

Prä-operationelle Vorhersage von Seegang und Wellenauflauf an Seedeichen in der deutschen Bucht

Norman Dreier¹ und Peter Fröhle²

¹ Technische Universität Hamburg, Institut für Wasserbau, norman.dreier@tuhh.de

² Technische Universität Hamburg, Institut für Wasserbau

Zusammenfassung

Die heutigen verfügbaren Frühwarnsysteme für Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste basieren ausschließlich auf der Vorhersage lokaler Wasserstände. Andere hydrodynamische Belastungen, welche z. B. durch Windwellen und lokale Strömungen hervorgerufen werden, sowie die Widerstandsfähigkeit der Küstenschutzbauwerke (Seedeiche, Ufermauern etc.) werden in der Regel nicht berücksichtigt. Daher wurde ein Prototyp für ein operationelles Echtzeit- und Vorhersagesystem (im Nachfolgenden als „prä-operationelles“ Vorhersagesystem bezeichnet) für Seegang und seegangsinduzierte Belastungen auf der Basis von Naturmessungen und numerischen Simulationen bzw. empirischen Ansätzen entwickelt und am Beispiel von Seedeichen in der deutschen Bucht implementiert. Zur Vorhersage der seegangsinduzierten Belastungen wird ein Hybridmodell bestehend aus numerischen Simulationen (SWAN) sowie empirischen Ansätzen, z. B. EurOtop (2018), in Kombination mit Messdaten dazu verwendet, um beispielsweise mittlere Wellenauflaufhöhen während Sturmfluten an einem Seedeich der Nordseeinsel Pellworm vorherzusagen bzw. in Nahezu-Echtzeit abzuleiten. Das prä-operationelle Vorhersagesystem wurde am Beispiel der Langzeitvorhersage ausgewählter Sturmereignisse der letzten zehn Jahre (z. B. „XAVER“, 5.–6.12.2013) demonstriert und die Vorhersagequalität auf Basis vorhandener Naturmessungen bewertet. Die mittlere quadratische Abweichung (RMSE) der auf Basis der Vorhersagedaten (z. B. Windvorhersage des DWD bzw. Wasserstandsvorhersage) abgeleiteten mittleren Wellenauflaufhöhen ($R_{n2\%}$) am Deich im Vergleich zu Messungen beträgt zwischen 3 % und 7 % (bzw. 0,16–0,34 m) und liegt damit in etwa in der gleichen Größenordnung wie die aus Seegangsmessdaten im Deichvorfeld bzw. direkt am Deichfuß berechneten mittleren Wellenauflaufhöhen.

Schlagwörter

Deutsche Bucht, Nordsee, Frühwarnsystem, operationelle Seegangsvorhersage, Wellenbelastung, ICON-EU, BSHcmod, Wellenauflauf, EurOtop Ansatz

Summary

Today's available flood- respectively storm surge warning systems for the German North Sea coast consist exclusively of water level forecasts. Other hydrodynamic loads caused by wind waves and local currents as well as the resistance of the flood protection structure itself (e. g. coastal dikes, flood protection walls etc.) are not taken into account. Therefore, a prototype for an operational now- and forecast system (in the following

called pre-operational forecast system) for waves and wave induced hydrodynamic loads is set up that consists of available field measurements and data from numerical wave simulations in the German Bight. A hybrid model approach is used for the forecast of hydrodynamic loads on sea dikes. The approach combines numerical results from the phase integrated spectral wave forecast model (SWAN) and empirical approaches (e. g. EurOtop) as well as field measurements for the now- and forecast of average wave run-up heights at a sea dike on the North Frisian Island of Pellworm. The operational system is demonstrated exemplarily for the forecast of selected storm surges during the past decade (e. g. "XAVIER", 5-6th December 2013) and the forecast quality is assessed on the basis of available field measurements. The RMSE (root mean square error) of the average wave run-up heights ($R_{u2\%}$) at the dike ranges between 3 % and 7 % (0,16–0,34 m) and corresponds to the uncertainty of the calculated average wave run-up heights based on measured local wave parameters.

Keywords

German Bight, North Sea, early-warning system, operational wave forecast, hydrodynamic loads, ICON-EU, BSHcmod, wave run-up, EurOtop approach

1 Einleitung

Die operationelle ozeanografische Vorhersage von Wasserstand und Strömung bzw. Seegang in der deutschen Bucht erfolgt durch umfangreiche numerische Vorhersagesysteme des BSH (Brüning et al. 2014) bzw. des Seewetteramtes des DWD. Durch verschiedene Initiativen, z. B. die Reform des DWD-Gesetzes oder das Open-Data-Gesetz ist es möglich, beispielsweise Wetter- und Klimainformationen frei verfügbar zu beziehen (z. B. über den Geoserver des DWD www.dwd.de/opendata), um offizielle Warnungen vor Naturgefahren sowie lokale Behörden des Bevölkerungs- und Katastrophenschutzes zu unterstützen.

Dennoch werden alle diese Vorhersagesysteme in der Regel nicht zur Vorhersage detaillierter lokaler Informationen (mit hoher räumlichen Auflösung im Bereich weniger Meter) oder für Frühwarnsysteme eingesetzt.

Die existierenden Systeme besitzen eine vergleichsweise grobe räumliche Auflösung (im Bereich von wenigen hundert Metern), welche für die direkte Bewertung der hydrodynamischen Belastungen von Küstenschutzbauwerken zumeist ungeeignet ist.

Aus diesem Grund ist die Kenntnis der seegangsinduzierten hydrodynamischen Belastungen von Seedeichen, einschließlich der zeitlichen und räumlichen Verteilung des Seegangs am Deich in Verbindung mit lokalen Wasserständen eine der entscheidenden Eingangsgrößen für die Ableitung eines risikobasierten Frühwarnsystems.

Im BMBF-Verbundvorhaben EarlyDike (2015–2018) wurde daher ein Prototyp für ein sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem entwickelt, welches beispielhaft für Seedeiche implementiert wurde, indem detaillierte Echtzeit- und Vorhersageinformationen für die lokalen Seegangsbedingungen und seegangsinduzierten Belastungen ermittelt und in einem GeoPortal bereitgestellt werden. Sämtliche relevante Daten (z. B. räumliche Sensordaten, numerische Vorhersagen etc.) sind in eine Sensor- und Geodateninfrastruktur (SSDI) integriert, die den Zugriff auf alle Daten ermöglicht (Becker et al. 2016, Krebs et al. 2017, Herle et al. 2018).

Im vorliegenden Beitrag werden die Modellkette zur Vorhersage des Seegangs sowie der seegangsinduzierten Belastungen vorgestellt sowie die Ergebnisse der Seegangs- und Wellenauflaufvorhersage beispielhaft gezeigt und bewertet.

2 Modellkette

Der grundlegende methodische Ansatz (vgl. Abbildung 1) besteht darin, die hydrodynamischen Belastungen von Seedeichen auf Grundlage routinemäßiger Naturmessungen der Bundesbehörden (z. B. des BSH bzw. der WSÄ) sowie lokaler Küstenschutzbehörden (z. B. LKN-SH) und eigener Naturmessungen (siehe Kapitel 2.2 Messkette Hydrodynamik) in Kombination mit numerischen und physikalisch/empirischen Methoden, die ortsabhängig entwickelt und angewendet werden, zu beschreiben und vorherzusagen.

Seegangsmonitor

Als Grundlage für operationelle Frühwarnsysteme entlang der gesamten deutschen Nordseeküste werden die lokalen Seegangsbedingungen mit einem prä-operationellen numerischen Modell (SWAN) der gesamten Nordsee auf Basis der ICON-EU Windfelder des DWD abgeleitet. Hierbei spielen die örtlichen Wasserstände eine wesentliche Rolle, insbesondere bei der mathematischen Beschreibung der physikalischen Prozesse im Zusammenhang mit der Wellenerzeugung und der Wellendeformation im Flachwasser. Daher erfolgt eine unidirektionale Kopplung des Seegangmodells mit Wasserstandsmodellen des BSH sowie des FWU der Universität Siegen (Niehüser et al. 2018).

In Ergänzung zu den numerischen Seegangssimulationen im Langzeit- (T+72 h) und Kurzzeit-Vorhersagemodus (T+24 h), werden zur Erfassung der lokalen Seegangsbedingungen und als Ausgangspunkt für die Ermittlung der aus dem Seegang in Kombination mit den Wasserständen resultierenden hydrodynamischen Belastung der Seedeiche Seegangsmessungen im unmittelbaren Deichvorfeld bzw. direkt am Deich durchgeführt. Verfügbare Seegangsmessdaten werden im Nahezu-Echtzeit-Modus abgeleitet und zum Vergleich der Modellergebnisse mit Messdaten genutzt. Darüber hinaus dienen die lokalen Seegangsmessdaten der Ableitung von Wind-Wasserstand-Wellen-Korrelationen, die in der Kurzzeitvorhersage angewendet werden.

Seegangbelastungssimulator

Die prä-operationelle Vorhersage der Seegangsbedingungen im Deichvorfeld (Seegangsmonitor) ist die Basis für das hybride Seegangbelastungsmodell (Seegangbelastungssimulator) welches auf der Grundlage von numerischen und empirischen Methoden, sowie auch auf der Basis hydrodynamischer Daten aus Naturmessungen (Messkette Hydrodynamik) betrieben wird. Existierende Seegangs- und Wellenaufmessungen des LKN-SH werden ebenfalls in die Analyse bzw. Vorhersage mit einbezogen.

Der Betrieb des Seegangsbelastungssimulators als Grundlage für das Frühwarnsystem erfolgt in drei Modi:

- Nahezu-Echtzeit-Modus auf Basis von lokalen Messdaten, mit dem Ziel, die Auswirkungen der Wellen am und auf dem Deich möglichst präzise und mit einer hohen Genauigkeit in den nächsten 15 Minuten (Aktualisierung alle 15 Minuten) zu bestimmen
- Kurzzeitvorhersage-Modus auf Basis numerischer (SWAN) bzw. empirischer Verfahren (Wind-Wellen-Korrelation) zur Vorhersage stündlicher Seegangsbelastungen in den nächsten 24 Stunden (Aktualisierung alle 6 Stunden)
- Langzeitvorhersage-Modus auf Basis numerischer Verfahren (SWAN) zur Vorhersage stündlicher Seegangsbelastungen in den nächsten 72 Stunden (Aktualisierung alle 12 Stunden)

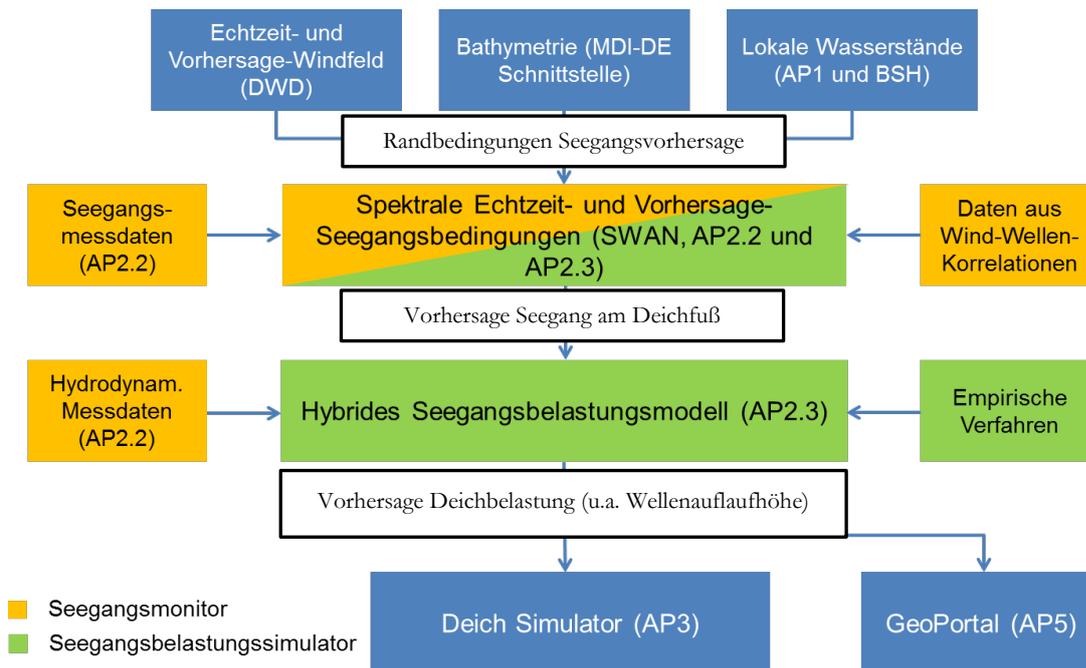


Abbildung 1: Methodischer Ansatz zur Vorhersage des Seegangs und seegangsinduzierter Belastungen von Seedeichen; AP=Arbeitspaket siehe Einleitungskapitel und Einbindung der Untersuchungen in die Arbeitspakete des Forschungsvorhabens „EarlyDike“.

Die Ergebnisse des Seegangsmonitors bzw. Seegangsbelastungssimulators, im Einzelnen: i) gemessene Seegangsdaten, ii) hochaufgelöste Nahezu-Echtzeit- und Vorhersagedaten des Seegangs, iii) gemessener Wellenauflauf und iv) datengesteuerte Modellergebnisse der hydrodynamischen Belastungen von Seedeichen werden als Grundlage für den Deich Simulator im Nahezu-Echtzeit- sowie im Vorhersagemodus zur Verfügung gestellt und im GeoPortal implementiert. Hierzu wurden Datenschnittstellen in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern IWW, gia und BAW entwickelt.

Im Folgenden werden der Ablauf und der Modellansatz zur Vorhersage der Seegangsbelastungen im Langzeit-Vorhersagemodus beispielhaft dargestellt. Wie bereits erwähnt, wurden über die Langzeit-Vorhersage hinaus, Systeme für die Kurzzeit- und Nahezu-Echtzeit-Vorhersage für unterschiedliche Anwendungsfälle entwickelt. Eine abschließende statistische Bewertung der Kurzzeit- und Nahezu-Echtzeit-Vorhersage steht aufgrund des geringen Datenumfangs der Messdaten noch aus.

2.1 Prä-operationelle Seegangsvorhersage (SWAN)

Zur Berechnung des Seegangs in der Deutschen Bucht wurde ein numerisches Seegangmodell auf der Basis des Programms SWAN (Booij et al. 1999) in der Version 41.10 eingesetzt.

In einer Reihe von nationalen (TUHH 2016, Herman et al. 2007, Mai 2002, Niemeier und Kaiser 2003, Zimmermann et al. 2004) und internationalen Studien (Camarena Calderon et al. 2015, Gautier et al. 2014, Van der Westhuysen et al. 2011, Van der Westhuysen et al. 2012, Zijlema et al. 2012) wurde die generelle Eignung von SWAN zur Reproduktion von kennzeichnenden Seegangparametern sowie -spektren in den stark strukturierten und von Wind und Tide beeinflussten Wattgebieten an der Nordsee festgestellt. Das Modell ist in der Lage „die zeitliche und räumliche Variabilität des Seegangs“ (Herman et al. 2007) beispielsweise an der Außenküste der Ostfriesischen Inseln, insbesondere in den stark strukturierten Gebieten der Riffgaten zwischen den Inseln, abzubilden. SWAN wurde ebenfalls zur Ermittlung von Bemessungsparametern sowohl an der Außenküste (Dreier 2009, Universität Rostock 2009, Fröhle et al. 2009) als auch im Wattbereich der ostfriesischen Inseln (Universität Rostock 2010, TUHH 2015) eingesetzt.

Im operationellen Einsatz in der Nordsee wird das Modell beispielsweise in den Niederlanden betrieben (Gautier und Caires 2015).

2.1.1 Modellbeschreibung SWAN

SWAN gehört zur Gruppe der spektralen Seegangmodelle der 3. Generation (beispielsweise wie WAM oder WaveWatch 3) und löst die sogenannte Wellenaktionsgleichung (spectral action balance equation), welche die zeitliche und räumliche Entstehung, Fortpflanzung (horizontal sowie im spektralen Raum) und Dissipation eines Richtungsspektrums beschreibt. Die Wellenaktionsgleichung in SWAN ist nachfolgend für den Fall sphärischer Koordinaten dargestellt (The SWAN Team 2017, Gleichung 2.25):

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_{\lambda} N}{\partial \lambda} + \cos^{-1} \varphi \frac{\partial c_{\varphi} \cos \varphi N}{\partial \varphi} + \frac{\partial c_{\sigma} N}{\partial \sigma} + \frac{\partial \bar{c}_{\theta} N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (1)$$

mit: $N = \text{Wellenaktion} = N_{(\sigma, \theta)} = \frac{E_{(\sigma, \theta)}}{\sigma} \quad (2)$

λ, φ = Längen-, Breitengrad
 σ, θ = Relative Frequenz, Wellenanlaufrichtung
 E = Wellenenergie

Der erste Term der Gleichung 1 beschreibt die zeitliche Änderung und die beiden darauf folgenden Terme die räumliche Fortpflanzung der Wellenaktion. Die beiden letzten Terme auf der linken Seite der Gleichung beschreiben die Fortpflanzung im spektralen Raum. Durch die Bathymetrie und Strömung wird in diesen Termen eine Frequenzverschiebung und Refraktion berücksichtigt. Der rechte Teil der Gleichung besteht aus dem Quellen- und-Senken-Term (S_{tot}), welcher die energierzeugenden bzw. dissipativen Prozesse erfasst. Im Flachwasser besteht der Quellen- und-Senken-Term aus sechs Prozessen, die in der nachfolgenden Gleichung dargestellt sind:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (3)$$

Der einzige energieerzeugende Effekt in Gleichung 3 ist der Windenergieeintrag (S_{in}) im ersten Term. Die beiden darauf folgenden Terme beschreiben die nichtlinearen Welleninteraktionen (3 Wellen/Triads, bzw. 4 Wellen/Quadruplets). Danach folgen die Terme der Energiedissipation durch Whitecapping ($S_{ds,w}$), Bodenreibung ($S_{ds,b}$) und das wassertiefenabhängige Wellenbrechen ($S_{ds,br}$).

2.1.2 Modellaufbau (Set-up)

Bathymetrie

Im Projekt EarlyDike wurde für einen räumlich übergeordneten Bereich (Modellname: North Sea State Model, Akronym: NSSM), der die komplette Nordsee umfasst (ca. 1000 km x 1000 km), ein numerisches operationelles Seegangsvorhersagemodell auf der Basis von SWAN erstellt. Der Seegang wurde mit einer räumlichen Auflösung von $\Delta\lambda=0,1^\circ$ bzw. $\Delta\varphi=0,05^\circ$ (ca. 6 km x 6 km) simuliert. Die Ausdehnung und Bathymetrie des übergeordneten Modellgebiets sind in Abbildung 2 dargestellt.

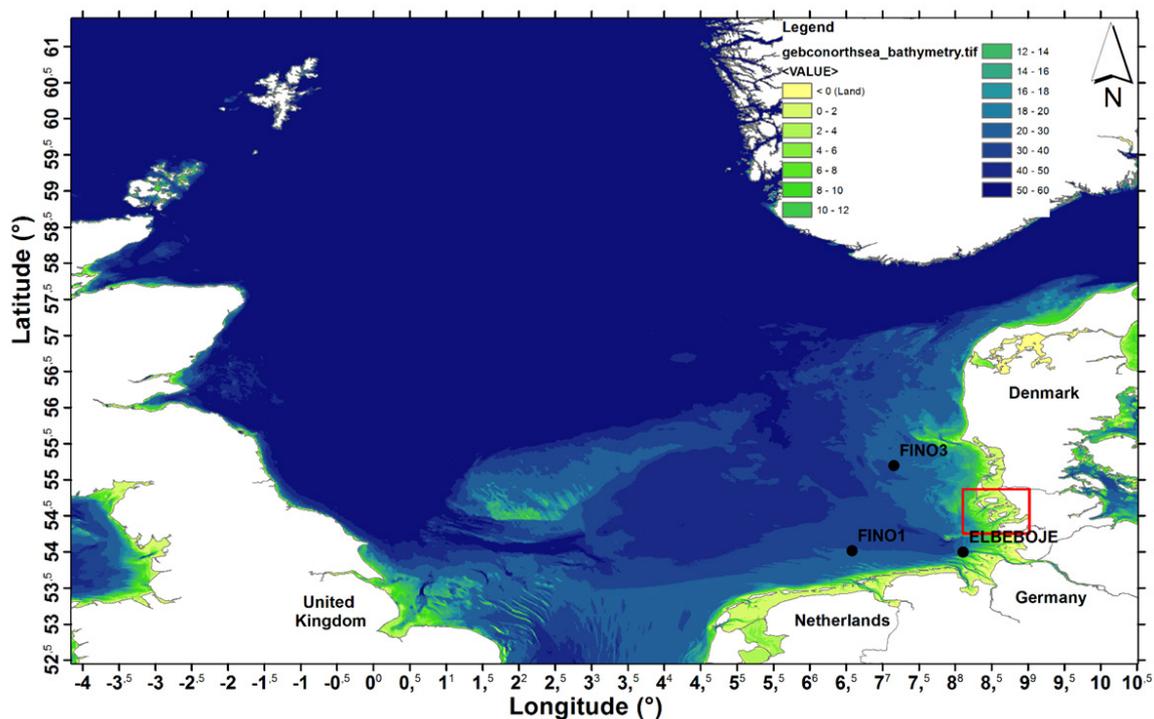


Abbildung 2: Modellgebiet und Bathymetrie (NSSM), verfügbare Seegangsmessungen im Tiefwasser (schwarze Punkte) sowie Lage des Detailgebietes (rotes Polygon).

Die Wassertiefenverhältnisse im NSSM-Modellgebiet wurden von dem frei verfügbaren, großräumigen, globalen Bathymetriedatensatz GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans), welcher vom BODC (British Oceanographic Data Centre) bereitgestellt wird, übernommen. Der Rasterdatensatz GEBCO 2014 Grid, mit einer räumlichen Auflösung von jeweils 30 Bogensekunden (ca. 1 km x 1 km), wurde anschließend auf die räumliche Auflösung des rechteckigen Berechnungsgitters reduziert, um die Simulationen zu beschleunigen. Die Tiefenangaben der GEBCO-Bathymetrie beziehen sich auf einen mittleren Wasserstand (MSL ± 0 m).

Darauf aufbauend wurde für das prä-operationelle Vorhersagesystem exemplarisch ein weiteres Detailmodell (Modellname: **Pellworm Sea State Model**, Akronym: **PWSM**) mittels Modell-Schachtelung/-Nesting erstellt, in dem auf Grundlage einer frei verfügbaren, höher aufgelösten Bathymetrie die räumliche Auflösung auf $\Delta\lambda=0,0006^\circ$ bzw. $\Delta\varphi=0,0006^\circ$ (ca. 50 m) erhöht wurde. Die Ausdehnung und Bathymetrie des Detailmodells sind in Abbildung 3 dargestellt.

Für die Wassertiefenverhältnisse im PWSM-Modellgebiet wurden ein frei verfügbarer, hoch aufgelöster Bathymetriedatensatz, welcher im Rahmen des KFKI-Projektes AufMod (2009-2012) erstellt wurde und über das Portal MDI-DE bereitgestellt wird, übernommen. Es wurde der Bathymetriedatensatz des Jahres 2012 mit einer räumlichen Auflösung von ca. 50 m x 50 m verwendet. Die Tiefenangaben der AufMod-Bathymetrie beziehen sich auf Normalnull (entspricht in etwa $MSL \pm 0$ m).

Modellparameter

In den Simulationen mit SWAN werden die nachfolgend aufgeführten, standardmäßig aktivierten physikalischen Prozesse berücksichtigt:

- Wellenwachstum durch Windeintrag (exponentiell nach Komen et al. 1984)
- Whitecapping (Komen et al. 1984)
- Nichtlineare Welleninteraktionen im Tiefwasser (Quadruplets, Hasselmann et al. 1985)
- Wassertiefenabhängiges Wellenbrechen mit $\gamma=0,73$ (Battjes und Janssen 1978)

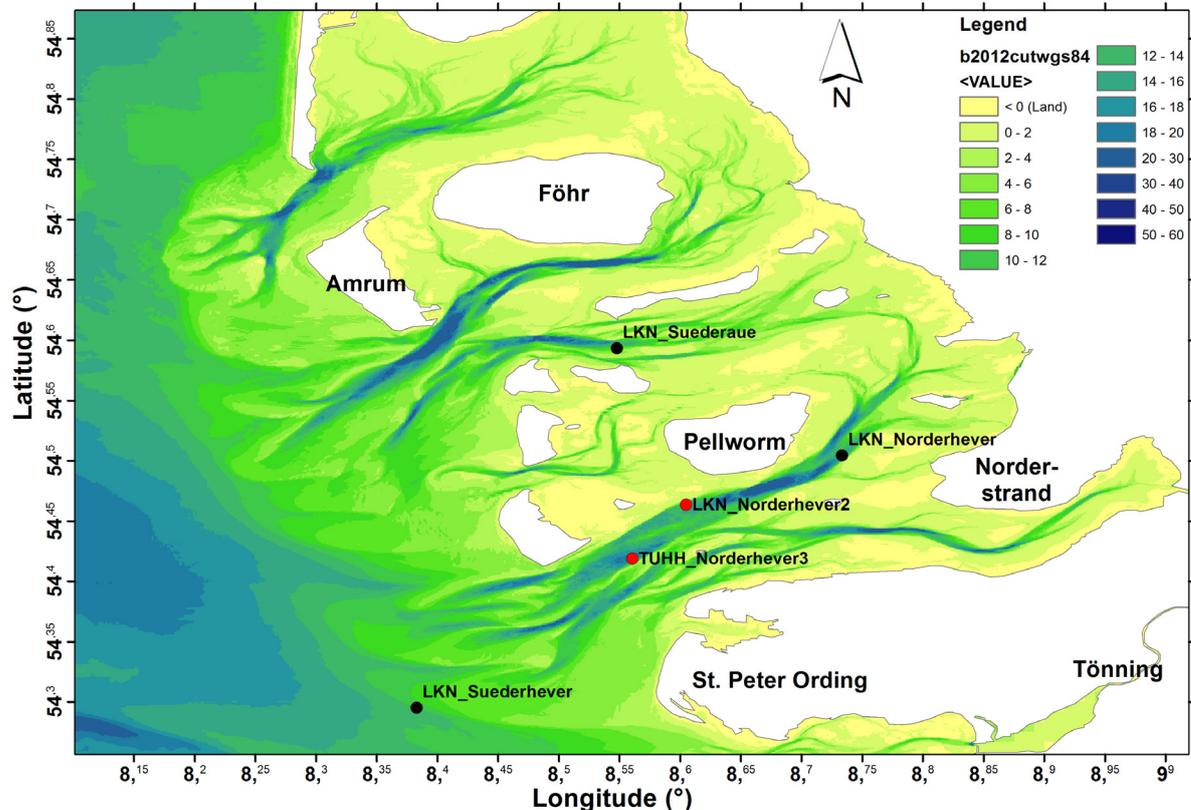


Abbildung 3: Modellgebiet und Bathymetrie (PWSM), verfügbare Seegangsmessungen im Übergangsbereich (schwarze Punkte) sowie Lage der Seegangsmessbojen „Norderhever 2 und -3“.

Zusätzlich werden nichtlineare Welleninteraktionen im Übergangsbereich (Triads, Eldeberky 1996) sowie die Bodenreibung mit konstantem Reibungskoeffizienten (Hasselmann 1973, JONSWAP) berücksichtigt.

Die Wahl der grundlegenden Modellparameter des Modells erfolgte auf Grundlage von Erfahrungen aus vorangegangenen Untersuchungen zur Ermittlung der Seegangsverhältnisse an der Nordseeküste (Universität Rostock 2009). Die von SWAN berechneten Seegangsspektren wurden mit 144 Richtungen ($2,5^\circ$) sowie mit 42 logarithmisch verteilten Frequenzstützstellen (von 0,02 Hz bis 1 Hz bzw. 50 s bis 1 s) aufgelöst.

Sämtliche Definitionen des Modellgebiets, der Programmausgaben usw. erfolgen auf Grundlage eines sphärischen Koordinatensystems (geografische Koordinaten, WGS84).

Die Komplexität der hydrodynamischen und meteorologischen Randbedingungen der instationären Seegangssimulationen kann die Anzahl der Iterationen bei der Lösung der implementierten Gleichungen erhöhen, sodass sich die Simulationsdauer erhöht. Im operationellen (automatisierten) Betrieb ist die Simulationsdauer entsprechend zu begrenzen. Daher wurde als weiterer wesentlicher Modellparameter die Anzahl der Iterationen bei der numerischen Lösung begrenzt. Nach Fraza (1988) und Van der Westhuysen (2008) sollten zur verbesserten Konvergenz der Iterationslösungen in Situationen mit starkem Wellenwachstum generell mindestens 3 Iterationsschritte erfolgen.

In einer Sensitivitätsanalyse wurde festgestellt, dass 3 Iterationsschritte ausreichend zur Bestimmung der Seegangparameter im Tiefwasser sind und eine höhere Anzahl von Iterationsschritten keinen signifikanten Einfluss auf die Berechnungsergebnisse des NSSM-Modells im Tiefwasser hat.

Im Gegensatz hierzu werden im Übergangsbereich (PWSM-Modell) 6 Iterationsschritte verwendet.

Hydrodynamische und meteorologische Randbedingungen

Als hydrodynamische Randbedingung im übergeordneten Modell (NSSM) werden frei verfügbare Wasserstandsvorhersagen des aktuellen operationellen Vorhersagesystems des BSH, welche in stündlicher Auflösung und für einen Zeitraum von 72 Stunden einmal pro Tag zur Verfügung gestellt werden, berücksichtigt. Es werden die Daten des Nord-Ost-seemodells BSHcmod NO mit einer räumlichen Auflösung von ca. 6 km x 6 km verwendet.

In einer Sensitivitätsanalyse (TUHH 2016) wurde festgestellt, dass der Einfluss von Seegangsrandbedingungen am nördlichen Modellrand des übergeordneten Modells unter Sturmflutbedingungen und bei einer Vorlaufzeit der instationären Simulationen von ca. 4 Tagen vernachlässigt werden kann. Da das prä-operationelle Vorhersagesystem für Sturmflutbedingungen konzipiert ist, werden demnach keine Seegangsrandbedingungen in den übergeordneten Simulationen (NSSM) berücksichtigt.

Im Detailmodell (PWSM) werden anschließend die Wasserstandsvorhersagen des FWU der Universität Siegen verwendet, welche ebenfalls in stündlicher Auflösung über einen Zeitraum von 72 Stunden, alle 6 Stunden zur Verfügung gestellt werden. In einer Sensitivitätsanalyse zum Einfluss der räumlichen Auflösung der lokalen Wasserstände auf die Seegangparameter im Deichvorfeld von „Untjehörn“, wurde festgestellt, dass eine höhere räumliche Auflösung als ca. 6 km x 6 km keinen signifikanten Einfluss auf die Berechnungsergebnisse hat. Daher werden die Wasserstandsvorhersagen des FWU mit einer

räumlichen Auflösung von ca. 6 km x 6 km an den Modellgitterpunkten des BSHmod NO-Modells zur Verfügung gestellt und in die Detailsimulationen (PWSM) eingebunden.

Als meteorologische Randbedingung werden sowohl im übergeordneten (NSSM) als auch im Detailmodell (PWSM) frei verfügbare Windvorhersagen des aktuellen operationellen Vorhersagemodells ICON-EU des DWD integriert. Die Daten des ICON-EU Modells des DWD werden für ein höher aufgelöstes Teilgebiet über Europa (ICON-EU Nest) mit einer räumlichen Auflösung von ca. 7 km x 7 km in stündlicher Auflösung für einen Zeitraum von 72 Stunden alle 6 Stunden zur Verfügung gestellt. Aufgrund des hohen Rechenzeitbedarfs werden ausschließlich Simulationen für die Hauptlaufvorhersagen um 00 UTC bzw. 12 UTC durchgeführt. Bei größeren Rechenkapazitäten wäre auch eine Erhöhung der Anzahl der Vorhersageläufe möglich, sodass die Vorhersagedaten häufiger aktualisiert werden.

2.1.3 Einbindung in das Gesamtkonzept (GeoPortal)

Ausgewählte Seegangparameter (z. B. H_{m0} , $T_{m-1,0}$ als auch θ_m) der Langzeitvorhersage werden sowohl als Flächendarstellungen per WMS-Layer als auch in Form von Zeitreihen mittels GeoMQTT-Protokoll, das vom gia der RWTH Aachen entwickelte wurde, über das Internet in eine Datenbank überführt und fortlaufend aktualisiert sowie mittels des Sensor Observation Service (SOS) in das GeoPortal eingebunden. Beispielhafte Ergebnisse sind in Herle et al. (2018) dargestellt.

2.2 Messkette Hydrodynamik

Als Grundlage für die Vorhersage der Seegangsbelastungen sowie der Seegangsbedingungen wurde eine Messkette zur Erfassung der hydrodynamischen Belastungen im Vorfeld und direkt auf Seedeichen beispielhaft für einen Seedeich im Bereich der Ortschaft „Untjehörn“ auf der Nordseeinsel Pellworm in enger Kooperation mit dem LKN-SH aufgebaut und betrieben.

Die lokalen Seegangsbedingungen im Deichvorfeld werden dabei beginnend vom einlaufenden Seegang aus dem Tiefwasser bis direkt an den Deich erfasst.

Die Messkette besteht aus den nachfolgend aufgeführten Bestandteilen:

- **Messkette Offshore:** Erfassung der lokalen Seegangsbedingungen im Norderhever-Strom mittels zweier „Directional Wave Rider“ Bojen an den Messpositionen „Norderhever 2 und -3“, dargestellt in Abbildung 4 bzw. Abbildung 3.
- **Messkette Deichvorfeld:** Erfassung des lokalen Seegangs sowie der lokalen Strömungen am Strand von „Untjehörn“ mit zwei konventionellen ADCPs „Workhorse Sentinel 1200“ (Teledyne RDI) sowie einem ADCP „Signature 1000“ (Nortek) mit mobilen 10 Hz-Druckmesssonden zur wasserstandsabhängigen Steuerung der ADCPs, sowie am Messpfahl „Untjehörn“ des LKN-SH, dargestellt in Abbildung 6.
- **Messkette Deich:** Erfassung des Seegangs am Deichfuß mit einer mobilen (vgl. Abbildung 6) bzw. festinstallierten 10 Hz-Druckmesssonde sowie des Wellenauflaufes mittels eines Stufenpegels des LKN-SH basierend auf Graphitelektroden am Deich „Untjehörn“ (Jensen und Scheider 2006), dargestellt in Abbildung 5.

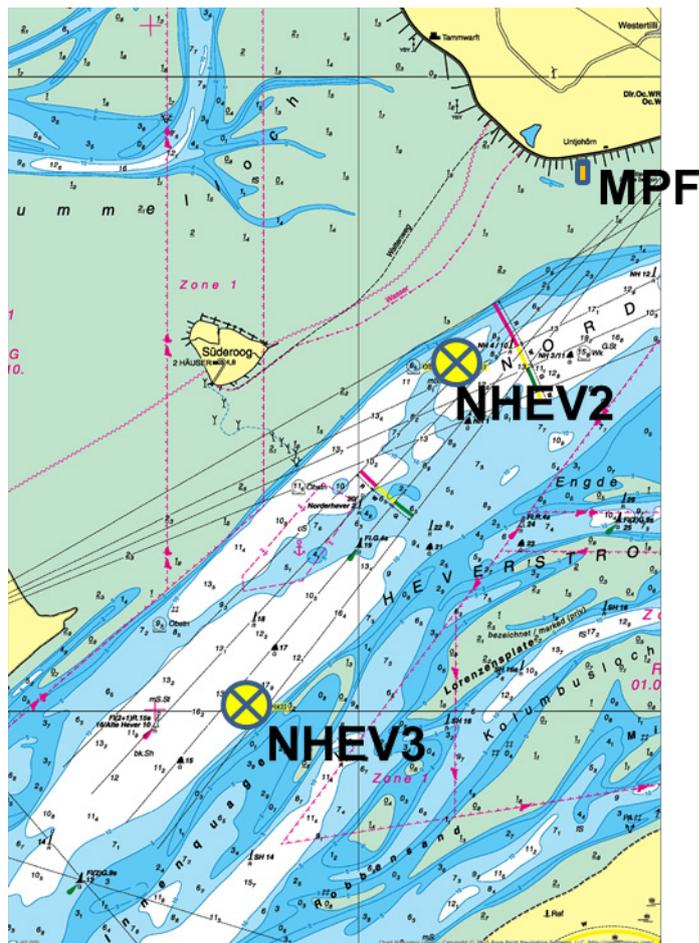


Abbildung 4: Lage der Seegangsmessbojen „Norderhever 2 und -3“ („NHEV2“ und „NHEV3“) sowie des Messpfahls „Untjehörn“ (MPF) vom LKN-SH, (Quelle: Chart Navigator Light).



Abbildung 5: Links: Wellenauflaufpegel „Untjehörn“ des LKN-SH, rechts: fest installierte 10 Hz-Druckmesssonde am Deichfuß.

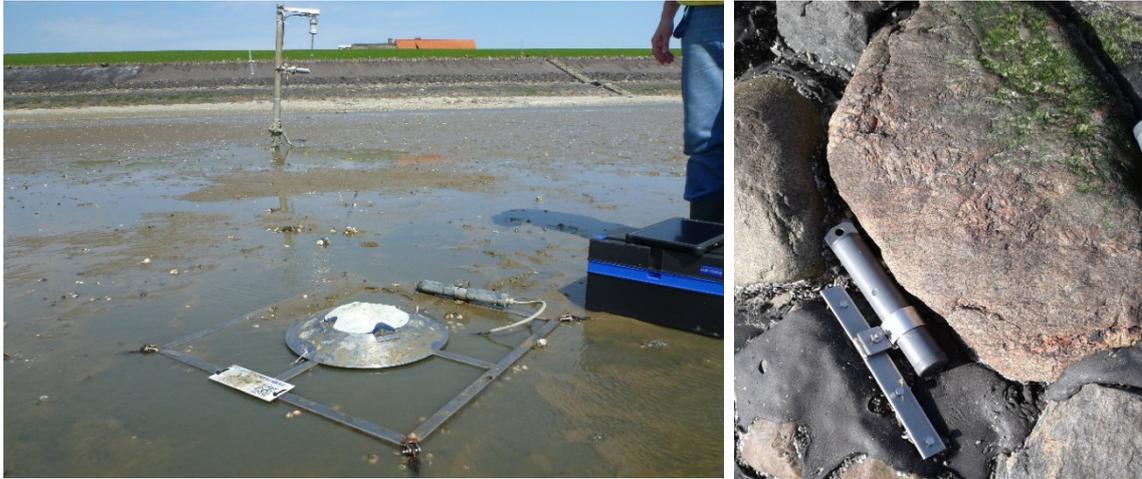


Abbildung 6: Links: „ADCP 1“ („Workhorse Sentinel 1200“) und Messpfahl „Untjehörn“ (im Hintergrund), rechts: mobile 10 Hz-Druckmesssonde am Deichfuß.

2.3 Prä-operationelle Vorhersage seegangsinduzierter Belastungen

Die prä-operationelle Vorhersage von seegangsinduzierten Belastungen des Deiches durch z. B. Wellenaufwurf erfolgt anhand eines Hybridmodells, welches die numerischen oder empirischen bzw. aus Messungen am Deichfuß (im Nahezu-Echtzeit-Modus) abgeleiteten Vorhersagedaten des Seegangs (siehe Kapitel 2.1 bzw. Kapitel 2.2) mit empirischen Verfahren zur Ermittlung des Wellenaufwurfes am Deich kombiniert (siehe Abbildung 1).

Die angewendeten Verfahren zur Ermittlung des Wellenaufwurfes werden nachfolgend beschrieben. Die Ergebnisse sind in Kapitel 3 dargestellt.

Um die Genauigkeit und Unsicherheit der Wellenaufwurfvorhersage einschätzen zu können wurden umfangreiche Methoden zur Auswertung historischer Wellenaufwurfmessungen am Wellenaufwurfpegel „Untjehörn“ basierend auf Leitfähigkeitsmessungen entwickelt und angewendet (siehe Ergebnisse in Kapitel 3.2).

2.4 Wellenaufwurfmodellierung

2.4.1 Phasenaufgelöste Seegangmodellierung

Ein weiteres Ziel des Projektes EarlyDike war es, ein phasenaufgelöstes Modell zur Simulation einzelner, individueller Wellen zusammen mit den entsprechend resultierenden hydrodynamischen Belastungen am Deich sowie auf dem Deich zu implementieren. Hydrodynamische Prozesse wie das Wellenbrechen auf dem Deich, der Wellenauf- und -abwurf sowie der Wellenüberlauf werden hierbei berücksichtigt. Die phasengemittelten Ergebnisse des SWAN-Modells werden im Analyseprozess phasenaufgelöst und mit einem phasenaufgelösten Seegangmodell weiterverarbeitet. Für die Ableitung einzelner Wellen aus dem phasengemittelten Spektrum wurde zunächst davon ausgegangen, dass die Phasenverteilung der einzelnen Wellenkomponenten zufällig ist.

Als phasenaufgelöstes Seegangmodell wurde ein numerisches Zwei-Phasen-Strömungsmodell auf Basis von OpenFOAM® zur Bestimmung der Seegangbelastungen einzelner Wellen auf Seedeichen eingesetzt. OpenFOAM® (Open Source Field Operation

and Manipulation) ist eine OpenSource-Software zur Durchführung numerischer Strömungssimulationen (CFD) auf Basis des Finite-Volumen-Verfahrens. Die freie Oberfläche zweiphasiger Strömungen (Phasengrenze) wird dabei mittels des Volume-of-Fluid-(VOF)-Verfahrens abgebildet. Zur Erzeugung und Absorption von freien Oberflächenwellen wurde der numerische Löser OLAFOAM (<https://openfoamwiki.net/index.php/Contrib/olaFlow>, zuletzt geprüft am 22.12.2021) angewendet, welcher eine Weiterentwicklung von IHFOAM (Higuera et al. 2013) darstellt und die dreidimensionalen Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (RANS) zur Approximation turbulenter Strömungen mittels Finite-Volumen-Methode und der Volumen-of-Fluid-Methode löst.

2.4.2 Modellaufbau (Set-up)

Im Projekt wurde auf Basis von OpenFOAM® ein zweidimensionales (2d-vertikales) numerisches Modell des Seedeiches „Untjehörn“ im Naturmaßstab aufgebaut. Die Abmessungen des Modells betragen 107 m in x -, 9 m in y - und 1 m in z -Richtung (vgl. Ausschnitt des Deichmodells in Abbildung 7).

Das Deichmodell wurde mittels eines strukturierten Berechnungsgitters mit einer räumlichen Auflösung von 4 cm in x - und z -Richtung und 100 cm in y -Richtung diskretisiert.

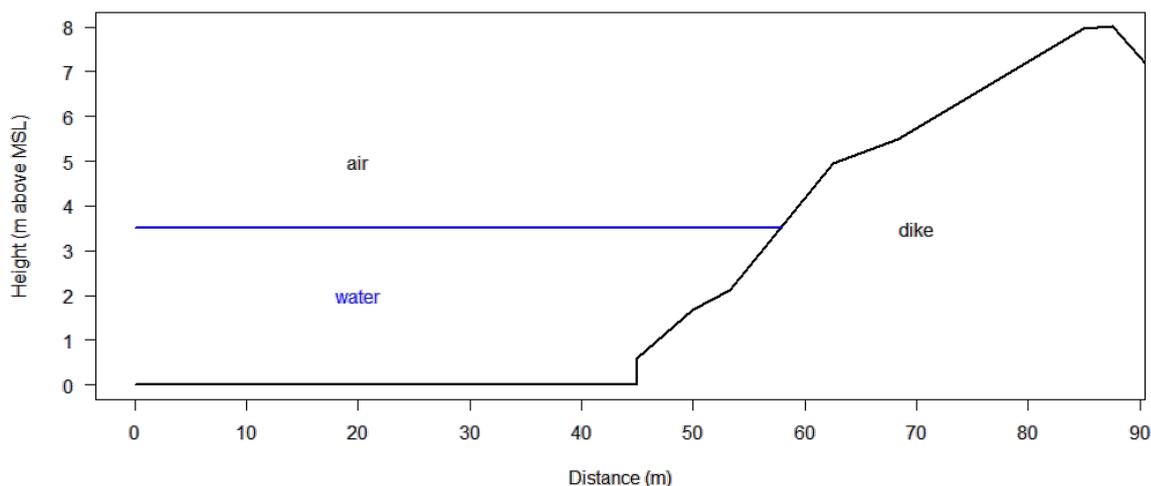


Abbildung 7: Schematische Darstellung des OLAFOAM Deichmodells (Hinweis: die Höhe ist überhöht dargestellt).

2.5 Empirische Wellenauflaufberechnungen

Die Ermittlung der mittleren Wellenauflaufhöhen ($R_{u2\%}$) erfolgt nach dem Mittelwertansatz (mean value approach) des EurOtop (2018), welcher für die Vorhersage des Wellenauflaufes bzw. den Vergleich mit Messungen geeignet ist:

$$R_{u2\%} = H_{m0} * 1,65 * \gamma_b * \gamma_f * \gamma_\beta * \xi_{m-1,0} \quad (4)$$

mit einem Maximum von:

$$R_{u2\%} = H_{m0} * 1.0 * \gamma_f * \gamma_\beta * \left(4 - \frac{1.5}{\sqrt{\gamma_b * \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_{m0}/L_{m-1,0}}}}} \right) \quad (5)$$

mit: H_{m0} = signifikante Wellenhöhe am Deichfuß (m)
 γ_b = Empirischer Beiwert für den Einfluss der Berme (-), hier = 1
 γ_f = Empirischer Beiwert für den Einfluss der Böschungsrauheit (-)
 γ_β = Empirischer Beiwert für den Einfluss der Wellenangriffsrichtung (-)
 a = mittlere Deichneigung (-)
 $L_{m-1,0}$ = Wellenlänge im Tiefwasser (m)

und der Brecherkennzahl:

$$\xi_{m-1,0} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_{m0}/L_{m-1,0}}} \quad (6)$$

und der Wellenlänge im Tiefwasser:

$$L_{m-1,0} = \frac{g * T_{m-1,0}^2}{2 * \pi} \quad (7)$$

mit: g = Erdbeschleunigung (m/s)
 $T_{m-1,0}$ = Energieperiode am Deichfuß (s)

Bei der Ermittlung der Wellenauflaufhöhen nach dem Ansatz nach EurOtop (2018) werden die komplexe Deichgeometrie (anhand der mittleren Deichneigung) sowie verschiedene empirische Beiwerte/Reduktionsfaktoren für den Einfluss der Oberflächenrauheit sowie der Wellenangriffsrichtung berücksichtigt. Der Einfluss einer Berme entfällt, da die Gleichungen 4 und 5 nur für einfache Böschungen mit Neigungen von 1:8 oder steiler gelten und eine Berme erst ab einer Neigung von 1:15 oder flacher nach EurOtop (2018) definiert ist.



Abbildung 8: Deichprofil Untjehörn (Seemann 2018).

Weiterhin wurde für die Berechnung des Wellenauflaufes das Deichprofil in Abschnitte mit unterschiedlicher Oberflächenrauheit eingeteilt (vgl. Abbildung 8 sowie Tabelle 1).

Tabelle 1: Deichprofilabschnitte und Oberflächenrauheit am Deich Untjehörn (Seemann 2018, modifiziert).

Abschnitt	Steigung 1 : m	Oberfläche	Rauheits- beiwert γ_f
1	5,5	Granitsetzsteins, vergossen	0,85
2	4	Metallhüttenschlacke, vergossen	0,85
3	2,8	Gussasphalt	1
4	11	Naturstein, Rauheitsstreifen	0,55
5	11	Asphalt	1
6	6,7	Gras	1

Eine Erkenntnis aus dem Vergleich historischer Wellenaufmessungen und den in der Langzeitvorhersage ermittelten Wellenaufhöhen (vgl. Kapitel 3) ist, dass die Berücksichtigung des Rauheitsstreifens anhand des gewählten Reduktionsfaktors γ_f (vgl. Tabelle 1) den tatsächlichen Wellenauflauf überschätzt. Die Oberflächenrauheit stellt daher einen Kalibrierungsfaktor in der Vorhersage des Wellenauflaufes am Deich dar. Auf der anderen Seite ist davon auszugehen, dass die Wellenaufmessungen ebenfalls mit Unsicherheiten behaftet sind, die derzeit noch nicht quantifiziert werden können.

3 Ergebnisse und Bewertung der Vorhersagequalität/-unsicherheit des Seegangs und des Wellenauflaufes für die Langzeitvorhersage

Zur Validierung des entwickelten prä-operationellen Vorhersagesystems für den Seegang sowie die seegangsinduzierten Belastungen durch z. B. Wellenauflauf sowie der Bewertung der Unsicherheit der Langzeitvorhersage erfolgten umfangreiche numerische Simulationen für ausgewählte Sturmflutereignisse der letzten 10 Jahre in der Nordsee (siehe Kapitel 3.1). Als meteorologische bzw. ozeanografische Randbedingungen der Simulationen wurden die Vorhersagen der in den jeweiligen Jahren im operationellen Betrieb befindlichen Vorhersagesysteme des DWD bzw. BSH verwendet.

Zusätzlich erfolgten ausgewählte Simulationen mit lokalen Wasserstandvorhersagen im Modellgebiet um Pellworm, welche vom FWU der Universität Siegen bereitgestellt wurden. Darüber hinaus erfolgten phasen aufgelöste numerische Simulationen zur beispielhaften Berechnung des Wellenauflaufes an einem Seedeich mittels numerischer Verfahren (siehe Kapitel 3.1.2).

3.1 Ergebnisse

Auf Basis vorhandener Wellenaufmessungen am Deich „Untjehörn“ auf Pellworm, die vom LKN-SH durchgeführt wurden, erfolgten die nachfolgend ausgeführten Langzeitvorhersagen:

- Orkantief „TILO“ (8. bis 9. November 2007) angetrieben von Cosmo-EU Windfeldern sowie BSHcmod-NO und FWU Wasserständen
- Orkantief „XAVER“ (5. bis 7. Dezember 2013) angetrieben von Cosmo-EU Windfeldern sowie BSHcmod-NO und FWU Wasserständen
- Orkantief „BARBARA“ (26. Dezember 2016) angetrieben von ICON-EU Nest Windfeldern sowie BSHcmod-NO Wasserständen
- Sturmtief „AXEL“ (4. Januar 2017) angetrieben von ICON-EU Nest Windfeldern sowie BSHcmod-NO Wasserständen

Zur vollständigen Entwicklung des Seegangs begannen die numerischen Seegangssimulationen jeweils mit einem Vorlauf von 4 Tagen. Die Topografie des Meeresbodens (Bathymetrie) wurde in allen Simulationen einheitlich verwendet (vgl. Kapitel 2.1.2).

3.1.1 Seegangs- und Wellenauflaufvorhersage am Beispiel des Orkantiefs „XAVER“, 5.-7.12.2013

Eine schwere Sturmflut in einer Serie von vier aufeinander folgenden Sturmfluten ereignete sich für die Insel Pellworm während des Wintersturmes „XAVER“ vom 5. bis 6.12.2013. Während des Sturmes wurden am 5.6.2013 maximale Geschwindigkeiten der Windböen von 148,3 km/h (Beaufort 12) und der 10-Minuten-Mittelwerte von 103 km/h (Beaufort 10) an der Station List auf Sylt aufgezeichnet (DWD 2013).

Die lange Dauer anhaltend hoher Windgeschwindigkeiten in Kombination mit langen Streichlängen bei nordwestlichen Windrichtungen ergaben in der deutschen Bucht an der Lokation „FINO3“ (vgl. Abbildung 9 a), hohe signifikante Wellenhöhen bis zu $H_s \sim 9,6$ m am 5.12. (TUHH 2016).

Die räumliche Verteilung der signifikanten Wellenhöhen sowie der mittleren Wellenaufrichtungen in der deutschen Bucht bzw. im Gebiet um Pellworm in der Vorhersage mit SWAN sind beispielhaft in Abbildung 9 a) bzw. b) dargestellt.

Für das Frühwarnsystem sind insbesondere die Seegangsparameter direkt am Deich (Deichfuß) bzw. in unmittelbarer Nähe des Deiches von Interesse und werden daher im Folgenden betrachtet.

Einen zeitlichen Vergleich zwischen dem gemessenen lokalen Wasserstand, den gemessenen lokalen Seegangsparametern ca. 50 m vor dem Seedeich „Untjehörn“ sowie den aus Messdaten abgeleiteten Wellenauflauf am Deich und den Ergebnissen der Vorhersage zeigt Abbildung 10. Die Messwerte sind dabei jeweils in Schwarz und die Simulationsergebnisse auf Basis der Wasserstandsvorhersage des BSH in Blau bzw. des FWU in Rot dargestellt.

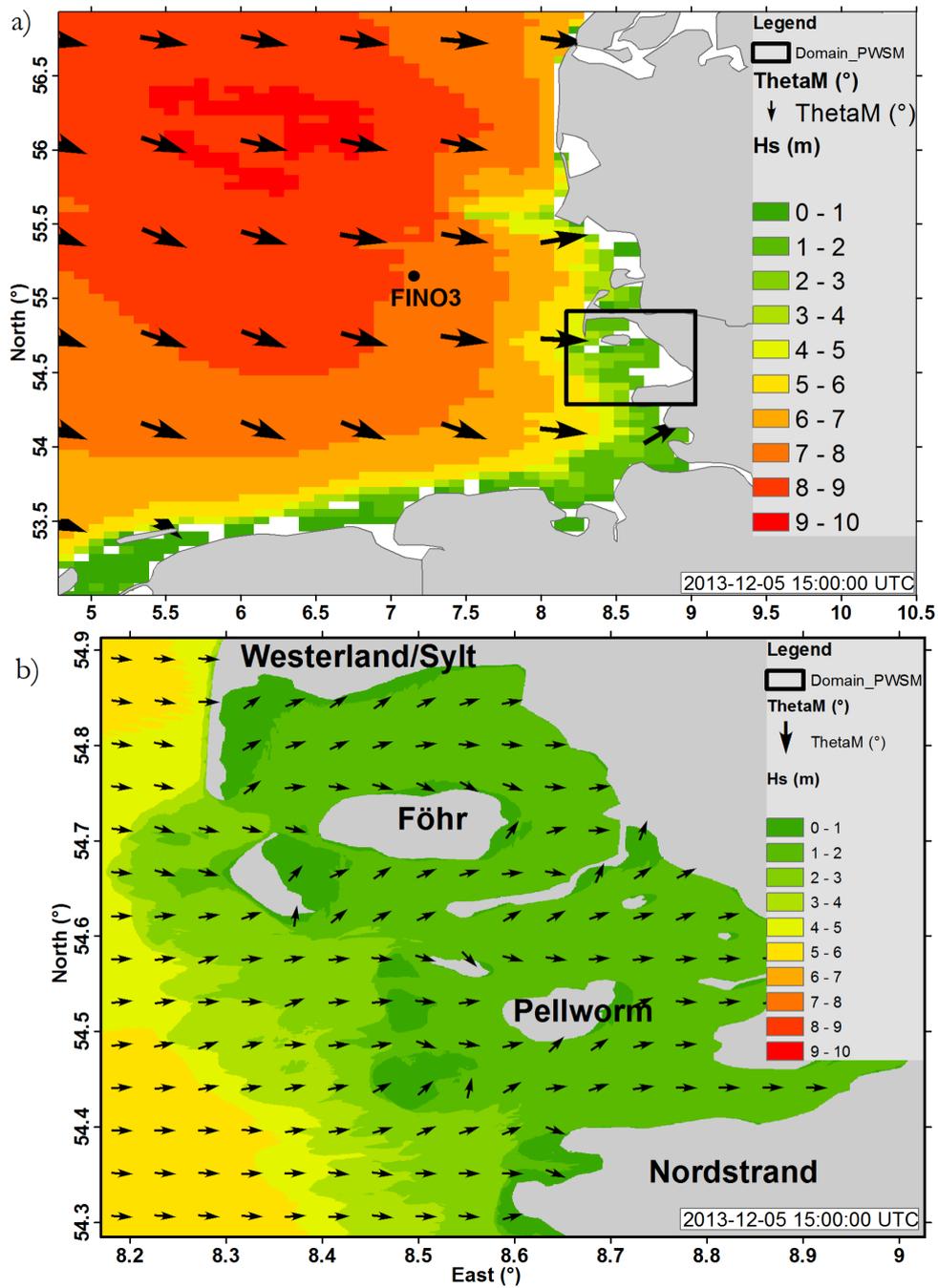


Abbildung 9: Langzeitvorhersage des Seegangs für das Orkantief „XAVER“ am 5.12.2013 16 MEZ (UTC+1) berechnet mit SWAN im Nordseemodell (a) und für ein Detailgebiet (siehe schwarzes Rechteck in a) um Pellworm (b). Die signifikante Wellenhöhe (H_m) ist farblich codiert und die mittlere Wellenanlaufichtung (θ_m) ist mittels Pfeilen in einem gröberen Ausgaberraster als die Berechnungsergebnisse dargestellt.

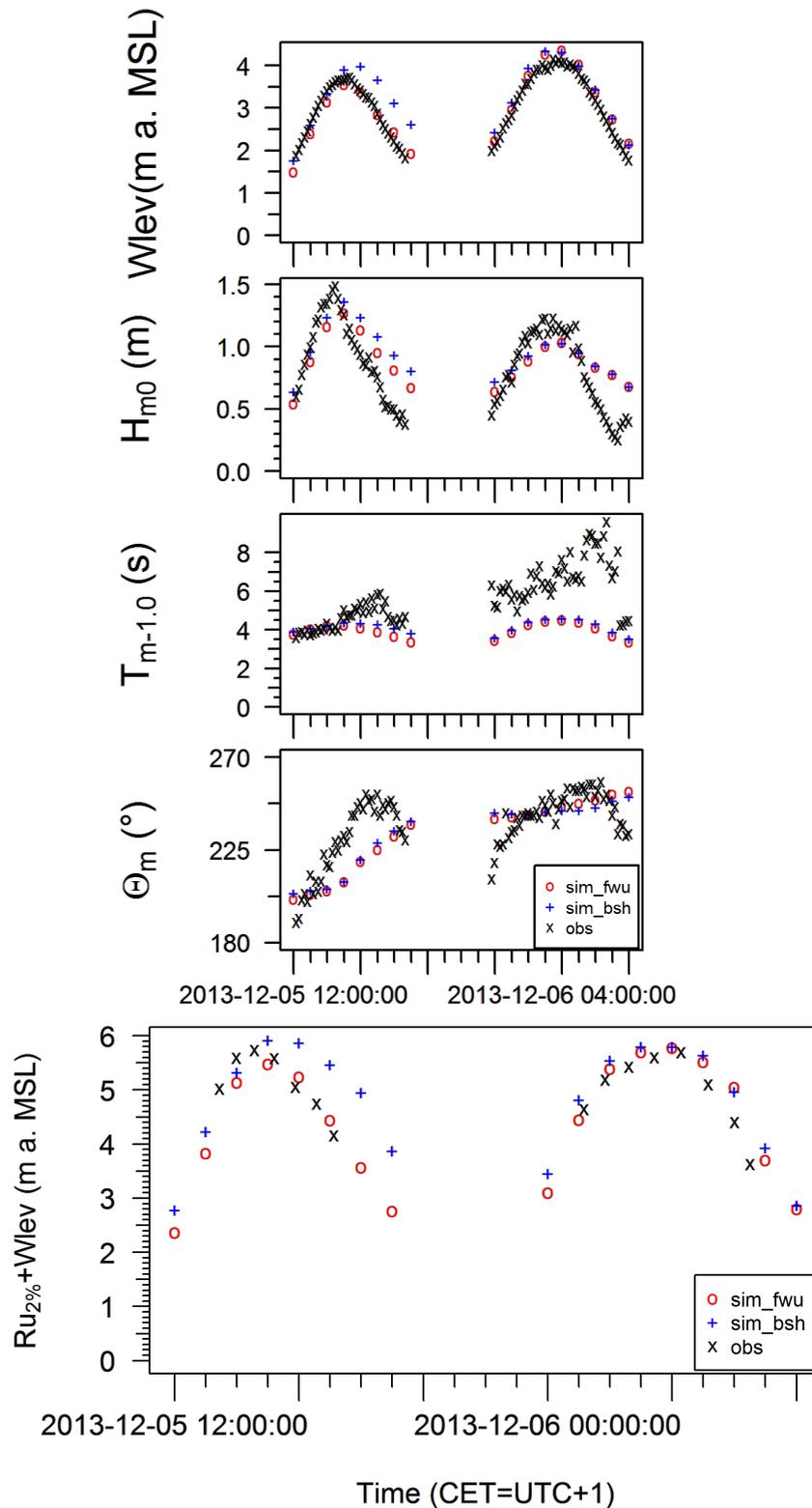


Abbildung 10: Hydrodynamische Parameter ca. 50 m vor dem Deich „Untjehörn“. Von oben nach unten: Wasserstand (Bezug NHN), signifikante Wellenhöhe (H_{m0}), Energieperiode ($T_{m-1,0}$), mittlere Wellenanlaufrichtung (Θ_m) sowie absolute mittlere Wellenaufhöhe ($Ru_{2\%}$ +Wasserstand m ü. NHN). Die Messdaten sind in Schwarz (Kürzel „obs“) und die Modellergebnisse auf Basis der Wasserstandsvorhersage des BSH bzw. des FWU in Blau (Kürzel „sim_bsh“) bzw. Rot (Kürzel „sim_fwu“) dargestellt.

Die mittlere quadratische Abweichung (root mean square error bzw. RMSE) zwischen den berechneten und gemessenen Parametern ist insbesondere in einem Bereich um den Sturmflut-Scheitelwasserstand interessant, da hier der Wellenaufbau am Deich am größten ist (vgl. Kapitel 3.2.1).

Die nachfolgend aufgeführten mittleren quadratischen Abweichungen wurden daher über einen Zeitraum von jeweils 3 Stunden um den jeweiligen Sturmflut-Scheitelwasserstand auf Basis der BSH- bzw. FWU-Vorhersage des Wasserstands berechnet und über die beiden Sturmfluten am 5. und 6.12.2013 gemittelt. Die mittleren quadratischen Abweichungen betragen für:

- den lokalen Wasserstand: 0,32 m (BSH) bzw. 0,22 m (FWU)
- die signifikante Wellenhöhe (H_{m0}): 0,19 m (BSH) bzw. 0,17 m (FWU)
- die Energieperiode ($T_{m-1,0}$): 1,71 s (BSH) bzw. 1,81 s (FWU)
- die mittlere Wellenaufbauhöhe ($R_{H2\%}$): 0,20 m (BSH) bzw. 0,19 m (FWU)
- die absolute mittlere Wellenaufbauhöhe ($R_{H2\%} + \text{Wasserstand m ü. NHN}$): 0,50 m (BSH) bzw. 0,20 m ü. NHN (FWU).

Wie Abbildung 10 verdeutlicht, werden der lokale Wasserstand, die lokalen Seegangparameter (bis auf die Energieperiode) und der Wellenaufbau sowohl teilweise über- als auch unterschätzt. Größere (systematische) Abweichungen existieren für die von SWAN berechneten Energieperioden aufgrund fehlender Seegangenergie im langperiodischen Bereich des von SWAN berechneten Seegangsspektrums.

Die mittleren quadratischen Abweichungen zwischen der Langzeitvorhersage des Seegangs bzw. des Wellenaufbaues am Seedeich „Untjehörn“ und Messungen sind insgesamt als gering einzustufen, was für eine gute Qualität des Vorhersagesystems spricht.

Die mittlere quadratische Abweichung der Wellenaufbauvorhersage auf Basis des empirischen Verfahrens nach EurOtop (2018) mit Seegangsdaten aus der Langzeitvorhersage des Seegangs (SWAN) liegt etwa in der gleichen Größenordnung wie die mittlere quadratische Abweichung der Wellenaufbauvorhersage mit gemessenen Seegangsdaten (RMSE $R_{H2\%,MPF} \sim 0,4$ m; vgl. Tabelle 2) im Vergleich zu gemessenen Wellenaufbaueignissen am Seedeich „Untjehörn“.

3.1.2 Wellenaufbaumodellierung

Zur beispielhaften Ermittlung des Wellenaufbaues am Seedeich „Untjehörn“ wurden numerische Simulationen mit regelmäßigen Wellen durchgeführt. Als Seegangsrandbedingung wurden Wellen mit einer Wellenhöhe von $H = 1,92$ m und einer Periode von $T = 3,75$ s über eine Simulationsdauer von 30 Sekunden (entspricht ca. 8 Wellen pro Simulation) eingesteuert. Der Wasserstand wurde mit 3,5 m angenommen. Sämtliche Seegangparameter und der Wasserstand wurden in Anlehnung an gemessene Werte am Messpfahl „Untjehörn“ während des Sturmflutscheitelwasserstandes des Sturmes „XAVIER“ am 05.12.2013 gewählt. Die zeitliche Auflösung der numerischen Simulation betrug $\Delta t = 0,05$ s.

Der zeitliche Verlauf des berechneten Wellenaufbaues am Deich (Bezug m ü. NHN, nachfolgend als „absolute mittlere Wellenaufbauhöhe“ bezeichnet) ist in Abbildung 11 dargestellt.

Abbildung 12 zeigt beispielhaft eine Momentaufnahme der freien Oberfläche des Wellenauflaufprofils für den Berechnungszeitschritt $t = 16,57$ s (dargestellt in Abbildung 11 mit roter Linie).

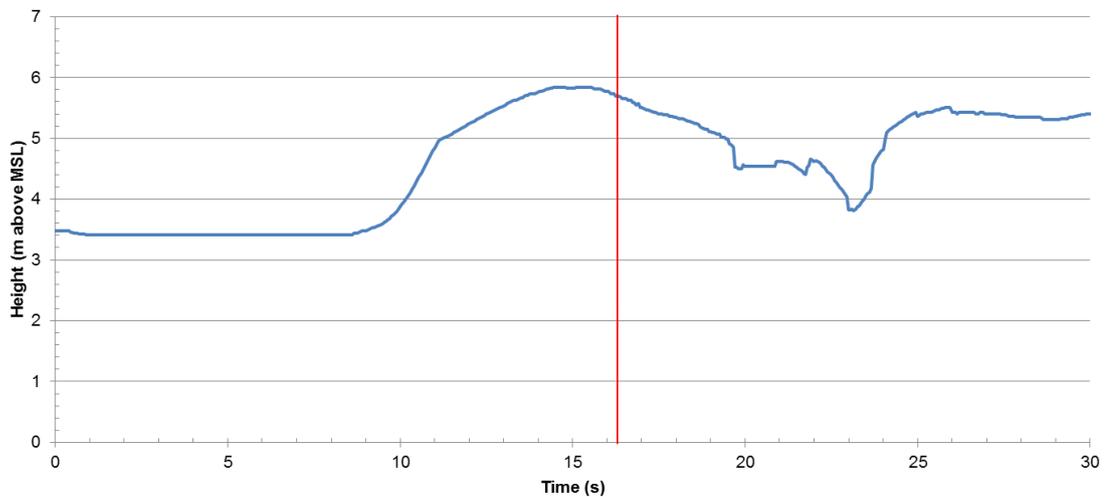


Abbildung 11: Absolute Wellenaufhöhe (Wellenaufhöhe bezogen auf NHN) in Simulation mit regelmäßigen Wellen.

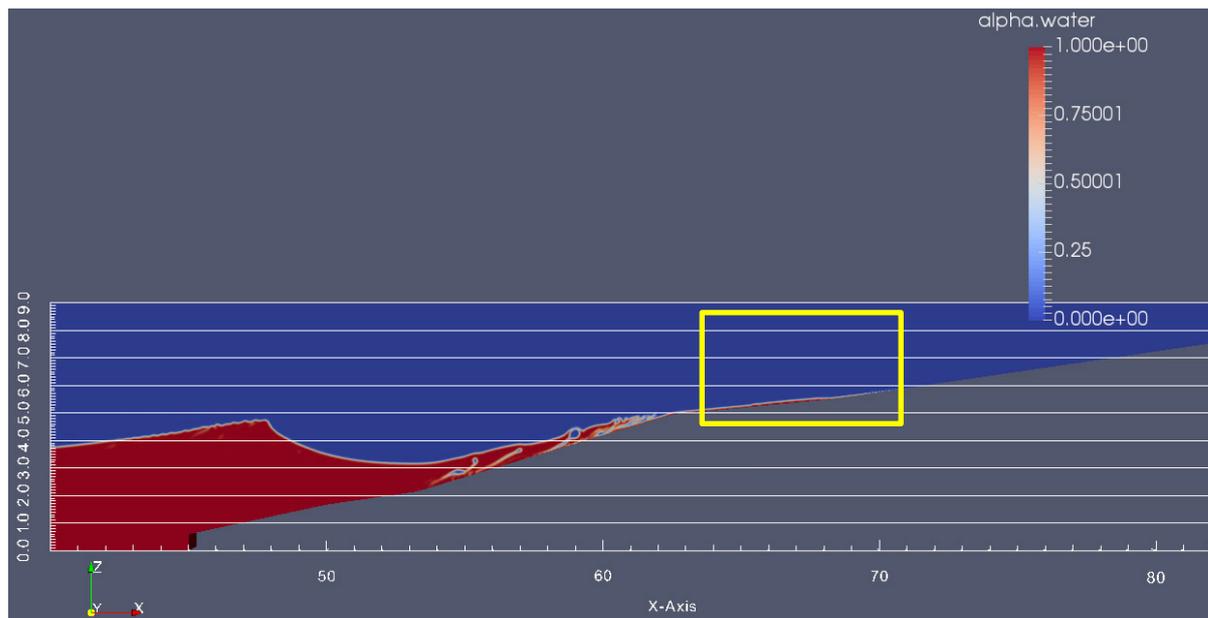


Abbildung 12: Wellenaufbausimulation mit regelmäßigen Wellen zum Zeitpunkt $t = 16,75$ s. Der berechnete α -Wert ist farblich codiert.

Zur Ermittlung der freien Oberfläche des Wellenauflaufes wurde der sog. α -Wert aus den Simulationsergebnissen ausgewertet, welcher den Anteil der Füllung der Berechnungszelle mit Wasser angibt ($\alpha = 1$ entspricht einer vollständigen Füllung und $\alpha = 0$ der Füllung nur mit Luft). Im Ergebnis einer Sensitivitätsanalyse wurde festgestellt, dass zur Auswertung der Wellenaufhöhen nur α -Werte $> 0,9$ betrachtet werden sollten.

Die absolute mittlere Wellenaufhöhe wurde für diesen Zeitschritt und mit Hilfe der zuvor erläuterten Auswertemethodik mit $\text{NHN}+5,58$ m berechnet. Die maximale Höhe des Wellenauflaufprofils wird bei der gewählten Auswertemethodik jedoch überschätzt, da zum dargestellten Zeitpunkt während des Wellenablaufprozesses noch Berechnungszellen

mit einem α -Wert $> 0,9$ auf der flach geneigten Außenböschung vorhanden sind und somit die Bestimmung der maximalen Wellenaufhöhe beeinflussen (siehe gelbes Rechteck in Abbildung 12).

Die durchgeführten Simulationen dienen zunächst ausschließlich der Entwicklung einer geeigneten Auswertemethodik der Simulationsergebnisse im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse. Daher wurden die Simulationsergebnisse noch nicht mit Messdaten bzw. anderen Berechnungsmethoden (z. B. empirischen Ansätzen) verglichen. Als ein Ergebnis der Sensitivitätsanalyse wurde festgestellt, dass die Auswertung der Wellenaufhöhen nicht ausschließlich auf dem α -Wert basieren sollte.

3.2 Bewertung der Vorhersagequalität und Unsicherheiten

Zur abschließenden Bewertung der Qualität der Langzeitvorhersage von Wasserstand und Seegang ca. 50 m vor dem Deich sowie der Belastungen infolge Wellenauflauf wurden für die in Kapitel 3.1 aufgeführten Sturmflutereignisse, die mittleren Abweichungen ausgewählter Vorhersageparameter im Vergleich zu Messungen bestimmt.

Die Abweichungen wurden einerseits über einen Zeitraum von jeweils 3 Stunden um den jeweiligen Sturmflut-Scheitelwasserstand bestimmt, um die Qualität der Vorhersage hoher Wellenaufereignisse einzuschätzen (siehe Kapitel 3.2.1). Andererseits wurden die Abweichungen für sämtliche zur Verfügung stehenden Messergebnisse während der betrachteten Sturmfluten ermittelt um die Qualität der Vorhersage sämtlicher gemessener Ereignisse bewerten zu können (siehe Kapitel 3.2.2).

3.2.1 Bewertung hoher Wellenaufereignisse

Die mittleren quadratischen Abweichungen (RMSE) für die betrachteten Sturmflutereignisse und Parameter sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Es wurde festgestellt, dass bis auf die Wellenperioden sämtliche Vorhersageparameter teilweise über- als auch unterschätzt werden (vgl. Tabelle 2, Mittelwert RMSE in den letzten beiden Spalten). Die Mittelwerte des RMSE der betrachteten Sturmflutereignisse verdeutlichen, dass die Unsicherheit der Vorhersage (hier ausgedrückt in Form des RMSE) der Energieperiode $T_{m-1,0}$ von bis zu 34 % (bzw. 2,8 s) am größten ist, gefolgt von der Unsicherheit der signifikanten Wellenhöhe H_{m0} von bis zu 25 % (bzw. 0,24 m). Die geringsten Unsicherheiten der Vorhersage wurden für die lokalen Wasserstände von bis zu 8 % (bzw. 0,25 m) festgestellt. Aufgrund teilweise gegenläufiger Effekte, z. B. der Überschätzung der lokalen Wasserstände und der Unterschätzung der lokalen Wellenhöhen, ergibt sich insgesamt eine Unsicherheit in der Vorhersage der Wellenaufhöhe am Deich von bis zu bis zu 12 % bzw. 0,19 m.

Zu Vergleichszwecken wurde die Unsicherheit zwischen der Vorhersage der Wellenaufhöhe bei Verwendung von Seegangsmessdaten am LKN-Messpfahl ca. 50 m vor dem Deich (vgl. Tabelle 2, Spalte 2, Kürzel „MPF“) bzw. direkt am Deichfuß (vgl. Tabelle 2, Spalte 2, Kürzel „DFS“) als Eingangsdaten für den Ansatz nach EurOtop (2018) und gemessenen Wellenaufhöhen berechnet. Dies ermöglicht es, die Unsicherheit bestehend aus der Messungenauigkeit sowie der des empirischen Verfahrens nach EurOtop (2018) zu bewerten. Hierbei zeigte sich erwartungsgemäß, dass die Unsicherheit der

Vorhersage der Wellenaufbauhöhe bei Verwendung der am Deichfuß gemessenen Seegangparameter nur etwa halb so groß ist (bis zu 11 % bzw. 0,17 m) wie bei Verwendung der am Messpfahl gemessenen Seegangparameter (bis zu 21 % bzw. 0,34 m). Es ist jedoch zu erwähnen, dass die am Deichfuß gemessenen Seegangparameter nur für ein Sturmereignis („BARBARA“ 2016) zur Verfügung standen und daher nur einen Einzelfall repräsentieren und eine größere Messdatenbasis für die statistische Auswertung notwendig ist.

3.2.2 Bewertung sämtlicher gemessener Wellenaufbauereignisse

Um eine robustere Bewertung der Qualität der Langzeitvorhersage zu ermöglichen, welche neben hohen Wellenaufbauereignissen auch mittlere Ereignisse berücksichtigt, wurden die mittlere quadratische Abweichung (RMSE) zwischen der Vorhersage des Wasserstands, des Seegangs sowie des Wellenaufbaues zusätzlich über die gesamte Dauer der Messungen bestimmt. Die Vorhersageergebnisse auf Grundlage der Wasserstandsvorhersage des BSH bzw. FWU sind für ausgewählte Parameter in Abbildung 13 den Messdaten gegenübergestellt.

Die größte Unsicherheit besteht demnach für die Vorhersage der Energieperiode $T_{m-1,0}$ (RMSE \sim 2,5 bzw. 3 s). Für die Vorhersage der restlichen Seegangparameter, sowie der Wasserstände und des Wellenaufbaues sind die Unsicherheiten relativ gering.

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass auch sämtliche Messungen von Seegang und Wellenaufbau durch Messunsicherheiten behaftet sind und eine größere Anzahl von Sturmfluten einschließlich Wellenaufbaumessungen untersucht werden müsste, um robuste Aussagen hinsichtlich der Vorhersagequalität bzw. -unsicherheit ableiten zu können. Die im Projekt entwickelte Messkette Hydrodynamik Pellworm sowie das entwickelte prä-operationelle hybride Vorhersagesystem für Seegang und Seegangsbelastungen bieten sehr gute Voraussetzungen zur Fortführung und Vertiefung der Untersuchungen.

Tabelle 2: Minimale bzw. maximale Abweichung (E_{\min} bzw. E_{\max}) sowie mittlere quadratische Abweichung (RMSE) zwischen berechnetem Wasserstand, signifikanter Wellenhöhe (H_{m0}), Energieperiode ($T_{m-1,0}$), mittlerer Wellenaufbauhöhe ($R_{0,2\%}$) sowie absolute mittlere Wellenaufbauhöhe ($R_{0,2\%} + \text{Wasserstand m ü. NHN}$) $R_{0,2\%} + \text{Wasserstand am Deich}$ „Untjehörn“ während ausgewählter Sturmereignisse und bei unterschiedlichen Wasserstandsvorhersagen (FWU bzw. BSH) und Messungen (DFS=Messung am Deichfuß, MPF=Messung am Messpfahl „Untjehörn“). Über- bzw. Unterschätzung im Vergleich zu Messungen in Rot bzw. Blau markiert, bei unklarem Vorzeichen in Weiß.

Parameter	Vorhersage	„TILO“ 2007			„XAVER“ 2013			„BARBARA“ 2016			„AXEL“ 2017			Mittelwert	
		E_{\min}	E_{\max}	RMSE	E_{\min}	E_{\max}	RMSE	E_{\min}	E_{\max}	RMSE	E_{\min}	E_{\max}	RMSE	RMSE	RMSE (%)
Wasserstand (m ü. NHN)	FWU	0,08	0,25	0,18	-0,28	0,37	0,22	-	-	-	-	-	-	0,20	4
	BSH	-0,03	0,17	0,10	-0,02	0,62	0,32	-0,40	-0,28	0,34	-0,27	-0,18	0,23	0,25	8
H_{m0} (m)	FWU	-0,44	-0,17	0,32	-0,27	0,24	0,17	-	-	-	-	-	-	0,24	25
	BSH	-0,43	-0,16	0,31	-0,21	0,34	0,19	-0,21	-0,06	0,12	-0,02	0,11	0,05	0,17	19
$T_{m-1,0}$ (s)	FWU	-4,79	-3,10	3,83	-3,59	0,24	1,81	-	-	-	-	-	-	2,82	34
	BSH	-4,62	-2,91	3,64	-3,47	0,36	1,71	-2,05	-1,14	1,60	-3,07	-1,78	2,37	2,33	33
$R_{0,2\%}$ (m)	FWU	-0,36	-0,04	0,20	-0,20	0,32	0,19	-	-	-	-	-	-	0,19	12
	BSH	-0,33	0,00	0,17	-0,13	0,34	0,20	-0,12	0,01	0,07	-	-	-	0,15	9
	DFS	-	-	-	-	-	-	0,09	0,22	0,17	-	-	-	0,17	11
	MPF	-0,36	0,42	0,32	-0,24	0,92	0,41	0,18	0,35	0,29	-	-	-	0,34	21
$R_{0,2\%} + \text{Wasserstand (m ü. NHN)}$	FWU	-0,19	0,14	0,12	-0,41	0,22	0,20	-	-	-	-	-	-	0,16	3
	BSH	-0,29	0,12	0,16	-0,08	0,90	0,50	-0,47	-0,31	0,38	-	-	-	0,34	7
	DFS	-	-	-	-	-	-	0,10	0,26	0,21	-	-	-	0,21	4
	MPF	-0,38	0,43	0,33	-0,22	0,92	0,41	0,15	0,35	0,30	-	-	-	0,35	7

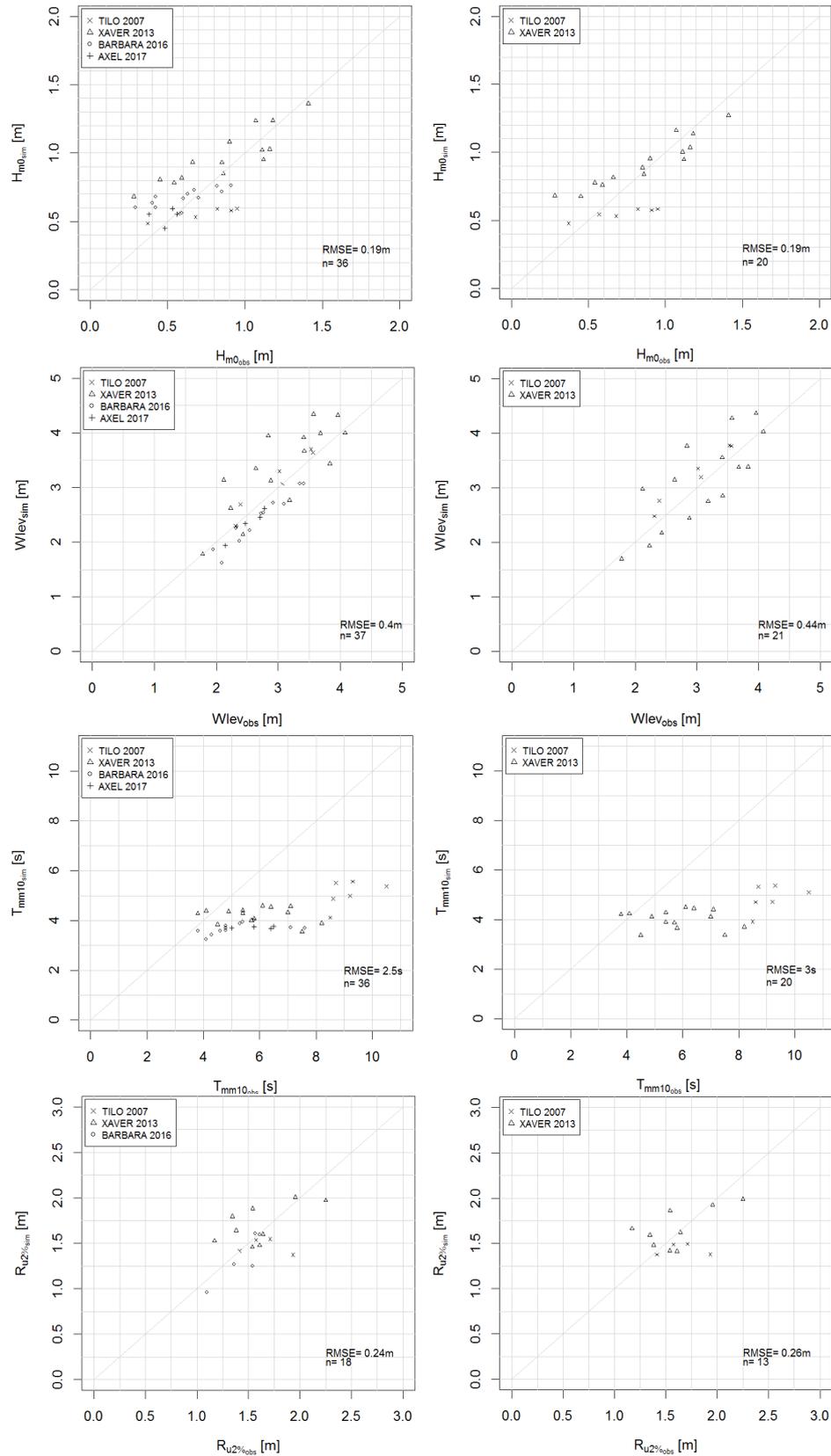


Abbildung 13: Vergleich der Langzeitvorhersage von Seegang und Wasserstand ca. 50m vor dem Deich sowie Wellenauflauf am Deich „Untjehörn“ für die Wasserstandsvorhersage des BSH (links) bzw. des FWU (rechts). Von oben nach unten: signifikante Wellenhöhe (H_{m0}), Wasserstand (m ü. NHN), Energieperiode ($T_{m-1,0}$), mittlere Wellenauflaufhöhe ($R_{u2\%}$). Berechnungsergebnisse auf Ordinate und Messwerte auf Abszisse.

4 Ausblick

Zur Optimierung der prä-operationellen Vorhersage des lokalen Seegangs im Deichvorfeld von „Untjehörn“ sind verschiedene Maßnahmen denkbar. Zum einen können die gemessenen Nahezu-Echtzeit-Daten dazu verwendet werden, die Vorhersage anzupassen (Datenassimilation). Eine andere Möglichkeit besteht darin, alternative Ansätze in SWAN zur Energiedissipation infolge des wassertiefenabhängigen Wellenbrechens (z. B. Van der Westhuysen 2010, Salmon und Holthuijsen 2011) bzw. des Whitecappings anstelle der standardmäßig verwendeten Ansätze (vgl. Kapitel 2.1.2) zu verwenden.

Zur besseren Vorhersage der Belastungen am Deich durch z. B. Wellenauflauf ist eine Kalibrierung des Hybridmodells anhand der im empirischen Ansatzes nach EurOtop (2018) verwendeten Oberflächenrauheit durchzuführen. Darüber hinaus sind zur Validierung der Vorhersage weitere Naturmessungen des Wellenauflaufes erforderlich. Die Naturmessungen können durch verbesserte Verfahren zur Messung des Wellenauflaufes, wie sie derzeit in Kooperation zwischen LKN-SH und TUHH entwickelt werden, ergänzt werden.

5 Dank

Die Autoren möchten sich beim LKN-SH, dem BSH und dem DWD sowie den WSÄ für die Datenbereitstellung zum Aufbau, zur Bewertung und zum Betrieb des prä-operationellen Vorhersagesystems und für die gute Zusammenarbeit bedanken. Weiterer Dank gilt dem Projektträger Jülich (PTJ) sowie dem BMBF für die Förderung und Unterstützung der Forschung.

6 Literaturverzeichnis

Battjes, J. A.; Janssen, J.: Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Coastal Engineering Proceedings*, 1, 16, 1978.

Becker, R.; Herle, S.; Lehfeldt, R.; Fröhle, P.; Jensen, J.; Quadflieg, T.; Schüttrumpf, H.; Blankenbach, J.: Distributed and Sensor Based Spatial Data Infrastructure for Dike Monitoring. In: FIG Working Week 2016, Christchurch, New Zealand, 2–6 May 2016. International Federation of Surveyors, FIG, Copenhagen, 2016.

Booij, N.; Ris, R. C.; Holthuijsen, L. H.: A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. In: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104, C4, 7649–7666, 1999.

Brüning, T.; Janssen, F.; Kleine, E.; Komo, H.; Maßmann, S.; Menzenhauer-Schumacher, I.; Jandt, S.; Dick, S.: Operational Ocean Forecasting for German Coastal Waters. In: *Die Küste*, 81, 273–290, 2014.

Camarena Calderon, A.; Gautier, C.; van Nieuwkoop, J.: Validation of SWAN under extreme conditions in the Wadden Sea. In: E-proc. of the 36th IAHR World Congress, The Hague, the Netherlands, June 28 - July 3, 2015, 36th IAHR World Congress. IAHR World Congress Proceedings, 2015.

Dreier, N.: Seegangsbelastung der Deckwerke am Nord- und Weststrand der Insel Wangerooge. Diplomarbeit, Universität Rostock, 2009.

DWD: Severe storm XAVER across northern Europe from 5 to 7 December 2013, Offenbach: Deutscher Wetterdienst, 2013.

Eldeberky, Y.: Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore zone. Delft, Technical University, Dissertation, 1996.

EurOtop: Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. Second Edition 2018. van der Meer, J. W.; Allsop, N.; Bruce, T.; Rouck, J. d.; Kortenhaus, A.; Pullen, T. et al., www.overtopping-manual.com, 2018.

Fraza, L.: Testing the non-stationary option of the SWAN wave model. Master Thesis, TU Delft, Delft, <http://resolver.tudelft.nl/uuid:f2fcc607-429c-41c7-b402-f3db86d15bf4>, zuletzt geprüft am 03.01.2022, 1988.

Fröhle, P.; Schlamkow, C.; Dreier, N.; Vogel, M.: Bemessungsseegang für die Seeseite der Insel Wangerooge – Numerische Untersuchungen mit dem Modell SWAN. Abschlussbericht, Rostock: Institut für Umweltingenieurwesen, Fachgebiet Küstenwasserbau, Universität Rostock, 2009.

Gautier, C.; Caires, S.: Operational wave forecasts in the southern North Sea. In: E-proc. of the 36th IAHR World Congress, The Hague, the Netherlands, June 28–July 3, 2015, 36th IAHR World Congress. IAHR World Congress Proceedings, 2015.

Gautier, C.; Camarena Calderon, A.; van Nieuwkoop, J.: SWAN hindcasts Wadden Sea, December 2013. Tidal inlet of Ameland and eastern Wadden Sea. Deltares, 2014.

Hasselmann, K.: Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Dt. Hydrograph. Inst, Hamburg, 1973.

Hasselmann, S.; Hasselmann, K.; Allender, J. H.; Barnett, T. P.: Computations and Parameterizations of the Nonlinear Energy Transfer in a Gravity-Wave Spectrum. Part II: Parameterizations of the Nonlinear Energy Transfer for Application in Wave Models. In: *Journal of Physical Oceanography*, 15, 11, 1378–1391, 1985.

Herle, S.; Becker, R.; Blankenbach, J.; Mulckau, A.; Lehfeldt, R.: EarlyDike: Sensor- & Geodateninfrastruktur für ein sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem für Seedeiche. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben EarlyDike – Teil 6. BMBF-Förderkennzeichen 03G0847A: Teilprojekt 5 – Sensor- & Geodateninfrastruktur, Geodätisches Institut der RWTH Aachen University (gia) & Bundesanstalt für Wasserbau, 2018.

Herman, A.; Kaiser, R.; Niemeyer, H. D.: KFKI-Projekt MOSES. Schlussbericht. BMBF Fördernummer: 03 KIS 040, NLWKN, Forschungsstelle Küste. https://izw.baw.de/publikationen/kfki-projekte-berichte/0/080_2_1_e35606.pdf, zuletzt geprüft am 03.01.2022, 2007.

Higuera, P.; Lara, J. L.; Losada, I. J.: Realistic wave generation and active wave absorption for Navier–Stokes models. In: *Coastal Engineering*, 71, 102–118, 2013.

Jensen, F.; Scheider, D.: Die Welle kommt. Systemsteuerung und Datenspeicherung im Küsten-Monitoring. In: *Verfahrenstechnik*, 05, 42–43, 2006.

Komen, G. J.; Hasselmann, S.; Hasselmann, K.: On the Existence of a Fully Developed Wind-Sea Spectrum. In: *Journal of Physical Oceanography*, 14, 8, 1271–1285, 1984.

Krebs, V.; Quadflieg, T.; Grimm, C.; Schwab, M.; Schüttrumpf, H.: Development of a sensor-based dike monitoring system for coastal dikes, *Coastal Engineering Proceedings*, 1, 35, 35, 2017.

Mai, S.: Seegangsausbreitung in Hever und Heverstrom. In: *Mitteilungen des Franzius Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen*, 87, 98–141, 2002.

Niehüser, S.; Dangendorf, S.; Arns, A.; Jensen, J.: Entwicklung einer Methodik zur Wasserstandsvorhersage entlang der gesamten deutschen Nordseeküste. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben EarlyDike – Teil 2. BMBF-Förderkennzeichen 03G0847B: Teilprojekt 1 – Sturmflutmonitor und Sturmflutsimulator, *Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), Universität Siegen*, 2018.

Niemeyer, H. D.; Kaiser, R.: Ermittlung des Bemessungsseegangs für Küstenschutzwerke und Randdünen mit mathematischer Modellierung. Schlussbericht zum KFKI-Forschungsvorhaben “Bemessungsseegang” KIS004, Nds. Landesamt für Ökologie, *Forschungsstelle Küste*, 2003.

Seemann, A.: Analyse und Bewertung des Wellenaufbaus an einem Seedeich während Sturmfluten auf Grundlage von Vorhersagen der Windverhältnisse sowie des lokalen Wasserstands. Master thesis, *Institute of River and Coastal Engineering, Hamburg University of Technology*, 2018.

The SWAN Team: SWAN. Scientific and Technical Documentation. SWAN Cycle III Version 41.10A, Delft: *Delft University of Technology*, 2017. <http://swanmodel.sourceforge.net/download/zip/swantech.pdf>, zuletzt geprüft am 14.06.2017.

TUHH: Numerische Simulationen zur Ermittlung des Bemessungsseegangs an der Wattseite der Insel Wangerooge, Deichausbau Dorf- und Ostgrodendeich, Neubau DB Schart. Abschlussbericht (unveröffentlicht), *Hamburg: Institut für Wasserbau, Technische Universität Hamburg*, 2015.

TUHH: Hindcast des Seegangs an der Außenküste der Insel Wangerooge für die Sturmflut vom 05.-06.12.2013. Numerische Untersuchungen mit dem Modell SWAN Version 41.01. Abschlussbericht (unveröffentlicht). *Hamburg: Institut für Wasserbau, Technische Universität Hamburg*, 2016.

Universität Rostock: Ermittlung der Seegangsverhältnisse an der Außenküste von Wangerooge. Abschlussbericht (unveröffentlicht), *Rostock: Institut für Umweltingenieurwesen, Fachgebiet Küstenwasserbau, Universität Rostock*, 2009.

Universität Rostock: Ermittlung der Seegangsverhältnisse an der wattseitigen Deichlinie der Ostfriesischen Inseln. Abschlussbericht (unveröffentlicht), *Rostock: Institut für Umweltingenieurwesen, Fachgebiet Küstenwasserbau, Universität Rostock*, 2010.

Van der Westhuysen, A. J.: Modeling of depth-induced wave breaking under finite depth wave growth conditions. In: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115, C1, 224, 2010.

Van der Westhuysen, A. J.; van Dongeren, A. R.; Groeneweg, J.; van Vledder, G. P.; Peters, H.; Gautier, C.; van Nieuwkoop, J. C. C.: Improvements in spectral wave modeling in tidal inlet seas. In: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117, C11, 2012.

Van der Westhuysen, A.: Nonstationary SWAN simulation in the Wadden Sea. Report (Hydraulic Engineering Reports), Deltares, <http://resolver.tudelft.nl/uuid:c4dc7d3c-697e-434c-ad63-4c305a1fd3f8>, 2008.

Zijlema, M.; van Vledder, G.; Holthuijsen, L. H.: Bottom friction and wind drag for wave models. In: *Coastal Engineering*, 65, 19–26, 2012.

Zimmermann, C.; Mai, S.; Daemrich, K.-F.: Ermittlung der Seegangsbedingungen am Hauptdeich der Insel Wangerooge (Bericht Nr. 680). Franzius Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, 2004. http://www.dr-smai.de/PDF_Projekte/hauptdeich_wangerooge_2004.pdf, zuletzt geprüft am 17.11.2017.