune reinforcements are sometimes combined with beach or shoreface nourishments, e.g. within the coastal management concepts of Mecklenburg-Vorpommern (StALU MM 2009) or in large-scale management schemes like the Hondsbossche Duinen in the Netherlands. In contrast to the artificial stabilization of dunes, new management concepts focus on the restoration of the natural dune dynamics of the dune system, thereby facilitating biodiversity and the growth of the coastal system with sea-level rise (Löffler et al. 2013, Osswald et al. 2019).

Table 14: SWOT analysis for dune reinforcement.

Strengths	Weaknesses
<ul> <li>Increased dune volume = direct protection (buffer) during flood events</li> <li>Easy dimensioning and monitoring</li> </ul>	<ul><li>No hydrodynamic effectiveness</li><li>High effort (planting of marram grass)</li></ul>
Opportunities	<b>/T1</b>
Opportunities	Inreats

The SWOT analysis shows that the different nourishment techniques have benefits and drawbacks that need to be balanced depending on the local boundary conditions at the nourishment site and the requirements of the stakeholders (e.g. local communities or beachgoers). Future research results, especially regarding long-term ecological and morphological impacts of nourishment activities, can help turning *opportunities* and *threats* into known *strengths* and *weaknesses*, thus reducing the risk of the applications. With the remaining unknowns, coastal engineers and planners have to choose the best possible option for their respective application, considering all boundary conditions and resulting risks for the environment. It must be noted that the biological processes which are so far unknown might have additional impacts on the coastal ecosystem. Coastal protection is an active interference with the coastal environment and as such always implicates a risk for the protection of lives and property.

#### 8 Conclusions

The research project STENCIL combined various methods and disciplines to provide an interdisciplinary view of the challenges faced by coastal managers and engineers when designing shore nourishments for the sustainable protection of developed coastlines. To address these challenges, STENCIL has provided improved numerical and analytical models (chapters 2, 3 and 4), laboratory procedures (chapter 6) and comprehensive datasets of laboratory experiments (chapter 4) and field measurements (chapter 5). The review of nourishment practice has revealed knowledge gaps and differences between country legislation and coastal management strategies. Based on the project results, the concluding SWOT analysis provides a tool for decision-makers and a basis for both upcoming research projects as well as for a strategy to establish an EAM for shore nourishments.

## 9 Acknowledgments

This study has been funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the BMBF framework program Research for Sustainable Development (FONA) through the project STENCIL (contract no. 03F0761 A–D).

We would like to dedicate this scientific article to our dear friend, colleague and coauthor Dr. Christian Hass, who unexpectedly passed away in September 2020 after a short and serious illness. Christian has worked for many years in coastal research in the North Sea as well as in Antarctica. We knew him as a wonderful mentor, colleague and person who had a significant share of the successful course of the STENCIL project. We miss him dearly.

## 10 References

Armstrong, S. B.; Lazarus, E. D.: Masked shoreline erosion at large spatial scales as a collective effect of beach nourishment. https://doi.org/10.1029/2018EF001070, 2019.

Bird, E.; Lewis, N.: Beach Renourishment. Springer International Publishing, Cham, 2015.

Black, K. S.; Tolhurst, T. J.; Paterson, D. M.; Hagerthey, S. E.: Working with Natural Cohesive Sediments. In: J Hydraul Eng, 128, 2–8. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:1(2), 2002.

Borenfreund, E.; Puerner, J. A.: Toxicity determined invitro by morphological alterations and neutral red absorption. In: Toxicological Letters, 24,119–124, 1985.

Borenfreund, E.; Shopsis, C.: Toxicity monitored with a correlated set of cell-culture assays. In: Xenobiotica, 15, 705–711, 1985.

Bryan, G. W.; Langston, W. J.: Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: a review. In: Environ Pollut, 76, 89–131. https://doi.org/10.1016/0269-7491(92)90099-V, 1992.

Carroll, B.; Turpin, T.: Environmental Impact Assessment Handbook: A Practical Guide for Planners, Developers and Communities, Reprinted. Thomas Telford, 2002.

Cofalla, C.: Hydrotoxikologie - Entwicklung einer experimentellen Methodik zur Charakterisierung und Bewertung kohäsiver schadstoffbehafteter fluvialer Sedimente. RWTH Aachen University, 2015.

de Groot, A.; Janssen, G.; Isermann, M.;Stock, M.; Glahn, M.; Arens, B. et al.: Wadden Sea Quality Status Report: Beaches and Dunes. In: Kloepper, S.; Common Wadden Sea Secretariat (eds): Wadden Sea Quality Status Report 2017. Wilhelmshaven, 2017.

de Jong, M. F.; Baptist, M. J.; Lindeboom, H. J.; Hoekstra, P.: Short-term impact of deep sand extraction and ecosystem-based landscaping on macrozoobenthos and sediment characteristics. In: Mar Pollut Bull, 97, 294–308. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul. 2015.06.002, 2015.

Dean, R. G.: Beach nourishment: Theory and practice. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 2002.

Dette, H.; Fuehrboeter, A.; Raudkivi, A.: Interdependence of beach fill volumes and repetition intervals. In: J Waterw Port, Coast Ocean Eng, 120, 580–593, 1994.

DIN 38415-6-2009: German standard methods for the examination of water, waste water and sludge - subanimal testing (group T) - Part 6: Toxicity to fish. Determination of the non-acute-poisonous effect of waste water to fish eggs by dilution limits (T6). German Institute for Standardization (DIN), Berlin, Germany, 2009.

Dohmen-Janssen, C. M.; Hanes, D. M.: Sheet flow dynamics under monochromatic nonbreaking waves. In: J Geophys Res, 107, 21. https://doi.org/10.1029/2001JC001045, 2002.

Dominik, J.; Förstner, U.; Mangini, A.; Reineck, H.-E.: 210Pb and 137Cs chronology of heavy metal pollution in a sediment core from the German Bight (North Sea). In: Senckenbergiana maritima, 10, 213–227, 1978.

Essink, K.; Birklund, J.; Madsen, H. T. et al.: Risk Analysis of Coastal Nourishment Techniques (RIACON) - Final Evaluation Report. Haren, NL, 1997.

Furmanczyk, K.: Eurosion case study: Hel Peninsula (Poland), 2004.

Gijsman, R.; Visscher, J.; Ruessink, G.; Schlurmann, T.: Observations on long-term sandbar behaviour along a curved coastline. Earth Surf Process Landforms (in preparation), 2019a.

Gijsman, R.; Visscher, J.; Schlurmann, T.: An assessment of beach nourishment lifetimes on Sylt in Germany. In: Proceedings of the 8th short course/conference on applied coastal research, 2019b.

Gijsman, R.; Visscher, J.; Schlurmann, T.: The lifetime of shoreface nourishments in fields with nearshore sandbar migration. In: Coast Eng, 103521, https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.103521, 2019c.

Gijsman, R.; Visscher, J.; Schlurmann, T.: A method to systematically classify design characteristics of sand nourishments. In: Coast Eng Proc, 1, 95, https://doi.org/10.9753/icce.v36.papers.95, 2018.

Greene, K.: Beach Nourishment: A Review of the Biological and Physical Impacts. ASMFC Habitat Management Series #7. Washington, D.C., 2002.

Hamm, L.; Katapodi, I.; Dohmen-Janssen, M. et al.: Grain size, gradation and density effects on sediment transport processes in oscillatory flow conditions. Delft, 1998.

Hanson, H.; Brampton, A.; Capobianco, M. et al.: Beach nourishment projects, practices, and objectives - A European overview. In: Coast Eng, 47, 81–111, https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00122-9, 2002.

Hassan, W. N.; Ribberink, J. S.: Transport processes of uniform and mixed sands in oscillatory sheet flow. In: Coast Eng, 52, 745–770, https://doi.org/10.1016/j.coastaleng. 2005.06.002, 2005.

Hassan, W. N. M.: Transport of size-graded and uniform sediments under oscillatory sheet-flow conditions. University of Twente, the Netherlands, 2003.

Hoekstra, P.; Houwman, K. T.; Kroon, A. et al.: Morphological Development of the Terschelling Shoreface Nourishment in Response to Hydrodynamic and Sediment Transport Processes. In: Coastal Engineering 1996. American Society of Civil Engineers, New York, NY, 2897–2910, 1997.

Holland, K. T.; Elmore, P. A.: A review of heterogeneous sediments in coastal environments. In: Earth-Science Rev, 89, 116–134. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008. 03.003, 2008.

Hollert, H.; Keiter, S.; Koenig, N.; Rudolf, M.; Ulrich, M.; Braunbeck, T.: A new Sediment Contact Assay to assess particle-bound pollutants using zebrafish (Danio rerio) embryos. In: Journal of Soils and Sediments, 3, 197–207, 2003.

Höss, S.; Ahlf, W.; Fahnenstich, C. et al.: Variability of sediment-contact tests in freshwater sediments with low-level anthropogenic contamination – Determination of toxicity thresholds. In: Environ Pollut, 158, 2999–3010. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.05.013, 2010.

Houssais, M.; Lajeunesse, E.: Bedload transport of a bimodal sediment bed. In: J Geophys Res, 117, F04015. https://doi.org/10.1029/2012JF002490, 2012.

Hudjetz, S.; Herrmann, H.; Cofalla, C. et al.: An attempt to assess the relevance of flood events – biomarker response of rainbow trout exposed to resuspended natural sediments in an annular flume. In: Environ Sci Pollut Res, 21, 13744–13757. https://doi.org/10.1007/s11356-013-2414-2, 2014.

Hurther, D.; Thorne, P. D.; Bricault, M. et al.: A multi-frequency Acoustic Concentration and Velocity Profiler (ACVP) for boundary layer measurements of fine-scale flow and sediment transport processes. In: Coast Eng, 58, 594–605. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.01.006, 2011.

Inui, T.; Dibajnia, M.; Isobe, M.; Watanabe, A.: A transport rate formula for mixed-size sands and its application. In: Proceedings of the 42nd Japanese Annual Conference on Coastal Engineering, 356–360, 1995.

Janssen, G.; Mulder, S.: Zonation of macrofauna across sandy beaches and surf zones along the Dutch coast. In: Oceanologia, 47, 265–282, 2005.

Jay, S.; Jones, C.; Slinn, P.; Wood, C.: Environmental impact assessment: Retrospect and prospect. In: Environ Impact Assess Rev, 27, 287–300. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2006.12.001, 2007.

Jha-Thakur, U.; Fischer, T. B.: 25 years of the UK EIA System: Strengths, weaknesses, opportunities and threats. In: Environ Impact Assess Rev, 61, 19–26. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2016.06.005, 2016.

Johann, S.: Acute and mechanism-specific toxicity of oils and oil spill response actions -Adaption of relevant bioanalytical tools and evaluation of ecotoxicological effects. Dissertation. RWTH Aachen University, 2020.

Joliffe, I.: Principal Component Analysis. Springer, 2002.

Keiter, S.; Rastall, A.; Kosmehl, T.; Wurm, K.; Erdinger, L.; Braunbeck, T.; et al.: Ecotoxicological assessment of sediment, suspended matter and water samples in the upper danube river – a pilot study in search for the causes for the decline of fish catches. In: Environmental Science and Pollution Research, 13, 308–319, 2006.

Klee, N.; Gustavsson, L.; Kosmehl, T.; Engwall, M.; Erdinger, L.; Braunbeck, T.; et al.: Changes in toxicity and genotoxicity of industrial sewage sludge samples containing nitroand amino-aromatic compounds following treatment in bioreactors with different oxygen regimes. In: Environmental Science and Pollution Research, 313–320, 2004.

Leewis, L.; van Bodegom, P. M.; Rozema, J.; Janssen, G. M.: Does beach nourishment have long-term effects on intertidal macroinvertebrate species abundance? In: Estuar Coast Shelf Sci, 113, 172–181. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.07.021, 2012.

LKN.SH: Fachplan Küstenschutz Sylt. Husum, 2015.

Löffler, M.; van der Spek, A. J. F.; van Gelder-Maas, C.: Options for dynamic coastal management. A guide for managers. Delft, 2013.

Mangor, K.; Drønen, N.; Kærgaard, K. H.; Kristensen, S. E.: Shoreline Management Guidelines. Hørsholm, 2017.

McFarland, S.; Whitcombe, L.; Collins, M.: Recent shingle beach renourishment schemes in the UK: Some preliminary observations. In: Ocean Coast Manag, 25, 143–149. https://doi.org/10.1016/0964-5691(94)90044-2, 1994.

Menn, I.; Junghans, C.; Reise, K.: Buried alive: Effects of beach nourishment on the infauna of an erosive shore in the North Sea. In: Senckenbergiana maritima, 32, 125–145, 2003.

Mielck, F.; Hass, H. C.; Michaelis, R. et al.: Morphological changes due to marine aggregate extraction for beach nourishment in the German Bight (SE North Sea). In: Geo-Marine Lett. https://doi.org/10.1007/s00367-018-0556-4, 2018.

Mielck, F.; Holler, P.; Bürk, D.; Hass, H. C.: Interannual variability of sorted bedforms in the coastal German Bight (SE North Sea). In: Cont Shelf Res, 111, 31–41. https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.10.016, 2015.

Mielck, F.; Michaelis, R.; Hass, H.-C.; Hertel, S.; Ganal, C.; Armonies, W.: Persistent effects of sand extraction on habitats and associated benthic communities in the German Bight. In: Biogeosciences, 18, 3565–3577. https://doi.org/10.5194/bg-18-3565-2021, 2021.

Mitchener, H.; Torfs, H.: Erosion of mud/sand mixtures. In: Coast Eng, 29, 1–25. https://doi.org/10.1016/S0378-3839(96)00002-6, 1996.

O'Donoghue, T.; Wright, S.: Concentrations in oscillatory sheet flow for well sorted and graded sands. In: Coast Eng, 50, 117–138. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng. 2003.09.004, 2004a.

O'Donoghue, T.; Wright, S.: Flow tunnel measurements of velocities and sand flux in oscillatory sheet flow for well-sorted and graded sands. In: Coast Eng, 51, 1163–1184. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.08.001, 2004b.

Ojeda, E.; Ruessink, B.; Guillen, J.: Morphodynamic response of a two-barred beach to a shoreface nourishment. In: Coast Eng, 55, 1185–1196. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.05.006, 2008.

Osswald, F.; Dolch, T.; Reise, K.: Remobilizing stabilized island dunes for keeping up with sea level rise? In: J Coast Conserv, 23, 675–687. https://doi.org/10.1007/s11852-019-00697-9, 2019.

Peterson, C. H.; Bishop, M. J.: Assessing the Environmental Impacts of Beach Nourishment. In: Bioscience, 55, 887–896, 2005.

Rakocinski, C. F.; Heard, R. W.; LeCroy, S. E. et al.: Responses by Macrobenthic Assemblages to Extensive Beach Restoration at Perdido Key, Florida, USA. In: J Coast Res, 12, 326–353, 1996.

Ribberink, J. S.; Dohmen-Janssen, M.; Hanes, D. M. et al.: Near-Bed Sand Transport Mechanisms under Waves - A Large-Scale Flume Experiment (Sistex99). In: Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering 2000. Sydney, 3263–3276, 2000.

Rosov, B.; Bush, S.; Roberts Briggs, T.; Elko, N.: The state of understanding the beach impacts of neach nourishment activities on infaunal communities. In: Shore and Beach, 84, 51–55, 2016.

Ruessink, B.; Wijnberg, K.; Holman, R. et al.: Intersite comparison of interannual nearshore bar behavior. In: J Geophys Res, 108. https://doi.org/10.1029/2002JC001505, 2003.

Schlacher, T. A.; Noriega, R.; Jones, A.; Dye, T.: The effects of beach nourishment on benthic invertebrates in eastern Australia: Impacts and variable recovery. In: Sci Total Environ, 435, 411–417. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.071, 2012.

Schretlen, J. L. M.: Sand transport under full - scale progressive surface waves. Universiteit Twente, 2012.

Sørensen, P.; Madsen, H. T.; Earnshaw, M. E. et al.: COADAPT - Danish Coast and Climate Adaption - Beach and shoreface nourishment at Thorsminde Tange, Denmark. Lemvig, 2014.

Speybroeck, J.: Ecology of Macrobenthos as a Baseline for an Ecological Adjustment of Beach Nourishment. Gent University, 2007.

Speybroeck, J.; Bonte, D.; Courtens, W. et al.: Beach nourishment: an ecologically sound coastal defence alternative? A review. In: Aquat Conserv Mar Freshw Ecosyst, 16, 419–435. https://doi.org/10.1002/aqc.733, 2006.

StALU MM: Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern. Rostock, 2009.

Staudt, F.; Ganal, C.; Gijsman, R. et al.: Erfahrungen mit Sandersatz im Küstenschutz. Eine allgemeine Entscheidungsunterstützung für die Praxis mit aktuellen Erkenntnissen aus der Wissenschaft. Hannover, 2019a.

Staudt, F.; Gijsman, R.; Ganal, C. et al.: The sustainability of beach nourishments: A review of nourishment and environmental monitoring practice. In: EarthArXiv. https://doi.org/10.31223/osf.io/knrvw, 2020.

Staudt, F.; Mullarney, J. C.; Pilditch, C. A.; Huhn, K.: Effects of grain-size distribution and shape on sediment bed stability, near-bed flow and bed microstructure. In: Earth Surf Process Landforms, 44, 1100–1116. https://doi.org/10.1002/esp.4559, 2019b.

Staudt, F.; Mullarney, J. C.; Pilditch, C. A.; Huhn, K.: The role of grain-size ratio in the mobility of mixed granular beds. In: Geomorphology, 278, 314–328. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.015, 2017.

Strecker, R.; Seiler, T. B.; Hollert, H.; Braunbeck, T.: Oxygen requirements of zebrafish (Danio rerio) embryos in embryo toxicity tests with environmental samples. In: Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 153(3), 318–327, 2011.

Tabat, W.: Sedimentologische Verteilungsmuster in der Nordsee (Sedimentary distribution patterns in the North Sea). In: Meyniana, 31, 83–124, 1979.

Temmler, H.: Sichtbeschreibung vom Untersuchungsbohrungen im Seegebiet westlich von Sylt. Gutachten 82/34. Husum, 1983.

Temmler, H.: Gutachten über den Aufbau des tieferen Untergrundes im Hinblick auf die Gewinnung von Spülsand im Umfeld der Insel Sylt. Gutachten 91/8, 1994.

van der A, D. A.; Ribberink, J. S.; van der Werf, J. J. et al.: Practical sand transport formula for non-breaking waves and currents. In: Coast Eng, 76, 26–42. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.01.007, 2013.

van der A, D. A.; van der Zanden, J.; O'Donoghue, T. et al.: Large-scale laboratory study of breaking wave hydrodynamics over a fixed bar. In: J Geophys Res Ocean. https://doi.org/10.1002/2016JC012072, 2017.

van der Werf, J. J.; Schretlen, J. J. L. M.; Ribberink, J. S., O'Donoghue, T.: Database of fullscale laboratory experiments on wave-driven sand transport processes. In: Coast Eng, 56, 726–732. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.01.008, 2009.

Van der Werf, J. J.; Staudt, F.; Posanski, D. et al.: Understanding and modelling wavedriven mixed sand transport. In: Coastal Sediments '19. Tampa/St. Pete, 2019.

van Duin, M. J. P.; Wiersma, N. R.; Walstra, D. J. R. et al.: Nourishing the shoreface: observations and hindcasting of the Egmond case, The Netherlands. In: Coast Eng, 51, 813–837. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.011, 2004.

van Ledden, M.; van Kesteren, W. G. M.; Winterwerp, J. C.: A conceptual framework for the erosion behaviour of sand-mud mixtures. In: Cont Shelf Res, 24, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.csr.2003.09.002, 2004.

van Rijn, L. C.: Coastal Erosion based on the concept of sediment cells, 2010.

Vanden Eede, S.; Van Tomme, J.; De Busschere, C. et al.: Assessing the impact of beach nourishment on the intertidal food web through the development of a mechanistic-envelope model. In: J Appl Ecol, 51, 1304–1313. https://doi.org/10.1111/1365-2664.12314, 2014.

Venditti, J. G.; Dietrich, W. E.; Nelson, P. A. et al.: Mobilization of coarse surface layers in gravel-bedded rivers by finer gravel bed load. In: Water Resour Res, 46, W07506. https://doi.org/10.1029/2009WR008329, 2010.

Verhagen, H. J.: Method for Artificial Beach Nourishment. In: Coastal Engineering, 1–12, 1992.

von Haugwitz, W.; Wong, H.; Salge, U.: The mud area southeast of Helgoland: A reflection seismic study. In: Mitteilungen aus dem Geol. Inst. der Universität Hamburg, 65, 409–422, 1988.

Werner, F.: Coarse sand patterns in the southeastern German Bight and their hydrodynamic relation-ships. In: Meyniana, 56, 117–148, 2004.

Wilmink, R. J. A.; Lodder, Q. J.; Sørensen, P.: Assessment of the Design and Behaviour of Nourishments in the North Sea Region. Towards an NSR Guideline for Nourishments. In: Coastal Dynamics, 801–809, 2017.

Wooldridge, T., Henter, H. J.; Kohn, J. R.: Effects of beach replenishment on intertidal invertebrates: A 15-month, eight beach study. In: Estuar Coast Shelf Sci, 175, 24–33. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.03.018, 2016.

Wright, L.; Short, A. D.: Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. In: Marine Geology, 56, 93–118. https://doi.org/10.1016/0025-3227(84)90008-2, 1984.

Zeiler, M.; Figge, K.; Griewatsch, K.; Diesing, M.; Scharzer, K.: Regenerierung von Materialentnahmestellen in Nord- und Ostsee. In: Die Küste, 68, 67–98, 2004.

Zielke, H.; Seiler, T.-B.; Niebergall, S.; Leist, E.; Brinkmann, M.; Spira, D.; Streck, G.; Brack, W.; Feiler, U.; Braunbeck, T.; Hollert, H.: The impact of extraction methodologies on the toxicity of sediments in the zebrafish (Danio rerio) embryo test. In: Journal of Soils and Sediments, 11, 352–363, 2011.

Zorndt, A.; Wurpts, A.; Schlurmann, T.; Ohle, N.; Strotmann, T.: Dune migration and sand transport rates in tidal estuaries: the example of the river Elbe. In: Proceedings of the 32nd international conference on coastal engineering. https://doi.org/10.9753/icce.v32. sediment.38, 2010.

Zorndt, A.; Wurpts, A.; Schlurmann, T.: The influence of hydrodynamic boundary conditions on characteristics, migration, and associated sand transport of sand dunes in a tidal environment: A long-term study of the Elbe Estuary. In: Ocean Dyn, 61, 1629–1644. https://doi.org/10.1007/s10236-011-0452-1, 2011.

# Seegangsbelastungen (SEELE) – Prozesse der Hydrodynamik bei Interaktion von Richtungsseegang mit Strömung

Mike Lieske<sup>1</sup>, Torsten Schlurmann<sup>2</sup> und Nils B. Kerpen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Leibniz Universität Hannover, Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen, lieske@lufi.uni-hannover.de

<sup>2</sup> Leibniz Universität Hannover, Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen

### Zusammenfassung

Die Errichtung von Bauwerken im küstennahen und Offshore-Bereich erfährt seit einigen Jahren, insbesondere im Hinblick auf die Erschließung neuer, regenerativer Energiequellen, eine zunehmend größere Bedeutung. Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen des vom BMBF geförderten KFKI-Forschungsvorhabens Seegangsbelastungen (SEELE) (FKZ 03KIS107) Untersuchungen zum Einfluss der Interaktion zwischen Seegangs- bzw. Wellenbelastungen und (Tide-) Strömung auf Bauwerke im Küstennahbereich durchgeführt, mit dem Ziel der Erweiterung des wissenschaftlichen und technischen Prozessverständnisses zur schrägen Wellen-Strömungs-Interaktion. Die Basis stellten wissenschaftliche Untersuchungen von physikalischen Modellversuchen im 2013/2014 erweiterten 3D-Wellenbecken des Ludwig-Franzius-Instituts für Wasserbau, Astuar- und Küsteningenieurwesen in Hannover dar. Der Schwerpunkt der Forschung lag auf der Untersuchung von langkämmigen Wellen, die sich schräg, gleich- oder entgegengesetzt zur Strömungsrichtung ausbreiten. Dabei wurde die Interaktion mit einem Strömungsfeld für unterschiedliche Wassertiefen, Wellenperioden, Wellenhöhen und Strömungsgeschwindigkeiten in einem 3D-Wellen-Strömungsbecken untersucht. Das Ziel des Projekts war eine tiefergehende Einsicht in die Prozesse der Wellen-Strömungs-Interaktion und deren Dokumentation.

### Schlagwörter

Strömung, Wellen, schräge Wellen-Strömungs-Interaktion, 3D-Wellenbecken, wasserbauliche Modellversuche

### Summary

Natural processes drive the nonlinear interactions between waves and currents. The robust reproduction of systems and states in natural environments is still rather limited and therefore physical model tests of wavecurrent conditions are required. Usually, assessments of processes and loads on coastal structures are derived from experiments either regarding flow only or waves only scenarios in independent physical models and therefore exclude the interaction between waves and currents as a regular feature. Assessments of loads on coastal structures stemming from oblique wave-current interaction remain a challenging and underresearched topic. For this reason, the KFKI research project "Seegangsbelastungen (Seele)" (Contract No. 03KIS107) was founded by the German "Federal Ministry of Education and Research (BMBF)". Experiments in a 3D wave-current basin were performed to thoroughly investigate drivers and effects of oblique wave-current interaction. Experiments comprise long-crested regular and irregular wave trains on obliquely opposing and following currents for different wave periods, wave heights and flow rates. To observe the physical processes of wave-current interaction, it was essential to proceed as follows:

- 1. Detailed flow experiments without waves (current alone, CA) in order to characterise the undisturbed currents.
- 2. Detailed wave experiments without current (waves alone, WA) in order to characterise the undisturbed waves.
- 3. Wave-current (WC) experiments in order to determine the deviations from only-current and onlywave conditions in order to identify the wave-current interactions.

Following this approach, an accurate evaluation of the processes of wave-current interaction was carried out and includes the investigation of side effects of the testing facility.

# Keywords

current, waves, oblique wave-current interaction, 3D wave basin, physical model tests

### 1 Einleitung

Die Errichtung von Bauwerken im küstennahen Bereich erfährt seit einigen Jahren, insbesondere im Hinblick auf die Erschließung neuer, regenerativer Energiequellen, eine immer größere Bedeutung. In diesem Zusammenhang spielen neben der Offshore-Windenergie zusätzlich andere Energienutzungsformen, wie z. B. Tideströmungs- oder Wellenenergiekraftwerke, eine zentrale Rolle.

Gründungsstrukturen und Verankerungen stellen häufig einen erheblichen Teil der gesamten Investitionskosten meerestechnischer Konstruktionen dar. Dennoch ist deren Bemessung derzeit häufig mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, welche vorwiegend auf Lücken hinsichtlich des Verständnisses und der Modellbildung dynamischer Prozesse und Versagensmechanismen bei der Wechselwirkung zwischen Seegang, Bauwerk und Boden zurückzuführen sind. Die Vorhersage von Lastzuständen an Bauwerken ist für eine wirtschaftliche Dimensionierung jedoch von großer Bedeutung. Durch den Betrieb verschiedenster meerestechnischer Konstruktionen steigt seit Jahren das Interesse am generellen und detaillierten Prozessverständnis sowie den resultierenden Belastungen während der Interaktion von natürlichem Seegang mit Strömungen. Küstenschutzbauwerke werden zudem meist vom natürlichen Seegang mit überlagerter Küstenquerströmung belastet. Es existierten bislang nur wenige Forschungseinrichtungen, die diese Phänomene "dreidimensional", d. h. mit Möglichkeiten zur räumlichen und wirklichkeitsnahen Überlagerung und Analyse der Interaktion von Strömungen mit Richtungsseegang im physikalischen Modell analysieren konnten.

Zur Dimensionierung von Schutz- und Gründungsbauwerken sind u. a. hydraulische Randbedingungen erforderlich. Je genauer diese im Vorfeld abgeschätzt bzw. prognostiziert werden können, desto ökonomischer können die Dimensionierung der Bauwerke und ggf. auch deren Unterhaltung über den Lebenszyklus ausfallen. Große Unsicherheiten bestehen derzeit vor allem in der Quantifizierung des Einflusses von Strömungen auf den vorherrschenden Seegang, das Brechen von Wellen und die Kolkausbildung bauwerksnah. Daher stellt die Beschreibung und das Verständnis der physikalischen Prozesse bei der Änderung von Seegangsparametern durch die Präsenz und bedingten Wechselwirkungen einer Strömung mit Wellen einen Schwerpunkt des Forschungsprojekts dar.

Mit zunehmender Rechnerleistung sind in den vergangenen Jahren auch die Möglichkeiten zur Untersuchung o. g. Fragestellungen mittels numerischer Berechnungsmethoden gestiegen. Numerische Berechnungen für Seegangsszenarien liefern makroskopisch betrachtet gute Näherungen. Auf Meso- und Mikro-Ebene, d. h. vor allem zeitlich und örtlich hochaufgelöst, bedarf es allerdings nach wie vor belastbarer Validierungsdaten der Modelle, welche aus Messungen in physikalischen Modellversuchen gewonnen werden können.

Für die genannten Fragestellungen und Untersuchungsschwerpunkte war die Erweiterung der vorhandenen Versuchseinrichtung im bestehenden 3D-Wellenbecken des Ludwig-Franzius-Instituts um die Generierung von Strömungen sowie weiterer technischer Anlagen erforderlich. Das 3D-Wellen-Strömungsbecken mit einem modularen Tiefteil im Zentrum des Beckens bietet somit auch nach Beendigung des Forschungsvorhabens zahlreiche neue Möglichkeiten der Analyse und Bewertung von Belastungen auf Gründungsbauwerke aufgrund kombinierter Einflüsse aus Richtungsseegang und Strömung sowie sich einstellende Erosions- und Sedimentationsprozesse am Meeresboden.

Die zur Erreichung der Ziele des Forschungsvorhabens erforderlichen Arbeiten lassen sich hierbei wie nachfolgend aufgeführt zusammenfassen:

- Vorarbeiten, Konzeption und Installation der Erweiterungsmaßnahmen zur Strömungsgenerierung, Kolkbildungsuntersuchung und Wellenabsorption im bestehenden 3D-Wellenbecken.
- Messungen und Analysen zur Veränderung der Seegangscharakteristik bei einer schrägen oder orthogonalen Wellen-Strömungs-Interaktion.
- Formulierung allgemeingültiger Zusammenhänge o. g. Untersuchungen.

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten KFKI-Forschungsvorhabens wurden zwei Treffen mit einer projektbegleitenden Gruppe zum wissenschaftlichen Ergebnisaustausch durchgeführt. Die projektbegleitende Gruppe setzte sich aus Expertinnen und Experten unterschiedlicher Einrichtungen mit breitem Hintergrundwissen zusammen. Folgende Teilnehmer/Organisationen waren vertreten:

- Dipl.-Ing. Holger Blum, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Direktion Norden
- Prof. Dr. Gabriele Gönnert, Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer Hamburg (LSBG Hamburg), Hamburg
- Dipl.-Ing. Holger Rahlf, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Hamburg
- Dipl.-Ing. Frank Thorenz, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Direktion Norden; Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)
- Dr. Manfred Zeiler, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg

#### 2 Stand der Wissenschaft

Die theoretischen Grundlagen zur wissenschaftlichen Analyse der Prozesse aus Hydro-, Sediment- und Morphodynamik bei Interaktion von Richtungsseegang mit Strömung sind detailliert in Lieske et al. (2017) veröffentlicht und adressieren folgende Schwerpunkte:

- (i) Klassifizierung von Strömungen, turbulenten Strömungseigenschaften, Art der Turbulenz sowie Analysemöglichkeiten turbulenter Strömungen
- Wellen im Kontext von Wellentheorien, Wellentransformationen, der Parametrisierung von Seegang, Analysemethoden in Zeit- und Frequenzbereich sowie Analysemethoden von multidirektionalem Seegang
- (iii) Wellen-Strömungs-Interaktion mit dem gesonderten Fokus des Einflusses von Strömungen auf Wellen und analog dem Einfluss von Wellen auf Strömungen.

Im Nachfolgenden wird eine kurze Übersicht zum Stand der Wissenschaft zur Interaktion von Wellen mit Strömungen gegeben und veröffentlichte Ergebnisse zu Erkenntnissen aus physikalischen Modellversuchen zusammengefasst.

#### 2.1 Interaktion von Wellen und Strömungen

Die Interaktion von Wellen und Strömungen ist in der Theorie bereits beschrieben. Im nachfolgenden wird einleitend eine kurze Zusammenfassung der gesammelten Erkenntnisse aus Peregrine (1976) und Peregrine und Jonsson (1983) gegeben.

Wasserwellen breiten sich als Störung an der Wasseroberfläche aus, der Wellenfortschritt ist direkt von der Wassertiefe abhängig. Während sich die Wellenorbitale im Tiefwasser nahezu unbeeinflusst bewegen können, kommt es im Übergangsbereich und vor allem im Flachwasserbereich zu einem Kontakt der Wellen mit der Sohle, was zu einer Stauchung der Wellenorbitale führt. Im Falle einer in der Wassersäule auftretenden Strömung, die sich im Einflussbereich der Wellenorbitale bewegt, kann es zu einer Beeinflussung der Oberflächenwelle durch die Strömung kommen.

Windwellen in der Natur werden durch Wind erzeugt. Strömungen können den effektiven Wind beeinflussen, da sich die relative Geschwindigkeit des Windes zu einer bewegten Wasseroberfläche zur relativen Geschwindigkeit des Windes zu einem festen Boden unterscheidet. Frei laufende Wellen werden sowohl durch die Grundberührung als auch durch Interaktion mit Strömungen refraktiert, wobei sich dieser Effekt in Küstennähe aufgrund der größeren Strömungsgradienten stärker ausprägen kann als auf offener See.

Zwei wesentliche Einflüsse von Strömungen wirken auf windgenerierte Wellen. Einerseits wird die relative Geschwindigkeit zwischen Luft und Wasser entweder erhöht oder gesenkt (größerer Einfluss bei entgegengesetzter Strömung) und andererseits die Änderung der effektiven Streichlänge (-dauer) des Windes. Bei entgegengesetzter Strömung erhöht sich die effektive Streichlänge und bei Strömungen in gleicher Richtung verringert sie sich entsprechend.

Die meisten theoretischen Arbeiten über Wellen-Strömungs-Interaktion basieren auf einer idealisierten, gleichförmigen Strömung. Strömungen, die für die Wellen-Strömungs-Interaktion von Bedeutung sind, beinhalten Tideströmungen, Meeresströmungen, lokale Strömungen (windgeneriert), Flussströmungen und wellengenerierte Strömungen. Die regelmäßigsten und berechenbarsten dieser Strömungen sind die Tideströmungen, welche gleichzeitig in den meisten Fällen auch die maßgeblichen Strömungen darstellen. Sie beeinflussen die sich oberhalb der Strömung ausbreitenden Wellen am dominantesten.

Um das Berechnen der Veränderung von Wellenlängen (Wellenlänge  $L_1 \rightarrow$  Wellenlänge  $L_2$ ) und Wellenhöhen (Wellenhöhe  $H_1 \rightarrow$  Wellenhöhe  $H_2$ ) eines Wellenzuges durch die Interaktion mit einer großmaßstäblichen Scherströmung über einer horizontalen Sohle zu ermöglichen (vgl. Abbildung 1), wurde von Jonsson und Skovgaard (1978) die sogenannte Erhaltung der "wave action" eingeführt. Diese neue Größe wird beschrieben als Energieeinheit pro Wellenkammlänge, dividiert durch die Kreisfrequenz der Welle. Eine Scherströmung repräsentiert eine horizontal in gleiche Richtung verlaufende Strömung, die zwei unterschiedliche vertikale Strömungsgeschwindigkeiten aufweist. Diese beiden Geschwindigkeiten sind, wie in Abbildung 1 zu sehen ist, durch einen Übergangsbereich, die sogenannte vertikale Scherschicht, voneinander getrennt. Dieser Umstand kann nach Jonsson und Skovgaard (1978) zum Beispiel auf eine Tideströmung zutreffen. Die einlaufenden Wellen werden an der Scherschicht, die theoretisch mehrere Wellenlängen breit sein kann, aufgrund des Geschwindigkeitsgradienten refraktiert. In Wellen-Strömungs-Systemen, wie sie oben beschrieben werden, wird zwischen drei Kurven unterschieden:

- Stromlinien,
- Wellenorthogonalen und
- Wellenstrahlen (wave rays)

Eine Stromlinie gibt die mittlere lokale Fließrichtung der Strömung an. Die Wellenorthogonale ist definiert als die Senkrechte zum Wellenkamm und der Wellenstrahl als eine parallele Linie zum lokalen Gruppengeschwindigkeitsvektor. Ohne Strömungseinfluss ergibt der Wellenstrahl eine Parallele zur Wellenfront, jedoch weicht sie, im Gegensatz zur Wellenorthogonalen, unter Einfluss einer schräg wirkenden Strömung davon ab (Herchenroder 1981), so wie in Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 1: Fortschreiten einer Welle auf einer Scherströmung vom Geschwindigkeitsbereich eins  $(U_i)$  in den Geschwindigkeitsbereich zwei  $(U_2)$ . Mittlere Wellenfront (WF) und Wellenorthogonale (WO) in horizontaler Draufsicht (nach Jonsson und Skovgaard 1978).



Abbildung 1: Horizontale Darstellung der Wellenstrahlen, der absoluten Gruppengeschwindigkeit  $c_{ga}$ , der absoluten Phasengeschwindigkeit  $c_a$  sowie des Wellenzahlvektors k (nach Jonsson 1990).

Große gleich- und entgegen-gerichtete Strömungen sind gemäß Jonsson und Skovgaard (1978) in der Lage, die Wellensteilheit signifikant zu erhöhen. Scherströmungen können einen sogenannten Filterungseffekt bezüglich der Wellen auslösen. Dabei steilen sich kurze Wellen, auf Grund ihrer geringeren Geschwindigkeit, im Bereich der Scherfläche soweit auf, dass sie brechen, bevor sie die Fläche vollständig passieren.

Die Veränderung einer Welle durch eine horizontale Strömung kann auf mehrere Wege erfolgen. Zum einen kann die Wellenlänge dahingehend modifiziert werden, dass Wellenzüge lokal gestreckt oder gestaucht werden und sich aus dieser Verzerrung eine Dopplerverschiebung ergibt. Dies resultiert darin, dass aus einer stationären Beobachtung eine andere Periode ermittelt wird, als aus einer Beobachtung, die sich mit der lokalen Strömungsgeschwindigkeit bewegt. Zum anderen verändern sich die Richtungen der Wellenorthogonale, der Wellenkämme und der Wellenstrahlen (Herchenroder 1981).

Die Dopplerverschiebung ergibt sich aus der Änderung in der beobachteten Frequenz einer Welle, die durch die relative Bewegung zwischen Quelle und Empfänger entsteht. Dadurch wird eine andere Frequenz wahrgenommen, als die tatsächlich von der Welle erzeugte Frequenz. Die Frequenz erhöht sich demnach, wenn der Empfänger sich zur Quelle hin bewegt und mündet in einer Verringerung der Frequenz bei einer Entfernung von der Quelle (Baldenhofer und Marschall 2015).

Eine klare Trennung bzw. Identifizierung der Geschwindigkeitskomponenten von Wellen und Strömung ist laut Peregrine und Jonsson (1983) unbedingt anzustreben. Nur so ist eine eindeutige Festlegung der relevanten Rahmenbedingungen für die Wellen-Strömungs-Interaktion möglich. Das Ziel ist die Definition zweier unterschiedlicher Bezugsrahmen. Der erste Bezugsrahmen ist stationär und soll die Wellenbewegungen erfassen. Der zweite Bezugsrahmen soll sich mit der Strömung bewegen und deren Parameter abbilden. Diesbezüglich bestehen allerdings Unsicherheiten, da der zweite Rahmen nur für eine perfekt gleichförmige Strömung einfach zu definieren ist, weshalb es bei einer ungleichförmigen Strömung zu einer Fehlinterpretation der praktischen oder analytischen Ergebnisse kommen kann.



Abbildung 2: Schematische Darstellung der Dopplerverschiebung. Oben befinden sich Sender (Mitte) und Empfänger (links und rechts) in Ruhe, beide aufgenommenen Frequenzen sind identisch. Unten bewegen sich beide Empfänger relativ zum Sender, links vom Sender weg und rechts auf den Sender zu. Links wird die Frequenz, aufgrund der Bewegung, scheinbar kleiner und rechts größer (nach Kronawitter 2002).

Die meisten Ergebnisse bezüglich des Refraktionseffekts, die in Peregrine und Jonsson (1983) Erwähnung finden, basieren auf linearen Wellentheorien, welche jedoch in Einzelfällen auf nichtlineare Fälle angewendet werden können, wie im Fall der Dopplerrelation. Viele weitere lineare Lösungen müssen modifiziert werden. Bezogen auf herkömmliche Wellenrefraktion bestehen bei auftretender Refraktion unter Strömungseinfluss zwei wesentliche Unterschiede:

- Die Strömung transportiert das Wasser, weshalb Energie zusammen mit der Welle in die gleiche Richtung transportiert werden kann, was sonst nicht der Fall ist.
- Wellenenergie wird, aufgrund des Energieaustauschs mit der Strömung, auch ohne den Einfluss von Reibungsverlusten dissipiert.

Bezüglich der Refraktionstheorie besteht die vordergründige Annahme von lokalen, flachen Wellen, wodurch sich Wellen jederzeit durch flache Wellenzüge auf einer lokalen Ebene erkennen lassen (Peregrine und Jonsson 1983).

Eine Strömung ist durch Turbulenz gekennzeichnet und wird mithilfe einer mittleren Strömung annähernd beschrieben. Durch die vorhandene Turbulenz der Strömung besteht eine Interaktion mit der Wasserwelle. Aufgrund von Turbulenzen in einer Strömung lässt sich die mittlere Fließgeschwindigkeit U nicht mit Hilfe von einfachen mathematischen Formeln beschreiben (Peregrine 1976).

Der größte Unterschied in der Wellenausbreitung im Vergleich zum Fall ohne Strömung (nur Wellen) ist die Tatsache, dass die Richtung der Wellenstrahlen vom Wellenzahl-Vektor abweichen kann. Der Wellenstrahl ist üblicherweise nicht normal zur Wellenkrone, es sei denn Wellen und Strömung hätten die gleiche Fortschrittsrichtung. Daraus folgt, dass die Wellenorthogonalen der Wellenkämme nicht unbedingt die Fortschrittsrichtung anzeigen (Peregrine und Jonsson 1983). Thomas (1990) vergleicht Modellergebnisse mit Daten aus Experimenten. Er stellt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den berechneten und gemessenen Wellenlängen und Geschwindigkeitsprofilen fest. Basierend auf diesen Vergleichen können Rückschlüsse auf den Einfluss der Turbulenzverteilung auf die Fließkinematik und die Anwendbarkeit von verschiedenen Wellentheorien gezogen werden. Die gewonnenen Ergebnisse werden in einem größeren Rahmen, unter Anwendung der Theorie nach Whitham (1974) (zitiert in Thomas 1990) und der Berücksichtigung von Amplituden- und Wellenlängenmodulationen unter einer langsam variierenden Strömung, gesehen.

Die Turbulenzverteilung in der Strömung ist eine bedeutende Komponente bei der Betrachtung der Wellen-Strömungs-Interaktion. Insbesondere der Einfluss auf die Entwicklung der Wellenlänge und der Geschwindigkeiten wird deutlich. Ein sich langsam anpassender Ansatz für finite Wellenamplituden auf konstanten Strömungen wird im Zusammenhang mit experimentellen Daten in Thomas (1990) aufgestellt.

	Autor	WP	SP	BA	EE	SE	Т	PM	NM
Einfluss von Strömung auf Wellenparameter	Dalrymple und Dean (1975)	Х		Х					
	Peregrine (1976)	Х	Х	Х		Х	Х		
	Jonsson und Skovgaard (1978)	Х		Х	Х				
	Brevik (1980)	Х	Х					Х	
	Brevik und Aas (1980)	Х	Х					Х	
	Herchenroder (1981)	Х		Х	Х				
	Thomas (1981)	Х	Х	Х			Х		
	Peregrine und Jonsson (1983)	Х	Х	Х				Х	
	Jonsson und Christoffersen (1984)	Х		Х	Х				
	Thomas (1990)	Х					Х		Х
	Swan und James (1998)	Х	Х	Х	Х		Х	Х	Х
	MacIver et al. (2006)	Х	Х	Х				Х	
	Toffoli et al. (2010)	Х	Х	Х				Х	
	Toffoli et al. (2011)	Х	Х	Х				Х	
Einfluss von Wellen auf Strömungsparameter	Kemp und Simons (1982)	Х	Х	Х				Х	
	Kemp und Simons (1983)	Х	Х	Х			Х	Х	
	Groenweg und Klopman (1998)		Х						Х
	Fredsø et al. (1999)	Х	Х					Х	
	Groenweg und Battjes (2003)	Х	Х				Х	Х	Х
	Musumeci et al. (2006)	Х	Х				Х	Х	
	Faraci et al. (2008)	Х	Χ				X	Х	

Tabelle 1: Auflistung relevanter Autoren zur Wellen-Strömungs-Interaktion mit Kennzeichnung (X) der Schwerpunkte der jeweiligen Studie.

WP = Wellenparameter; SP = Strömungsparameter; BA = Berechnungsansätze; EE = Energieerhaltung; SE = Strömungseigenschaften; T = Turbulenz; PM = Physikalische Modellierung;NM = Numerische Modellierung

Swan und James (1998) führen an, dass ein funktionierendes Wellen-Strömungsmodell die Dopplerverschiebung sowohl der Oberflächenströmung als auch der oberflächennahen Wirbelverteilung berücksichtigen muss. Die wesentlichen Eigenschaften der Wellen-Strömungs-Interaktion, wobei die Strömung über die Tiefe variiert, resultieren aus einer wechselseitigen Beeinflussung von Welle und Strömung, wobei beide Komponenten sich durch die jeweils andere verändern. Diese Wechselwirkungen sind sehr stark von Wirbeln abhängig. Besonders im Bereich von Uferunregelmäßigkeiten, wie Landzungen oder Prielen, ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von turbulenten Strömungen sehr hoch (Peregrine und Jonsson 1983).

Die Beschreibung der Interaktion zwischen einer stetigen Strömung und eines regulären Wellenzuges kann, laut Thomas (1990), nur dann analytisch erfolgen, wenn sich die Welle rotationsfrei zu einer gleichmäßigen Strömung oder zu einer Strömung mit gleichmäßiger Turbulenzverteilung bewegt. Im Falle einer zufälligen Turbulenzverteilung ist die Berechnung auch von linearen Wellen nicht möglich und eine numerische Lösung zu suchen. Da in Thomas (1981) der Fokus auf linearen Wellen liegt, konzentriert sich die Arbeit von Thomas (1990) auf Methoden zum Umgang mit Wellen finiter Amplitude. Das in Thomas (1990) beschriebene Modell stellt eine lückenlose Beschreibung der Wellenkinematik dar, welche üblicherweise durch die Wellenlänge und die Geschwindigkeitsprofile unter der Welle charakterisiert wird.

Eine Zusammenfassung weiterer relevanter Literatur zur Wellen-Strömungs-Interaktion unter Nennung der Schwerpunkte der jeweiligen Studie ist in Tabelle 1 aufgelistet. Eine weiterführende Diskussion deren Inhalte ist in Lieske et al. (2017) aufgeführt.

### 2.1.1 Physikalische Modellversuche zur Wellen-Strömungs-Interaktion

Auch Ergebnisse aus physikalischen Modellversuchen stellen Erkenntnisse zur Wellen-Strömungs-Interaktion bereit. Brevik und Bjørn (1979) sehen im Phänomen der Wellen-Strömungs-Interaktion ein beträchtliches praktisches Interesse. Sie adressierten drei Fragestellungen bezüglich der Wellen-Strömungs-Interaktion:

- die Änderung der Wellen-Amplitude nach der Wellenausbreitung über einer folgenden oder entgegengesetzten Strömung,
- den Unterschied in der Wellen-Abschwächung mit und ohne Strömung und somit der Bestimmung des Wellen-Strömungs-Reibungsfaktors  $f_{\mu\nu}$  und
- die Reduktion der mittleren horizontalen Geschwindigkeitsverteilung der Strömung.

Bezüglich der oben genannten Fragestellungen führten Brevik und Bjørn (1979) verschiedene großmaßstäbliche Versuche in einem Wellenkanal (Sjøfrid, NTNU Trondheim) mit Strömungsinduktion und großmaßstäblich welliger Sohle durch. Die Änderung der Wellenamplituden befand sich im Bereich der theoretischen Berechnungen, insofern es sich um nichtbrechende Wellen handelte. Die wellige Sohle war maßgeblich für die Abschwächung der Wellen verantwortlich. Für den Fall einer Periode von T = 2,0 s wurden die Wellen-Strömungs-Reibungsfaktoren  $f_{we}$  ermittelt. Aus den Messungen der horizontalen Geschwindigkeitsprofile mit einem Messflügel ging hervor, dass zwischen den Profilen mit freier Oberfläche und den horizontalen Geschwindigkeitskomponenten nur eine kleine bis gar keine Phasenverschiebung vorlag. Dieses Verhalten wurde bereits durch die von Brevik und Bjørn (1979) genutzte Theorie prognostiziert. Hierbei ist zu hinterfragen, ob ein Messflügel, welcher Geschwindigkeiten nur in einer Dimension aufnehmen kann, die durch Turbulenzen hervorgerufenen dreidimensionalen Prozesse ausreichend abbildet. Des Weiteren wurde durch Brevik und Bjørn (1979) eine Reduktion der mittleren horizontalen Geschwindigkeit bei Wellenpräsenz festgestellt. Die Zielsetzungen in Brevik (1980) entsprachen denselben Kriterien wie in Brevik und Bjørn (1979), mit dem Unterscheid, dass die Versuche in einem kleineren Wellenkanal mit höheren Strömungsgeschwindigkeiten und einer glatten Sohle stattfanden. Dadurch wurde es ermöglicht eine größere Bandbreite an Experimenten durchzuführen.

Im Gegensatz zu den vorherigen Versuchen in Brevik und Bjørn (1979) wurde eine Phasenverschiebung von ca. 30° zwischen der Strömungsgeschwindigkeit und der Oberflächengeschwindigkeit identifiziert. Ebenfalls trat eine Reduktion der mittleren horizontalen Strömungsgeschwindigkeit unter Welleneinfluss auf. Brevik (1980) beobachtete eine hohe Korrelation zwischen der Theorie und den experimentell ermittelten Ergebnissen.

Die Untersuchung der Wellen-Strömungs-Interaktion in Thomas (1981) erfolgte auf Basis eines regulären Wellenzuges auf einer entgegengesetzt gerichteten Strömung, der Berücksichtigung einer Turbulenzverteilung in zwei Dimensionen sowie der Verwendung der linearen Wellentheorie. Zur Vorhersage der Wellenlänge und der Partikelgeschwindigkeit unter der Welle bedurfte es der Verwendung eines numerischen Modells, welches durch experimentelle Daten kalibriert und validiert wurde.

In physikalischen Modellversuchen sollte der mittlere Stand des Wasserspiegels bekannt sein, welcher sich im Allgemeinen vom Ruhewasserstand unterscheidet (Peregrine und Jonsson 1983). Diese Differenz kann aufgrund einer Umverteilung des Wassers an der Oberfläche durch die Bewegung der Wellenmaschine und deren generierte Wellen auftreten. Dieser Modelleffekt kann besonders bei sehr steilen, irregulären Tiefwasserwellen zur Geltung kommen, da es bei brechenden Wellen zu einem Impulsaustausch mit der Strömung kommt, wird diese im Normalfall verstärkt (Peregrine und Jonsson 1983).

Für die Untersuchung von Swan und James (1998) wurden Versuche in einem kombinierten Wellen-Strömungskanal im hydraulischen Laboratorium des Imperial College in London unternommen. Der Kanal hatte eine Länge von 25 m, eine Breite von 0,3 m und eine Tiefe von 0,7 m. Die Wellenerzeugung erfolgte durch ein computergesteuertes Klappen-Wellenpaddel, wohingegen die Strömungserzeugung mittels dreier Rohrstrecken mit geschlossenem Kreislauf und integrierten Pumpen realisiert wurde. Der maximale Durchfluss der Strömung betrug 0,05 m<sup>3</sup>/s und konnte beidseitig beaufschlagt werden. Die Messwerterfassung erfolgte mithilfe von Wellenpegeln (für die Wasserspiegelauslenkung) und einem Laser-Doppler-Anemometer für die Partikelgeschwindigkeiten.

Swan und James (1998) ermittelten Änderungen im Wellenspektrum, indem zuerst Wellen (Pierson-Moskowitz-Spektrum) ohne Strömung erzeugt wurden und anschließend exakt die gleichen Wellen mit einer zusätzlichen, unterhalb fließenden Scherströmung kombiniert belastet wurden. Es wurden dieselben Methoden der Messwerterfassung angewendet. Da beide Methoden, die analytische als auch die numerische Methode, die Dopplerverschiebung und die Turbulenzverteilung berücksichtigen, sind die ermittelten, iterativen Ergebnisse von Swan und James (1998) sehr nah am gemessenen Spektrum. Ältere Methoden ziehen zumeist nur die Dopplerverschiebung in ihre Berechnungen mit ein, nicht jedoch die Turbulenzverteilung. Des Weiteren zeigt sich, dass die Bedeutung der Turbulenzverteilung äquivalent zur Dopplerverschiebung sein kann, wenn der Einfluss von Scherströmungen vorherrscht (Swan und James 1998).

Auch Strömungen wurden von Swan und James (1998) ohne Einfluss von Wellen gemessen, um ihr ursprüngliches Strömungsfeld aufzuzeichnen und diese Daten in den soeben erwähnten Berechnungen zu verwenden. Es wurde festgestellt, dass die Änderung der Strömungsmagnitude im Verhältnis zur Wellenhöhe bzw. Wellensteilheit steht. Die Wellensteilheit stieg mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit an. Aus der Analyse der regelmäßigen Wellen ging hervor, dass in einem unregelmäßigen Wellenspektrum mit einer kontinuierlichen Veränderung der Strömungscharakteristika zu rechnen ist. Dies erschwerte die Separation von Bewegungskomponenten im Fluid, die individuell aus den komplexen Wechselwirkungen aus Wellen und Strömung resultieren, signifikant.

MacIver et al. (2006) untersuchten die Umwandlung von nichtlinearen Wellen während der Fortbewegung auf einer schmalen, strahlähnlichen, horizontal verlaufenden Strömung, in einem Wellenbecken mit Strömungserzeugung in Wallingford, England. Dabei wurde der Angriffswinkel der Wellen auf die Strömung so variiert, dass sie, je nach Versuchsaufbau, entweder orthogonal (90°) oder schräg (gleichgerichtet (60°), entgegengerichtet (120°)) aufeinander trafen. Die Wellencharakteristik wurde nicht verändert, so dass sie untereinander vergleichbar blieben. Das Längenverhältnis der Strömung war vergleichbar mit der der einfallenden Wellenlänge (MacIver et al. 2006). Die aus den Versuchen resultierenden Datensätze boten die Möglichkeit des direkten Vergleichs der Versuchsvarianten, bezüglich der Kinematik und Dynamik der Wellen-Strömungs-Interaktion. Der Fokus der Wellen-Strömungs-Interaktion lag auf der Veränderung der Oberflächenauslenkung und der Strömungsprofile.

Das Fehlen von aussagekräftigen Untersuchungen der Wellen-Strömungs-Interaktion in drei Dimensionen kann durch die Tatsache begründet werden, dass es bis Ende des letzten Jahrtausends keine passenden Versuchsanlagen gab (Thomas und Klopman (1997), zitiert in MacIver et al. (2006)). Dies hatte sich mit dem Bau des Wellenbeckens in Wallingford, England im Jahr 1995 geändert, da dieses Wellenbecken in der Lage war, im großen Maßstab und in drei Dimensionen die Wellen-Strömungs-Interaktion nachzubilden.

Es erfolgte eine orthogonal zur Wellenmaschine verlaufende, strahlähnliche, ca. 4,0 m breiten Scherströmungsgenerierung in der Mitte des Wellenbeckens. Die erforderliche Entwicklungslänge der Strömung in Längsrichtung betrug das Zehnfache der Wassertiefe. Über die Breite der Scherströmung nahm die Geschwindigkeit der Strömung zu den Rändern hin ab, wobei sich ein Kernbereich mit relativ konstanter Geschwindigkeit von ca. 2,0 m Breite herausbildete. Mit zunehmendem Abstand zur Strömungseinleitung nahm die Strömungsamplitude ab und Streuungen nahmen zu. Während der Versuche traten klein- und großräumige, turbulente Strukturen in der Strömung auf, die eine Länge von bis zu 2,4 m und eine Periode von bis zu 300 s aufwiesen. Diese Parameter konnten nach der "gefrorenen Konvektions-Methode" nach Taylor (1938) berechnet werden (MacIver et al. 2006). Es wurden vernachlässigbare Reflexionen der einlaufenden Wellen am Strömungsrand der Strömung festgestellt. Es stellte sich ebenfalls das typische Refraktionsverhalten der Wellen ein, bei dem eine der Strömung folgende Welle sich parallel zur Strömung ausrichtet und sich durch erhöhte Wellenlängen und reduzierte Wellenhöhen auszeichnet (MacIver et al. 2006). Eine der Strömung entgegengesetzte Welle verhielt sich entgegengesetzt und war geprägt durch eine eher normale Ausrichtung an der Strömung sowie kürzeren Wellenlängen und gesteigerten Wellenhöhen (MacIver et al. 2006). Diese sich verändernden Eigenschaften der Wellen konnten von MacIver et al. (2006) mit einem relativ einfachen Wellenstrahlmodell berechnet werden, welches die Transformation der Wellen auf einer sich über die Tiefe konstant und langsam variierenden Strömung berücksichtigte. Die Berechnung mit einem anspruchsvolleren Strömungs-Annäherungsmodell, welches die effektive vertikale Spannung berücksichtigt, zeigte keine sonderlichen Verbesserungen bezüglich der Prognose. Jedoch war eine weitere Verfolgung des Einflusses der vertikalen Spannungen erstrebenswert.

Für die Untersuchung zur Entstehung von Freak Waves und dem Einfluss einer Strömung auf dieses Phänomen, wurden Experimente in einem multi-direktionalen Wellenbecken unter Aufschlag von Strömung durchgeführt (Toffoli et al. 2010). Die Untersuchungen fokussierten thematisch die nichtlineare Dynamik von Oberflächenwellen und das Auftreten von extremen Wellenereignissen, im Fall eines schräg auf eine Strömung treffenden Wellenfeldes. Toffoli et al. (2010) führten eine Vielzahl von Versuchen mit entgegengesetzter, gleichmäßiger Strömung durch. Gemäß der linearen Dispersionsrelation wurde davon ausgegangen, dass die Wellenlängen sich beim Kontakt mit einer entgegengesetzten Strömung verkürzen und sich die Wellen in diesem Zuge stärker aufsteilen. Dadurch wird ein Hervorrufen nicht-linearer Prozesse generell wahrscheinlicher. Das Ziel der Versuche war die Analyse, inwiefern das Aufsteilen der Wellen durch die Wellen-Strömungs-Interaktion das Entstehen von extremen Wellen begünstigt. Es stellte sich heraus, dass die Interaktion von regulären Wellen mit einer teilweise entgegengesetzten Strömung zu einer Zunahme der nichtlinearen Effekte führt. Für unregelmäßige Wellen kann die Wahrscheinlichkeit von extremen Wellen mit Hilfe der Berechnung der vorherrschenden Kurtosis bestimmt werden (Toffoli et al. 2010).

Laborversuche im Zusammenhang mit der Dynamik von dreidimensionalen, mechanisch generierten Wellen über einer schrägen, teilweise entgegengesetzten Strömung sind in Toffoli et al. (2011) aufgeführt. Die Versuche fanden, wie schon zuvor in Toffoli et al. (2010), im Ocean Wave Laboratory von Marintek in Trondheim statt. Die Fließgeschwindigkeit variierte in Richtung der mittleren Wellenfortschrittsrichtung mit einem ansteigenden Trend. Tests mit regulären Wellen entgegen der Strömungsrichtung zeigten eine Zunahme der Wellensteilheit und somit ein begünstigendes Verhalten für das Auftreten von sehr großen Wellenamplituden. Bei unregelmäßigen Wellenspektren resultierte die Gegenwart einer schrägen Strömung in einer schwachen Verstärkung der Welleninstabilität und einer höheren Wahrscheinlichkeit von extremen Wellenereignissen (Toffoli et al. 2011).

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden im Projekt folgende Faktoren identifiziert, die zur Vertiefung des Prozessverständnisses der Wellen-Strömungs-Interaktion beitragen:

- Anpassung der Forschungsinfrastruktur (Wellenbecken) zur Generierung eines homogenen Strömungsfeldes über die gesamte Breite des Versuchsstandes zur Vermeidung von Modelleffekten (vgl. MacIver et al. 2006).
- Dreidimensionale und hochfrequente Messung von Strömungskomponenten im physikalischen Modell zur Identifikation und Quantifizierung von Turbulenzänderungen.
- Identifikation des Einflusses der Strömungsgeschwindigkeit auf die Phasenverschiebung in Bezug auf die Oberflächengeschwindigkeit.
- Quantifizierung der Veränderung von nichtlinearen Effekten durch die Interaktion von Wellen mit Strömungen und deren zeitliche Zuordnung (vgl. Toffoli et al. 2010).
### 3 Physikalische Modellversuche zur Wellen-Strömungs-Interaktion

Die empirischen Untersuchungen zur schrägen und orthogonalen Wellen-Strömungs-Interaktion, die im Rahmen des Forschungsprojekts "<u>See</u>gangsbe<u>l</u>astung<u>e</u>n" (*Seele*) durchgeführt wurden, werden im Folgenden beschrieben. Dabei stehen die Zielsetzung und Methodik in diesem Beitrag im Vordergrund. Eine ausführliche Dokumentation über die Messtechnik, die Versuchseinrichtung, den Versuchsaufbau, das Versuchsproramm und die Versuchsdurchführung der physikalischen Modellversuche ist in Lieske et al. (2017) aufgeführt.

## 3.1 Zielsetzung und Methodik

Zur Untersuchung der physikalischen Prozesse bei der Wellen-Strömungs-Interaktion (wave current interaction - WCI) sind entsprechende Modellversuche nach wie vor notwendig. Sie bilden dabei vereinfacht die natürlichen Prozesse unter kontrollierten Randbedingungen ab. Die Ergebnisse aus den Versuchen werden u. a. zur Bewertung analytischer Ansätze und Kalibrierung numerischer Modelle benötigt. Besonders für den Fall der schrägen WCI (d. h. die Wellenrichtung zur Strömungsrichtung verläuft schräg oder orthogonal zueinander) besteht ein großer Bedarf an Messergebnissen aus physikalischen Modellversuchen. Die übergeordnete Zielsetzung bei den durchgeführten Messungen beinhaltet ein vertieftes Verständnis und Wissen zum Wellenverhalten bei schräger oder orthogonaler WCI für unterschiedliche Wellenperioden, Wellenrichtungen und Strömungsgeschwindigkeiten.

Daher ist für die Ermittlung der physikalischen Zusammenhänge der WCI wie folgt vorzugehen:

- (i) Strömungsversuche ohne Wellen (current alone CA) und Strömungsanalyse, um die ungestörten Strömungsverhältnisse zu erfassen.
- (ii) Wellenversuche ohne Strömung mit Wellenanalyse ohne Strömung (wave alone WA), um die ungestörten Wellenverhältnisse zu erfassen.
- (iii) Schräge und orthogonale Wellen-Strömungsversuche (wave-current WC) und deren Analyse, um die veränderten Wellenverhältnisse zu erfassen.
- (iv) Vergleichsanalyse, um die Abweichungen zwischen CA, WA und WC zu ermitteln und damit die Effekte der schrägen und orthogonalen WCI aufzuzeigen.

Das erste Ziel der Strömungsversuche ohne Wellen und der Wellenversuche ohne Strömung war, die Erfassung und Dokumentation der Verhältnisse im 3D-Wellen-Strömungsbecken bzgl. der Strömungsanlage und der passiven Wellenabsorber zu ermitteln. Ein weiteres Ziel lag darin, eine Datengrundlage für die anschließende Vergleichsanalyse zu den schrägen und orthogonalen Wellen-Strömungsversuchen zu schaffen. Durch diese Methodik können Aussagen über Modelleffekte der Versuchseinrichtung und die Effekte der schrägen und orthogonalen WCI getroffen werden. Das beschriebene Vorgehen ist in Abbildung 4 dargestellt.

Die Modellversuche wurden im Maßstab 1:10 nach dem Ähnlichkeitsgesetz von Froude für den Küstennahbereich mit nichtbrechenden Wellen (KFKI 2015) durchgeführt. Die in den Versuchen verwendeten Parameter bilden Wellen- und Strömungsereignisse in der Nordsee vornehmlich im Bereich der Ostfriesischen Küste und deren vorgelagerten Inseln ab. Die vorhandenen Wellen- und die Strömungsverhältnisse in dem Bereich der Nordsee können dem Seegangsatlas der deutschen Nordseeküste (Mai 2004) und dem Strömungsatlas der BSH (Dick et al. 2010) entnommen werden.



Abbildung 4: Methodik der physikalischen Modellversuche zur schrägen WCI.

# 3.2 Datenauswertung

Die Messdaten aus den Wellen-Strömungsversuchen wurden mittels der Frequenz- und Zeit-Frequenzanalyse analysiert. Der Fokus der Auswertung für die Strömungsversuche wurde dabei insbesondere auf ermittelte Strömungsgeschwindigkeiten, die Auswahl geeigneter Filterkriterien, die Definition von Qualitätskriterien für Messwerte und den Einfluss der Messdauer auf mittlere Strömungsgeschwindigkeiten und Turbulenzintensitäten gelegt. Für die Auswertung der Wellenversuche wurde der Fokus auf die 3D-Wellenanalyse gelegt, mit deren Hilfe Vergleiche von Soll- und Ist-Wellenhöhen und -Richtungen adressiert werden. Zudem wurden Reflexionskoeffizienten in Abhängigkeit von Wellenhöhe, Wellenperiode und Wellenrichtung für das Wellenbecken ermittelt. Eine detaillierte Dokumentation der vollzogenen Auswertung der Daten kann Lieske et al. (2017) entnommen werden.

# 4 Ergebnisse der Wellen-Strömungsversuche

Durch eine Auswertung der zu Grunde liegenden Daten (i) im Frequenzbereich mittels der Fourier-Transformation (FT) und (ii) im Zeit-Frequenzbereich mittels der Hilbert-Huang-Transformation (HHT) konnten Abhängigkeiten der Wellen-Strömungs-Interaktion bestimmt werden. Die Fourier-Transformation ist eine mathematische Methode, mit der z. B. irregulärer Seegang in seine periodischen Einzelkomponenten (regelmäßige Wellen verschiedener Amplitude, Frequenz und Phasenverschiebung) aufgegliedert werden kann. Die Hilbert-Huang-Transformation bietet eine Möglichkeit, Seegang zusammen mit einem Trend in sogenannte Intrinsic-Mode-Funktionen (IMF) zu zerlegen und Momentanfrequenzdaten zu erhalten. Sie eignet sich daher gut zur Auswertung von nicht stationären und nichtlinearen Daten. Für beide Auswertungen kann die detaillierte Implementierung der Routinen sowie die zugehörige Aufbereitung der Messdaten in Lieske et al. (2017) nachgeschlagen werden. Grundlagen zur Seegangsanalayse im Zeit- und Frequenzbereich sind in Die Küste, Heft 65, Kapitel 3.6.3.3 (KFKI 2015) gegeben. Im Nachfolgenden wird explizit auf die Reproduzierbarkeit der einzelnen Versuchsreihen sowie eine Bewertung und einen Vergleich der gewonnen Erkenntnisse eingegangen.

## 4.1 Reproduzierbarkeit

Die Reproduzierbarkeit der durchgeführten Versuche stellte ein wichtiges Kriterium dar, um eine belastbare Deutung von Analyseergebnissen vornehmen zu können. Zur Untersuchung der Versuche und der Wiederholungsversuche hinsichtlich ihrer Übereinstimmung wurden die Fourierspektren der Messungen miteinander verglichen.

Für die Wellenversuche, deren Versuchsreihen aus einem Versuch und zwei Wiederholungsversuchen bestehen, konnte für alle Versuche eine gute Übereinstimmung zwischen den Amplitudenspektren festgestellt werden. Die Frequenzen der Signalkomponenten stimmten innerhalb der Versuchsreihe überein. Auch die Abweichungen zwischen den berechneten Amplituden der entsprechenden Peaks im Spektrum waren in allen Fällen geringer als 2 mm (2 %).

Auch für die Versuchsreihen der kombinierten Wellen-Strömungs-Versuche, die sich aus nur einem Versuch und einem Wiederholungsversuch zusammensetzten, konnte festgestellt werden, dass eine gute Übereinstimmung zwischen den Amplitudenspektren vorlag. Die Abweichungen zwischen den Amplituden eines Versuchs und seines Wiederholungsversuchs betrugen mit einer Ausnahme maximal 2,1 mm (2 %). Die Frequenzen der sich entsprechenden Peaks im Amplitudenspektrum innerhalb einer Versuchsreihe stimmten bei Ausschluss eines Einzelversuches noch besser überein, hier betrug die größte Abweichung weniger als 1 %.

# 4.2 Bewertung und Vergleich

Die Fourieranalyse der Wellenversuche ohne Strömung hat ergeben, dass die Amplitudenspektren dieser Versuche sich von den zuvor ermittelten Referenzfällen unterscheiden. Die Spektren der gemessenen Wellen enthalten nicht wie erwartet zwei sondern insgesamt fünf bis sechs Komponenten höherer Ordnung.

Für das Vorhandensein der überzähligen Peaks sind zwei mögliche Gründe denkbar: (i) Die hochfrequenten Peaks stellen Reflexionsanteile der Welle dar oder (ii) deuten auf eine weitere Verformung der Welle hin, aus der eine Welle der Stokes-Theorie höherer Ordnung resultiert. Die zweite Vermutung ließe sich über die Betrachtung der Phasenfunktion überprüfen, welche jedoch nicht durchgeführt wurde. Für die kombinierten Wellen-Strömungs-Versuche konnte festgestellt werden, dass die Anzahl der Peaks höherer Ordnung geringer ausfällt als bei den Spektren der WA-Versuche: Die in den WA-Spektren sichtbaren Peaks ab der dritten Ordnung waren in den meisten Fällen im Amplitudenspektrum der WCI-Versuche nicht präsent. Das Wegfallen der höheren Peaks während der Anwesenheit einer Strömung lässt vermuten, dass infolge der Strömung hochfrequente Anteile mit einer vergleichsweise sehr geringen Amplitude eliminiert werden und somit eine Verformung der Welle stattfand. Die Linearität der Welle nahm mit Anwesenheit der Strömung zu. Die Betrachtung der Abszissenwerte der Peaks in den Spektren ließ deutlich werden, dass für alle WCI-Versuche innerhalb einer Wellenperiode unabhängig von der Strömungsstärke identische Basisfrequenzen und Frequenzen der jeweiligen Höherharmonischen vorlagen. Gleichzeitig konnten keine Unterschiede zwischen den Basisfrequenzen der WCI-Versuche zu den Frequenzen der WA-Versuche ermittelt werden. Dies bedeutet, dass die Wellenperiode trotz einer anwesenden Strömung, unabhängig von deren Durchfluss, unverändert bleibt.

Daneben konnte festgestellt werden, dass in den Amplitudenspektren der WCI-Versuche Seitenbandfrequenzen auftraten. Seitenbänder treten im Verlauf von Modulationsinstabilitäten in Erscheinung und sind ein Kennzeichen für nichtlineare Vorgänge während der Wellenausbreitung. Es zeigte sich, dass die Anzahl der Seitenbänder desto größer ausfällt, je stärker die Strömung und je kleiner die Wellenperiode sind.

Die Fourier-Analyse und die Berechnung von Amplitudenspektren sind demnach geeignet, um Rückschlüsse auf die Wellenform sowie auf Veränderungen der Form und der Nichtlinearität infolge der Wellen-Strömung-Interaktion zu ziehen. Mithilfe der Amplitudenspektren sind außerdem Veränderungen der Frequenz bzw. der Wellenperiode feststellbar. Gut geeignet ist die Fourier-Analyse zum Auffinden von Seitenbandinstabilitäten. Sie gibt somit Hinweise auf das Auftreten von Modulationsinstabilitäten, die möglicherweise durch den Einfluss der Strömung entstehen. Die Auswertung der Fourierspektren liefert allerdings keinen Zeitbezug. Die Prozesse konnten demzufolge identifiziert werden, jedoch nicht der Zeitpunkt ihres Eintretens sowie die Häufigkeit ihres Auftretens während des Versuchs.

Aus diesem Grund wurde als weitere Analysemethode die Hilbert-Huang-Transformation (HHT) angewendet. Im Gegensatz zur Fourier-Analyse liefert die HHT zeit-frequenzabhängige Spektren. Die HHT wurde durch Huang et al. (1998) entwickelt und stellt eine Erweiterung der Hilbert-Analyse dar. Die Hilbert-Analyse ist ein bewährtes Verfahren zur Zeit-Frequenz-Analyse von nichtlinearen und instationären Prozessen. Ein Kennzeichen für ein nichtlineares System sind zeitabhängige Veränderungen der Frequenz eines Signals. Um die Anwendung der Hilbert-Analyse auf breitbandige Signale zu ermöglichen, entwickelten Huang et al. (1998) die Methode der Empirical Mode Decomposition (EMD). Mithilfe der EMD kann die empirische Zerlegung eines breitbandigen in schmalbandige Signale erfolgen, indem das Ursprungssignal in seine charakteristischen Wellenanteile, die sogenannten Intrinsic Mode Functions (IMF), aufgespalten wird. Eine Hilbert-Transformation der IMFs liefert schließlich ein zeitabhängiges Frequenz- und Amplitudenspektrum, das sogenannte Hilbert-Spektrum.

Die Hilbert-Huang-Analyse des Wellenversuchs ohne Strömung hat ergeben, dass ein generiertes Wellensignal entgegen den Erwartungen zwei gleichzeitig auftretende Komponenten enthielt, welche in zwei Intrinsic Mode Functions (IMFs)  $c_4$  und  $c_5$  wiedergegeben werden konnte. IMFs stellen dabei die in einem Datensatz eingebetteten Schwingungsmodi

dar. Die Berechnung des Grades der Nichtlinearität bestätigte, was bereits durch die Schwankungsbreite der IMFs im Hilbert-Spektrum deutlich wurde: Die Nichtlinearität beider Komponenten unterschied sich voneinander. Ein Beispiel für die fünfte IMFs der Wellen-Strömungs-Interaktion für Versuche mit variierendem Durchfluss ist in Abbildung 5 gegeben.



Abbildung 5: Fünfte IMFs der Wellen-Strömungs-Versuche mit Angabe des Frequenzmittelwertes  $f_m$ : (a) Versuch 267 ( $Q = 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ), (b) Versuch 285 ( $Q = 3,0 \text{ m}^3/\text{s}$ ), (c) Versuch 303 ( $Q = 5,0 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Das Signal, welches in der vierten IMF wiedergegeben wurde, zeigte jedoch eine gute Übereinstimmung mit dem Wellensignal. Dies spiegelte sich im Hilbert-Spektrum wider: Der Verlauf der vierten IMF beschrieb eine gleichmäßige Oszillation, welche für Stokes'sche Wellen zu erwarten war. Der Frequenzmittelwert der Schwingung stimmte zudem mit der Frequenz des Wellensignals überein. Die fünfte IMF hingegen zeigte eine größere Schwankungsbreite und zudem einen etwas geringeren Frequenzmittelwert und reproduzierte demnach einen anderen Oszillationsmodi und nicht einen durch *mode mixing* abgespaltenen Anteil. Bei der Betrachtung der vierten IMF fiel auf, dass die Schwankungsbreite der Oszillation variierte und erst ab t = 400 s einen unveränderten Zustand erreichte. Demnach schwankten die Linearität und damit die Wellenform des Signals während der Versuchsdurchführung. Die Ursache hierfür sollte in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

Für die kombinierten Wellen-Strömungs-Versuche konnte festgestellt werden, dass die Information des Eingangssignals für alle Versuche ebenfalls in zwei IMFs  $c_4$  und  $c_5$  vorlag. Die vierte IMF, deren Frequenz mit dem Eingangssignal übereinstimmte, enthielt nicht nur die Information der unbeeinflussten Welle, sondern reproduzierte erwartungsgemäß die bereits verformte Welle.

Der Verlauf der vierten IMFs im Hilbert-Spektrum zeigte ebenfalls eine Oszillation, die jedoch eine variierende Schwankungsbreite besaß. Die mittlere Schwankungsbreite unterschied sich für die verschiedenen Strömungsdurchflüsse. Dementsprechend konnten für die vierten IMFs der verschiedenen WCI-Versuche unterschiedliche Grade der Nichtlinearität festgestellt werden. Die Hilbert-Spektren der fünften IMFs unterschieden sich von denen der vierten IMFs: Wie im WA-Fall zeigten die IMFs eine größere Schwankungsbreite und einen von den vierten IMFs abweichenden Frequenzmittelwert. Die ermittelten Grade der Nichtlinearität bestätigten dies.

Im nächsten Schritt erfolge eine Quantifizierung der Nichtlinearitäten. Huang et al. (2013) führen einen sogenannten Grad der Nichtlinearität (Degree of Nonlinearity, DN) ein, welcher mithilfe der im Hilbert-Spektrum dargestellten Momentanfrequenz bestimmt werden kann zu:

$$DN' = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n} \left[ \left( \frac{f_{j,inst.} - f_{const.}}{f_{const.}} \right) \frac{a_z}{\overline{a_z}} \right]^2} \text{ mit } 0 \le DN \le 1,$$
(1)

mit

DN: Grad der Nichtlinearität [-], f<sub>inst.</sub>: Momentanfrequenz [Hz],

- $f_{const.}$ : konstante Frequenz einer linearen Welle mit der gleichen Periode,
- $a_z$ : Amplitude zwischen zwei Nulldurchgängen einer lokalen Welle,
- $\overline{a_z}$ : Mittelwert von  $a_z$ .

Die Bestimmung von DN beruht auf der Annahme, dass die Momentanfrequenz einer linearen kosinus- oder sinusförmigen wellentrigonometrischen Funktion als einer Sinuswelle konstant ist. Die Momentanfrequenz einer nichtlinearen Welle hingegen variiert innerhalb einer Schwingungsdauer (Brühl 2014). Die Nichtlinearität eines untersuchten Signals wird anhand des Vergleichs seiner Momentanfrequenz mit der Momentanfrequenz einer linearen Welle innerhalb einer Schwingungsperiode ermittelt. Der Grad der Nichtlinearität nimmt für lineare Sinus- bzw. Kosinus-förmige Wellen einen Wert von DN = 0 an und nimmt mit Größerwerden der Nichtlinearität eines Signals zu. Für regelmäßige Wellen ist nach Huang et al. (2013) der Einfluss der Amplituden weniger relevant, sodass Gleichung (1) angepasst wird zu

$$DN' = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n} \left( \frac{f_{j,inst.} - f_{const.}}{f_{const.}} \right)^2} \text{ mit } 0 \le DN' \le 1,$$
(2)

mit

In Abbildung 6 sind die berechneten Modifizierten Grade der Nichtlinearität DN' über den verschiedenen Strömungsdurchflüssen für die vierten (blaue Kreise) und fünften IMFs (rote Vierecke) des WA-Versuchs ( $Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ ) sowie der WCI-Versuche graphisch dargestellt. Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass für die vierten IMFs der WCI-Versuche der Grad der Nichtlinearität des betrachteten Zeitfensters zwischen 400 s und 700 s für die Versuche mit  $Q = 3,0 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $Q = 5,0 \text{ m}^3/\text{s}$  etwas größer ist als für den Versuch mit dem geringsten Strömungsdurchfluss. Ein Trend in Abhängigkeit des Strömungsdurchflusses ist gegeben. Im Vergleich zum WA-Versuch ist die Nichtlinearität der vierten IMFs der WCI-Versuche geringer.

Dieses Ergebnis spiegelt die Resultate aus der Fourier-Analyse wieder. Für die Amplitudenspektren der Messsignale dieser Versuchsreihe konnte festgestellt werden, dass die Anzahl der Komponenten im Vergleich zum WA-Versuch für alle WCI-Fälle geringer war. Demnach hat auch die FFT gezeigt, dass die Nichtlinearität des Signals von WA zu WCI abnimmt. Des Weiteren hat die Fourier-Analyse ergeben, dass die Nichtlinearität für Q = 1,5 m<sup>3</sup>/s am geringsten ist und für höhere Durchflüsse wieder zunimmt. Die HHT für die vierten IMFs, für die festgestellt wurde, dass sie das Messsignal gut wiedergeben, zeigt demnach mit den Beobachtungen aus der FFT übereinstimmende Ergebnisse bezüglich der Nichtlinearität.



Abbildung 6: Modifizierter Grad der Nichtlinearität DN' in Abhängigkeit des Strömungsdurchflusses für die IMFs  $c_4$  und  $c_5$ .

Die graphische Darstellung der Grade der Nichtlinearität für  $c_5$  macht zum einen nochmals deutlich, dass die Nichtlinearität der fünften IMFs sich deutlich von DN' der vierten IMFs unterscheidet. Zum anderen wird ersichtlich, dass die Nichtlinearität mit Zunahme des

Strömungsdurchflusses größer wird. Allerdings nimmt die Nichtlinearität dieser IMF im Gegensatz zu der vierten IMF auch im Vergleich zum WA-Fall zu.

Anzumerken ist, dass für die Berechnung des Grades der Nichtlinearität ein Mittelwert über das Zeitfenster von 400 s gebildet wurde. Die für die vierten IMFs des WCI-Falls und für alle fünften IMFs starken Schwankungen im Hilbert-Spektrum werden möglicherweise nicht ausreichend durch einen Mittelwert repräsentiert. Für zukünftige Untersuchungen ist daher zu empfehlen, eine detaillierte Analyse einzelner Schwingungen durchzuführen.

Die Anwendung der Hilbert-Huang-Analyse auf die hier untersuchten Versuche ermöglichte, die Eingangssignale des Wellenversuchs und der Wellen-Strömungs-Versuche als schmalbandige Signale in einer IMF wiederzugeben. Durch die Darstellung der IMFs in den Hilbert-Spektren war es möglich, Unterschiede zwischen dem WA-Fall und dem WCI-Fall festzustellen: Für einen Vergleich konnten im Rahmen dieser Untersuchung (i) der Kurvenverlauf der IMFs im Hilbert-Spektrum, (ii) die Schwankungsbreite der dargestellten Frequenzen sowie deren Mittelwert und (iii) der Grad der Nichtlinearität, der aus den Momentanfrequenzen der IMF berechnet wird, herangezogen werden.

Ein Vorteil der HHT gegenüber der Anwendung der Fourier-Analyse war die Möglichkeit der zeitlichen Zuordnung verschiedener Prozesse. Beispielsweise konnte für den Wellenversuch festgestellt werden, dass die Schwankungsbreite des im Hilbert-Spektrum dargestellten Signals und somit die Nichtlinearität im Versuchsverlauf variiert.

### 4.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse aus der Frequenzanalyse und Zeit-Frequenzanalyse

Die Fourier-Transformation der Versuchsdaten hat gezeigt, dass die Wellensignale aus den Versuchen nicht den nominalen generierten Wellen entsprachen. Gemäß den FFT-Spektren entsprachen die gemessenen Wellen nicht der zu erwartenden Stokes'schen Wellentheorie 2. Ordnung, sondern waren einer Wellentheorie 5. oder 6. Ordnung zuzuordnen. Des Weiteren wichen die aus den Amplitudenspektren ermittelten Wellenhöhen von den vorgegebenen Wellenhöhen ab. Die Hilbert-Huang-Analyse des untersuchten Wellensignals hat ebenfalls gezeigt, dass es sich bei dem Messsignal um eine Welle höherer Ordnung handelte, dessen Grad der Nichtlinearität DN' im für die FFT betrachteten Zeitfenster zwischen 400 s und 700 s einen Wert von 0,18 annahm. Anhand der Ermittlung von Nichtlinearitätsgraden für generisch erzeugte Referenzfälle sollte im Rahmen künftiger Analysen für den ermittelten Wert untersucht werden, welcher Theorie höherer Ordnung die Welle laut der HHT exakt zuzuordnen ist.

Mithilfe des Hilbert-Spektrums konnte eine zeitliche Veränderung der Linearität des Signals festgestellt werden. Die Linearität des Signals war zum Zeitpunkt t = 100 s und bis t = 400 s höher als in der restlichen Zeitreihe. Zwar konnte für das in der FFT betrachtete Zeitfenster anhand des Hilbert-Spektrums festgestellt werden, dass von einer konstanten Linearität auszugehen ist – eine zeitliche Zuordnung der Linearität bzw. eine Veränderung der Linearität des Signals während der gesamten Versuchsdauer konnte mit der FFT nicht identifiziert werden.

Sowohl die FFT als auch die HHT ergaben für einen mit beiden Methoden untersuchten Versuch (H = 0,066 m; T = 1,2 s;  $\theta = 70^{\circ}$ ), dass die Frequenz des Messsignals einen Wert von 0,83 Hz aufweist und somit mit der Frequenz der generierten Welle übereinstimmt. Die Übereinstimmung der gemessenen Frequenzen mit den Sollwerten der durch die Wellenmaschine erzeugten Wellen der übrigen WA-Versuche, die nur mit der FFT untersucht wurden, konnte ebenfalls bestätigt werden.

Für die kombinierten Wellen-Strömungs-Versuche zeigte die Fourier Analyse, dass die Anzahl der höherharmonischen Komponenten im Messsignal im Vergleich zum WA-Fall geringer war. Die daraus abzuleitende Abnahme der Nichtlinearität zeigte auch die Untersuchung der Hilbert-Spektren der WCI-Signale. Der Grad der Nichtlinearität wurde in den Hilbert-Spektren als Mittelwert über den Zeitraum zwischen 400 s und 700 s berechnet. Der Verlauf des Signals im Hilbert-Spektrum zeigte jedoch, dass die Nichtlinearität des Signals über die gesamte Versuchsdauer schwankte. Demnach ist es im Vergleich zur FFT mit der HHT möglich, die Nichtlinearität in Abhängigkeit der Zeit zu ermitteln. Bezüglich der Frequenzen zeigte sich auch für die mit beiden Methoden untersuchten WCI-Fälle, dass die Frequenz der Welle keine Änderung infolge der Strömung erfuhr. Dies galt ebenso für die übrigen, nur mit der FFT analysierten Versuche.

Die Amplitudenspektren der FFT zeigten des Weiteren, dass im WCI-Fall Seitenbänder in der unmittelbaren Umgebung der Peaks auftraten. Die Ausprägung der Seitenbänder nahm mit Anstieg des Strömungsdurchflusses und mit der Abnahme der Wellenperiode zu. Dieser durch die Strömung verursachte Effekt konnte mit der HHT nicht identifiziert werden.

Im Rahmen der HHT konnte sowohl für den Wellenversuch (WA) als auch für die kombinierten Wellen-Strömungs-Versuche (WSI) festgestellt werden, dass neben einer das Eingangssignal gut reproduzierenden IMF zwei weitere IMFs existierten, die ebenfalls Anteile des Messsignals enthielten. Eine Zuordnung der ersten Komponente war nicht möglich und bedarf weiterer Untersuchungen, da möglicherweise ein *mode mixing* vorlag. Die zweite Komponente besaß zwar eine Frequenz des gleichen Frequenzbereichs wie das Messsignal, zeigte allerdings für alle betrachteten WCI-Versuche einen von der Wellenfrequenz abweichenden, geringeren Mittelwert und einen größeren Schwankungsbereich der Frequenzen. Die Grade der Nichtlinearität dieser Komponente zeigen mit Werten zwischen 0,42 und 0,60, dass sich die Nichtlinearität der Komponente deutlich von derjenigen der Eingangssignale unterschied. Die Identifizierung dieser sowohl im Wellensignal als auch im WCI-Signal zusätzlich vorhandenen Komponenten war das Ergebnis der Hilbert-Huang-Analyse. Die Amplitudenspektren der FFT wiesen keine zusätzlichen Komponenten anderer Basisfrequenzen auf.

Die Fourier-Transformation erwies sich als geeignete Analysemethode, um einen Überblick über grundsätzliche Eigenschaften des untersuchten Signals zu erhalten. Die durchgeführten Analysen vermittelten zum einen die Frequenz der Basiskomponente, welche der Frequenz der Welle entspricht, und zum anderen die Anzahl und die Amplitude der höherharmonischen Komponenten einen ersten Eindruck über die gemessene Welle. Die Identifizierung möglicher Effekte der Wellen-Strömungs-Interaktion durch diese grundsätzlichen Parameter, d. h. auf Grundlager der ermittelten Wellenperiode und Nichtlinearität bzw. Wellenform, konnte über den Vergleich der jeweiligen Spektren eines WA-Falls und eines entsprechenden WCI-Falls geschehen.

Bei der HHT erfolgt die Beurteilung der auftretenden Wellen-Strömungs-Prozesse über den Vergleich der Charakteristik der IMFs, die das Eingangssignal wiedergeben, und deren Hilbert-Spektren. Wie auch bei der FFT konnten die Ergebnisse bezüglich der Wellenperiode und der Linearität des Signals verglichen werden. Zudem bot die HHT eine Möglichkeit der Identifizierung und der zeitlichen Zuordnung verschiedener, auch instationärer Prozesse zu den Messergebnissen.

Die Auswertung der Messdaten mit der HHT hat jedoch auch gezeigt, dass die Methode für die Analyse der betrachteten Wellen-Strömungs-Daten noch nicht optimiert ist. Die durchgeführte Parameterstudie hat deutlich gemacht, dass durch nicht optimal gewählte Einstellungsparameter für die Zerlegung des Signals in seine Oszillationsmodi beispielsweise ein *mode mixing* auftritt. Das *mode mixing* führt zu einer mathematisch bedingten Aufspaltung oder Vermischung von gleichen Frequenzgrößenordnungen in unterschiedlichen IMFs. Die Qualität der Ergebnisse aus der HHT hängt folglich sehr von den zuvor gewählten Einstellungen ab.

Die Interpretation der mittels der HHT erhaltenen Ergebnisse erfolgte unter der Annahme, dass für die durchgeführten Analysen geeignete Einstellungsparameter gewählt wurden. Dennoch kann nicht uneingeschränkt davon ausgegangen werden, dass die Analyseergebnisse tatsächlich ausschließlich physikalische Vorgänge widerspiegeln. Dies gilt beispielsweise für die identifizierte zusätzliche Komponente in den WA- und WCI-Versuchen. Für diese wird zwar aufgrund der festgestellten Charakteristiken ein physikalischer Ursprung vermutet, allerdings kann ein mathematischer Grund für das Erscheinen dieser Komponente ohne tiefergehende Analysen nicht sicher ausgeschlossen werden. Gleiches gilt für die weitere Komponente, deren Deutung im Rahmen des Projektes nicht möglich war und für deren Ursache ein *mode mixing* vermutet wird.

Demnach besteht für die Anwendung der Hilbert-Huang-Analyse weiterer grundlegender Analysebedarf, um die Methode für die Untersuchung der Wellen-Strömungs-Daten zu optimieren. Im Gegensatz hierzu ist die Fourier-Transformation eine Methode, die auch im Bereich der Wellenversuche auf eine langjährige Erfahrung zurückblicken kann und folglich als erprobt und ausgereift anzusehen ist. Daher sollte auch bei zukünftigen Untersuchungsreihen stets zusätzlich eine reine Frequenzanalyse der Versuchsergebnisse erfolgen, da die Frequenzanalyse zur Überprüfung der Ergebnisse aus der HHT und damit zur Validierung der Zeit-Frequenzanalyse-Methode herangezogen werden kann.

### 5 Zusammenfassung und Fazit

Als Voraussetzung zur Durchführung der physikalischen Modellversuche zur schrägen und orthogonalen Wellen-Strömungs-Interaktion im Küstennahbereich wurde ein 3D-Wellenbecken um notwendige technische Erweiterungen zur Strömungsgenerierung und Wellenabsorption erweitert. Diese Maßnahmen waren ein wesentlicher Bestandteil des Forschungsvorhabens und konnten erfolgreich durchgeführt werden.

Nach Fertigstellung der erweiterten Versuchseinrichtung wurden physikalische Modellversuche zur schrägen und orthogonalen Wellen-Strömungs-Interaktion durchgeführt. Es wurde zunächst die Entstehung von hydrodynamischen Belastungen aufgrund der schrägen und orthogonalen Wellen-Strömungs-Interaktion im Küstennahbereich untersucht. Die physikalischen Modellversuche beinhalteten folgende Untersuchungen:

- 1. Strömungsversuche ohne Wellen, um die ungestörten Strömungsverhältnisse zu erfassen
- 2. Wellenversuche ohne Strömung, um die ungestörten Wellenverhältnisse zu erfassen
- 3. Wellen-Strömungs-Versuche, um das Wellen-Strömungs-Verhalten zu erfassen

Durch diese Vorgehensweise konnten Aussagen über die stattfindenden Prozesse im 3D-Wellen-Strömungsbecken getroffen und Randeinflüsse der Versuchseinrichtung ermittelt werden. Der Reflexionskoeffizient  $k_r$  der passiven Wellenabsorber wurde in Abhängigkeit der Wellenhöhe, der Wellenperiode und der Richtung bestimmt und variierte zwischen 2 % und 13 %.

Die Ziele der Strömungsversuche ohne Wellen waren die technische Umsetzung von Strömungsmessungen im Wellenbecken, Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Wassertiefen und die Ermittlung der Strömungscharakteristik. Diese Ziele konnten mit einem hohen Detailgrad erreicht werden, so dass sehr gute Kenntnisse bzgl. der Strömungsgenerierung der erweiterten Versuchseinrichtung bestehen. Es konnte gezeigt werden, dass im Zentrum des 3D-Wellen-Strömungsbecken auf einer Fläche von ca. 10 m x 10 m räumlich homogene Strömungsfelder erzeugt werden können und dass diese Strömungen mit Seegang aus verschiedenen Richtungen überlagert werden können. Randeffekte aufgrund einer jet-artigen Strömungsgenerierung, wie in MacIver et al. (2006) beschrieben, konnten vermieden werden.

Im Anschluss an die Strömungsversuche wurden die physikalischen Modellversuche zu der Wellengenerierung und dem Wellenverhalten ohne Strömung durchgeführt. Die Ziele der Versuche waren zum einen das Verhalten von unidirektionalen, regelmäßigen Wellen mit der neuen passiven Wellenabsorption im Wellenbecken zu ermitteln und zum anderen die Wellencharakteristik der Wellendaten als Grundlage für die folgenden Untersuchungen zur Wellen-Strömungs-Interaktion zu erhalten. Diese Ziele konnten ebenfalls erreicht werden, so dass auch in diesem Fall sehr gute Kenntnisse bzgl. der Wellengenerierung in der erweiterten Versuchseinrichtung bestehen. In Abhängigkeit der Wellenrichtung wurden Soll-Wellenperioden mit einer maximalen Abweichung von 0.4 % reproduziert, Soll-Wellenhöhen zeigten zu Beginn Abweichungen von bis zu 20 %. Für diese Abweichungen wurden im Rahmen des Projektes Korrekturfunktionen ermittelt.

Im letzten Schritt der physikalischen Modellversuche wurden die Wellen-Strömungsversuche durchgeführt, mit dem Ziel, die Wellencharakteristik bei schräger und orthogonaler Wellenrichtung zur Strömungsrichtung bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten zu untersuchen. Dieses Ziel konnte ebenfalls erfolgreich erreicht werden und zeigt interessante Änderungen der Wellencharakteristik. Im Einzelnen konnte gezeigt werden:

- Die von Brevik und Bjørn (1979), Swan und James (1998) sowie MacIver et al. (2006) aufgezeigten Transformationsprozesse während der Wellen-Strömungs-Interaktion (Korrelation der Strömungsmagnitude und der Wellensteilheit, Anstieg der Wellensteilheit mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit in Wellenfortschrittsrichtung) konnten reproduziert werden.
- Die Nichtlinearität von Wellen nimmt bei der Interaktion mit Strömungen zu, allerdings sind die Amplituden 4. und 5. Ordnung sehr klein (< 0.1%) und deren Einfluss auf die Wellenform demnach gering.
- Die Basisfrequenz einer generierten regelmäßigen Welle wurde durch die Überlagerung mit einer Strömung nicht verändert.
- Die Amplitude höher-harmonischer Frequenzen im Amplitudenspektrum sinkt unter Strömungseinfluss im Vergleich zur Wellenausbreitung ohne Strömungskomponente.

- Die Wellen-Strömungs-Interaktion führt sowohl für die Peak-Frequenz als auch für höher-harmonischen Frequenzen zur Ausbildung von Seitenbändern im Amplitudenspektrum (Hinweis von Modulationsinstabilitäten). Die Amplitude der Frequenzkomponenten der Seitenbänder steigt mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit an.
- Die Ausprägung der Seitenbänder nimmt für kleiner werdender Wellenperioden zu.
- Ein Vergleich der vierten IMF zwischen Wellenversuchen mit und ohne Strömungsinteraktion ermöglicht, Auswirkungen der Wellen-Strömungs-Interaktion zu identifizieren.
- Die Nichtlinearität von Wellen mit steigendem Einfluss von Strömungskomponenten wurde quantifiziert. Der Grad der Nichtlinearität der IMF c4 nimmt hierbei ab und der Grad der Nichtlinearität der IMF c5 für steigende Strömungsgeschwindigkeiten zu.

Die Anwendung der Hilbert-Huang-Analyse auf die hier untersuchten Versuche hat es ermöglicht, die Eingangssignale des Wellenversuchs und der Wellen-Strömungs-Versuche als schmalbandige Signale in einer IMF wiederzugeben. Durch die Darstellung der IMFs in den Hilbert-Spektren war es möglich, Unterschiede zwischen dem WA-Fall und dem WCI-Fall festzustellen: Für einen Vergleich konnten im Rahmen dieser Untersuchung (i) der Kurvenverlauf der IMFs im Hilbert-Spektrum, (ii) die Schwankungsbreite der dargestellten Frequenzen sowie deren Mittelwert und (iii) der Grad der Nichtlinearität, der aus den Momentanfrequenzen der IMF berechnet wird, herangezogen werden.

Ein Vorteil gegenüber der Anwendung der Fourier-Analyse war die Möglichkeit der zeitlichen Zuordnung verschiedener Prozesse. Beispielsweise konnte für den Wellenversuch festgestellt werden, dass die Schwankungsbreite des im Hilbert-Spektrum dargestellten Signals und somit die Nichtlinearität im Versuchsverlauf variiert.

### 5.1 Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Die vorliegenden Daten bieten die Grundlage für weitere wissenschaftliche Qualifizierungsprojekte (z. B. Promotionsarbeiten). Des Weiteren ist die im Rahmen des Forschungsvorhabens für die Untersuchung der Wellen-Strömungs-Interaktion erweiterte Versuchseinrichtung für generelle Fragestellungen zur funktionalen Optimierung von Küstenschutzbauwerken direkt nutzbar. Grundsätzlich schließen sich, aufbauend auf den in dieser Studie gewonnenen Erkenntnissen, unmittelbare Folgeuntersuchungen zur Analyse unterschiedlicher Fragestellungen an, so z. B. Analysen zu wellen- und strömungsinduzierten Belastungen auf Küsten- und Offshore-Bauwerke mit Fokus auf den Grenzbereich zwischen Boden und Bauwerk, die Untersuchung komplexer Struktursysteme für Bauwerksgründungen und die Auslegung schwimmender Strukturen und Plattformen. Entsprechende Untersuchungen hierzu in entsprechenden Anschlussprojekten werden bereits durchgeführt.

Beispielsweise wird mit dem BMWi (AIF) geförderten Projekt "TexBase" die Kolkbildung für überlagerte Wellen- und Strömungseinwirkung untersucht, um Grundlagen für die erforderlichen technischen und wissenschaftlichen Planungen und Bemessungen für das innovative OWEA-Schwergewichtsfundament mit aufgelöster Struktur zu schaffen. Darüber hinaus wurden auch Studien zu konventionellen Strukturen bereits im Wellenbecken durchgeführt, die allerdings mit bislang in Versuchseinrichtungen kaum produzierbaren Randbedingungen getestet wurden. Daher konnten mit Hilfe der Strömungs- und Wellenüberlagerung bereits auch die Kolkgenese und die komplexere Lastcharakteristik am Monopile untersucht werden (BMU Förderung).

Da die hier vorgestellten Untersuchungen zunächst auf vergleichsweise kleinskaligen Modellversuchen basieren, wären im Anschluss an dieses Forschungsvorhaben erweiterte Studien unabdingbar. Die Studien würden sowohl Modellversuche im großen Maßstab unter verminderten Maßstabeffekten, wie auch Messungen an realen Bauwerken im Rahmen eines Monitoringkonzepts zur Korrelation mit den vorhandenen Messergebnissen, einbeziehen. Im Bereich der Grundlagenforschung gibt es weitere interessante wissenschaftliche Fragestellungen zu den Prozessen der schrägen und orthogonalen Wellen-Strömungs-Interaktion bei turbulenten Strömungen. Der Fokus bei den durchgeführten Untersuchungen lag auf der Beeinflussung der Wellen durch die Strömung. Künftige wissenschaftliche Fragestellungen können als Schwerpunkt die Untersuchung des Einflusses der Wellen auf die turbulente Strömung haben, so dass aus den vorliegenden Ergebnissen und den künftigen Ergebnissen sich weitere Erkenntnisse zu der schrägen und orthogonalen Wellen-Strömungs-Interaktion ergeben.

### 6 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei allen Beteiligten, die im Rahmen von Vorversuchen, der Antragsstellung, der Realisierung, Versuchsdurchführung und Auswertung zum Gelingen des Projektes beigetragen haben: Christina Carstensen, Lutz Evers, Arndt Hildebrandt, Stefan Mehlhase, Arne Stahlmann, Gerhard Streich, Jonathan Weisheit und Mayumi Wilms.

# 7 Literaturverzeichnis

Baldenhofer, K.; Marschall, N.: Lexikon der Fernerkundung. Stand: 19.04.2015: http://www.fe-lexikon.info/lexikon-d.htm, 2015.

Brevik, I.: Flume experiment on waves and currents II. Smooth bed. In: Coastal Engineering 4, 89–110. https://doi.org/10.1016/0378-3839(80)90009-5, 1980.

Brevik, I.; Bjørn, A.: Flume experiment on waves and currents. I. Rippled bed. In: Coastal Engineering 3, 149–177, https://doi.org/10.1016/0378-3839(79)90019-X, 1979.

Brühl, M.: Direct and inverse nonlinear Fourier transform based on the Korteweg-deVries equation (KdV-NLFT). A spectral analysis of nonlinear surface waves in shallow water. Dissertation. Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, 2014.

Dalrymple, R. A.; Dean, R. G.: Waves of maximum height of uniform currents. In: Journal of the waterways harbors and coastal engineering division, Aug. 1975.

Dick, S.; Mittelstaedt, E.; Müller-Navarra, S. H.: Der küstennahe Gezeitenstrom in der Deutschen Bucht. 4. unveränd. Aufl. Hamburg: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2348), 2010.

Faraci, C.; Foti, E.; Musumeci, R. E.: Waves plus currents at a right angle: The rippled bed case. In: J. Geophys. Res., 113, C7, https://doi.org/10.1029/2007JC004468, 2008.

Fredsø, J.; Andersen, K. H.; Sumer, B. M.: Wave plus current over a ripple-covered bed. In: Coastal Engineering 1999, 38, 177–221, 1999.

Groenweg, J.; Klopman, G.: Changes of the mean velocity profiles in the combined wavecurrent motion described in a GLM formulation. In: J. Fluid Mech., 370, 271–296, https://doi.org/10.1017/S0022112098002018, 1998.

Groenweg, J.; Battjes, J.: Three-dimensional wave effects on a steady current. In: J. Fluid Mech., 478, https://doi.org/10.1017/S0022112002003476, 2003.

Herchenroder, B. E.: Effects of currents on waves. Fort Belvoir, Va.: USA Army. Coastal Engineering Research Center (Coastal engineering technical aid, 81,14), 1981.

Huang, N. E.; Lo, Men-Tzung; Wu, Z.; Chen, X-Y.: Method for quantifying and modeling degree of nonlinearity, combined nonlinearity, and nonstationarity. In: Publication, U.S.P.A., Pub. No.: US 2013/0080378 A1 Pub. Date Mar. 28, 2013, 44, 2013.

Huang, N. E.; Shen, Z.; Long, S. R.; Wuu, M. C.; Shih, H. H.; Zheng, Q.: The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. In: Proceedings of Royal Society London, 454, 903–995. https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193, 1998.

Jonsson, I. G.: Wave-Current Interactions. In: LeMéhauté, Bernard; Hanes, Daniel M.; Hill, Maurice Neville; Robinson, Allan R. (Hg.): The sea. Ideas and observations on progress in the study of the seas. New York, NY: Interscience Publ., 1990.

Jonsson, I. G.; Christoffersen, J. B.: Current Depth Refraction of Regular Waves. In: Edge, B. L. (Hg.): Nineteenth Coastal Engineering Conference. Proceedings of the international conference; September 3–7, 1984, Houston Texas. New York, NY: American Soc. of Civil Engineers, 1984.

Jonsson, I. G.; Skovgaard, O.: Wave refraction across a shearing current. Lyngby: Technical Univ. of Denmark (Report/The Danish Center for Applied Mathematics and Mechanics, DCAMM, 151), 1978.

Kemp, P. H.; Simons, R. R.: The interaction between waves and a turbulent current: waves propagating with the current. In: J. Fluid Mech., 116 (-1), 227–250. https://doi.org/10.1017/S0022112082000445, 1982.

Kemp, P. H.; Simons, R. R.: The interaction of waves and a turbulent current: waves propagating against the current. In: J. Fluid Mech., 130 (-1), 73–89. https://doi.org/10.1017/S0022112083000981, 1983.

Kronawitter, A.: Sonnensystem, Stand 20.04.2015: http://astronomy.meta.org/ infosys/ELisa/Lern/AstroEin/sonnenSysAENF.html, 2002.

Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) (Hg.): Die Küste, 65, 2015. EAK Korrigierte Ausgabe 2007, unveränderter Nachdruck 2015.

Lieske, M.; Schlurmann, T.; Carstensen, C.; Evers, L.; Kerpen, N. B.; Mehlhase, S.; Stahlmann, A.; Weisheit, J.: Seegangsbelastungen (SEELE): Prozesse der Hydro-, Sediment- und Morphodynamik bei Interaktion von Richtungsseegang mit Strömung, Abschlussbericht Nr. 754. Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, https://doi.org/ 10.2314/GBV:1017922675, 2017.

MacIver, R. D.; Simons, R. R.; Thomas, G. P.: Gravity waves interacting with a narrow jetlike current. In: J. Geophys. Res. 111 (C3), https://doi.org/10.1029/2005JC003030, 2006.

Mai, S.: Seegangsatlas der deutschen Nordseeküste. Hg. v. Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen. Stand 20.03.2017 https://www.lufi.uni-hannover.de/seegangsatlas\_reg\_ver/start.htm, 2004.

Musumeci, R. E.; Cavallaro, L.; Foti, E.; Scandura, P.; Blondeaux, P.: Waves plus currents crossing at a right angle: Experimental investigation. In: J. Geophys. Res. 111 (C7), https://doi.org/10.1029/2005JC002933, 2006.

Peregrine, D. Howell: Interaction of Water Waves and Currents. In: von Mises, Richard; Dryden, H. L.; Chernyi, G. G. (Hg.): Advances in applied mechanics, Vol. 16. 1. Aufl: Elsevier textbooks, 1976.

Peregrine, D. H.; Jonsson, I. G.: Interaction of waves and currents. Fort Belvoir, Va. In: Coastal Engineering Res. Center (USA, Army, Coastal Engineering Research Center. Miscellaneous report, 83(6), 1983.

Swan, C.; James, R. L.: Random Waves on a Vertically-sheared Current. Virginia: American Society of Civil Engineers, 1998.

Taylor, G. I.: The Spectrum of Turbulence. In: Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 164, 919, 476–490. https://doi.org/10.1098/rspa.1938.0032, 1938.

Thomas, G. P.: Wave-current interactions: an experimental and numerical study. Part 1. Linear waves. In: J. Fluid Mech. 110, 457–474. https://doi.org/10.1017/S0022112081000839, 1981.

Thomas, G. P.: Wave–current interactions: an experimental and numerical study. Part 2. Non-linear waves. In: J. Fluid Mech. 216, 505–536. https://doi.org/10.1017/S0022112090000519, 1990.

Toffoli, A.; Ardhuin, F.; Babanin, A. V.; Benoit, M.; Bitner-Gregersen, E. M.; Cavaleri, L.: Extreme Waves in Directional Wave Fields Traversing Uniform Currents. In: Proceedings of the HYDRALAB III Joint User Meeting, Hannover, February 2010.

Toffoli, A.; Bitner-Gregersen, E. M.; Osborne, A. R.; Serio, M.; Monbaliu, J.; Onorato, M.: Extreme waves in random crossing seas: Laboratory experiments and numerical simulations. In: Geophys. Res. Lett. 38, 6, https://doi.org/10.1029/2011GL046827, 2011.

Whitham, G. B.: Linear and Nonlinear Waves. New York: John Wiley & Sons, 1974.