

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Periodical Part, Published Version

**Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hg.)**

## **Die Küste, 90 - EarlyDike**

Die Küste. Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee. Archive for Research and Technology on the North Sea and Baltic Coast

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

**Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) (Hg.)**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/108657>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hg.) (2021): Die Küste, 90 - EarlyDike. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (Die Küste. Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee. Archive for Research and Technology on the North Sea and Baltic Coast, 90).

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

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

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





Die Küste

EarlyDike

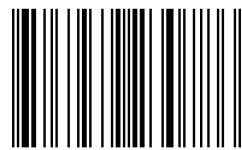
# Die Küste

ARCHIV FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK  
AN DER NORD- UND OSTSEE

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

**Entwicklung eines sensor- und risikobasierten  
Frühwarnsystems für Seedeiche  
EarlyDike**

ISBN 978-3-939230-78-6



9783939230786

90  
2021

HERAUSGEBER: KURATORIUM FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN  
EDITOR: GERMAN COASTAL ENGINEERING RESEARCH COUNCIL

# Die Küste

ARCHIV FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK  
AN DER NORD- UND OSTSEE

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

Entwicklung eines sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems für Seedeiche  
EarlyDike

Heft 90 · 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](mailto:izw@baw.de), [www.baw.de](http://www.baw.de)  
Druck: BSH Druckerei, Rostock



ISSN 0452-7739  
ISBN 978-3-939230-78-6

---

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

<i>Ralf Becker, Jörg Blankenbach, Norman Dreier, Peter Fröhle, Thomas Gries, Stefan Herle, Jürgen Jensen, Verena Krebs, Rainer Lehfeldt, Alexander Mulckau, Sebastian Niehüser, Till Quadflieg, Holger Schüttrumpf und Max Schwab</i> EarlyDike - Entwicklung eines sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems für Seedeiche	1
<i>Sebastian Niehüser, Sönke Dangendorf, Arne Arns und Jürgen Jensen</i> Entwicklung einer Methodik zur Wasserstandsvorhersage entlang der gesamten deutschen Nordseeküste	13
<i>Norman Dreier und Peter Fröhle</i> Prä-operationelle Vorhersage von Seegang und Wellenaufwurf an Seedeichen in der deutschen Bucht	51
<i>Verena Krebs und Holger Schüttrumpf</i> Entwicklung eines sensorbasierten Deichmonitorings	79
<i>Max Schwab, Till Quadflieg und Thomas Gries</i> Intelligente Geotextilien für das Echtzeit-Deichmonitoring	131
<i>Stefan Herle, Ralf Becker, Jörg Blankenbach, Alexander Mulckau und Rainer Lehfeldt</i> EarlyDike: Sensor- & Geodateninfrastruktur für ein sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem für Seedeiche	161





# **EarlyDike - Entwicklung eines sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems für Seedeiche**

Ralf Becker<sup>1</sup>, Jörg Blankenbach<sup>2</sup>, Norman Dreier<sup>3</sup>, Peter Fröble<sup>3</sup>, Thomas Gries<sup>4</sup>, Stefan Herle<sup>4</sup>, Jürgen Jensen<sup>5</sup>, Verena Krebs<sup>6</sup>, Rainer Lehfeld<sup>7</sup>, Alexander Mulckau<sup>8</sup>, Sebastian Niehüser<sup>8</sup>, Till Quadflieg<sup>4</sup>, Holger Schüttrumpf<sup>6</sup> und Max Schwab<sup>4</sup>

<sup>1</sup> RWTH Aachen University, Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik und Geoinformationssysteme, [ralf.becker@gia.rwth-aachen.de](mailto:ralf.becker@gia.rwth-aachen.de)

<sup>2</sup> RWTH Aachen University, Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik und Geoinformationssysteme

<sup>3</sup> Technische Universität Hamburg, Institut für Wasserbau

<sup>4</sup> RWTH Aachen University, Institut für Textiltechnik

<sup>5</sup> Universität Siegen, Abteilung Wasserbau und Hydromechanik

<sup>6</sup> RWTH Aachen University, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

<sup>7</sup> Bundesanstalt für Wasserbau

<sup>8</sup> Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

## **Zusammenfassung**

See- und Ästuardeiche zählen zu den wichtigsten Küstenschutzanlagen in Deutschland. Ein frühzeitiges Erkennen von Gefahren und das rechtzeitige Verhindern eines möglichen Deichversagens sind elementar für einen zuverlässigen Küstenschutz. Bestehende Frühwarnsysteme für Sturmfluten und Hochwasserereignisse berücksichtigen lediglich die Vorhersage von Wasserständen, während zusätzlich wirkende Belastungsgrößen wie Wind- und Wellenangriff sowie der Zustand der Hochwasserschutzanlagen selber nicht einfließen. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass es infolge des zeitgleichen Eintretens mehrerer Belastungen oder durch Vorschädigungen des Bauwerks bereits vor Eintritt des Bemessungswasserstandes zu einem frühzeitigen Versagen kommen kann. Vor Gefährdungen infolge eines solchen Ereignisses kann derzeit nicht rechtzeitig gewarnt werden. Das Projekt *EarlyDike* soll diese Lücke schließen: Am Beispiel von Seedeichen wird ein sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem entwickelt, welches mehrere Belastungsgrößen (Wasserstand, Wind und Wellen) sowie die Widerstandsfähigkeit des Bauwerks selbst berücksichtigt. Die Integration und Aufbereitung der Daten erfolgt in einem webbasierten GeoPortal, welches potentiellen Endnutzern zur Verfügung gestellt werden kann. Das dreijährige Projekt wurde im Rahmen des Sonderprogramms *Geotechnologien* des *Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)* gefördert. Insgesamt waren sechs Forschungsinstitute an dem Verbundvorhaben *EarlyDike* beteiligt.

## **Schlagwörter**

Frühwarnsystem, Echtzeitvorhersage, Wasserstandvorhersage, Seegangsvorhersage, Deichmonitoring, intelligente Geotextilien, webbasiertes GeoPortal

## Summary

*Sea and estuarine dikes are one of the most important structures when it comes to coastal protection in Germany. The early detection of possible hazards and the prevention of dike failures are fundamental for a reliable coastal defense. Therefore, the implementation of advanced early warning systems is a key aspect to attain a safe coastal environment. Current early warning systems for storm surges in Germany are based solely on water level forecasts. Other loads such as wind, waves or currents, as well as the resistance of the coastal protection structure itself, are not considered. Nevertheless, coastal protection structures may fail due to cascading effects before the design load is reached. Existing early warning systems in coastal areas cannot identify such events. The interdisciplinary research project, EarlyDike, attempts to close this gap by developing an innovative early warning system, which is not only based on water level forecasts, but also considers wave load, improved storm surge monitoring, and inner dike conditions. The implementation of a web-based geoportal, which integrates the information generated by sensors and numerical simulations, enables decision makers to access reliable real-time data. Thereby, the intended sensor- and risk-based early warning system allows in time warnings and improves present disaster prevention and management. The German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) funded the three-year joint research project EarlyDike, to which six research institutions contributed.*

## Keywords

*early warning system, non-time forecast, sea level forecast, wave forecast, dike monitoring, smart geotextiles, web-based geoportal*

## 1 Einleitung

In Deutschland zählen Seedeiche zu den wichtigsten Küstenschutzanlagen (Schüttrumpf 2008, EAK 2002). In den vergangenen Jahrzehnten trugen eine Vielzahl zum Thema Seedeiche durchgeführter Forschungsprojekte zu einem vertieften Prozessverständnis, einer Beschreibung der wichtigsten Versagensmechanismen und vor allem zu einer sichereren Deichbemessung bei. Daraus resultierten neben zahlreichen Veröffentlichungen, Anpassungen in der Deichbemessung und -konstruktion sowie milliarden schwere Deichsanierungsprogramme (MELUR Schleswig-Holstein 2013, NLWKN 2007). Die neusten Erkenntnisse zu den Themen Deichbemessung, -entwurf und -bau sind beispielsweise in den „Empfehlungen für Küstenschutzwerke“ (EAK 2002), im „EurOtop Manual“ (EurOtop 2016) und im „International Levee Handbook“ (CIRIA 2013) zusammengetragen.

Aber auch die bestentwickelten und vermeintlich sichersten Küstenschutzbauwerke können keine absolute Sicherheit garantieren: Durch den Klimawandel und den damit verbundenen Meeresspiegelanstieg werden Extremereignisse, die über die Bemessungswerte hinausgehen, wahrscheinlicher (MELUR Schleswig-Holstein 2013). Schäden oder Schwachstellen innerhalb der Bauwerkstruktur können unerkannt bleiben und den Widerstand der Anlagen verringern. Ferner zeigen Auswertungen vergangener Schadensereignisse, dass das gleichzeitige Auftreten mehrerer Belastungen bereits vor dem Überschreiten des Bemessungswasserstandes zu einem Versagen der Bauwerke führen kann (Vrijling 2001). In all diesen Fällen ist es wichtig, über effiziente Frühwarnsysteme zu verfügen, die Gefahren rechtzeitig erkennen und damit ein Versagen der Schutzanlagen verhindern sowie im Katastrophenfall bei der Steuerung von Notfallmaßnahmen helfen. Das

Vorhandensein technisch ausgefeilter Frühwarn- und Monitoringsysteme ist folglich ebenso elementar für einen zuverlässigen Küstenschutz wie die ständige Verbesserung der Küstenschutzanlagen selber.

Bestehende Frühwarnsysteme für den Küstenschutz in Deutschland basieren auf Wasserstandmessungen und -vorhersagen, die durch das *Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)* zur Verfügung gestellt werden (<http://www.sturmflutwarnungen.de/>). Informationen zu zusätzlich wirkenden Belastungsgrößen wie Wind- und Wellenangriff sowie über den inneren Zustand der Küstenschutzanlagen selber, die bei der Sicherheit eine wichtige Rolle spielen, fehlen bislang vollständig. Vor Gefährdungen infolge solcher Ereignisse kann derzeit nicht rechtzeitig gewarnt werden.

## 2 Ziel

Ziel des Verbundvorhabens *EarlyDike* war es, ein sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem zu entwickeln, welches mehrere Belastungsgrößen (z. B. Wasserstand, Wind und Wellen) sowie die Widerstandsfähigkeit des Bauwerks selbst berücksichtigt. Am Beispiel von Seedeichen erfolgte im Rahmen des Projekts der Aufbau eines GeoPortals, in welches neben hochaufgelösten Informationen zu Wellen und Seegang auch die Daten aus einem sensorgestützten Deichmonitoring eingehen. Auf Grundlage dieser Echtzeitdaten kann unter Einbeziehung aller relevanter Prozesse rechtzeitig gewarnt und im Katastrophenfall ein effektives Katastrophenmanagement durchgeführt werden. Hierzu sollen die Daten zum Zustand des Bauwerks und zu allen äußeren Belastungen dem potentiellen Endnutzer (z. B. Deichverbänden und zuständigen Landesbehörden) über das GeoPortal direkt zur Verfügung gestellt werden.

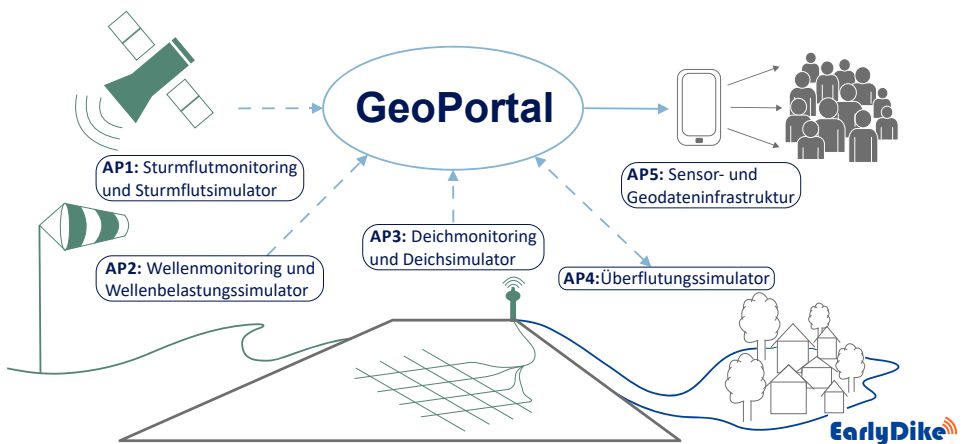


Abbildung 1: Struktur des Verbundprojekt *EarlyDike* mit allen behandelten Arbeitspaketen (AP).

## 3 Vorgehen

Das Projekt gliederte sich in fünf Teilprojekte bzw. Arbeitspakete (vgl. Abbildung 1). Insgesamt waren sechs Forschungsinstitutionen der Universitäten Aachen, Hamburg und Siegen sowie die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) an dem Verbundprojekt beteiligt.

Im ersten Arbeitspaket „Sturmflutmonitoring und Sturmflutsimulator“ wurde am *Forschungsinstitut Wasser und Umwelt der Universität Siegen (fww)* zum ersten Mal eine Methodik zur Vorhersage von Sturmflutwasserständen entlang der gesamten deutschen Nordseeküste (einschließlich Inseln und Halligen) entwickelt, die prinzipiell in den operationellen Betrieb (an entsprechenden Landes- oder Bundesbehörden) integriert werden kann. Hierzu wurde ein hydrodynamisch-numerisches Modell genutzt und mit empirisch-statistischen Regressionsansätzen kombiniert (Sturmflutmonitoring), in die schließlich die meteorologischen Vorhersagen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) eingehen (Sturmflutsimulator) (Niehüser et al. 2018).

Im Rahmen des zweiten Arbeitspakets „Wellenmonitoring und Wellenbelastungssimulator“ wurden vom *Institut für Wasserbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH WB)* auf Grundlage numerischer Simulationen in Kombination mit Messungen in der Natur Echtzeit- und Vorhersageinformationen für lokale Seegangsbedingungen ermittelt. Darauf aufbauend wurde ein Hybridmodell auf Basis numerischer Simulationen sowie empirischer Ansätze zur Abschätzung der welleninduzierten Belastungen durch Wellenauflauf entwickelt und anhand einer Messkette zur Erfassung der hydrodynamischen Belastungen vor und auf einem Seedeich verifiziert (Dreier und Fröhle 2018).

Am *Institut für Wasserbau und Wassernwirtschaft der RWTH Aachen University (IWW)* erfolgte in Zusammenarbeit mit dem *Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University (ITA)* die Entwicklung eines „Deichmonitors und -simulators“. Zunächst wurden die Anforderungen an ein Monitoringkonzept für Seedeiche und hieraus ein Messkonzept für intelligente Geotextilien ermittelt. In der Versuchshalle des IWW wurden die mit einem Sensorgarn ausgestatteten Geotextilien in einem Modelldeich getestet und validiert. Die erfassten Sensordaten wurden so verarbeitet, dass sie Rückschlüsse auf den Zustand des Deiches zulassen und in einen Deichmonitor, der eine Echtzeitüberwachung des Modelldeichs ermöglicht, eingespeist werden können (Krebs und Schüttrumpf 2018, Schwab et al. 2018).

Am *Geodätischen Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme der RWTH Aachen University (gia)* wurde eine Sensor- und Geodateninfrastruktur (SSDI) als Schnittstelle zwischen existierenden räumlich-zeitlichen Daten und Echtzeitmessungen durch Geosensornetze entwickelt. Als zentraler Zugang zu jedweder Information wurde ein webbasiertes Deich-GeoPortal aufgebaut, welches sowohl den direkten Zugriff auf die in Echtzeit erfassten Sensordaten als auch auf ergänzende Daten Dritter erlaubt. Durch die Integration und Synthese sämtlicher Daten im GeoPortal können ortsspezifische Gefährdungen unter Berücksichtigung aller notwendigen Einflussfaktoren ermittelt und Warnungen direkt an die Endnutzer herausgegeben werden. Das aufgesetzte GeoPortal ermöglicht dabei den zentralen Zugang zu allen Daten und Informationen. Schließlich befasste sich der Projektpartner *Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)* mit der Nutzung der Marinen Daten-Infrastruktur Deutschland (MDI-DE) zur Publikation der Projektergebnisse. Standardisierte Metadaten zu ausgewählten projektbezogenen Daten und Internet-Diensten, die in einem Präsentationsgeoportal angeboten werden, bilden die Grundlage für die Kommunikation mit der nationalen (GDI-DE) und der internationalen Geodaten-Infrastruktur (INSPIRE). Damit ist die Interoperabilität der verwendeten technischen Methoden nachgewiesen, die zur Einbindung in Frühwarnsysteme erforderlich ist (Herle et al. 2018).

## 4 Ergebnisse und Ausblick

### 4.1 Sturmflutmonitoring und Sturmflutsimulator

Bestehende Frühwarnsysteme für den Küstenschutz in Deutschland basieren auf Wasserstandsmessungen und -vorhersagen, die durch das BSH (in Kooperation mit DWD) zur Verfügung gestellt werden (<http://www.sturmflutwarnungen.de/>). Die Vorhersagen des Wasserstands werden derzeit punktuell für ausgewählte Pegelstandorte bereitgestellt. Dabei setzt sich das für die Nordsee verwendete operationelle Vorhersagesystem aus der Tidevorhersage, numerischen Wettervorhersagemodellen, einem Windstaumodell und dem Model Output Statistics (MOS) System zusammen. Für die spezifischen Pegelstandorte werden schließlich präzise und hochaufgelöste Wasserstandsvorhersagen für bis zu sechs Tage im Voraus bereitgestellt (Müller-Navarra et al. 2012). Aus der punktuellen Wasserstandsvorhersage ergibt sich allerdings ein Defizit. Aus Wasserstandsaufzeichnungen und deren Auswertungen ist bekannt, dass solche punktuellen Wasserstandsdaten nicht repräsentativ für ein größeres Gebiet, z. B. für die Deutsche Bucht oder auch kleinere geografische Einheiten, wie z. B. eine Hallig, sind. So können aus lokalen Effekten (z. B. nichtlineare Interaktionen, komplexe Bathymetrie mit Priel und Wattflächen) räumliche Wasserstandsdifferenzen im Dezimeterbereich entlang eines einzelnen Küstenabschnitts resultieren. Insbesondere entlang komplexer Küstenlinien, wie die der deutschen Nordsee mit vielen Inseln, Buchten, Ästuar und dem Watt, ist eine einfache Interpolation zwischen den Pegelstandorten von unzureichender Genauigkeit (Arns et al. 2015). Durch die Kombination hydrodynamisch-numerischer und empirisch-statistischer Modelle wird in AP1 daher zum ersten Mal eine Methodik entwickelt, mit deren Hilfe sich die aktuell verfügbaren Punktdaten der Wasserstandsvorhersage auf die gesamte Küstenlinie (einschließlich Inseln und Halligen) hochaufgelöst (Stundenwerte, Punktabstand  $\sim 1\text{km}$ ) übertragen lassen.

Es wurde ein zweidimensionales, hydrodynamisch-numerisches Modell der gesamten Nordsee erstellt, welches die Aufgabe hat, realistische Wasserstände entlang der gesamten Küstenlinie zu simulieren. Die Modellentwicklung erfolgte auf Basis aktueller bathymetrischer Informationen, meteorologischer und astronomischer Randbedingungen sowie den Änderungen des mittleren Meeresspiegels. Ein besonderer Fokus beim Modellbau lag auf der robusten und hochauflösenden Abbildung von Wasserständen in Flachwasserbereichen. Dafür wurde ein Rechengitter erzeugt, das der speziellen Flachwassercharakteristik, vor allem nahe der Küste, Rechnung trägt. Verbleibende Diskrepanzen zwischen Modellergebnissen und Beobachtungen aus der Natur wurden zudem über eine regionale Bias-Korrektur eliminiert, um so eine Datenbasis auch in unbepegelten Gebieten zu erzeugen.

Die simulierten und bias-korrigierten Wasserstände stellen die Basis für die Separierung von Gezeitenanteil und Windstau dar. Dafür wurde das Verfahren der „Harmonischen Darstellung der Ungleichheiten“ nach Müller-Navarra (2013) verwendet. Das Verfahren ermöglicht Tideanalysen für einzelne Bereiche der Tidekurve, wodurch auch partiell (bei Ebbe) trockenfallende Wattflächen (stellen einen großen Teil des Küstenvorfeldes dar), mit in die Tideanalyse mit einbezogen werden können. Darüber hinaus wurde dieser Ansatz speziell für Gezeitenvorhersagen in flachen Schelfgebieten wie der Deutschen Bucht, in der die Tidekurven durch starke Deformationen gekennzeichnet sind und somit nur unzureichend über klassische harmonische Analysen beschrieben werden können, entwickelt.

Um eine flexible, rechentechnisch effektive und zugleich robuste Vorhersage des Windstaus zu entwickeln, wurden empirisch-statistische Modelle auf Basis von multiplen linearen Regressionsbeziehungen (schrittweise Regression) abgeleitet. Der Windstau fungiert darin als die zu erklärende Variable (Regressand), während meteorologische Parameter (Wind- und Luftdruckfelder, die in der Praxis aus Wettervorhersagen zur Verfügung stehen) als Prädiktoren herangezogen wurden. Durch die Verwendung des separierten Windstaus aus den simulierten und bias-korrigierten Wasserständen, konnten die empirisch-statistischen Windstauamodelle auf die gesamte deutsche Küstenlinie erweitert werden. Eine weitere wesentliche Weiterentwicklung des hier entwickelten Ansatzes stellte die Berücksichtigung der Tide-Windstau Interaktion in der Deutschen Bucht im Rahmen der empirisch-statistischen Modellentwicklung dar. Hierfür wurden die empirisch-statistischen Windstauamodelle in Abhängigkeit der astronomischen Tidekurve abgeleitet. Die modellierten Windstauvorhersagen wurden anhand unabhängiger Beobachtungsdaten validiert. Insbesondere für die niedrigen und hohen Perzentilen der astronomischen Tidekurve konnten hierdurch deutliche Verbesserungen der Modellgüte erzielt werden.

Die Kombination der genannten Modellkette (Gezeitsynthese plus Windstauvorhersage) ermöglicht nun zum ersten Mal eine räumlich wie zeitlich hochaufgelöste Wasserstands-vorhersage entlang der gesamten deutschen Nordseeküste (einschließlich Inseln und Halligen). Anhand eines Sturmflutereignisses (Orkan XAVER im Dezember 2013) wurde das Verfahren praxisnah angewendet und anschließend in einen operationellen Testbetrieb integriert. Dies geschah in enger Zusammenarbeit mit den Bearbeitern der weiteren Arbeitspakete (Dreier und Fröhle 2018, Herle et al. 2018). Für eine vollständige Integration der Methodik in einen operationellen Betrieb (an entsprechenden Landes- oder Bundesbehörden) sind allerdings weitere Arbeitsschritte erforderlich. Hierunter fallen unter anderem die Ableitung der Regressionskoeffizienten der empirisch-statistischen Windstauamodelle anhand der Vorhersagedaten des DWD oder die Zusammenführung der Unsicherheiten aus der Modellkette zu einer Gesamt-Unsicherheit.

## 4.2 Wellenmonitoring und Wellenbelastungssimulator

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

Als zentrales Element für die Vorhersage der seegangsinduzierten Belastungen sowie der lokalen Seegangsverhältnisse wurde mit Beginn 2016 die „Messkette Hydrodynamik“ auf und in der Nähe der Insel Pellworm an der Nordseeküste in Betrieb genommen. Die Messkette dient der Erfassung der lokalen Seegangs- und Strömungsverhältnisse, als auch des lokalen Wasserstands und des Wellenauflaufes auf einem Seedeich auf der Insel Pellworm. Die Messdaten bilden die Grundlage für die Vorhersage der lokalen Seegangsbedingungen und der seegangsinduzierten Belastungen im Nahezu-Echtzeitmodus sowie für das Monitoring von Seegang, Strömung und Wellenauflauf zum Zwecke der Validierung des entwickelten Vorhersagesystems.

Im Rahmen des Arbeitspakets 2.2 (Wellenmonitoring) wurde ein prä-operationelles numerisches Seegangsvorhersagemodell (SWAN) für die gesamte Nordsee sowie hochaufgelöst für ein Detailgebiet in der Nähe von Pellworm implementiert und in den operationellen Betrieb überführt (Langzeit- bzw. Kurzzeitvorhersage). Sämtliche Vorhersagedaten werden im GeoPortal des entwickelten Frühwarnsystems bereitgestellt.

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

Im Arbeitspaket 2.3 (Wellenbelastungssimulator) wurde ein Hybridmodell basierend auf numerischen Simulationen (SWAN) und empirischen Ansätzen (z. B. EurOtop 2016) entwickelt anhand dessen die operationelle Vorhersage der seegangsinduzierten Belastungen in verschiedenen Betriebsmodi (Langzeit- und Kurzzeitvorhersage) erfolgt. Die Nahezeit-Vorhersage erfolgt im Gegensatz dazu basierend auf den Messdaten der „Messkette Hydrodynamik“ in Verbindung mit empirischen Ansätzen. Sämtliche Vorhersagedaten sind ebenfalls über das im Projekt entwickelte GeoPortal abrufbar.

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

### 4.3 Deichmonitoring und Deichsimulator

Zurzeit erfolgt die Überwachung von Seedeichen während sowie nach Sturmfluten vor allem auf Grundlage visueller Überprüfungen. Um jedoch gemäß dem Ziel des Projekts ein verbessertes Frühwarnsystem für Seedeiche zu entwickeln, ist ein Deichmonitoring erforderlich, mithilfe dessen kontinuierlich und möglichst entlang der gesamten Deichlinie gleichzeitig, Informationen über den Zustand der Deiche gewonnen werden können. Hierzu wurde ein sensorbasiertes Deichmonitoring entwickelt, welches flächendeckend eingesetzt werden kann und dem im Rahmen des Projekts entwickelten GeoPortal Echtzeitdaten zum inneren Zustand der Deiche zur Verfügung stellt.

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

Hierzu wurden am *Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University (ITA)* garnbasierte Sensoren in ein Geotextil integriert, die bei einem Einbau unterhalb der Außendichtung eines Seedeiches in der Lage sind, einen Anstieg der Sickerlinie innerhalb des Deichkörpers sowie eine Wasserinfiltration durch die Deckschicht des Deiches zuverlässig zu erkennen. Dafür wurden Integrationskonzepte in bestehende textile Herstellungsverfahren für

Geotextilien untersucht und verschiedene Füge-technologien für die Geotextilien bezüglich der Verbundfestigkeit charakterisiert. Um ein Auslesen der Sensoren des intelligenten Geotextils zu ermöglichen, wurde eine Messkette mit entsprechender Sensorschaltung entwickelt.

Die neuartigen, intelligenten Geotextilien wurden in der Versuchshalle des *Instituts für Wasserbau und Wassermwirtschaft der RWTH Aachen University (IWW)* in Deichmodellen auf unterschiedlichen Skalen getestet, validiert und in Zusammenarbeit mit dem *ITA* für den Einbau im Deich optimiert. Hierbei fanden vorerst kleinmaßstäbliche Versuche mit Prototypen der Sensoren statt. Wichtige Erfahrungen aus den kleinmaßstäblichen Untersuchungen konnten in die Entwicklung eines großmaßstäblichen Textils fließen, das schließlich in über mehrere Monate stattfindenden Langzeittests in einem großmaßstäblichen Modelldeich kontinuierlich belastet und vielfachen Nass-Trocken-Wechseln ausgesetzt wurden. Hierbei wurde das Sensortextil anhand der Ergebnisse konventioneller Messtechnik validiert und auf Grundlage der gesammelten Daten eine Methodik zur automatischen Analyse der Sensordaten abgeleitet.

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

#### 4.4 Sensor- und Geodateninfrastruktur

Frühwarnsystem dienen dazu, aufkommende Gefahren frühzeitig zu erkennen und Betroffene schnellstmöglich über Gefährdungen zu informieren. Die Anforderungen sind dabei vielfältig, beinhalten aber vor allem die Messung von Umweltdaten durch Sensoren, die Echtzeitkommunikation, die Auswertung und den Zugriff auf Daten und Warnungen. Dabei sind existierende Frühwarnsysteme meist proprietäre Lösungen und bieten keinen standardisierten Zugriff.

Das *Geodätischen Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme der RWTH Aachen University (gia)* entwickelte im Projekt *EarlyDike* eine Sensor- und Geodateninfrastruktur (Sensor and Spatial Data Infrastructure, SSDI) basierend auf existierenden IuK-Standards, die als Schnittstelle zwischen existierenden räumlich-temporalen Daten und Echtzeitmessungen durch Geosensornetze dient. Die Datenfusion aus unterschiedlichen Quellen war dabei entscheidend für ein ganzheitliches Monitoring von Deichen, da nur so die Validität der Modelle und Simulationen gewährleistet werden konnte. Gleichzeitig wurden die berechneten Modelle aus den anderen Teilprojekten z. B. des Deichsimulators oder des Überflutungssimulators durch Software-Schnittstellen in die SSDI integriert.

Die Implementierung dieser SSDI erfolgte nach dem Muster einer serviceorientierten Architektur (SOA), sodass Web Services entwickelt werden konnten, die den Zugang zu den Daten und den Modellen bieten. Zur Wahrung der Interoperabilität wurden internationale Geoinformationsstandards des Open Geospatial Consortiums (OGC) und der



INSPIRE-Richtlinie der EU eingesetzt. Diese Standards umfassen Dienste zum Abrufen von Geodaten wie Web Map Services (WMS) und Web Feature Services (WFS) aber auch für den Zugriff auf Sensordaten wie dem Sensor Observation Service (SOS). Des Weiteren wurden neue Mechanismen und Dienste erforscht, die Geodatenströme in Echtzeit erfassen, analysieren und prozessieren können. Nur so ließen sich gleichzeitig Sensordaten und Echtzeitsimulationen anbinden und integrieren. Eine besondere Bedeutung kam dabei leichtgewichtigen Austauschprotokollen wie dem Internet of Things (IoT)-Protokoll Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) zu, da hiermit ein einfaches ereignisgesteuertes Messaging zwischen den unterschiedlichen Plattformen umgesetzt werden konnte.

Das Protokoll MQTT wurde um raumzeitliche Funktionalitäten zu einem GeoMQTT genannten Protokoll erweitert, so dass zusätzlich sowohl räumliche als auch zeitliche Spezifizierungen und Filter bei den anfallenden Datenströmen bzw. beim Messaging ermöglicht wurden. Mit diesen Erweiterungen wird das Protokoll insbesondere den Anforderungen an die Echtzeit-Bereitstellung und -Verteilung von Geodaten zwischen verschiedenen Datenproduzenten und -konsumenten gerecht: Beispielsweise wurden zur Übertragung der gemessenen Sensordaten aus den intelligenten Geotextilien in die SSDI-Datensinken entsprechende Clients auf den Sensorknoten implementiert. Die gemessenen Daten werden in Echtzeit weitergeleitet und analysiert. Warnungen bei drohendem Deichversagen können so, basierend auf den Messungen ausgesprochen werden. Die Ergebnisse der verschiedenen Simulationen (Sturmflut, Wellen etc.) werden ebenfalls in Echtzeit mittels GeoMQTT übertragen.

Als zentraler Zugang zu allen relevanten Informationen wurde ein Webportal (GeoPortal) aufgebaut, welches sowohl den direkten Zugriff auf die in Echtzeit erfassten Sensordaten als auch auf die ergänzenden Daten Dritter mittels stationärer und mobiler Endgeräte erlaubt. Des Weiteren wurden die Ergebnisse der wasserbaulichen Analyse- und Simulationswerkzeuge integriert.

## 4.5 Einbindung in die MDI-DE

Die Marine Daten-Infrastruktur Deutschland (MDI-DE) ist ein Netzwerk von Geodaten-Servern mit einem gemeinsamen GeoPortal für Daten und Dienste aus der deutschen Küstenzone (MDI-DE 2014). Bundes- und Landesbehörden haben sich 2014 in einer Verwaltungsvereinbarung zusammengeschlossen, um vor allem die seitens der EU-Richtlinien erforderlichen Daten und Metadaten aus Meer und Küste verfügbar zu machen. Dieses Fachportal ermöglicht anhand von Metadaten die Suche nach Fachdaten aus dem Küsteningenieurwesen, dem Küstengewässerschutz, dem Meeresumweltschutz und dem Meeresnaturschutz. Sie unterstützt gemäß INSPIRE deren Nutzung durch Internetdienste und bildet auch eine Plattform zur Kommunikation von Forschungsergebnissen aus den genannten Themengebieten, die amtliche Daten ergänzen und innovative methodische Ansätze präsentieren.

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) hat die Voraussetzungen für die Nutzung vorhandener nationaler und internationaler Geodateninfrastrukturen zur Publikation von Daten und Analysen aus dem Verbundprojekt erarbeitet. Dazu wurden mit dem Nord- und Ostsee Küsten-Informationen-System NOKIS standardisierte Metadaten erfasst, die die Anforderungen der relevanten Zielsysteme MDI-DE, GDI-DE und INSPIRE erfüllen und einen automatisierten Informationsfluss über Katalogschnittstellen gewährleisten.

Das sichert die Auffindbarkeit von Informationen, deren Nutzung durch interoperable Dienste zur Visualisierung und zum Download unterstützt wird. Eine technische Qualitätssicherung der angebotenen Produkte erfolgte durch die Anwendung der Testsuite der GDI-DE, die Geodaten und Dienste auf Konformität zu den Vorgaben von INSPIRE und GDI-DE prüft, und somit die Durchgängigkeit der Information sicherstellt.

Die inhaltliche Qualitätssicherung erfolgte bei der Verschlagwortung durch die Verwendung des GEneral Multilingual Environmental Thesaurus (GEMET), der vom Europäischen Umweltinformations- und Umweltbeobachtungsnetz (European Environment Information and Observation Network – EIONET) verwaltet und publiziert wird. Diese mehrsprachige gemeinsame Terminologie von umweltrelevanten Begriffen hilft bei der strukturierten Suche nach Daten und der Darstellung und Systematisierung von Trefferlisten.

Insbesondere für die Wiederverwendung von Daten ist die Dokumentation von deren Herkunft und von eventuellen Verarbeitungsprozessen Bestandteil der Metadaten. Bei Daten aus numerischen Simulationen stehen hier Angaben zum verwendeten Modellierungssystem und zur Wahl der Eingangsdaten, während bei Daten aus Feldmessungen Geräte- bzw. Sensorbeschreibungen erfasst werden.

## 5 Danksagung

Das Verbundprojekt *EarlyDike* wurde vom 1. Juni 2015 bis zum 31. Mai 2018 mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Sonderprogramms *Geotechnologien* gefördert (BMBF-Förderkennzeichen: 03G0847A, 03G0847B, 03G0847C, 03G0848A).

Die Teilprojektleiter und Mitarbeiter bedanken sich für die intensive Betreuung durch den Projektträger Jülich und die fruchtbare Zusammenarbeit mit den Küstenschutzbehörden.

## 6 Literaturverzeichnis

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.

CIRIA: The international levee handbook. Construction Industry Research and Information Association, London, 1332 S., 2013.

Dreier, N.; Fröhle, P.: Prä-Operationelle Vorhersage von Seegang und Wellenauflauf an Seedeichen in der deutschen Bucht. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben *EarlyDike* – Teil 3, BMBF-Förderkennzeichen 03G0847C: Teilprojekt 2 – Wellenmonitoring und Wellenbelastungssimulator, Institut für Wasserbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg, 2018.

EAK: Empfehlungen für Küstenschutzwerke. Korrigierte Ausgabe 2007. *Die Küste*, 65, 2002.

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., [www.overtopping-manual.com](http://www.overtopping-manual.com), 2016.

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 und 03G0848A: Teilprojekt 5 – Sensor- & Geodateninfrastruktur, Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme der RWTH Aachen University & Bundesanstalt für Wasserbau, 2018.

Krebs, V.; Schüttrumpf, H.: Entwicklung eines sensorbasierten Deichmonitorings. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben EarlyDike – Teil 4, BMBF-Förderkennzeichen 03G0847A: Teilprojekt 3 – Deichmonitor und Deichsimulator, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University, 2018.

MDI-DE: Marine Daten-Infrastruktur Deutschland. Die Küste, 82 MDI-DE, 204 S., 2014.

MELUR Schleswig-Holstein: Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein. Fortschreibung 2012 Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, Kiel, 102 S., 2013.

Müller-Navarra, S. H.; Seifert, W.; Lehmann, H.-A.; Maudrich, S.: Sturmflutvorhersage für Hamburg 1962 und heute, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie Hamburg und Rostock, 2012.

Müller-Navarra, S. H.: Gezeitenvorausberechnungen mit der Harmonischen Darstellung der Ungleichheiten. Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie Nr. 50, 2013.

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 – Sturmflutmonitoring und Sturmflutsimulator, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), Universität Siegen, 2018.

NLWKN: Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/Bremen - Festland. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, 78 S., 2007.

Schüttrumpf, H.: Sea Dikes in Germany. In: Die Küste, 74, 189–199, 2008.

Schwab, M.; Quadflieg, T., Gries, T.: Intelligente Geotextilien für das Echtzeit-Deichmonitoring. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben EarlyDike – Teil 5, BMBF-Förderkennzeichen 03G0847A: Teilprojekt 3 – Deichmonitor und Deichsimulator, Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, 2018.

Vrijling, J. K.: Probabilistic design of water defense systems in The Netherlands. In: Reliability Engineering & System Safety, 74, 3, 337–344. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(01\)00082-5](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(01)00082-5), 2001.



# Entwicklung einer Methodik zur Wasserstandsvorhersage entlang der gesamten deutschen Nordseeküste

Sebastian Niebuser<sup>1,4</sup>, Sönke Dangendorf<sup>2,3</sup>, Arne Arns<sup>4</sup> und Jürgen Jensen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), Universität Siegen, [sebastian.niebuser@uni-rostock.de](mailto:sebastian.niebuser@uni-rostock.de)*

<sup>2</sup> *Center for Coastal Physical Oceanography, Old Dominion University, Norfolk, VA*

<sup>3</sup> *Department of River-Coastal Science and Engineering, Tulane University, New Orleans, LA*

<sup>4</sup> *Professur Küstenschutz und Küstendynamik, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Universität Rostock*

## Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wird eine Methodik zur flächig und zeitlich hochauflösenden Wasserstandsvorhersage auf Basis existierender Ansätze und Modelle für die gesamte deutsche Nordseeküste vorgestellt. Übergeordnetes Ziel war es, die bestehenden operationellen Modelle zur Wasserstandsvorhersage in Deutschland zu erweitern, indem sie von einer punktuellen Betrachtung auf die gesamte Küstenlinie ausgedehnt werden. Dafür kam ein hydrodynamisch-numerisches Modell zum Einsatz, mit dessen Hilfe Wasserstandsinformationen für die gesamte deutsche Nordseeküste simuliert bzw. rekonstruiert wurden. Die Modellbildung erfolgte auf Basis aktueller bathymetrischer Informationen, meteorologischer und astronomischer Randbedingungen sowie den beobachteten Änderungen des mittleren Meeresspiegels. Die auf diese Weise generierten Wasserstandsdaten wurden in die zugrundeliegenden Gezeiten- und Windstauanteile separiert. Hierzu wird der Gezeitenanteil direkt mit Hilfe von deterministischen Modellen abgeschätzt, während die Differenz zwischen Wasserstand und Gezeitensignal den meteorologisch induzierten Anteil am Wasserstand beschreibt. Für dieses stochastische Signal (i. d. R. als Windstau bezeichnet) wurde ein empirisch-statistisches Modell auf Basis von multiplen linearen Regressionsbeziehungen entwickelt. Die Ableitung der Regressionskoeffizienten basiert auf meteorologischen Randbedingungen. Ein Schwerpunkt bei diesen empirisch-statistischen Windstaumodellen lag auf der Berücksichtigung der nichtlinearen Interaktion zwischen Gezeiten und Windstau. Die Kombination der genannten Modellkette in einen Vorhersagebetrieb (Gezeitensynthese plus Windstauvorhersage) ermöglicht nun zum ersten Mal eine flächig wie zeitlich hochauflösende Wasserstandsvorhersage entlang der gesamten deutschen Nordseeküste (einschließlich Inseln und Halligen, Punktabstand ~1 km, Stundenwerte). Anhand eines Sturmflutereignisses (Orkan „Xaver“ im Dezember 2013) wurde das Verfahren praxisnah angewendet und anschließend erfolgreich in einen operationellen Testbetrieb integriert. Diese Arbeit liefert somit einen Beitrag zur Erweiterung und Optimierung bestehender Frühwarnsysteme des Küstenschutzes.

## Schlagwörter

Wasserstandsvorhersage, Windstau, Küstenschutz, Hochwasserrisiko, Sturmflut

## Summary

*In this paper, a methodology for a spatially and temporally high-resolved water level forecast based on existing approaches and models for the entire German North Sea coast is presented. The overall objective was to extend the existing operational models for water level forecasting in Germany from individual tide gauges to the entire coastline. A hydrodynamic numerical model is used to simulate water levels for the entire coastline of the German North Sea. The modelling is carried out on the basis of currently available bathymetric information, meteorological and astronomical boundary conditions as well as the observed changes in the mean sea level. Next, the water level information is separated into tidal and non-tidal components. The non-tidal residual is applied to derive empirical-statistical models using multiple linear regression relationships. Regression coefficients are derived using meteorological boundary conditions as input. The statistical approaches presented here also aim at incorporating the nonlinear interaction between tide and non-tidal residual into the model chain (tidal synthesis and non-tidal residual prediction). As a result, a water level prediction at high spatial and temporal resolution along the entire coastline of the German North Sea (including islands and Halligen, point distance  $\sim 1$  km, hourly values) is presented. Based on the 2013 storm surge "Xaver", the procedure was applied practically and then successfully integrated into an operational test operation. This work thus makes a significant contribution to the extension and optimization of existing early warning systems for coastal protection.*

## Keywords

*water level forecast, surge, coastal protection, flood risk, storm surge*

## 1 Einleitung

See- und Ästuardeiche schützen in Deutschland mehr als 2,4 Millionen Menschen und zählen damit zu den wichtigsten Küstenschutzbauwerken. Im Versagensfall drohen schwerwiegende Konsequenzen, wie z. B. bei der verheerendsten Sturmflut der Stadtgeschichte Hamburgs im Jahr 1962, bei der nach zahlreichen Deichbrüchen rund ein Sechstel des Stadtgebietes überflutet wurde und über 300 Menschen starben. Das frühzeitige Erkennen von Gefahren ist daher elementar, um einen zuverlässigen Küstenschutz zu ermöglichen. Dabei stehen Landnutzungsänderungen sowie gesteigerte monetäre Werte in überflutunggefährdeten Gebieten einer stetigen Verbesserung der Küstenschutzanlagen als auch der Vorhersage und des Katastrophenmanagements gegenüber (Haigh und Nicholls 2017).

Die maßgebliche Einwirkung auf Küstenschutzbauwerke in der deutschen Nordsee stellen (Extrem-)Wasserstände in Form von Sturmfluten (als Kombination aus Tide, Windstau und mittlerem Meeresspiegel (MSL)) und Seegang dar. Bestehende Frühwarnsysteme für den Küstenschutz in Deutschland basieren auf Wasserstandsmessungen und -vorhersagen, die durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) (in Kooperation mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD)) zur Verfügung gestellt werden. Die Vorhersagen des Wasserstands werden derzeit nur punktuell für ausgewählte Pegelstandorte bereitgestellt. Dabei setzt sich das für die Nordsee verwendete operationelle Vorhersagesystem aus der Tidevorhersage, numerischen Wettervorhersagemodellen, einem Windstaumodell und dem Model Output Statistics (MOS) System zusammen. Für die spezifischen Pegelstandorte werden schließlich präzise und hochaufgelöste Wasserstandsvorhersagen für bis zu sechs Tage im Voraus bereitgestellt (Müller-Navarra und Knüpfer 2010,

Müller-Navarra et al. 2012). Aus der punktuellen Wasserstandsvorhersage ergibt sich allerdings ein Defizit. Aus Wasserstandsaufzeichnungen und deren Auswertungen ist bekannt, dass solche punktuellen Wasserstandsdaten nicht repräsentativ für ein größeres Gebiet, z. B. für die Deutsche Bucht oder auch kleinere geografische Einheiten, wie z. B. eine Hallig sind. So können aus lokalen Effekten (z. B. nichtlineare, dynamische Interaktionen, komplexe Bathymetrie mit Prielen und Wattflächen) räumliche Wasserstandsunterschiede im Dezimeterbereich entlang eines einzelnen Küstenabschnitts resultieren. Insbesondere entlang komplexer Küstenlinien, wie die der deutschen Nordsee mit vielen Inseln, Buchten, Ästuarien und dem Watt, ist eine einfache Interpolation zwischen den Pegelstandorten von unzureichender Genauigkeit (Arns et al. 2015).

Der Fokus des vorliegenden Beitrags liegt entsprechend auf der Entwicklung einer Methodik zur Vorhersage des Ruhewasserstandes, d. h. exklusive Seegang, mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung für die gesamte deutsche Küstenlinie der Nordsee. Der betrachtete Wasserstand setzt sich aus drei Komponenten zusammen: (i) dem MSL, (ii) der astronomischen Gezeit (deterministisch) sowie (iii) dem Windstau. Unter dem Windstau wird die Differenz zwischen Wasserstand und astronomischer Gezeit verstanden. Alle Komponenten unterliegen stetigen Veränderungen und interagieren (nichtlinear) untereinander bzw. beeinflussen sich und die zu beobachtenden Veränderungen. Der Anstieg des MSL und dessen Variabilität wird in der Wissenschaft global (z. B. *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC); Dangendorf et al. 2017), regional (z. B. Slangen et al. 2014, Grinstead et al. 2015) als auch im Gebiet der Nordsee (Lüders 1936, Dietrich 1954, Dangendorf et al. 2014) diskutiert. Eine Erhöhung des Basiswasserstandes in Form des MSL-Anstiegs beeinflusst dabei sowohl die Tide als auch den Windstau. Die Gezeiten in der Nordsee, die mit einer mittleren Tiefe von etwa 94 m ein flaches Schelfmeer darstellt, werden hauptsächlich durch Schwingungen des Nordatlantiks angeregt (z. B. Arns et al. 2013). Die Nordsee ist maßgeblich durch halbtägliche Gezeiten charakterisiert. Der Tidehub erreicht in der Deutschen Bucht Werte zwischen 2 m und 4 m. Innerhalb der Nordsee sind unterschiedliche maßgeblich topografische Effekte zu berücksichtigen, die für eine Deformation der Tidekurve sorgen. Hierunter fallen zum Beispiel Flachwasser- wie auch Reibungseffekte sowie die komplexe Gestaltung der Küstenlinie und ständige morphologische Veränderungen, die verstärkt in den Wattgebieten auftreten. Der MSL-Anstieg nimmt Einfluss auf diese Deformation der Tidekurve, insbesondere auf die Flutgeschwindigkeiten und den Tidehub. In Arns et al. (2017) wurde beispielsweise eine Erhöhung des Tidehubs von 0,32 m bis 0,77 m während Extremereignissen mittels hydrodynamisch-numerischer Simulation unter Berücksichtigung unterschiedlicher RCP-Szenarien (*Representative Concentration Pathways*) modelliert. Da die astronomische Gezeit in der Nordsee starke Abhängigkeiten zum Windstau aufweist (nichtlineare Tide-Windstau Interaktion; z. B. Horsburgh und Wilson 2007), wird der Windstau ebenfalls implizit durch den MSL-Anstieg beeinflusst. Der Windstau wird hauptsächlich durch die vorherrschende Meteorologie bestimmt. Das bedeutet, dass Luftdruck, Windgeschwindigkeit und -richtung sowohl eine Erhöhung als auch eine Abminderung des Gesamtwasserstands gegenüber der astronomischen Tide bewirken können (Dangendorf et al. 2012, 2013). Maßgebend für Sturmfluten in der Deutschen Nordsee sind im Allgemeinen Winde aus nordwestlicher Richtung mit Geschwindigkeiten größer als 25 m/s (z. B. Jensen und Müller-Navarra 2008). Die Interaktion zwischen Tide und Windstau drückt sich in der Deutschen Bucht dadurch aus, dass die

höchsten Windstauereignisse bei Tideniedrigwasser (Tnw) auftreten. Steht eine ausreichende Wassersäule zur Verfügung, können die durch die hohen Windgeschwindigkeiten an der Küste angestauten Wassermassen, in bodennahen Schichten zurückströmen (Annusch 1977). Bei Tnw steht die Wassersäule nicht in der gleichen Form zur Verfügung, weshalb dieser Rückstromeffekt reduziert wird. Eine einfache Superposition des maximal gemessenen Tidewasserstandes mit dem maximalen Windstauereignis ohne Berücksichtigung dieser Interaktionen führt daher zu einer erheblichen Überschätzung des tatsächlichen Sturmflutwasserstandes (Gönnert et al. 2010, Tang et al. 1996).

Der Beitrag ist wie folgt strukturiert und basiert auf der Kombination eines hydrodynamisch-numerischen Modells (HNM) mit empirisch-statistischen Regressionsansätzen zur Übertragung der aktuell verfügbaren punktuellen Wasserstandsvorhersage auf die gesamte deutsche Küstenlinie. In Kapitel 2 wird die entwickelte Methodik sowie die zur Verfügung stehende Datengrundlage erläutert. Die jeweiligen Ergebnisse des zweidimensionalen HNM, der Separierung der simulierten Wasserstandsdaten in die Komponenten der deterministischen Gezeit und des Windstaus sowie die Entwicklung der empirisch-statistischen Modelle zur Rekonstruktion und Vorhersage des Windstaus werden in Kapitel 3 beschrieben. In Kapitel 4 werden die Ergebnisse aus Kapitel 2 und Kapitel 3 zusammengeführt und zeigen den Ablauf der Wasserstandsvorhersage anhand der entwickelten Methodik. Die Zusammenführung erfolgt durch die Überlagerung der Gezeiten- mit der Windstauvorhersage zu dem Gesamtwasserstand. In Kapitel 5 werden schließlich die Vorgehensweise und die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick über weiteren Forschungsbedarf gegeben.

## 2 Methodik und verwendete Datengrundlage

Der Ablauf und die verwendete Methodik sind in Abbildung 1 übersichtlich dargestellt. Den ersten Schritt bildet die Bestandsaufnahme der Datengrundlage. Hierunter fallen alle meteorologischen, topographischen, hydraulischen und hydrologischen Datensätze, die während der weiteren Verarbeitung benötigt werden. Die Erläuterung der relevanten Datengrundlage erfolgt jeweils in den folgenden Kapiteln, wenn sie verwendet werden.



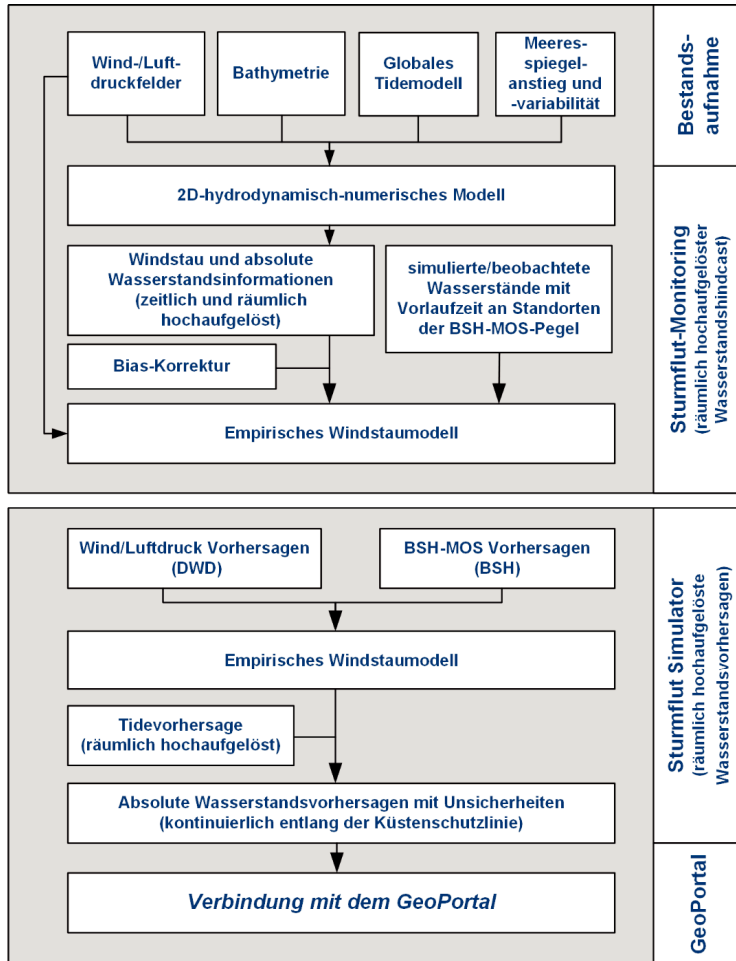


Abbildung 1: Übersicht der Methodik.

## 2.1 Hydrodynamisch-numerisches Modell

Es wird ein zweidimensionales, tiefenintegriertes, barotropes HNM entwickelt, um Wasserstände für einen Zeitraum von 15 Jahren (2000–2014) zu simulieren. Die Modellerstellung erfolgt mit der Software MIKE21® vom Danish Hydraulic Institute (DHI). Das Modell basiert auf der numerischen Lösung der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen unter Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung. Die Steuerung und Auswertung der Simulationen erfolgt automatisiert über die Software Matlab®.

Der Modellbereich deckt die gesamte Nordsee und Teile des angrenzenden Nordostatlantiks ab. Die Randbedingungen des HNM sind in Abbildung 2a) als blaue Linien dargestellt und liegen somit außerhalb der Schelfregion der Nordsee im tiefen Nordostatlantik.

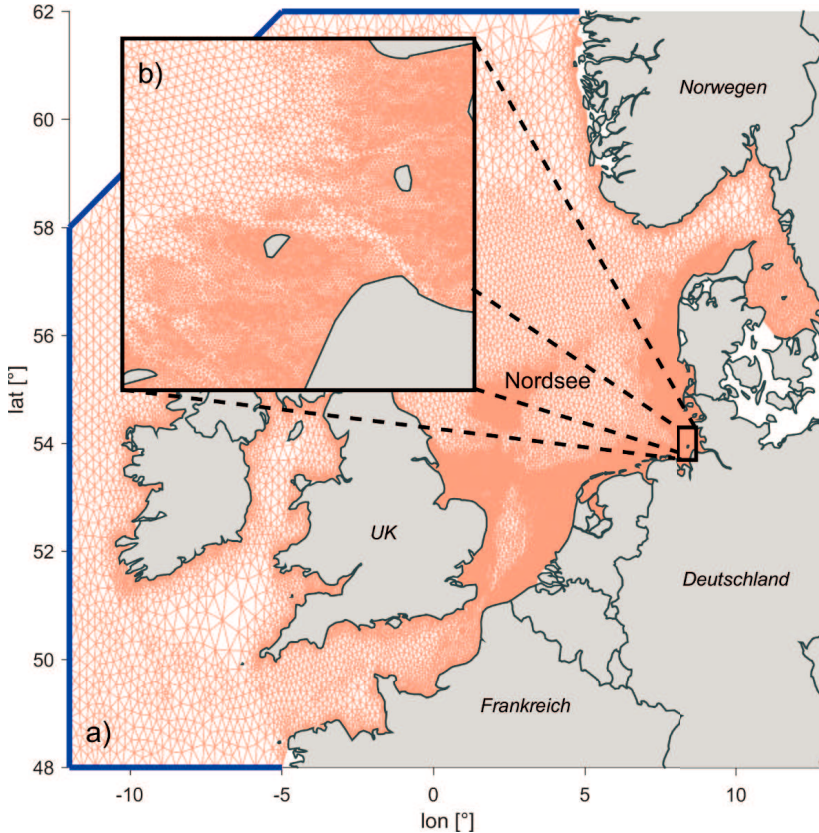


Abbildung 2: a) Modellgebiet und Rechengitter des HNMs. b) Detailausschnitt des Modellgebietes des Elbmündungsgebietes.

Das eingesteuerte Gezeitensignal an den Randbedingungen kann daher als nahezu ungestört betrachtet werden. Die Deformation des Gezeitensignals durch Flachwassereffekte und Reibungseinflüsse setzt schließlich am Kontinentalhang ein und wird innerhalb des HNM beschrieben. Darüber hinaus können Fernwellen in der Simulation erfasst werden, die in diesem Bereich außerhalb der Nordsee entstehen (Annutsch 1977).

Für die Generierung der dynamischen Randbedingungen an den offenen Modellrändern wird das frei verfügbare DTU10 Ocean Tide Model verwendet. Das Tidemodell wurde auf Basis von satellitenaltimetrischen Messungen entwickelt, welche als Basis zur Separierung der benötigten harmonischen Komponenten dienen (Cheng und Andersen 2011). Die Performance des Modells wurde anhand von Pegelstationen getestet und mit anderen verfügbaren globalen Tidemodellen verglichen. Für die Partialtiden M2, S2, K1 und O1 wurden in Bezug auf die mittlere quadratische Abweichung geringe Abweichungen für das nordwestliche europäische Schelfgebiet und im tiefen Ozean zu Pegeldaten bzw. zu Messungen mit einem Bottom Pressure Recorder (BPR) und anderen verfügbaren Tidemodellen nachgewiesen (Cheng und Andersen 2010, Stammer et al. 2014). Insgesamt werden zehn Partialtiden in DTU10 berücksichtigt. Vier unterliegen einem halbtäglichen Zyklus (M2, S2, N2, K2) und fünf einem täglichen Zyklus (K1, O1, P1, Q1, S1). Bei der M4

handelt es sich hingegen um eine Flachwassertide, die hauptsächlich durch Deformationseffekte am Meeresboden entsteht. Die M4 im Speziellen ist eine Obertide der M2, welche wiederum die dominierende Partialtide in der Deutschen Bucht ist. Die räumliche Auflösung erstreckt sich über  $0,125^\circ$  sowohl entlang der Längen- als auch der Breitengrade. Die zeitliche Auflösung kann entsprechend den Modellanforderungen beliebig gewählt werden. Im vorliegenden HNM wird modellintern ein Zeitschritt von 10 Minuten gewählt.

Zur Berücksichtigung des Meeresspiegelanstiegs und der -variabilität im HNM wird auf Satellitenaltimeterdaten aus dem Aviso-Katalog (*Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data*) zurückgegriffen. Dieser stellt globale Daten und Informationen aus verschiedenen Topex/Poseidon und ERS Satellitenmissionen seit 1993 zur Verfügung. Eine Einschränkung der Datenverwendbarkeit kann sich in Küstennähe ergeben (Passaro et al. 2015), was für den hier angestrebten Zweck jedoch von untergeordneter Rolle ist, da die Informationen an den offenen Modellrändern benötigt werden. Die Vorteile liegen in der hohen räumlichen Informationsdichte (Auflösung:  $0,125^\circ$ ) bezüglich des MSL seit 1993, die nicht durch vertikale Landbewegungen oder andere Küstenprozesse im Vergleich zu Tidepegeln beeinflusst sind. Satellitendaten werden routinemäßig um hochpassgefilterte ( $< 20$  Tage) atmosphärische Einflüsse (Wind und Luftdruck in Form des inversen barometrischen Effektes (IBE)) korrigiert (die so genannte Dynamic Atmospheric Correction (DAC)). Da im HNM diese atmosphärischen Prozesse berücksichtigt werden sollen, sind diese wieder hinzuzufügen, um eine Vergleichbarkeit mit Tidepegeln gewährleisten zu können (Bonaduce et al. 2016). Durch die Verwendung räumlich hochaufgelöster Messungen der Meeresoberfläche gegenüber der Generierung einer Indexzeitreihe aus Tidepegeln mit monatlicher Auflösung (siehe Wahl et al. 2013, Arns et al. 2013), ist eine Verbesserung der Einlauftrandbedingungen zu erwarten.

Für den meteorologischen Antrieb des HNM werden Reanalysedaten aus dem CIRES 20th Century Reanalysis V2c Project des Earth System Research Laboratory der US National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) verwendet, die auf Basis eines globalen Wettervorhersagemodells ermittelt wurden und frei verfügbar sind (Compo et al. 2011). Als Input werden sowohl Windfelder (als meridionale und zonale Windgeschwindigkeiten) als auch der atmosphärische Luftdruck benötigt. Die räumliche Ausdehnung erstreckt sich global auf einem rechteckigen Gauß'schen Gitter mit orthogonalen Koordinaten auf den Längen- und Breitengraden. Die räumliche Auflösung beträgt  $192 \times 94$  Gitterpunkte, woraus sich eine Gitterbreite von  $1,875^\circ$  in Richtung der Längengrade und  $1,904^\circ$  in Richtung der Breitengrade ergibt. Die zeitliche Auflösung mit der die Reanalysedaten zur Verfügung stehen, beträgt drei Stunden. Die meridionalen und zonalen Windgeschwindigkeiten beziehen sich auf eine Höhe von 10 m über dem MSL, während die atmosphärischen Druckfelder unmittelbar den MSL als Bezugsniveau aufweisen.

Der Höhenverlauf des Meeresbodens wird im HNM über bathymetrische Datensätze beschrieben. Die Qualität der Bathymetrie hat einen maßgebenden Einfluss auf die Qualität und Robustheit der Modellergebnisse (insbesondere im Flachwasserbereich durch komplexe hydrodynamische Prozesse). Es liegt eine Vielzahl unterschiedlicher, potenziell verwendbarer Datenquellen vor, die sich in ihrer räumlichen Auflösung sowie Ausdehnung unterscheiden. Hierzu gehören auch veränderliche Bathymetrien der Jahre 1982 bis 2012 aus dem Projekt „AufMod“ (Heyer und Schrottke 2013). Durch die geringe räumliche Ausdehnung der AufMod-Bathymetrie (beschränkt auf die Deutsche Bucht), muss ein weiterer

Datensatz für den verbleibenden Bereich des Modellgebietes verwendet werden. Die optimalen Ergebnisse hinsichtlich der Genauigkeit und der räumlichen Auflösung liefert die Kombination aus den Datensätzen AufMod (Deutsche Bucht) und GEBCO (verbleibendes Modellgebiet) mit räumlichen Auflösungen von 50 m respektive 30 Bogensekunden. Die endgültige Bathymetrie des HNMs in der Deutschen Bucht ist exemplarisch in Abbildung 3 gezeigt.

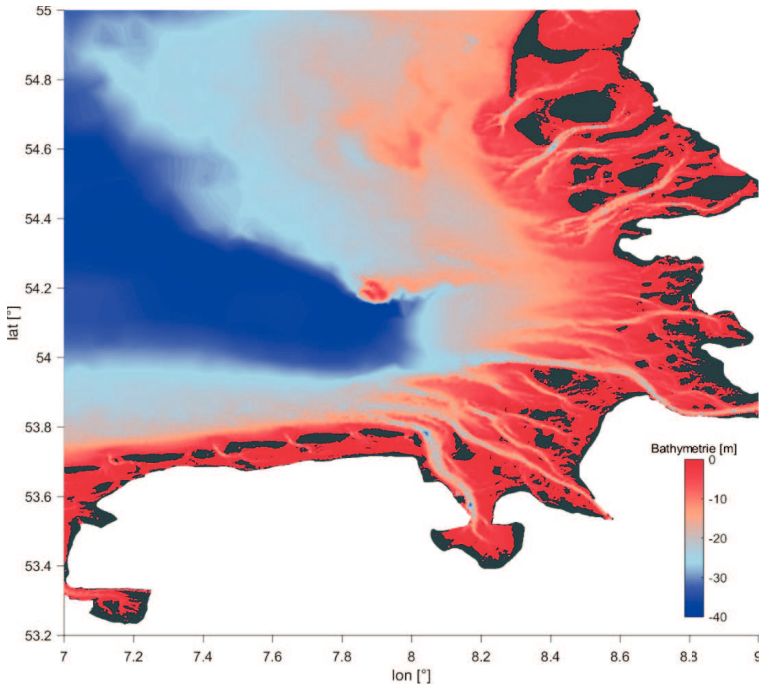


Abbildung 3: Zusammengeführte Höhenwerte der finalen Bathymetrie des HNMs als Konturplot (Ausschnitt). Zur besseren Differenzierung der Höhenwerte wurden alle Werte  $< -40$  m in einer Farbe dargestellt und Werte  $> 0$  m aus dem Datensatz eliminiert.

Das unstrukturierte Berechnungsnetz des HNM wird über einen adaptiven Algorithmus mit der Software Matlab® entwickelt, mit dem die Zellgrößen der zugrundeliegenden Bathymetrie angepasst werden sollen: Je geringer die Tiefe, desto kleiner die Zellen des Rechengitters. Durch den Vergleich von Abbildung 2 und Abbildung 3 ist deutlich die gewünschte Abstufung der Gittergröße des HNMs entsprechend der Bathymetrie zu erkennen. So können beispielsweise die Norwegische Rinne westlich von Norwegen bis in den Skagerrak oder die Doggerbank östlich von Großbritannien, die auch als nordwestliche Begrenzung der großen Deutschen Bucht gilt, identifiziert werden. Deutlich zu erkennen sind auch die Flachwasserbereiche in der Deutschen Bucht und die komplexe Struktur des Meeresbodens im Bereich unmittelbar vor der Küste. In der Deutschen Bucht selbst werden beispielsweise die tieferen Fahrrinnen deutlich vom Rechengitter abgebildet (Abbildung 2b). Die minimale Kantenlänge der einzelnen Gitterelemente ist beschränkt auf die maximale Auflösung der Bathymetrie und kann daher in der Deutschen Bucht bis zu 50 m betragen. Insgesamt umfasst das finale Rechengitter 79.962 Gitterpunkte, die zu 153.139 Elementen trianguliert werden.

## 2.2 Gezeitenanalyse/-synthese

Der nächste Punkt in der Methodik widmet sich der Fragestellung, wie der Windstau anhand der simulierten Wasserstandsdaten unter Berücksichtigung der Flachwassercharakteristik ermittelt und vorhergesagt werden kann. Die gängigen Verfahren zur Tideanalyse/-synthese basieren im Wesentlichen auf Beobachtungsdaten an z. B. Pegelstandorten, d. h. es werden Wasserstandszeitreihen der Vergangenheit analysiert und die darin enthaltenen Komponenten separiert. Die Gezeitenkomponente stellt durch die Anziehungskräfte zwischen Sonne, Mond und Erde den größten Einfluss der Wasserstandsänderungen in der Nordsee dar. Vereinfacht können die zur Verfügung stehenden Verfahren in harmonische und nicht-harmonische Methoden unterteilt werden (Pugh und Woodworth 2014). Die harmonischen Verfahren basieren im Wesentlichen auf der Annahme, dass die Frequenzen der einzelnen Partialtiden bekannt sind, woraus sich die Gezeitenkomponente abschätzen lässt (Godin 1972). Durch die Anpassung harmonischer Schwingungen an den Wasserstand lassen sich Phase und Amplitude der einzelnen Partialtiden approximieren und ergeben summiert die Gezeitenkomponente. Bei den nicht-harmonischen Verfahren werden die Meridiandurchgangszeiten des Mondes verwendet, um die mittleren Hoch- und Niedrigwasserintervalle an dem zu analysierenden Pegelstandort zu ermitteln. Die mittleren Intervalle werden durch Addition der Ungleichheiten in der Hoch- und Niedrigwasserzeit überlagert. Die Ungleichheiten stammen aus Abweichungen der Mondbewegung vom Mittel, hervorgerufen durch beispielsweise halbmonatliche (Spring-Nipp-Zyklus) oder halbtägige Änderungen in der Mondlaufbahn. Die Hoch- und Niedrigwasserhöhen der Gezeitenkomponente werden identisch bestimmt. In Müller-Navarra (2013) wurde darüber hinaus ein Verfahren vorgestellt, dass vom BSH in Deutschland zur Gezeitenanalyse/-synthese verwendet wird und der grundsätzlichen Methodik der nicht-harmonischen Verfahren ähnelt. Es handelt sich um die „Harmonische Darstellung der Ungleichheiten (HDdU)“ (Horn 1960). Hier werden die Ungleichheiten in Höhe und Zeit allerdings analog zu den harmonischen Verfahren als Anpassung periodischer Glieder bestimmt.

In Jensen et al. (2013) wurden verfügbare Programmmodule basierend auf der harmonischen Gezeitenanalyse (TTide (*Harmonic Analysis Toolbox*), Pawlowicz et al. (2002); UTide (*Unified Tidal Analysis and Prediction Functions*), Codiga (2011)), der HDdU für den Pegel Cuxhaven gegenübergestellt. Ein wesentlicher Unterschied findet sich in der benötigten Datengrundlage. Die Berücksichtigung langperiodischer Zyklen der Gezeitenkomponente (z. B. Nodalzyklus mit 18,61 Jahren) wird in der HDdU durch Kollektivlängen > 19 Jahren erfasst, was gleichzeitig eine Einschränkung darstellt. Zeitreihen, die weniger als 19 Jahre umfassen, können nicht oder nur bedingt analysiert werden. Die harmonischen Programmmodule TTide/UTide erlauben bereits die Analyse von Zeitreihen einzelner Jahre, da sogenannte Satellitenkorrekturen (siehe auch Pawlowicz et al. 2002) vorgenommen werden, um langperiodische Zyklen zu approximieren. Insbesondere im Untersuchungsgebiet Deutsche Bucht finden allerdings komplexe und nichtlineare Verformungsprozesse der Tide im Küstenbereich durch Flachwassereffekte und Reibungseinflüsse statt. Den resultierenden Deformationen wird bei der Verwendung der HDdU durch die Bestimmung der Ungleichheiten zu unterschiedlichen Tidephasen Rechnung getragen. Die Ergebnisse der Analysen in Jensen et al. (2013) lassen daher den Schluss zu, dass die HDdU für den hier angestrebten Anwendungsfall und das vorliegende Untersuchungsgebiet das geeignetere

Verfahren darstellt. Diese Erkenntnis wird durch die Untersuchungen in Boesch und Müller-Navarra (2019) bestätigt. Ein weiterer und in den bisherigen Vergleichen vernachlässigter Punkt ist, dass mit der HDdU im Gegensatz zu den harmonischen Verfahren auch trockenengefälle oder unvollständige Zeitreihen analysiert werden können. Dieser Punkt ist insbesondere im Hinblick auf die simulierten Wasserstände entscheidend, da aufgrund der flachen Deutschen Bucht die Tnw entlang der Küste oftmals unvollständig sind und Bereiche des Wattenmeers regelmäßig trockenfallen. Die Anwendung der in Müller-Navarra (2013) erläuterten HDdU erfolgt mit den verfügbaren R-Paketen „Tide Tables“ bzw. „Tide Curves“ für Scheitelwerte bzw. vollständige Wasserstandszeitreihen.

### 2.3 Empirisch-statistische Windstaumodelle

Durch die Anwendung der HDdU ist es möglich, den Windstau aus den simulierten Wasserstandsdaten zu separieren und für die Entwicklung empirisch-statistischer Windstaumodelle nutzbar zu machen. Im Vordergrund steht dabei, die an der Genese beteiligten physikalischen Prozesse zur Beschreibung des Windstaus über eine empirisch-statistische Formulierung zu erfassen und diese in eine flexible und robuste Vorhersage zu integrieren.

An dieser Stelle wird das empirisch-statistische Windstaumodell aus Jensen et al (2013) als Basis herangezogen und auf ausgewählte Pegelstandorte sowie die simulierten Wasserstände aus dem HNM angewendet. Zuerst wird die oben erläuterte Gezeitenanalyse durchgeführt, die darauf abzielt, die Gesamtwasserstände in Tide und Windstau zu separieren. Für den zweiten Schritt werden dann sowohl Gezeiten als auch der Windstau an jedem einzelnen Gitterpunkt aus dem HNM entlang der gesamten deutschen Küstenlinie benötigt, um die Koeffizienten der empirisch-statistischen Windstaumodelle abzuleiten. Der Windstau an jedem relevanten Gitterpunkt wird als zu erklärende Variable (Regressand) in einer schrittweisen multiplen linearen Regression mit dem gleichen meteorologischen Input (Windfelder und atmosphärischer Luftdruck aus Compo et al. (2011)), wie im HNM, als Prädiktor wie folgt verwendet:

$$S(t) = \sum_{j=0}^n a_j g_j(t) + e(t) \quad (1)$$

$S(t)$  stellt den Windstau zum Zeitpunkt  $t$  dar, während  $a_j$  bzw.  $g_j$  die Regressionskoeffizienten bzw. die Prädiktoren abbilden.  $e(t)$  ist der verbleibende Fehlerterm (unkorrelierte und normalverteilte Störgröße). Die Koeffizienten werden so bestimmt, dass die Summe der quadratischen Abweichungen minimal wird. Für die schrittweise multiple lineare Regression werden die folgenden fünf Basissterme verwendet:

$$g_0 = 1 \quad (2)$$

$$g_1 = f^2 \cos \beta$$

$$g_2 = f^2 \sin \beta$$

$$g_3 = f^3 \cos \beta$$

$$g_4 = f^3 \sin \beta$$

$$g_5 = p - \text{mean}(p)$$

Hier beschreiben die Prädiktoren  $g_1$ – $g_4$  die quadratischen und die kubischen Komponenten des Windschubes in Abhängigkeit von der (Wind-)Geschwindigkeit  $f$  und der Richtung  $\beta$ .  $g_5$  beschreibt den IBE und erfasst lineare Wasserstandsänderungen des Ozeans durch den atmosphärischen Luftdruck (Ponte 2006). Im Gegensatz zu Müller-Navarra und Giese (1999) und Jensen et al (2013) handelt es sich dabei nicht um statische Terme. Durch den schrittweisen Ansatz wird nur diejenige Kombination von Prädiktoren verwendet, bei der alle Prädiktoren einen statistisch signifikanten Anteil des Windstaus beschreiben. Der Signifikanztest wird beschrieben durch die Nullhypothese, dass keine Korrelation zwischen einem spezifischen Prädiktor und dem Windstau besteht (Von Storch und Zwiers 1999):

$$p = |R| \sqrt{\frac{n-2}{1-R^2}} \quad (3)$$

Der  $p$ -Wert beschreibt entsprechend die Wahrscheinlichkeit, dass ein spezifischer Prädiktor die Modellgüte verbessert, indem die Variabilität des Windstaus signifikant reduziert wird. Im vorliegenden Fall wird der kritische Wert von  $p$  auf das Signifikanzniveau von 5 % ( $p \leq 0,05$ ) festgelegt.

Der Windstau an den einzelnen Standorten in der Deutschen Bucht stellt eine Kombination verschiedenster Einflüsse über dem Gebiet der Nordsee dar, deren Auswirkungen mitunter zeitversetzt eintreten. Daher werden die Prädiktoren mit einer Zeitverzögerung von bis zu 24 Stunden versehen. Damit wird sichergestellt, dass beispielsweise der Einfluss von Fernwellen berücksichtigt wird. Fernwellen benötigen etwa 15 Stunden, um von der nordöstlichen Küste Schottlands in die Deutsche Bucht fortzuschreiten (Annusch 1977). Die räumliche Ausdehnung der meteorologischen Daten wird entsprechend auf das Gebiet von etwa  $-5^\circ$  bis  $30^\circ$  östlicher Länge und auf etwa  $50^\circ$  bis  $70^\circ$  nördlicher Breite festgelegt. Um den Rechenaufwand zu reduzieren, wird zudem die Auflösung von  $1,875^\circ$  auf  $3,75^\circ$  mittels räumlicher Interpolation verringert. Die geringere räumliche Auflösung der Prädiktoren hat keinen signifikanten Einfluss auf die finale Modellperformance, was sich in der hohen räumlichen Korrelation der meteorologischen Inputvariablen untereinander erklären lässt. Die zeitliche Auflösung der meteorologischen Prädiktoren wird mit einer kubischen Interpolation auf die identische zeitliche Auflösung wie beim Windstau überführt (von dreistündlich auf stündlich). Insgesamt werden die meteorologischen Zeitreihen von 60 Gitterpunkten mit jeweils fünf Basistermen (Gleichung 2) und unterschiedlichen Zeitversätzen in der Modellentwicklung verwendet. In der Summe resultieren hieraus insgesamt 7.200 Prädiktoren pro Standort, die innerhalb der schrittweisen Methodik auf ihren signifikanten Einfluss auf den Windstau getestet werden. Die daraus abgeleiteten empirisch-statistischen Windstaumodelle ermöglichen es primär, barotrope Ausgleichsprozesse im Ozean als Reaktion auf Windschub und hydrostatisch wirkende Luftdruckschwankungen zu erfassen (barokline Einflüsse spielen bei der Windstaugenese, aufgrund der nicht (oder nur temporär) vorhandenen Schichtung, nur eine sehr untergeordnete Rolle). Im Rahmen der empirisch-statistischen Modellentwicklung werden verschiedene Trainingsperioden getestet, um die Modellergebnisse zu validieren. Für die Ergebnisse der Trainingsperiode zwischen 2000 und 2012 wird auf Kapitel 4.1 verwiesen. Für den Vorhersagemodus werden die Regressionskoeffizienten der empirisch-statistischen Windstaumodelle für die gesamte vorliegende Periode zwischen 2000 und 2014 abgeleitet.

In einem nächsten Schritt wird den nichtlinearen Interaktionen zwischen Tide und Windstau in der flachen Nordsee Rechnung getragen, indem die empirisch-statistischen Modelle für verschiedene Tidephasen unter Verwendung verschiedener Perzentile der astronomischen Tide abgeleitet werden. Dies bedeutet, dass für definierte Tidewasserstandsklassen individuelle Regressionskoeffizienten für die signifikanten meteorologischen Prädiktoren ermittelt werden. Somit wird sichergestellt, dass in den Regressionsmodellen ein identisches Windfeld unterschiedlich hohen Windstau bei Tnw und Tidehochwasser (Thw) verursachen kann. Die Tidezeitreihe wird dafür in 84 Klassen eingeteilt. In den niedrigen bzw. hohen Perzentilen (0 % bis 2 % bzw. 98 % bis 100 %) wird eine Schrittweite von 0,1 % für die Zuweisung verwendet. Die Schrittweite wird sukzessive auf 5 % bis zu den mittleren Perzentilen (25 % bis 80 %) erhöht. Damit wird dem größeren Effekt der Tide-Windstau Interaktion in den niedrigen bzw. hohen Perzentilen Rechnung getragen. In Abbildung 4 ist das Vorgehen exemplarisch für das Kalenderjahr 2008 und den Pegelstandort Cuxhaven gezeigt.

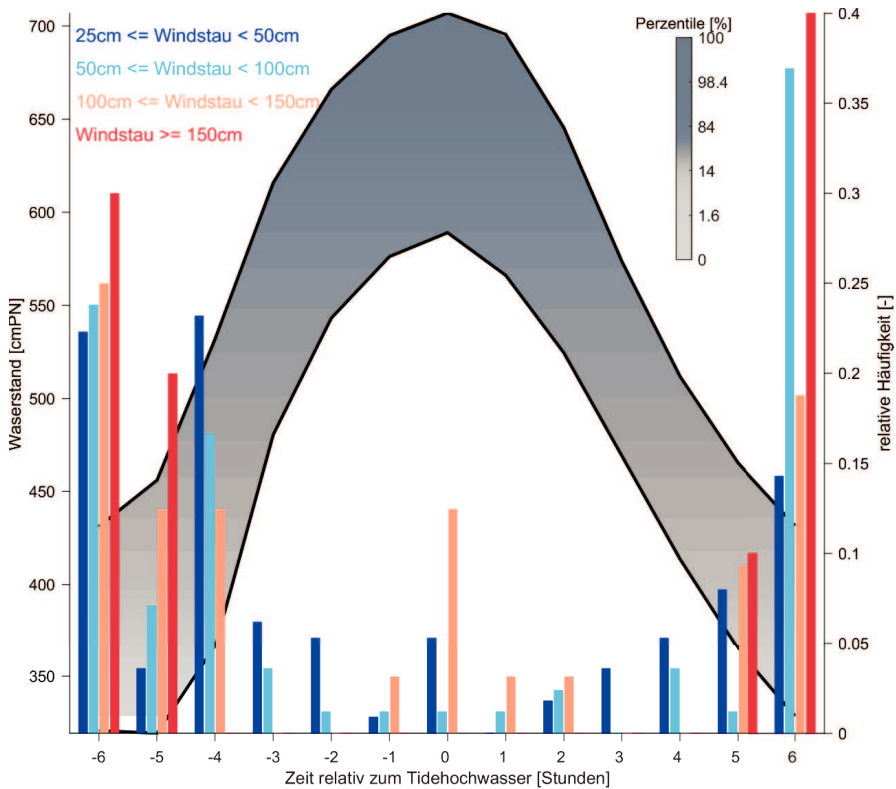


Abbildung 4: Mittlere Gezeitenkurve und zugehöriger Windstau für das Jahr 2008 am Pegel Cuxhaven.



Auf der linken Ordinate ist der mittlere astronomische Wasserstand dargestellt. Auf der rechten Ordinate ist die relative Häufigkeit des Windstaus zu den unterschiedlichen Tidephasen relativ zum Thw abgebildet. Hierbei wird der Windstau in vier unterschiedliche Intensitätsklassen eingeteilt und unterschiedlichen Tidephasen ( $\pm 6$  Stunden um das Thw) zugeordnet. Aus der Untersuchung geht hervor, dass der Einfluss der Tidephase einen wesentlichen Faktor für die Ausprägung des Windstaus darstellt. So treten die extremsten Windstauereignisse bevorzugt zu Zeiten niedriger Wasserstände auf. Beispielsweise sind ungefähr 70 % der beobachteten Windstauwerte  $\geq 150$  cm sechs Stunden vor oder nach dem Thw aufgezeichnet worden. Wenige Stunden vor und nach dem Thw ( $\pm 4$  Stunden um das Thw) hingegen ist kein Windstauwert  $\geq 150$  cm in den Aufzeichnungen enthalten. Die physikalische Erklärung liefert primär der geringere sohnnahe Rückstromeffekt bei Thw, der es den durch Windeinwirkung an die Küste gestauten Wassermassen ermöglicht, wieder zu entweichen. Bei besonders geringen Wasserständen kann der Wind die Wassermassen bis in die bodennahen Schichten bewegen und so den sohnnahe Rückstromeffekt minimieren (Annusch 1977). Diese Ergebnisse bestätigen auch die Schlussfolgerungen von Gönnert et al. (2010) und zeigen, dass eine einfache Überlagerung von maximalem Gezeitenwasserstand und maximalem Windstau in der Deutschen Bucht physikalisch fragwürdig ist. Aus diesem Grund wird der Einfluss der Interaktion zwischen Tide und Windstau explizit in bei der Entwicklung der empirisch-statistischen Windstau Modelle berücksichtigt.

## 2.4 Beurteilung der Modellgüte

Zur Beurteilung der Modellgüte werden die im Kontext hydrologischer Modellierungen gängigen Effizienzkriterien verwendet (siehe Krause et al. 2005). Konkret werden das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  (Perfekte Anpassung: 1) und der Root-Mean-Square Error (RMSE; Perfekte Anpassung: 0) verwendet. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  wird beschrieben durch das Quadrat der Pearson-Korrelation  $R$ :

$$R^2 = \left( \frac{C(x,y)}{\sqrt{C(x,x) \cdot C(y,y)}} \right)^2 \quad (4)$$

$C$  stellt dabei die Kovarianz zweier Zufallsvariablen  $x$  und  $y$  dar:

$$C(x, y) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x) \cdot (y_i - \mu_y) \quad (5)$$

Darin beschreibt  $n$  die Länge und  $\mu$  den Mittelwert der Zeitreihen  $x$  und  $y$ . Daraus folgt, dass  $R^2$  sich zwischen 0 und 1 bewegt und die erklärte Variabilität der Zeitreihe  $y$  anhand der Zeitreihe  $x$  beschreibt. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  gibt jedoch keine Auskunft darüber, wie groß die absoluten Abweichungen zwischen den Zeitreihen  $x$  und  $y$  ausgeprägt sind. Deshalb wird zusätzlich der RMSE verwendet, worüber die mittlere Abweichung der beiden Zeitreihen  $x$  und  $y$  quantifiziert wird:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (6)$$

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Hydrodynamisch-numerisches Modell

Die Kalibrierung des HNMs erfolgt auf Basis von Beobachtungen an 33 Tidepegeln aus unterschiedlichen Quellen (siehe Abbildung 5). Die Wasserstandsdaten der Tidepegel entlang der Ostküste Englands, im Ärmelkanal und in den Niederlanden werden aus dem GESLA-2-Datensatz (Global Extreme Sea Level Analysis Version 2; Woodworth et al. 2016) extrahiert. Die Pegeldata in der Deutschen Bucht werden von der Deutschen Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) zur Verfügung gestellt und sind über die gesamte Deutsche Bucht verteilt. Einige der Pegel liegen auf Inseln, wie Norderney vor der niedersächsischen Nordseeküste, oder List in Schleswig-Holstein auf der Ostseite der Insel Sylt. Zwei der Pegelstandorte befinden sich in Ästuargebieten (Emden und Wilhelmshaven). Der Pegel Helgoland liegt im Tiefwasser außerhalb des Wattenmeeres. Insgesamt führt die Verteilung der Pegelstandorte mit unterschiedlicher Charakteristik zu der Annahme, dass die Wasserstandsmessungen repräsentativ für die Deutsche Bucht sind (siehe Abbildung 5b, schwarze Punkte). Zudem werden vier weitere Pegelstandorte (Hooge, Schlüttsiel, Everschop und Büsum; siehe Abbildung 5b, blaue Punkte) als „Kontrollpegel“ zur Validierung der Ergebnisse verwendet.

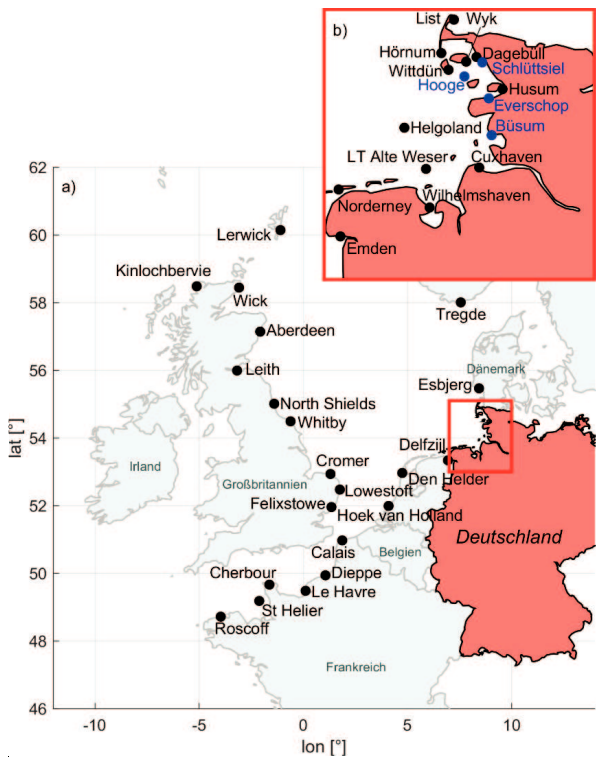


Abbildung 5: Pegelstandorte zur Kalibrierung und Validierung des HNMs: a) Modellbereich außerhalb der Deutschen Bucht. b) Detailausschnitt der Pegelstandorte innerhalb der Deutschen Bucht.

Im Zuge der Modellkalibrierung wird der Einfluss verschiedener Kalibrierungsgrößen auf die simulierten Wasserstände betrachtet. Wichtigster Parameter ist hierbei die Sohlrauheit, die im vorliegenden HNM über den  $k_{st}$ -Wert (Strickler-Beiwert) in  $m^{1/3}/s$  approximiert wird. Um einen optimalen  $k_{st}$ -Wert zu identifizieren, wird dieser im Zuge der Kalibrierung voll automatisiert in einem physikalisch sinnvollen Bereich ( $40\text{--}50\text{ m}^{1/3}/s$ ; überwiegend Feinsande (Heyer und Schrottke 2013)) variiert und die Ergebnisse werden mit den beobachteten Wasserständen verglichen. Der Vergleich erfolgt auf Basis der gesamten Simulationsdauer (2000–2014) und zusätzlich auf Basis von Einzelereignissen, wie beispielsweise der Allerheiligenflut vom 01.11.2006. Anhand der ausgewählten Effizienzkriterien  $R^2$  und RMSE wird im Rahmen der Kalibrierung schließlich ein  $k_{st}$ -Wert von  $45\text{ m}^{1/3}/s$  für die endgültige Simulation von Wasserständen in der Deutschen Bucht festgelegt; die ermittelte Sohlrauheit in Arns et al. (2013) kann somit bestätigt werden. Die gewählte Sohlrauheit wird vereinfacht global für das gesamte Modellgebiet angesetzt. In Abbildung 6 ist der Einfluss der Rauheit auf die Wasserstände am Pegel Cuxhaven in der Deutschen Bucht sowie der am Pegel North Shields an der Ostküste Englands zwischen dem 30.10.2006 und 03.11.2006 (Allerheiligenflut) gezeigt. Während der Durchführung der Kalibrierung wird deutlich, dass der Einfluss der Sohlrauheit in Flachwasserbereichen wie der Deutschen Bucht am größten ist und in tieferen Gebieten wie entlang der Ostküste Englands keinen signifikanten Einfluss hat.

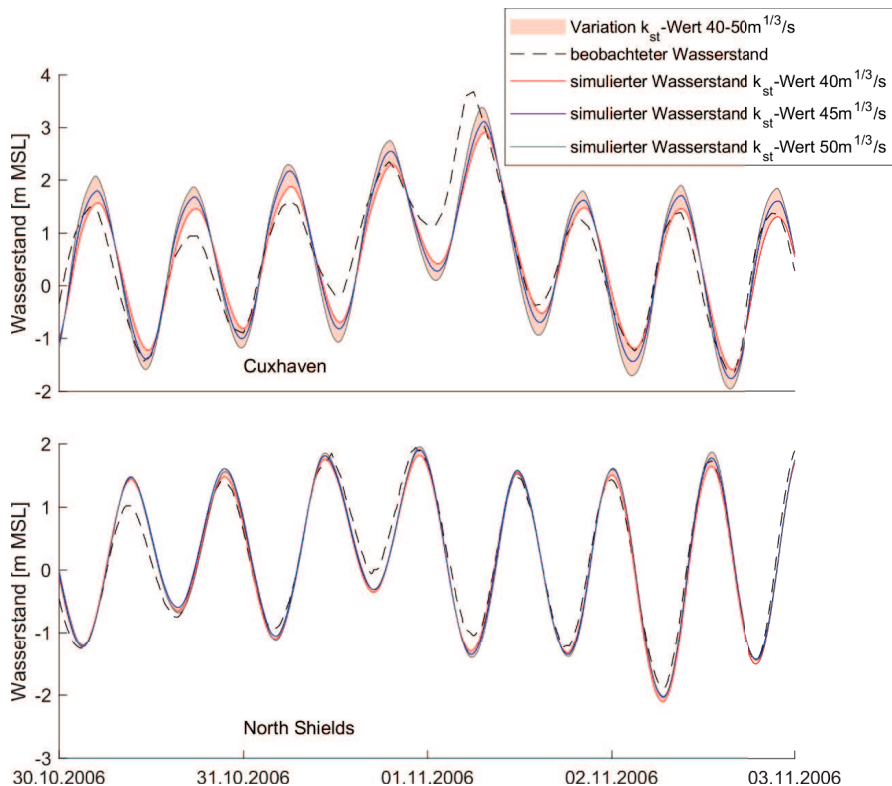


Abbildung 6: Einfluss der Rauheit auf die Wasserstände am Pegel Cuxhaven (oben) und North Shields (unten) zwischen dem 30.10.2006 und dem 03.11.2006 (Allerheiligenflut).

Die finalen Modellläufe werden im Anschluss an die Kalibrierung jahresweise mit einer Vorlaufzeit von zwei Wochen durchgeführt (Einschwingphase). Die Ausgabe der simulierten Zeitreihen erfolgt mit einem Zeitschritt von 10 Minuten. Die Modellgüte ( $R^2$  und RMSE) an den 33 Pegelstandorten ist in Tabelle 1 unter Berücksichtigung der gesamten Simulationsdauer zusammengefasst. Zusätzlich wird ein Zeitversatz zwischen Simulation und Beobachtung ermittelt, indem die Zeitreihen gegeneinander verschoben werden und jeweils das größte Bestimmtheitsmaß  $R^2$  ermittelt wird. Die Verschiebung erfolgt sukzessive in 10-Minuten Schritten. Der ermittelte Zeitversatz wie auch die Bathymetrie im Modell am Standort der Pegel sind ebenfalls in Tabelle 1 aufgeführt. Im Mittel über alle 33 Pegelstandorte erreicht das HNM eine Modellgüte von  $R^2 = 0,91$  und  $RMSE = 0,41$  m. Werden lediglich die Pegelstandorte im Interessensgebiet Deutsche Bucht betrachtet, wird eine Erhöhung des  $R^2$  auf 0,97 und eine Optimierung des RMSE auf 0,28 m erreicht. Der Zeitversatz der simulierten gegenüber den beobachteten Wasserständen variiert in der Deutschen Bucht um  $\pm 10$  Minuten, was der Schrittweite der zeitlichen Diskretisierung im HNM entspricht und daher als vernachlässigbar angesehen wird. Der Zeitversatz von 70 bzw. 30 Minuten an den Pegeln Husum bzw. Emden ist mit deren Lage im Binnenbereich zu erklären. Sie befinden sich somit außerhalb der Modellgrenzen und werden zur Berücksichtigung in den Simulationen im Modell Richtung Seeseite verschoben. In Anbetracht des geplanten Anwendungsfalls wird die Qualität der Modellergebnisse bei Auswertung der gesamten Simulationsdauer als hinreichend genau eingestuft.

Neben der gesamten Simulationsdauer müssen auch Einzelereignisse hinsichtlich ihrer Modellgüte ausgewertet werden, um die Abbildung von beispielsweise Extremereignissen beurteilen zu können. Im Fall von Cuxhaven liegt eine Modellperformance von  $R^2 = 0,97$  und  $RMSE = 0,32$  m für die gesamte Simulationsdauer vor. Für die Sturmflut am 01.11.2006 zeigen die Simulationsergebnisse jedoch Abweichungen von  $> 1$  m (siehe Abbildung 6). Trotz möglichst detaillierter modellinterner Randbedingungen und Parameter, verbleibt demnach eine Diskrepanz zwischen simulierten und beobachteten Wasserständen. Diese können sowohl aus natürlichen (z. B. Meteorologie) als auch aus anthropogenen (z. B. Baumaßnahmen) Einflüssen resultieren, die modelltechnisch nur unzureichend erfasst werden können. Diese Abweichungen werden auch als Bias bezeichnet und können zur Minimierung der Diskrepanz zwischen simulierten und beobachteten Wasserständen, wie auch in vielen anderen Bereichen der hydrologischen Modellierung, korrigiert werden.

Die Bias-Korrektur basiert auf der Ermittlung einer Transferfunktion zwischen den modellierten und den beobachteten Wasserständen an den verfügbaren Pegelstandorten (Piani 2010), um die Modellabweichungen zu verringern (Mudelsee 2010). Diese Transferfunktionen werden unter Verwendung eines räumlichen Interpolationsschemas auf die simulierten Wasserstände übertragen, für die keine Beobachtungen vorliegen. Dafür werden im ersten Schritt quantil-basierte Differenzen, einschließlich deren Standardabweichung (Darstellung der in der Bias-Korrektur enthaltenen Unsicherheiten), zwischen dem beobachteten Wasserstand und der simulierten Zeitreihe berechnet, um bewerten zu können, wie gut das Modell insbesondere die Hoch- und Niedrigwasser an den einzelnen Standorten abbilden kann. Um die Korrekturfunktionen flächig auf unbekannte Standorte zu übertragen, werden Wichtungsfaktoren abgeleitet, um die ermittelten quantil-basierten Differenzen und Standardabweichungen auf die Simulation zu übertragen. Die benötigten Wichtungsfaktoren werden anhand eines funktionalen Zusammenhangs zwischen der

Abhängigkeit der Zeitreihen in Form der linearen Regression, der inversen Distanz sowie der Bathymetrichöhe ermittelt.

Tabelle 1: Modellgüte an den 33 Pegelstandorten nach der Kalibrierung. Die Pegelstandorte innerhalb der Deutschen Bucht sind fett hervorgehoben.

<b>Pegel</b>	<b>RMSE [m]</b>	<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	<b>Zeitversatz [min]</b>	<b>Bathymetrie Modell [m MSL]</b>
Aberdeen	0,30	0,97	10	-13,85
Calais	0,30	0,99	10	-7,03
Cherbour	0,18	0,99	0	-9,31
Chromer	1,13	0,72	20	-21,11
Delfzijl	0,27	0,97	0	-14,36
Den Helder	0,26	0,90	0	-18,65
Dieppe	0,35	0,99	10	-10,29
Esbjerg	0,25	0,92	-10	-5,08
Felixstowe	0,75	0,79	10	-11,73
Hoek van Holland	0,31	0,94	20	-6,67
Kinlochbervie	2,41	0,42	0	-13,97
Le Havre	0,23	0,99	0	-12,01
Leith	0,43	0,95	60	-9,27
Lerwick	0,27	0,89	0	-9,24
Lowestoft	0,31	0,86	20	-14,8
North Shields	0,33	0,97	0	-8,43
Roscoff	0,48	0,97	-10	-6,12
St. Helier	0,28	0,99	-20	-24,74
Tredge	0,29	0,53	-30	-3,66
Whitby	0,66	0,89	10	-51,48
Wick	0,37	0,90	20	-57,72
<b>Cuxhaven</b>	<b>0,32</b>	<b>0,97</b>	<b>10</b>	<b>-17,55</b>
<b>Hörnum</b>	<b>0,23</b>	<b>0,96</b>	<b>-10</b>	<b>-8,71</b>
<b>Wittdün</b>	<b>0,24</b>	<b>0,97</b>	<b>-10</b>	<b>-17,62</b>
<b>Wyk</b>	<b>0,25</b>	<b>0,97</b>	<b>10</b>	<b>-7,35</b>
<b>Husum</b>	<b>0,46</b>	<b>0,96</b>	<b>70</b>	<b>-3,79</b>
<b>Dagebüll</b>	<b>0,28</b>	<b>0,97</b>	<b>10</b>	<b>-2,30</b>
<b>List</b>	<b>0,23</b>	<b>0,95</b>	<b>0</b>	<b>-3,50</b>
<b>Wilhelms- haven</b>	<b>0,26</b>	<b>0,98</b>	<b>0</b>	<b>-19,07</b>
<b>Emden</b>	<b>0,29</b>	<b>0,97</b>	<b>30</b>	<b>-7,16</b>
<b>Helgoland</b>	<b>0,24</b>	<b>0,97</b>	<b>0</b>	<b>-4,36</b>
<b>LT Alte Weser</b>	<b>0,26</b>	<b>0,98</b>	<b>0</b>	<b>-13,03</b>
<b>Norderney</b>	<b>0,25</b>	<b>0,96</b>	<b>0</b>	<b>-11,57</b>

Am Beispiel vom Pegelstandort Hooge wird in Abbildung 7 exemplarisch das Ergebnis der vorgestellten Bias-Korrektur darstellt. Der Pegelstandort Hooge ist nicht Teil der abgeleiteten Korrekturfunktion und kann somit als unabhängiger Standort für die Validierung der Korrektur herangezogen werden. Dabei kann für Hooge gezeigt werden, dass sich eine Verbesserung im RMSE von 0,24 m auf 0,08 m einstellt. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  kann von 0,95 auf 0,99 verbessert werden. Die Unter- respektive Überschätzung der Thw und Tnw kann durch die Anbringung der Korrektur deutlich reduziert werden. Durch die zusätzliche Angabe von Konfidenzbereichen (siehe Abbildung 7) werden verbleibende Unsicherheiten in den simulierten und Bias-korrigierten Wasserständen für den weiteren Prozess berücksichtigt. In Abbildung 7 wird zudem deutlich, dass die Konfidenzbereiche in den höheren bzw. niedrigeren Wasserständen deutlich größer werden, als in den mittleren Bereichen der Zeitreihe.

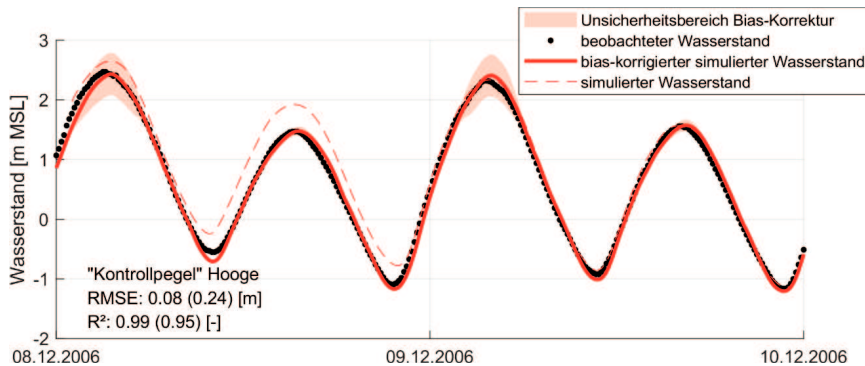


Abbildung 7: „Kontrollpegel“ Hooge vor und nach der Bias-Korrektur zwischen dem 08.12.2006 und dem 10.12.2006.

Die Anwendung der vorgestellten Bias-Korrektur auf die Ergebnisse des HNM kompensiert entsprechend weitestgehend die modelltechnischen Limitationen und wird auf die Gitterpunkte der gesamten Deutschen Bucht angewendet. Für die weitere Verwendung werden dafür aus dem HNM 1.484 Punkte mit einem mittleren Abstand von 1 km entlang der deutschen Küstenlinie exportiert. Diese Punkte beschreiben den Bereich, für den in den folgenden Kapiteln die Wasserstandsvorhersage entwickelt wird. Da der Großteil der Deutschen Bucht während T<sub>nw</sub> trockenfällt, muss allerdings eine Konvention eingeführt werden, die Einschränkungen in der weiteren Verwendung der an den einzelnen Punkten zur Verfügung stehenden simulierten und Bias-korrigierten Wasserstände festlegt. Dafür werden zwei Klassifizierungen (sogenannte „Flags“) definiert, die in Tabelle 2 zusammengestellt sind.

In Abbildung 8 sind die 1.484 exportierten Punkte aus dem HNM dargestellt. Jeder Punkt ist farblich anhand seines zugeordneten Flags eingefärbt (Flag 1: grüne Punkte; Flag 2: orangene Punkte). Der Großteil aller Punkte weist somit Defizite in der Abbildung der Niedrigwasser auf (Flag 2), was in den meisten Fällen auf ein Trockenfallen des Pegels im T<sub>nw</sub> zurückzuführen ist. Für die weitere Verwendung und die Ableitung der Windstau-Modelle entstehen dadurch allerdings keine Einschränkungen. Für die weitere Vorgehensweise wird angenommen, dass die simulierten und Bias-korrigierten Wasserstände qualitativ Naturmessungen entsprechen und dass die nach der Bias-Korrektur verbleibenden Fehler vernachlässigbar klein sind.

Tabelle 2: Übersicht der Klassifizierung der simulierten Zeitreihen nach der Bias-Korrektur.

Flag	Kurzbeschreibung	Erläuterung
1	Gesamte Zeitreihe ist für die Tideanalyse und die Ermittlung des Windstaus geeignet.	Die Simulation entspricht nahezu der Beobachtung aus der Natur. Entsprechend kann die Zeitreihe vollständig für die weiteren Analysen verwendet werden und der Gitterpunkt erhält Flag 1.
2	Zeitreihe ist für die Ermittlung des Windstaus geeignet; die Niedrigwasser unterliegen Unsicherheiten und sind daher nur bedingt für die Tideanalyse geeignet.	Aufgrund der zu grob aufgelösten Bathymetrie im Bereich einiger Gitterpunkte ist das Modell nicht in der Lage, die Niedrigwasser adäquat abzubilden. Dieses Phänomen tritt auf, wenn die Bathymetrie $< -2.5$ m beträgt. Entsprechend werden alle Gitterpunkte, die dieses Kriterium erfüllen, mit Flag 2 versehen und nur Wasserstände $> 0$ m für die weiteren Analysen verwendet.

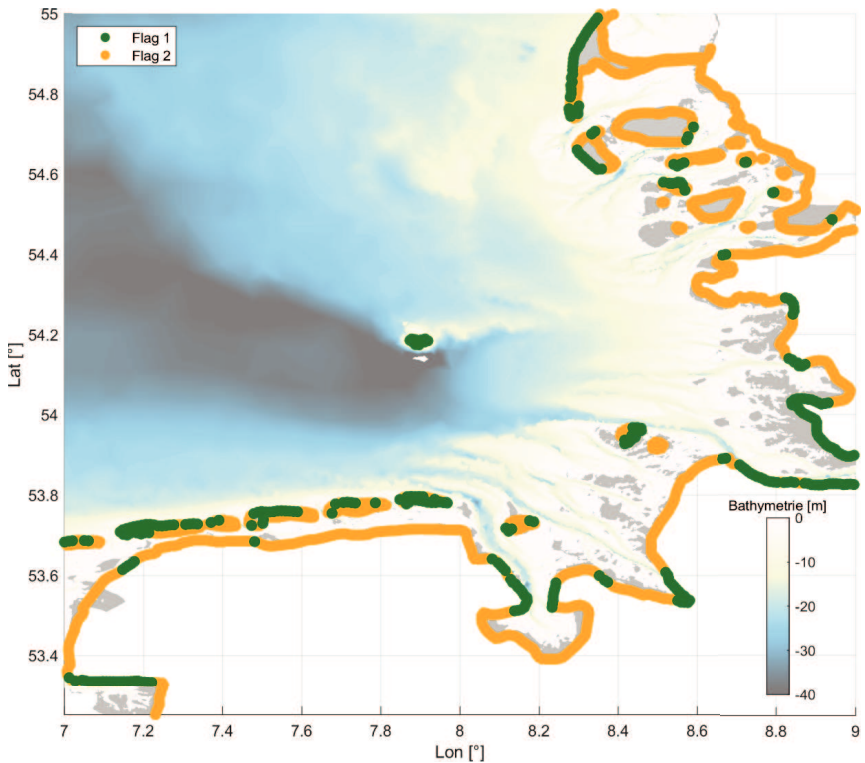


Abbildung 8: Exportierte Küstenlinie aus dem HNM (1.484 Punkte im Abstand von etwa 1 km) mit zugeordneten Flags.

### 3.2 Empirisch-statistische Windstaumodelle

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Entwicklung der empirisch-statistischen Windstaumodelle erläutert. Dies beinhaltet zum einen eine Überprüfung der physikalischen Plausibilität der Prädiktorenauswahl und zum anderen eine statistische Bewertung der Modellperformance für ausgewählte Pegelstandorte (Abbildung 11) sowie für die 1.484 Gitterpunkte entlang der Küstenlinie in der Deutschen Bucht (Abbildung 13).

Das Ergebnis der signifikanten Prädiktorenauswahl mittels der in Kapitel 2.3 beschriebenen schrittweisen multiplen linearen Regression ist für die Pegelstandorte Cuxhaven und List in Abbildung 9 bzw. 10 dargestellt. Die Lage des jeweiligen Pegelstandortes ist als schwarzer Punkt dargestellt. Die signifikanten Prädiktoren der zonalen Windkomponente sind jeweils oben links, die der meridionalen Windkomponente oben rechts und die des atmosphärischen Luftdrucks unten links abgebildet. Der damit einhergehende mittlere Zeitversatz, bis ein Einfluss der Meteorologie im Windstau sichtbar wird, ist unten rechts für die einzelnen Prädiktoren aufgeführt. Die Darstellung der signifikanten Prädiktoren erfolgt über Rechtecke, deren farbliche Abstufung die Häufigkeit der meteorologischen Prädiktoren angibt (Mehrfachauswahl aufgrund verschiedener Zeitlags als auch aufgrund der hier nicht vorgenommenen Trennung in quadratische/kubische Komponenten des Windes möglich). Die blauen Punkte im Hintergrund stellen die betrachteten meteorologischen Gitterpunkte aus dem verwendeten 20CRv2c-Reanalysedatensatz dar.

Die Abbildungen zeigen auf, welche Gitterpunkte in die finalen Regressionsmodelle mit eingeflossen sind, wie viele Prädiktoren von einer einzelnen Lokation ausgewählt wurden und mit welchem Zeitversatz dies geschehen ist. Da die Prädiktorenauswahl auf Basis eines rein statistischen Ansatzes erfolgt, ist eine Überprüfung/Einordnung der physikalischen Plausibilität zwingend erforderlich. Insgesamt verbleiben an beiden Pegelstandorten Cuxhaven und List (Abbildung 9 und 10) jeweils neun von ursprünglich 7.200 Prädiktoren als statistisch signifikante Prädiktoren zur Beschreibung der Abhängigkeit zwischen Windstau und Meteorologie.

Am Pegelstandort Cuxhaven, der sich in der Elbmündung in der südöstlichen Deutschen Bucht befindet, reagiert der Windstau besonders sensitiv auf hohe Windgeschwindigkeiten, die aus nordwestlicher Richtung über der Nordsee entstehen und die Wassermassen in der Deutschen Bucht anstauen. Folglich sind sowohl zonale als auch meridionale Windkomponenten erforderlich, um die zeitliche Entwicklung eines Sturmflutereignisses korrekt abzubilden. Im Zuge der Entwicklung des schrittweisen multiplen linearen Regressionsmodells für Cuxhaven wird eine ausgewogene Anzahl von statistisch signifikanten zonalen und meridionalen Windkomponenten identifiziert (Abbildung 9 oben links/rechts). Die statistisch signifikanten Prädiktoren, die auf der atmosphärischen Luftdruckkomponente basieren, befinden sich alle in benachbarten Gitterzellen über dem Skagerrak (Abbildung 9 unten links). Darüber wird eine der häufigsten Zugbahnen von Stürmen über der Nordsee beschrieben, die normalerweise vom Nordatlantik über den Skagerrak zur zentralen Ostsee wandern und zu einem erhöhten Windstau führen (Jensen und Müller-Navarra 2008).

Der Pegelstandort List liegt im Vergleich zu Cuxhaven weiter nördlich in Nordfriesland und weist eine meridionale Küstenausrichtung auf. Durch die geographische Lage ist der Windstau am Pegel List eher sensitiv gegenüber Sturmereignissen aus westlichen Richtungen. Dies spiegelt sich gut in der Auswahl der finalen Prädiktoren der Windkomponenten



wider (Abbildung 10 oben links). Bezogen auf die Windkomponenten werden nur zonal gerichtete Prädiktoren als statistisch signifikant eingeordnet, wobei alle meridionalen Windkomponenten in der schrittweisen Regression rausfallen.

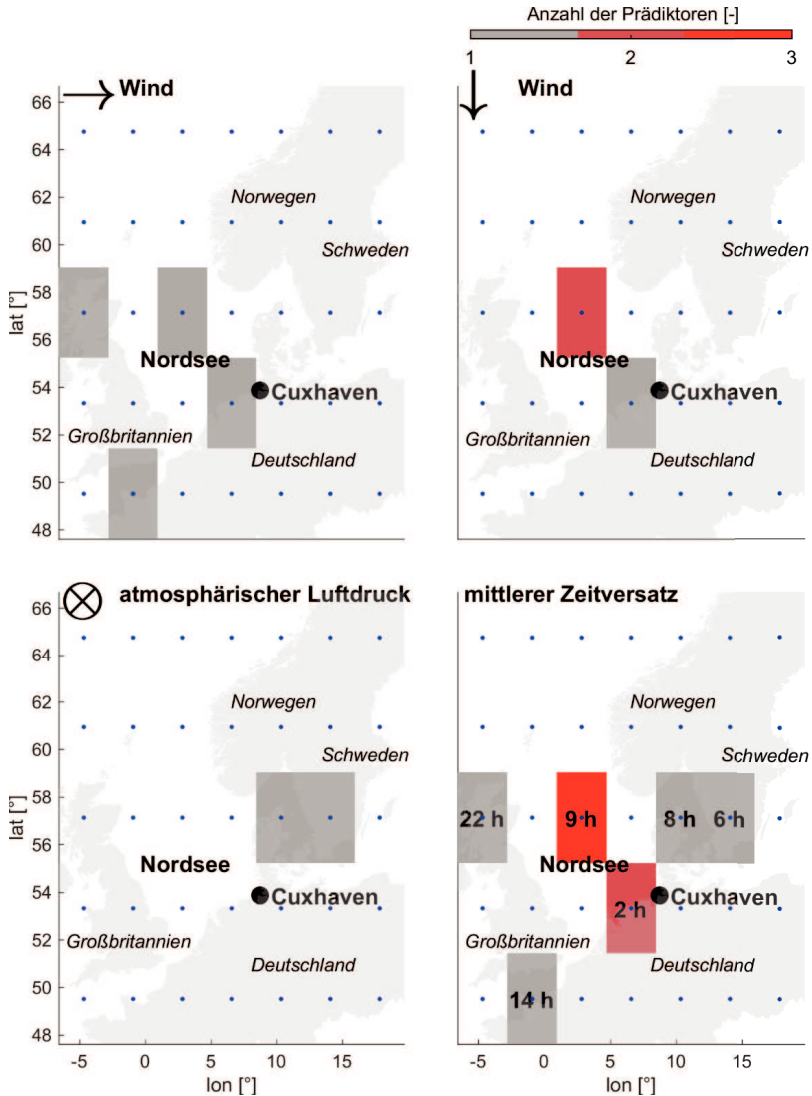


Abbildung 9: Ergebnis der schrittweisen multiplen Regression am Beispiel Cuxhaven.

Für die beiden Pegelstandorte Cuxhaven und List finden sich statistisch signifikante Prädiktoren sowohl in der zentralen Nordsee als auch in der zentralen Deutschen Bucht. Hierüber wird der lokale Einfluss der Windeinwirkung beschrieben, der unmittelbar in der Deutschen Bucht vorliegt und mitunter ohne nennenswerte zeitliche Verzögerung für eine Erhöhung des Windstaus sorgt. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen des schrittweisen Regressionsansatzes aus Streicher et al. (2015) finden sich darüber hinaus statistisch

signifikante Prädiktoren der zonalen Windkomponente über dem Ärmelkanal. Westwinde über dem Ärmelkanal haben demnach an den beiden Pegelstandorten Cuxhaven und List ebenfalls einen Einfluss auf den Windstau in der Deutschen Bucht.

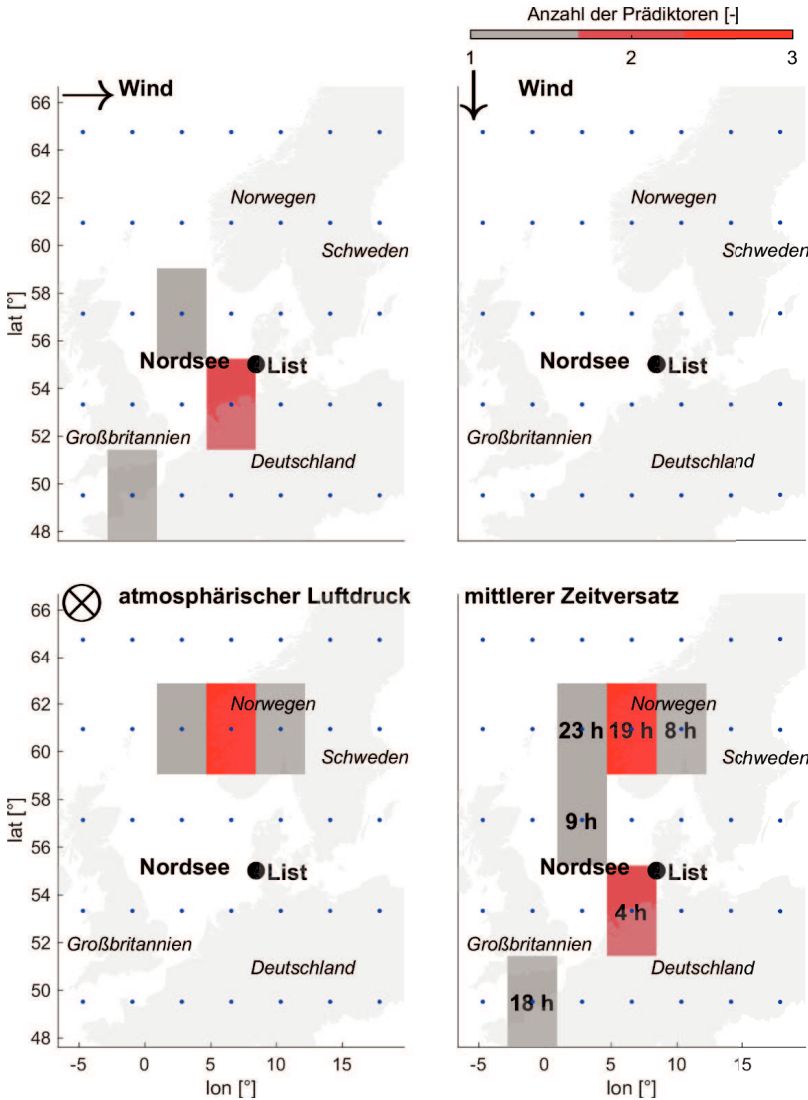


Abbildung 10: Ergebnis der schrittweisen multiplen Regression am Beispiel List.

An beiden Standorten wird mindestens ein statistisch signifikanter Prädiktor auf der Linie zwischen dem nördlichen Großbritannien und dem nördlichen Norwegen gefunden. Diesem Übergangsbereich von Nordatlantik und Nordsee wird der Ursprung von Fernwellen zugeschrieben, die entgegen dem Uhrzeigersinn durch die Nordsee in die Deutsche Bucht einlaufen (Annutsch 1977). Der Einfluss von Fernwellen wurde bisher in bestehenden empirisch-statistischen Modellen über die Vorgabe eines meteorologischen Gitterpunktes in

der nördlichen Nordsee (Jensen et al. 2013) oder der Einbeziehung des Pegels Aberdeen an der schottischen Ostküste als Proxy (Müller-Navarra und Giese 1999) integriert. Somit können sowohl die Relevanz des Einflusses von Fernwellen auf den Windstau in der Deutschen Bucht als auch die physikalische Plausibilität der abgeleiteten Windstaumodelle mit dem schrittweisen Ansatz bestätigt werden. Gleiches gilt für die ermittelte zeitliche Verzögerung, mit der die Meteorologie der nördlichen Nordsee Einfluss auf den Windstau nimmt. Die mittlere Zeitverzögerung von 22 bis 23 Stunden (Abbildung 9 und 10) stimmt mit der in der Literatur beschriebenen Dauer, die eine Fernwelle benötigt um von Schottland in die Deutsche Bucht fortzuschreiten, gut überein (Annutsch 1977). Eine vollständige Auflistung aller Regressionskoeffizienten und p-Werte sind in Tabelle 3 und Tabelle 4 für die betrachteten Pegelstandorte Cuxhaven und List aufgelistet.

Tabelle 3: Signifikante Prädiktoren des empirisch-statistischen Windstaumodells am Pegelstandort Cuxhaven.

j	Prädiktor $g_j$	Regressionskoeffizient $a_j$	p-Wert
1	1	-4,31E-02	< 0,001
2	$f^2 \sin\beta$	-3,40E-03	< 0,001
3	$f^2 \cos\beta$	2,06E-05	< 0,001
4	$f^2 \cos\beta$	1,45E-05	< 0,001
5	$f^2 \cos\beta$	5,46E-05	< 0,001
6	$f^3 \sin\beta$	-2,90E-05	< 0,001
7	$f^3 \sin\beta$	-5,52E-05	< 0,001
8	$f^3 \sin\beta$	-2,34E-05	< 0,001
9	p-mean(p)	-1,69E-04	< 0,001
10	p-mean(p)	1,03E-04	< 0,001

Tabelle 4: Signifikante Prädiktoren des empirisch-statistischen Windstaumodells am Pegelstandort List.

j	Prädiktor $g_j$	Regressionskoeffizient $a_j$	p-Wert
1	1	-4,63E-02	< 0,001
2	$f^2 \sin\beta$	-7,79E-04	< 0,001
3	$f^2 \sin\beta$	-1,74E-03	< 0,001
4	$f^2 \sin\beta$	-1,35E-03	< 0,001
5	$f^3 \sin\beta$	-2,99E-05	< 0,001
6	p-mean(p)	-1,33E-04	< 0,001
7	p-mean(p)	1,53E-03	< 0,001
8	p-mean(p)	-1,62E-03	< 0,001
9	p-mean(p)	2,63E-04	< 0,001
10	p-mean(p)	-1,20E-04	< 0,001

Die Performance der Windstaumodelle an allen betrachteten Pegelstandorten in der Deutschen Bucht ist in Abbildung 11 zusammengefasst. Es wird für jeden Pegelstandort das empirisch-statistische Windstaumodell auf Basis der Beobachtungsdaten zwischen 2000 und 2014 entwickelt und der Windstau für die identische Periode rekonstruiert. Die resultierenden Effizienzkriterien sind jeweils in den Ellipsen angegeben (links: RMSE; rechts:  $R^2$ ) und farblich abgestuft dargestellt. Die durch die empirisch-statistischen

Windstaumodelle beschriebene Variabilität variiert zwischen 73 % ( $R^2 = 0,73$ ) am Pegel Wilhelmshaven und 81 % ( $R^2 = 0,81$ ) am Pegel List respektive Helgoland. Im Mittel über alle Pegelstandorte erklären die Windstaumodelle rund 78 % ( $R^2 = 0,78 \pm 0,02$  (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung)) der Variabilität. Die mittlere quadratische Abweichung erreicht im Mittel über alle Pegelstandorte einen Wert von  $RMSE = 16 \pm 3$  cm (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung). Die geringste Abweichung findet sich am Pegel Helgoland ( $RMSE = 13$  cm). Die größten Differenzen zwischen beobachtetem und rekonstruiertem Windstau weist der Pegel Husum in Schleswig-Holstein mit einem  $RMSE = 20$  cm auf.

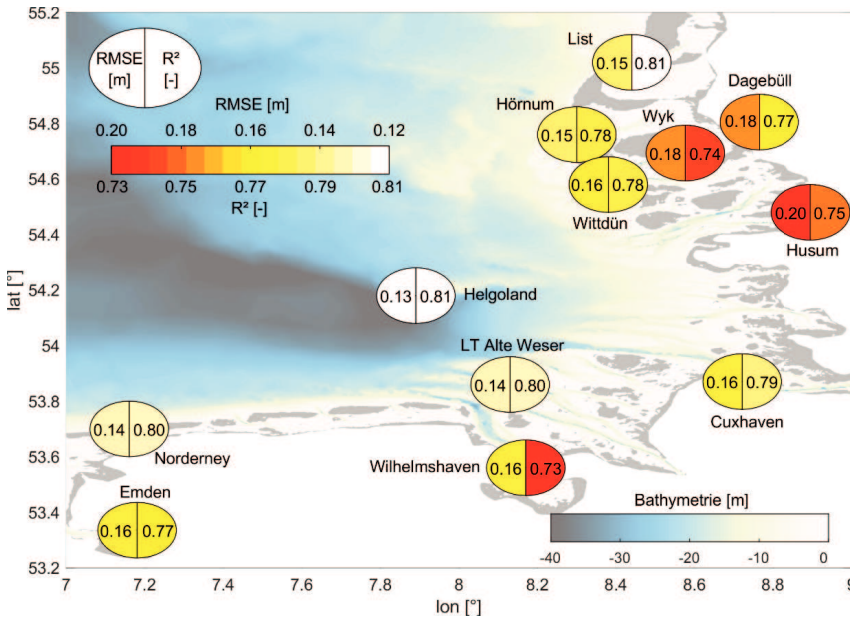


Abbildung 11: Effizienzkriterien der empirisch-statistischen Windstaumodelle (ohne Berücksichtigung der Interaktion zwischen Tide und Windstau) an den Pegelstandorten in der Deutschen Bucht.

Generell zeigt sich in der beschriebenen Variabilität und der mittleren quadratischen Abweichung zwischen beobachtetem und rekonstruiertem Windstau, dass die wesentlichen Eigenschaften des Windstaus durch die empirisch-statistischen Windstaumodelle gut erfasst werden. Es fällt jedoch auf, dass die Modellgüte an Pegeln mit besonders großen Flachwassereffekten in Buchten relativ zu vorgelagerten Pegeln tendenziell etwas abnimmt. Am Pegel Helgoland, der im vorgelagerten Tiefwasserbereich der Deutschen Bucht liegt, ist beispielsweise die beste Beschreibung des Windstaus mit den empirisch-statistischen Modellen möglich ( $R^2 = 0,81$ ;  $RMSE = 13$  cm). In den deutlich flacheren Bereichen im Wattenmeer nahe der Festlandküste verringert sich die Modellperformance etwas (Wyk:  $R^2 = 0,74$ ;  $RMSE = 18$  cm, Dagebüll:  $R^2 = 0,77$ ;  $RMSE = 18$  cm, Husum:  $R^2 = 0,75$ ;  $RMSE = 20$  cm). Diese Beobachtung bestätigt sich auch für Ästuarpegel (z. B. Wilhelmshaven:  $R^2 = 0,73$ ;  $RMSE = 16$  cm). Es liegt der Schluss nahe, dass stark lokal begrenzte Effekte und nichtlineare Interaktionen zur Beschreibung des Windstaus in den empirisch-statistischen Modellen nicht adäquat erfasst werden. Deshalb wird im Folgenden das Ergebnis der Weiterentwicklung der empirisch-statistischen Windstaumodelle gegenüber

bisherigen Ansätzen hinsichtlich der Berücksichtigung der Interaktion zwischen Tide und Windstau erläutert.

Um die erheblichen nichtlinearen Interaktionen zwischen Tide und Windstau in der flachen Deutschen Bucht zu erfassen, werden die empirisch-statistischen Windstauamodelle in einem nächsten Schritt für verschiedene Tidephasen abgeleitet. In Abbildung 12 ist beispielhaft die Verbesserung anhand des RMSE für alle Pegelstandorte gezeigt. Die Resultate der beschriebenen Variabilität  $R^2$  verhalten sich analog. Die Perzentile in Abbildung 12 auf der Abszisse sind logarithmiert, um insbesondere die hohen und niedrigen Perzentile analysieren zu können. In rot sind jeweils die mittlere quadratische Abweichungen RMSE der empirisch-statistischen Windstauamodelle für die jeweiligen Perzentile ohne und in schwarz unter Berücksichtigung der Tide-Windstau Interaktion dargestellt. Zusätzlich sind der RMSE und das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  über die gesamten Zeitreihen angegeben. Die Klammerwerte beschreiben dabei die Effizienzkriterien ohne Berücksichtigung der Tide-Windstau Interaktion. Es kann durch die Ergebnisse bestätigt werden, dass die Interaktion zwischen Tide und Windstau in den niedrigen bzw. hohen Perzentilen der astronomischen Zeitreihen eine übergeordnete Rolle spielt. Eine Verbesserung in den mittleren Perzentilbereichen kann einheitlich für alle Pegelstandorte nicht nachgewiesen werden. Im Mittel stellt sich über den gesamten betrachteten Zeitraum eine (nicht signifikante) Verbesserung im  $R^2$  von 0,025 und im RMSE von 0,9 cm gegenüber dem Modell ohne Berücksichtigung der Tide-Windstau Interaktion ein. Insgesamt sind die Verbesserungen in den niedrigen Perzentilen stärker ausgeprägt als in den hohen Perzentilen. Bei einem geringeren Basiswasserstand (niedrige Perzentile) dominieren lokale Effekte, wie die verminderte bodennahe Rückströmung. Auch der Einfluss der Windeinwirkung auf eine geringere Wassersäule wird bei  $T_{nw}$  verstärkt und erklärt die unterschiedliche Verbesserung im Vergleich zwischen niedrigen und hohen Perzentilen.

Am Pegel Husum wird die größte Verbesserung aller Pegelstandorte im RMSE von  $> 10$  cm in den niedrigen Perzentilen ( $< 5\%$ ) erreicht. Der Pegelstandort Wyk weist hingegen die geringste Verbesserung im RMSE von  $< 5$  cm in den niedrigen Perzentilen ( $< 5\%$ ) auf. Korrelationen zwischen der geographischen Lage eines Pegelstandortes und den Verbesserungen in den einzelnen Perzentilen sind an dieser Stelle weniger stark ausgeprägt als in Abbildung 11. Am Pegel Helgoland fallen die perzentilbasierten Verbesserungen im Verhältnis etwas geringer aus, was mit weniger stark ausgeprägten lokalen Effekten in Verbindung gebracht werden kann. An den Pegelstandorten Wyk, Dagebüll, Husum und Wilhelmshaven zeigt sich jedoch kein einheitliches Bild. Einzig am Pegel Husum wird durch die Berücksichtigung der Interaktion zwischen Tide und Windstau eine überdurchschnittliche Verbesserung in den niedrigen und hohen Perzentilen erreicht. Die Verbesserungen in Wyk, Dagebüll und Wilhelmshaven liegen in einer identischen Größenordnung wie bei den übrigen Pegelstandorten der Deutschen Bucht. Der Vergleich des empirisch-statistischen Windstaumodells am Pegel Cuxhaven ( $R^2 = 0,82$ ; RMSE = 15 cm) mit Jensen et al. (2013) zeigt nahezu identische Ergebnisse ( $R^2 = 0,82$ ; RMSE = 15,9 cm). In Jensen et al. (2013) wurde ebenfalls die Interaktion zwischen Tide und Windstau berücksichtigt. Die theoretischen Überlegungen und Auswertungen zur Tide-Windstau Interaktion werden durch die hier gezeigten Ergebnisse bestätigt. Durch die vorgestellte Erweiterung der empirisch-statistischen Windstauamodelle wird eine Möglichkeit geliefert, diese nichtlineare Interaktion in der Praxis zu berücksichtigen.

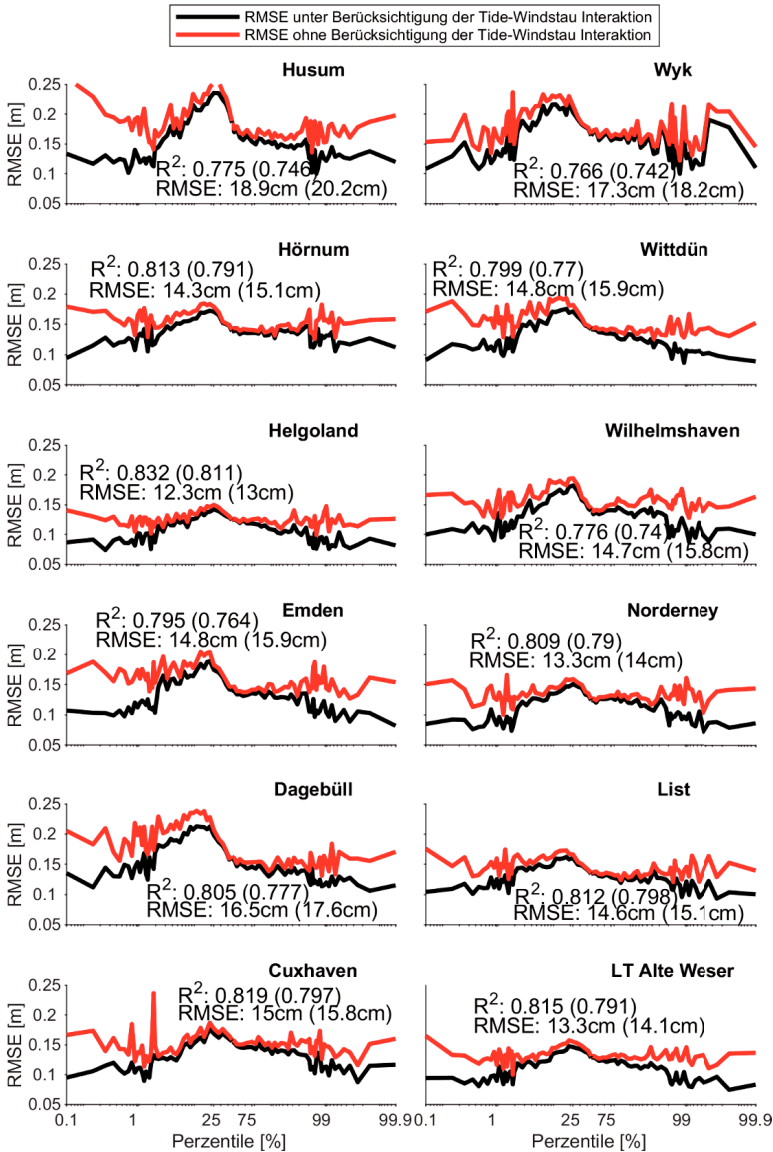


Abbildung 12: Optimierung der Windstaumodelle durch Berücksichtigung der Interaktion zwischen Wasserstand und Windstau an den Pegelstandorten in der Deutschen Bucht.

Die beschriebene Vorgehensweise kann auf jede beliebige Zeitreihe des HNM-Outputs angewendet werden. Hierfür werden die 1.484 Gitterpunkte entlang der Küstenlinie verwendet. Das Resultat unter Berücksichtigung der Tide-Windstau Interaktion ist in Abbildung 13 anhand des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  dargestellt. Die Absolutwerte der erklärten Variabilität an den einzelnen Gitterpunkten variieren von 78 % ( $R^2 = 0,78$ ) bis 83 % ( $R^2 = 0,83$ ) und spiegeln damit die Ergebnisse an den einzelnen Pegelstandorten wider (vergleiche Abbildung 11). Die mittlere quadratische Abweichung variiert zwischen

RMSE = 8 cm und RMSE = 20 cm und bestätigt ebenfalls die ermittelte Modellperformance an den Pegelstandorten in Abbildung 11. Das mittlere Bestimmtheitsmaß erreicht über alle 1.484 Punkte entlang der Küstenlinie (einschließlich der Inseln und Halligen) einen Wert von  $R^2 = 0,81$  (RMSE = 14 cm).

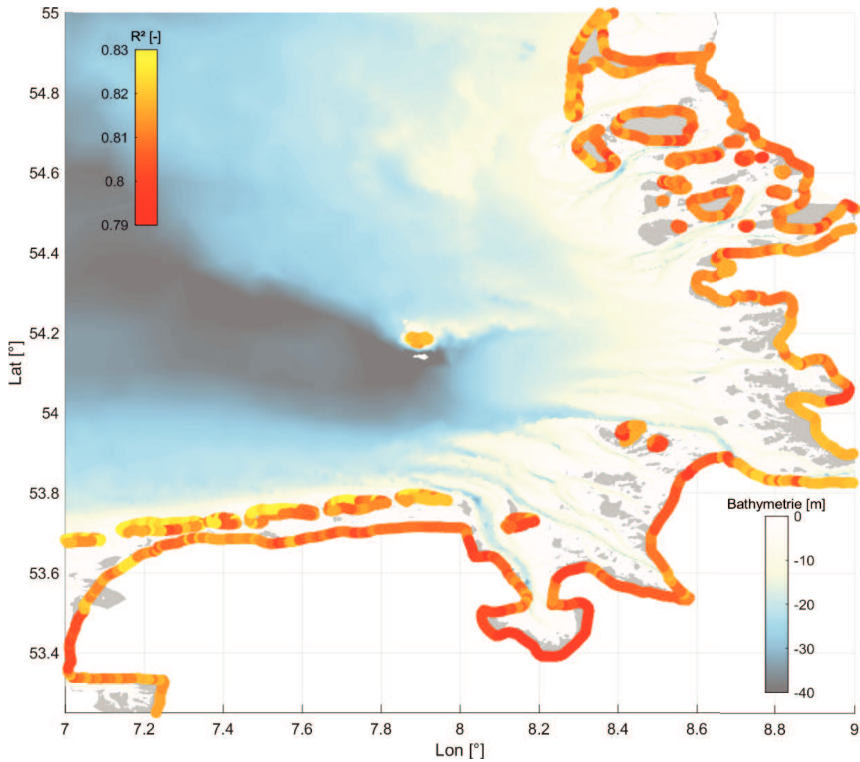


Abbildung 13: Exportierte Küstenlinie aus dem HNM (1.484 Punkte im Abstand von etwa 1 km) mit zugeordnetem Bestimmtheitsmaß  $R^2$ .

Die Modellperformance variiert innerhalb der Deutschen Bucht und zeigt maßgebliche Unterschiede hinsichtlich der geographischen Lage der 1.484 Gitterpunkte. An den Nordküsten der ostfriesischen Inseln wird die höchste Modellperformance anhand des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  erreicht ( $R^2 > 0,8$ ). Identische Größenordnungen werden um Helgoland erreicht, das außerhalb der flachen Deutschen Bucht gelegen ist. Auch das Mündungsgebiet der Elbe zeigt hohe Werte im  $R^2$ . Hier sind primär Winde aus nordwestlicher Richtung für einen Anstieg des Windstaus verantwortlich. Dieser kann entsprechend modelltechnisch erfasst werden. Im Wattenmeer entlang der nordfriesischen Küstenlinie nehmen die Werte des  $R^2$  leicht ab, wobei diese immer noch statistisch signifikant bleiben. Hier zeigen sich deutlich der Einfluss der (nichtlinearen) Effekte und die Flachwassercharakteristik. Es dominieren stark lokale Effekte die Ausbildung des exakten Windstaus und lassen sich modelltechnisch nur bedingt erfassen. Besonders ausgeprägt bildet sich dieser Effekt im Mündungsgebiet der Weser und Ems aus. Im Jadebusen wird die geringste Modellperformance in der gesamten Deutschen Bucht erreicht ( $R^2 < 0,8$ ).

Zusammenfassend liegt die Modellperformance der empirisch-statistischen Modelle in der gleichen Größenordnung wie an den einzelnen Pegelstandorten. Zudem wird für alle 1.484 Gitterpunkte innerhalb der Deutschen Bucht die Abhängigkeit zwischen Modellperformance und geographischer Lage in Bezug auf die Bathymetrie bestätigt. Die Auswahl der Pegel zeigt ebenfalls diese Abhängigkeiten und bestätigt somit die Repräsentativität der ausgewählten Standorte.

#### 4 Wasserstandsvorhersage an der gesamten deutschen Küstenlinie

Die entwickelte Methodik zur Erweiterung der bestehenden operationellen Modelle zur Wasserstandsvorhersage an der deutschen Küste von einer punktuellen Betrachtung auf die gesamte Küstenlinie setzt sich zusammen aus der Vorhersage der Gezeiten sowie des Windstaus. Das HNM liefert hierfür die Datengrundlage des Gesamtwasserstandes entlang der Küstenlinie der Deutschen Bucht für die Vergangenheit zur Ableitung der erforderlichen Koeffizienten für den Vorhersagebetrieb. Mit der HDdU wird aus den Gesamtwasserständen der Gezeiten- und der Windstauanteil separiert. Die Vorhersage des Gezeitenanteils wird ebenfalls mit der HDdU realisiert, während für den Windstau die empirisch-statistischen Windstauamodelle herangezogen werden. Im Vorhersagemodus wird der Windstau entsprechend an den 1.484 Punkten mit der prognostizierten astronomischen Tide am selben Punkt kombiniert, um letztlich den absoluten Wasserstand zu erhalten. Die Verwendung der empirisch-statistischen Modellen ermöglicht darüber hinaus die Quantifizierung der in den Vorhersagen enthaltenen Unsicherheiten in Verbindung mit den Regressionskoeffizienten (z. B. 95%-Konfidenzintervall).

Für die folgenden Analysen werden sowohl die bisher verwendeten 20CRv2c-Reanalysefelder als auch die tatsächlichen meteorologischen Vorhersagen verwendet, die vom DWD zur Verfügung gestellt wurden. Für den Vorhersagemodus ergibt sich dieses Erfordernis, da die meteorologischen Reanalysen nur für die Vergangenheit zur Verfügung stehen und die Vorhersagen des DWD im operationellen Wasserstandsvorhersagedienst des BSH angewendet werden (Müller-Navarra 2009). Hierbei ist es wichtig zu erwähnen, dass ein operationeller Betrieb und ein Vergleich der Modelle auf Basis der Reanalysedaten auch die Ableitung von separaten, auf Basis von Vorhersagedaten abgeleiteten, empirisch-statistischen Windstauomodellen erfordert. Dies ist darin begründet, dass das DWD-Modell eine wesentlich höhere zeitliche und räumliche Auflösung als die Reanalysedaten besitzt und sich somit leicht unterschiedliche Prädiktoren ergeben können. Es lagen allerdings keine langzeitlichen Vorhersagen des DWD aus der Vergangenheit vor, weshalb hier vereinfachend die ereignisbasierten Vorhersagen des DWD auf die bestehenden Modelle angewendet werden. Die horizontalen und vertikalen Windkomponenten sowie die atmosphärischen Luftdruckfelder der DWD-Vorhersage haben eine stündliche Auflösung, die den gesamten numerischen Modellbereich abdeckt. Die meteorologischen Daten stammen aus dem Modell „COSMO-EU“ (seit 2015 „ICON-EU“) und haben eine räumliche Auflösung von etwa  $0,07^\circ$  Richtung der Längengrade und  $0,05^\circ$  Richtung der Breitengrade.

Um die empirisch-statistischen Windstauomodellen im Vorhersagemodus für ein Extremereignis zu testen, wird in Kapitel 4.1 der gut dokumentierte Orkan „Xaver“, der Anfang Dezember 2013 über das nördliche Europa zog, untersucht. Die hohen Windgeschwindigkeiten sorgten dafür, dass in Teilen der Deutschen Bucht (vor allem in Niedersachsen) die



bisherigen Rekordwasserstände überschritten wurden (Jensen et al. 2015). Derartige Ereignisse sind daher von großer Bedeutung, wenn es um die Vorhersage von Wasserständen und entsprechend um die frühzeitige Verhinderung von Schäden sowie um Maßnahmen des Katastrophenmanagements geht. In Kapitel 4.2 wird schließlich die Erweiterung der Wasserstandvorhersage von der punktuellen Betrachtung auf die gesamte Küstenlinie anhand eines operationellen Testbetriebs verdeutlicht.

#### 4.1 Orkan „Xaver“

Im Folgenden wird die Vorhersagegüte der Windstaumodelle exemplarisch für den Pegelstandort Cuxhaven erläutert. Für den Vergleich mit weiteren Pegelstandorten wird an dieser Stelle auf Niehüser et al. (2018) verwiesen. Die Regressionskoeffizienten werden auf Basis der Reanalysefelder zunächst für die Trainingsperiode zwischen 2000 und 2012 abgeleitet, um dann eine Vorhersage auf Basis des unabhängigen Zeitraums von 2013 bis 2014 zu erstellen, welcher auch den Orkan „Xaver“ beinhaltet. Für die Periode zwischen 2013 und 2014 ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,82$  und eine mittlere quadratische Abweichung von  $RMSE = 16$  cm (jeweils unter Berücksichtigung der Tide-Windstau Interaktion). Diese Werte sind nahezu identisch zu den Werten, die sich über den gesamten Zeitraum von 2000 bis 2014 (siehe Kapitel 3.2) bzw. die Trainingsperiode von 2000 bis 2012 ergeben.

In Abbildung 14 sind die Ergebnisse der Rekonstruktion vom Orkan „Xaver“ am Pegel Cuxhaven auf Basis der Reanalysedaten und der DWD-Vorhersagen gegenübergestellt. In schwarz gepunktet ist die beobachtete Windstaukurve abgebildet. Die graue gestrichelte Linie zeigt die astronomische Komponente. Der rekonstruierte bzw. vorhergesagte Windstau ist als rote Linie (Reanalysedaten) dargestellt. Die blaue Linie bildet den rekonstruierten bzw. vorhergesagten Windstau bei Verwendung der DWD-Vorhersage ab. Die statistischen Unsicherheiten (95%-Konfidenzintervall) sind als rote respektive blaue Schattierung dargestellt.

Es wird deutlich, dass das empirisch-statistische Windstaumodell den Verlauf der Sturmflut verhältnismäßig gut abbilden kann, wenn als Antrieb die gleiche Datengrundlage genutzt wird, wie für die Ableitung der Regressionskoeffizienten. Für die Periode der Sturmflut wird ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,90$  erreicht; der mittlere quadratische Fehler beträgt  $RMSE = 32$  cm. Die Unterschiede hinsichtlich der Modellperformance durch die Berücksichtigung der Tide-Windstau Interaktion sind für diese kurze Periode weniger Tage nicht signifikant. Der maximale Windstau kann zwar nicht vollständig vom empirisch-statistischen Windstaumodell abgebildet werden, allerdings stellt sich hier die Frage, ob das Sturmflutereignis in der meteorologischen Reanalyse detailliert genug abgebildet ist.

Im Gegensatz dazu resultiert aus der Verwendung der DWD-Vorhersage als Antrieb eine deutliche Unterschätzung des maximalen Windstaus bzw. des gesamten Sturmflutereignisses. Das Bestimmtheitsmaß ist hier  $R^2 = 0,85$  und somit etwas geringer als mit den Reanalysedaten. Der mittlere quadratische Fehler von  $RMSE = 59$  cm ist annähernd doppelt so groß, wie bei Verwendung der meteorologischen Reanalyse. Die massiven Abweichungen können über den Unterschied der räumlichen als auch zeitlichen Auflösung der verwendeten meteorologischen Datensätze erklärt werden. Dafür wurden in Niehüser et al. (2018) die meteorologischen Felder aus den Reanalysedaten und den DWD-Vorhersagen

gegenübergestellt. Die Abweichungen im Luftdruck bewegten sich in einer Größenordnung von  $\pm 1$  hPa im Maximum. Die hieraus resultierenden Differenzen sind daher nicht verantwortlich für die Abweichungen in der Windstau-Vorhersage. Der Vergleich der effektiven Windrichtungen hat jedoch gezeigt, dass die Westwinde in den Reanalysedaten stärker ausgeprägt sind als in der DWD-Vorhersage. Diese Abweichungen können bereits für die Unterschätzung des Windstaus verantwortlich sein. Wie bereits erwähnt, können die beobachteten Differenzen auch der Tatsache geschuldet sein, dass die Regressionskoeffizienten in beiden Experimenten auf Basis der Reanalysedaten und nicht auf Basis der DWD-Daten selbst abgeleitet wurden. Dies sollte für einen operationellen Betrieb unbedingt geprüft werden. Darüber hinaus gestaltet es sich schwierig, die Performance der Vorhersage anhand eines einzelnen Ereignisses festzumachen. Deshalb werden in Zukunft weitere Vorhersagen an unterschiedlichen Pegelstandorten mit Beobachtungen validiert, um die Modellgüte besser quantifizieren zu können und Optimierungen hinsichtlich der Koeffizientensätze der meteorologischen Prädiktoren vorzunehmen.

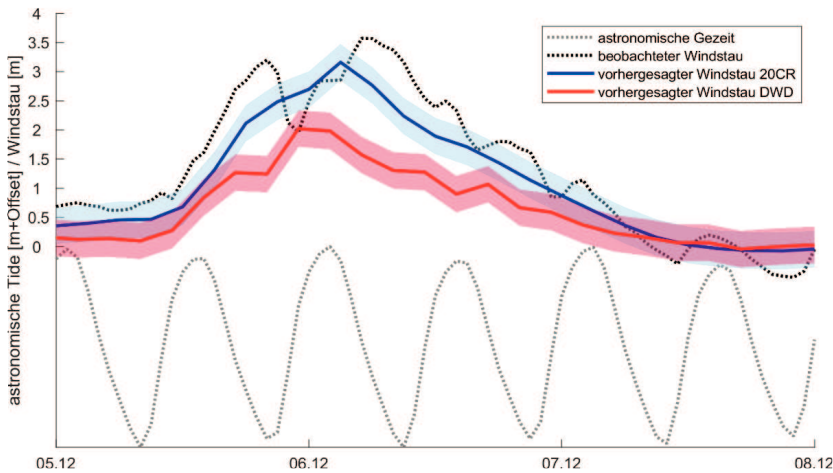


Abbildung 14: Vergleich der Rekonstruktion des Orkans „Xaver“ am Pegel Cuxhaven mit Reanalysedaten und DWD-Vorhersagen.

## 4.2 Operationeller Testbetrieb

Im Folgenden ist in Abbildung 15 ein Beispiel der Wasserstandsvorhersage entlang der Küstenlinie mit allen ermittelten Komponenten dargestellt. Diese Darstellung fasst den Mehrwert dieses Beitrags (Erweiterung der Wasserstandsvorhersage von punktueller Betrachtung auf die gesamte Küstenlinie (einschließlich Inseln und Halligen)) zusammen.

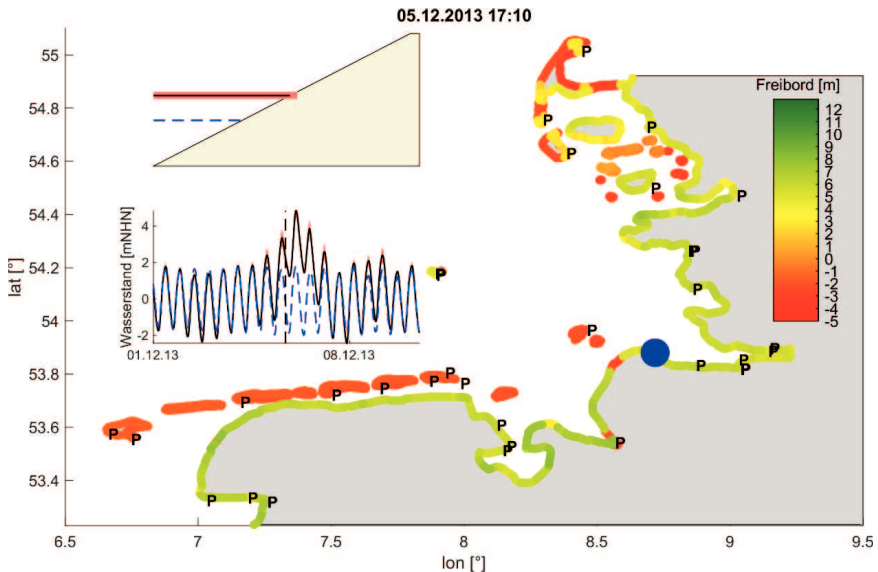


Abbildung 15: Beispielhafte Darstellung eines Zeitschritts der Wasserstandsvorhersage entlang der gesamten deutschen Küstenlinie (einschließlich der Inseln und Halligen).

Die Überführung der empirisch-statistischen Windstaumodelle in den operationellen Testbetrieb erfolgt auf einem zeitgesteuerten Server am Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu). In einem halbstündigen Zyklus werden die erforderlichen Daten vom Server des DWD ([opendata.dwd.de](http://opendata.dwd.de)) auf Aktualität überprüft und heruntergeladen. Es erfolgen automatisch unterschiedliche Verarbeitungsschritte, die beispielsweise die räumliche Auflösung auf die erforderliche Ausdehnung anpassen. Schließlich werden die meteorologischen Datensätze gespeichert, um zukünftig Optimierungen der Regressionskoeffizienten und der meteorologischen Prädiktoren vorzunehmen und etwaige Defizite in der Vorhersage (siehe Kapitel 4.1) zu minimieren.

Auf Basis der Meteorologie wird anschließend die Windstaukomponente anhand der erstellten empirisch-statistischen Windstaumodelle an jedem der 1.484 Gitterpunkte bestimmt. Darüber hinaus wird die astronomische Komponente für den zugrundeliegenden Vorhersagezeitraum anhand der HDdU (Müller-Navarra 2013) abgeschätzt. Die Gesamtwasserstände an jedem Gitterpunkt werden aus der Kombination aus Windstau und Astronomie errechnet. Zusätzlich erfolgt die Ermittlung der statistischen Unsicherheit aus den Regressionsmodellen.

Anhand von Abbildung 15 kann gezeigt werden, dass die Methodik und die Kombination aus HNM und empirisch-statistischer Regressionsansätze für den vorliegenden Anwendungsfall geeignet sind. Oben links wird jeweils ein schematischer Deich mit zugehörigem Gesamtwasserstand (schwarz mit Unsicherheitsband) sowie der astronomischen Komponente (blau gestrichelt) des aktuellen Zeitschritts dargestellt. Wenn vorhanden, wird zusätzlich die aktuell vorhandene beobachtete Zeitreihe des ausgewählten Pegels ([pegelonline.de](http://pegelonline.de)) ausgegeben. Darunter ist in gleicher Farbgebung der gesamte Vorhersagehorizont als Übersicht gezeigt. Im verbleibenden Teil der Abbildung 15 sind die Küstenlinie der Deutschen Bucht sowie die 1.484 Gitterpunkte zur Vorhersage der Wasserstände abgebildet. Der jeweils betrachtete Punkt, für den die Detailabbildungen erstellt werden, ist als

blauer Punkt markiert (in dem Fall Cuxhaven). Die Punkte, die mit „P“ eingetragen sind, stellen die Pegelstandorte in der Deutschen Bucht dar, für die Beobachtungsdaten zur Validierung verfügbar sind ([pegelonline.de](http://pegelonline.de)). Um die Aussagekraft der Vorhersage zu erhöhen, orientiert sich die Einfärbung der Gitterpunkte an der Küstenlinie nicht an den Wasserständen, sondern stellt den Freibord (Wasserstand minus Deichhöhe) dar. Hierüber wird impliziert die Information vermittelt, ob ein Wasserstand für eine Region bedrohlich wird oder werden kann. Die zugehörigen Informationen zur Deichlinie/-höhe wurden vom LKN-SH (LKN-SH 2012) bzw. NLWKN (NLWKN 2007) zur Verfügung gestellt. Bereiche ohne derartige Informationen, wurden mit Geländehöhe versehen (z. B. Ostfriesische Inseln), was den geringen Freibord in entsprechenden Bereichen erklärt. Hier besteht zukünftig weiterer Forschungsbedarf, Bereiche ohne Küstenschutz bzw. Dünen etc. in die Darstellung adäquat mit einzubeziehen.

In Zusammenarbeit mit dem Geodätischen Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme (gia) und der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) konnte darüber hinaus erfolgreich eine automatische Übertragung der generierten Vorhersage-Datensätze in ein GeoPortal und die Marine Dateninfrastruktur Deutschland (MDI-DE) realisiert werden. Für weitere Details wird an dieser Stelle auf Herle et al. (2018) verwiesen. Über das GeoPortal werden zudem die Wasserstandsvorhersagen als Basis zur Vorhersage des Seegangs bereitgestellt (siehe Dreier und Fröhle 2018). Eine Übersicht des entwickelten sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems für die Küstenlinie (beispielhaft für See- deiche) ist in Becker et al. (2018) gegeben.

## 5 Fazit und weiterer Forschungsbedarf

Das übergeordnete Ziel dieses Beitrages war die Erweiterung der existierenden operativen Wasserstandsvorhersage in Deutschland von einer punktuellen Betrachtung (spezi- fische Pegelstandorte) auf die gesamte deutsche Küstenlinie (einschließlich Inseln und Hal- ligen). Es konnte erfolgreich eine Methodik entwickelt werden, die auf der Kombination eines hydrodynamisch-numerischen Modells mit empirisch-statistischen Regressions- ansätzen basiert. Damit wurde zum ersten Mal eine Modellkette erzeugt, die sowohl räum- lich als auch zeitlich hochaufgelöste Wasserstandsvorhersagen (Punktabstand  $\sim 1$  km, Stun- denwerte) für die Deutsche Bucht liefert. Es konnte weiterhin nachgewiesen werden, dass die Modellgüte der Vorhersage auch in unbepegelten Gebieten in einer ähnlichen Größen- ordnung wie an den Stützstellen der Messungen liegt.

Die aktuelle Modellkette zur Wasserstandsvorhersage am BSH erlaubt derzeit lediglich Vorhersagen an einzelnen Pegelstandorten, da zwischen einzelnen Stationen keine Infor- mationen über die Gezeiten existieren. Um diesen Missstand zu beheben, wurde zunächst ein zweidimensionales, hydrodynamisch-numerisches Modell der gesamten Nordsee er- stellt, welches die Aufgabe hat, realistische Wasserstände entlang der gesamten Küstenlinie zu simulieren. Ein besonderer Fokus beim Modellaufbau lag auf der robusten und hoch- auflösenden Abbildung von Wasserständen in Flachwasserbereichen. Dafür wurde ein Re- chengitter erzeugt, das der speziellen Flachwassercharakteristik, vor allem nahe der Küste, Rechnung trägt. Verbleibende Diskrepanzen zwischen Modellergebnissen und Beobach- tungen aus der Natur wurden zudem über eine regionale flächige Bias-Korrektur eliminiert, um so eine Datenbasis auch in unbepegelten Gebieten zu erzeugen.

Die simulierten und Bias-korrigierten Wasserstände stellen die Basis für die Separierung von Gezeitenanteil und Windstau dar. Dafür wurde die „Harmonische Darstellung der Ungleichheiten“ nach Müller-Navarra (2013) verwendet. Das Verfahren ermöglicht Tideanalysen für einzelne Bereiche der Tidekurve, wodurch auch partiell (bei Ebbe) trockenfallende Wattflächen (stellen einen großen Teil des Küstenvorfeldes dar), mit in die Tideanalyse einbezogen werden können. Darüber hinaus wurde dieser Ansatz speziell für Gezeitenvorhersagen in flachen Schelfgebieten wie der Deutschen Bucht, in der die Tidekurven durch starke Deformationen gekennzeichnet sind und somit nur unzureichend über klassische harmonische Analysen beschrieben werden können, entwickelt.

Für die robuste Vorhersage des Windstaus wurden empirisch-statistische Modelle auf Basis von multiplen linearen Regressionsbeziehungen (schrittweise Regression) abgeleitet. Der Windstau fungiert darin als die zu erklärende Variable (Regressand), während meteorologische Parameter (Wind- und Luftdruckfelder, die in der Praxis aus Wettervorhersagen zur Verfügung stehen) als Prädiktoren herangezogen wurden. Empirisch-statistische Windstauamodelle stellen auch heute noch einen wichtigen Bestandteil der Wasserstandsvorhersage in Deutschland dar. Durch die Verwendung des separierten Windstaus aus den simulierten und bias-korrigierten Wasserständen, konnten die empirisch-statistischen Windstauamodelle auf die gesamte deutsche Küstenlinie erweitert werden. Eine zusätzliche wesentliche Weiterentwicklung des hier vorgestellten Ansatzes stellte die Berücksichtigung der Tide-Windstau Interaktion in der Deutschen Bucht im Rahmen der empirisch-statistischen Modellentwicklung dar. Hierfür wurden die empirisch-statistischen Windstauamodelle in Abhängigkeit der astronomischen Tidekurve abgeleitet. Die modellierten Windstauvorhersagen wurden anhand unabhängiger Beobachtungsdaten validiert. Insbesondere für die niedrigen und hohen Perzentile der astronomischen Tidekurve konnten hierdurch deutliche Verbesserungen der Modellgüte erzielt werden.

Anhand eines Sturmflutereignisses (Orkan „Xaver“ im Dezember, 2013) wurde das Verfahren praxisnah angewendet und anschließend in einen operationellen Testbetrieb integriert. Für eine vollständige Integration der Methodik in einen operationellen Betrieb (an entsprechenden Landes- oder Bundesbehörden) sind allerdings weitere Arbeitsschritte erforderlich, die anhand der gesammelten Erfahrungen während der bisherigen Bearbeitung deutlich wurden.

So ist es für eine robuste Vorhersage des Windstaus in der Deutschen Bucht mit empirisch-statistischen Regressionsansätzen zwingend erforderlich, die Regressionskoeffizienten der Prädiktoren anhand der Datengrundlage abzuleiten, die schließlich auch im Vorhersagemodus verwendet wird. Am Beispiel der Vorhersage des Sturmflutereignisses „Xaver“ vom 06.12.2013 wurde diese Tatsache verdeutlicht. Der Vergleich zwischen dem vorhergesagten und dem beobachteten Windstau zeigt eine verhältnismäßig gute Übereinstimmung, wenn als Antrieb die gleiche Datengrundlage (Reanalysedaten) genutzt wird, wie für die Ableitung der Regressionskoeffizienten. Die Differenzen zwischen dem vorhergesagten und dem beobachteten Windstau verdoppeln sich jedoch nahezu, wenn als Modellantrieb die DWD-Vorhersagen verwendet werden, die nicht für die Ableitung der Regressionskoeffizienten genutzt wurden. Die Begründung liefert die wesentlich höhere räumliche als auch zeitliche Auflösung der meteorologischen Vorhersagen des DWD. Anhand der im Rahmen des operationellen Testbetriebs gespeicherten atmosphärischen Felder der DWD-Vorhersagen sollen zukünftig Optimierungen der abgeleiteten Regressionskoeffizienten vorgenommen werden. Hierfür wird allerdings eine ausreichende

Datengrundlage von mehreren Jahren benötigt, die aktuell noch nicht zur Verfügung steht. Anschließend können weitere Validierungen der Wasserstandsvorhersagen anhand von Pegelbeobachtungen durchgeführt werden, da es sich schwierig gestaltet, die Performance der bisherigen Vorhersage anhand eines einzelnen Sturmflutereignisses festzumachen.

Ein weiterer Punkt ist die Kombination der enthaltenen Unsicherheiten aller Arbeitsschritte der Modellkette, die zukünftig zu einer sinnvollen Gesamt-Unsicherheit zusammengeführt werden sollten (HNM/Bias-Korrektur, Gezeitenanalyse/-synthese, empirisch-statistische Windstaumodelle). Aktuell werden ausschließlich die statistischen Unsicherheiten aus den empirisch-statistischen Windstaumodellen in die Methodik einbezogen. Darüber hinaus sollten die Erfahrungen aus dem Wasserstandsvorhersagesystem des BSH mit in die Betrachtung einbezogen werden.

Für eine vollständige Übertragung der vorhergesagten Wasserstände auf ein definiertes Schutzziel fehlen aktuell Information zu Deichabschnitten und deren Höhe. Für eine aussagekräftige Vorhersage werden diese Informationen allerdings zwingend benötigt. Daher gilt es beispielsweise ein geeignetes Höhenniveau als Referenzhöhe zur Vorhersage der Wasserstände an unbedeichten Küstenabschnitten abzuleiten. Auch werden Informationen zu Dünen und weiteren vorhandenen Küstenschutzbauwerken benötigt.

## 6 Danksagung

Das Verbundprojekt EarlyDike wurde vom 01. Juni 2015 bis zum 31. Mai 2018 mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Sonderprogramms Geotechnologien gefördert (BMBF-Förderkennzeichen: 03G0847B).

Die Teilprojektleiter und Mitarbeiter bedanken sich für die intensive Betreuung durch den Projektträger Jülich und die fruchtbare Zusammenarbeit mit den Küstenschutzbehörden.

Bei der Erstellung des hydrodynamisch-numerischen Modells kam das Softwarepaket MIKE21® zum Einsatz, dass freundlicherweise von DHI-WASY zur Verfügung gestellt wurde.

## 7 Literaturverzeichnis

Annusch, R.: Wasserstandsvorhersage und Sturmflutwarnung. Seewart, 38, 5, 185–204, Hamburg, 1977.

Arns, A.; Dangendorf, S.; Jensen, J.; Talke, S.; Bender, J.; Pattiaratchi, S.: Sea-level rise induced amplification of coastal protection design heights. In: *Sci. Rep.* 7, 40171; <https://doi.org/10.1038/srep40171>, 2017.

Arns, A.; Wahl, T.; Dangendorf, S.; Mudersbach, C.; Jensen, J.: Ermittlung regionalisierter Extremwasserstände für die Schleswig-Holsteinische Nordseeküste. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, HW57, 6, 2013.

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.

Becker, R.; Blankenbach, J.; Dreier, N.; Fröhle, P.; Gries, T.; Herle, S.; Jensen, J.; Krebs, V.; Lehfeldt, R.; Mulckau, A.; Niehüser, S.; Quadflieg, T.; Schüttrumpf, H.; Schwab, M.: EarlyDike – Entwicklung eines sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems für Seedeiche. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben EarlyDike – Teil 1, BMBF-Förderkennzeichen Förderkennzeichen 03G0847A, 03G0847B, 03G0847C, 03G0848A, 2018.

Boesch, A.; Müller-Navarra, S. H.: Reassessment of long-period constituents for tidal predictions along the German North Sea coast and its tidally influenced rivers. In: *Ocean Sci.* 15, 5, 1363-1379. <https://doi.org/10.5194/os-15-1363-2019>.

Bonaduce, A.; Pinardi, N.; Oddo, P.; Spada, G.; Larnicol, G.: Sea-level variability in the Mediterranean Sea from altimetry and tide gauges. In: *Clim Dyn.* <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3001-2>, 2016.

Cheng, Y.; Andersen, O. B.: Improvement in global ocean tide model in shallow water regions. Poster, SV.1-68 45, OSTST, Lisbon, 18–22. Oct., 2010.

Cheng, Y.; Andersen, O. B.: Multimission empirical ocean tide modeling for shallow waters and polar seas. In: *J. Geophys. Res.*, 116, C11001, <https://doi.org/10.1029/2011JC007172>, 2011.

Codiga, D. L.: Unified Tidal Analysis and Prediction Using the UTide Matlab Functions. Technical Report 2011-01. Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island, Narragansett, RI, 2011.

Compo, G. P.; Whitaker, J. S.; Sardeshmukh, P. D.; Matsui, N.; Allan, R. J.; Yin, X.; Gleason, B. E.; Vose, R. S.; Rutledge, G.; Bessemoulin, P.; Brönnimann, S.; Brunet, M.; Crouthamel, R. I.; Grant, A. N.; Groisman, P. Y.; Jones, P. D.; Kruk, M.; Kruger, A. C.; Marshall, G. J.; Mauger, M.; Mok, H. Y.; Nordli, Ø.; Ross, T. F.; Trigo, R. M.; Wang, X. L.; Woodruff, S. D.; Worley, S. J.: The Twentieth Century Reanalysis Project. In: *Quarterly J. Roy. Meteorol. Soc.*, 137, 1–28, 2011.

Dangendorf, S.; Calafat, F. M.; Arns, A.; Wahl, T.; Haigh, I. D.; Jensen, J.: Mean sea level variability in the North Sea: Processes and implications. In: *J. Geophys. Res. Oceans*, 119, 10, n/a. <https://doi.org/10.1002/2014JC009901>, 2014.

Dangendorf, S.; Marcos, M.; Wöppelmann, G.; Conrad, C. P.; Frederikse, T.; Riva, R.: Re-assessment of 20th century global mean sea level rise. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114, 23, 5946–5951. <https://doi.org/10.1073/pnas.1616007114>, 2017.

Dangendorf, S.; Mudersbach, C.; Wahl, T.; Jensen, J.: Characteristics of intra-, inter-annual and decadal sea-level variability and the role of meteorological forcing: the long record of Cuxhaven. In: *Ocean Dynamics*, 63, 2–3, 209–224. <https://doi.org/10.1007/s10236-013-0598-0>, 2013.

Dangendorf, S.; Wahl, T.; Hein, H.; Jensen, J.; Mai, S.; Mudersbach, C.: Mean Sea Level Variability and Influence of the North Atlantic Oscillation on Long-Term Trends in the German Bight. In: *Water*, 4, 4, 170–195. <https://doi.org/10.3390/w4010170>, 2012.

Dietrich, G.: Ozeanographisch-meteorologische Einflüsse auf Wasserstandsänderungen des Meeres am Beispiel der Pegelbeobachtungen von Esbjerg. In: *Die Küste*, 2, 1954.

Dreier, N.; Fröhle, P.: Prä-Operationelle Vorhersage von Seegang und Wellenaufbau an Seedeichen in der deutschen Bucht. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben EarlyDike – Teil 3, BMBF-Förderkennzeichen 03G0847C: Teilprojekt 2 – Wellenmonitoring und Wellenbelastungssimulator, Institut für Wasserbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg, 2018.

Godin, G.: *The Analysis of Tides*. University of Toronto Press, Toronto, 1972.

Gönnert, G.; Gerkenmeier, B.; Müller, J.-M.; Sossidi, K.; Thumm, S.: Zur hydrodynamischen Interaktion zwischen den Sturmflutkomponenten Windstau, Tide und Fernwelle. XtremRisK-Zwischenbericht TP1, Hamburg, 2010.

Grinsted, A.; Jevrejeva, S.; Riva, R. E. M.; Dahl-Jensen, D.: Sea level rise projections for northern Europe under RCP8.5. In: *Climate Research*, 64, 15–23, <https://doi.org/10.3354/cr01309>, 2015.

Haigh, I. D., Nicholls, R. J.: Coastal Flooding. MCCIP Science Review 2017, <https://doi.org/10.14465/2017.arc10.009-cof>, 2017.

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 und 03G0848A: Teilprojekt 5 – Sensor- & Geodateninfrastruktur, Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme der RWTH Aachen University & Bundesanstalt für Wasserbau, 2018.

Heyer, H.; Schrottko, K.: AufMod (03KIS082-03KIS088) Gemeinsamer Abschlussbericht für das Gesamtprojekt mit Beiträgen aus allen 7 Teilprojekten. <https://doi.org/10.2314/GBV:780783271>, 2013.

Horn, W.: Some Recent Approaches to Tidal Problems. In: *Int. Hydrogr. Rev.*, 37, 2, 65–84, 1960.

Horsburgh, K. J.; Wilson, J.: Tide-Surge interaction and its role in the distribution of surge residuals in the North Sea. In: *J. Geophys. Res.*, 112 C08003, 2007.

Jensen, J.; Arns, A.; Wahl, T.: Yet another 100yr storm surge event: the role of individual storm surges on design water levels. In: *J Mar. Sci. Technol.*, 23, 882–7, 2015.

Jensen, J.; Mudersbach, C.; Dangendorf, S.: Untersuchungen zum Einfluss der Astronomie und des lokalen Windes auf sich verändernde Extremwasserstände in der Deutschen Bucht. KLIWAS Schriftenreihe KLIWAS-25/2013, [https://doi.org/10.5675/Kliwas\\_25.2013\\_Extremwasserstände](https://doi.org/10.5675/Kliwas_25.2013_Extremwasserstände), 2013.

Jensen, J.; Müller-Navarra, S. H.: Storm Surges on the German Coast. Archive for research and technology on the North Sea and Baltic coast. In: *Die Küste*, 74, 92–124, 2008.

Krause, P., Boyle, D. P., Bäse, F.: Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. In: *Advances in Geosciences*, 5, 89–97, 2005.

LKN-SH - Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz des Landes Schleswig-Holstein (Hg.): Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein - Fortschreibung 2012, Kiel, 2012.



Lüders, K.: Über das Ansteigen der Wasserstände an der deutschen Nordseeküste. Zentralblatt der Bauverw., 50, 1936.

Mudelsee, M.; Chirila, D.; Deutschländer, T.; Döring, C.; Haerter, J.; Hagemann, S.; Hoffmann, H.; Jacob, D.; Krahe, P.; Lohmann, G.; Moseley, C.; Nilson, E.; Panferov, O.; Rath, T.; Tinz, B.: Climate Model Bias Correction und die Deutsche Anpassungsstrategie. In: Mitteilungen der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft (DMG), 03, 2–7, 2010.

Müller-Navarra, S. H.; Giese, H.: Improvements of an Empirical Model to Forecast Wind Surge in the German Bight. In: Dtsch. Hydrogr. Z., 51, 385 – 405, Hamburg, 1999.

Müller-Navarra, S. H.; Knüppfer, K.: Improvement of water level forecasts for tidal harbours by means of model output statistics (MOS) – Part I (Skew surge forecast). Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie 47, 22, 2010.

Müller-Navarra, S. H.; Seifert, W.; Lehmann, H.-A.; Maudrich, S.: Sturmflutvorhersage für Hamburg 1962 und heute. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie Hamburg und Rostock, 2012.

Müller-Navarra, S. H.: Gezeitenvorausberechnungen mit der Harmonischen Darstellung der Ungleichheiten. Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie Nr. 50, 2013.

Müller-Navarra, S. H.: Über neuere Verfahren der Wasserstands- und Sturmflutvorhersage für die deutsche Nordseeküste. Archive for research and technology on the North Sea and Baltic coast. In: Die Küste, 76, 193–204, 2009.

Niehüser, S.; Arns, A.; Dangendorf, S.; Jensen, J.: A high resolution storm surge forecast for the German Bight. In: 9th Chinese-German Joint 2018, 127–136, 2018.

NLWKN – Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (Hg.): Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/Bremen - Festland. Norden, 2007.

Passaro, M.; Cipollini, P.; Benveniste, J.: Annual sea level variability of the coastal ocean: The Baltic Sea-North Sea transition zone. In: J. Geophys. Res. Oceans, 120, 4, 3061–3078, <https://doi.org/10.1002/2014JC010510>, 2015.

Pawlowicz, R.; Beardsley B.; Lentz, S.: Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE. In: Computers and Geosciences, 28, 929–937, 2002.

Piani, C.; Weedon, G. P.; Best, M.; Gomes, S. M.; Viterbo, P.; Hagemann, S.; Haerter, J. O.: Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrologic models. In: Journal of Hydrology, 395 (3–4), 199–215, 2010.

Ponte, R. M.: Low-frequency sea level variability and the inverted barometer effect. J. Atmos. Technol., 23, 619–629, <https://doi.org/10.1175/JTECH1864.1>, 2006.

Pugh, D.; Woodworth, P.: Sea-Level Science. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 2014.

Slangen, A. B. A.; Carson, M.; Katsman, C. A.; van de Wal, R. S. W.; Koehl A.; Vermeersen, L. L. A.; Stammer, D.: Projecting twenty-first century regional sea-level changes. In: Climatic Change, 124, 317–332, <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1080-9>, 2014.

Stammer, D.; Ray, R. D.; Andersen, O. B.; Arbic, B. K.; Bosch, W.; Carrère, L.; Cheng, Y.; Chinn, D. S.; Dushaw, B. D.; Egbert, G. D.; Erofeeva, S. Y.; Fok, H. S.; Green, J. A. M.; Griffiths, S.; King, M. A.; Lapin, V.; Lemoine, F. G.; Luthcke, S. B.; Lyard, F.; Morison, J.; Müller, M.; Padman, L.; Richman, J. G.; Shriver, J. F.; Shum, C. K.; Taguchi, E., Yi, Y.: Accuracy assessment of global barotropic ocean tide models. In: *Rev. Geophys.*, 52, 243–282, <https://doi.org/10.1002/2014RG000450>, 2014.

Streicher, M.; Kristandt, J.; Knaack, H.: Abschlussbericht: Optimierung Empirischer Sturmflutvorhersagen (OptempS–MohoWif A). BMBF Förderkennzeichen 03KIS097, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Forschungsstelle Küste, 2015.

Tang, Y. M.; Grimshaw, R.; Sanderson, B.; Holland, G.: A numerical study of storm surges, with application to the North Queensland coast. In: *J. Phys. Oceanogr.*, 26, 2700–2711, 1996.

Von Storch, H. V.; Zwiers, F. W.: *Statistical analysis in climate research*. 1st edn. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1999.

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.

Woodworth, P. L.; Hunter, J. R.; Marcos, M.; Caldwell, P.; Menéndez, M.; Haigh, I.: Towards a global higher-frequency sea level dataset. In: *Geosci. Data*, 3, 50–59, <https://doi.org/10.1002/gdj3.42>, 2016.

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

Norman Dreier<sup>1</sup> und Peter Fröhle<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Hamburg, Institut für Wasserbau, [norman.dreier@tuhh.de](mailto:norman.dreier@tuhh.de)

<sup>2</sup> 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 ( $R_{H2\%}$ ) 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 non- 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 ( $R_{n2\%}$ ) 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](http://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 Seegangsmodells 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.

### Seegangsbelastungssimulator

Die prä-operationelle Vorhersage der Seegangsbedingungen im Deichvorfeld (Seegangsmonitor) ist die Basis für das hybride Seegangsbelastungsmodell (Seegangsbelastungssimulator) 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)

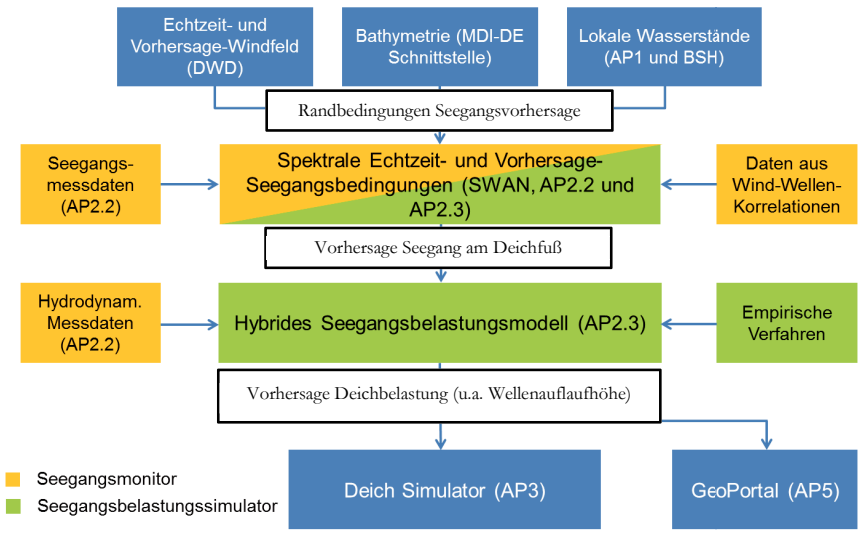


Abbildung 1: Methodischer Ansatz zur Vorhersage des Seegangs und seegangsinduzierter Belastungen von Seedeichen; AP=Arbeitspaket siehe Einleitungskapitel und Einbindung der Untersuchungen in die Arbeitspakete des Forschungsvorhabens „EarlyDike“.

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

$\lambda, \varphi$  = Längen-, Breitengrad  
 $\sigma, \theta$  = 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 energieerzeugenden 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 energierzeugende 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.

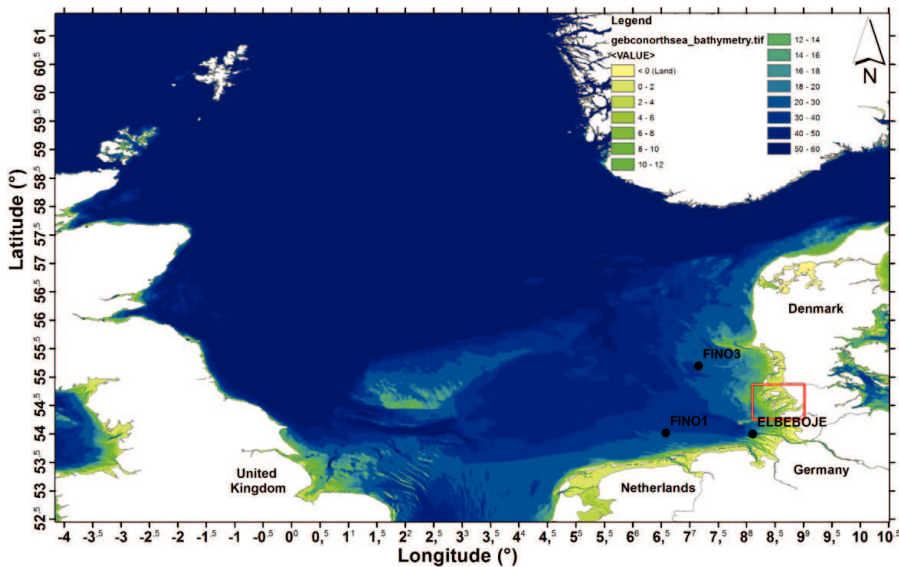


Abbildung 2: Modellgebiet und Bathymetrie (NSSM), verfügbare Seegangsmessungen im Tiefwasser (schwarze Punkte) sowie Lage des Detailgebietes (rotes Polygon).

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  $\pm 0$  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)

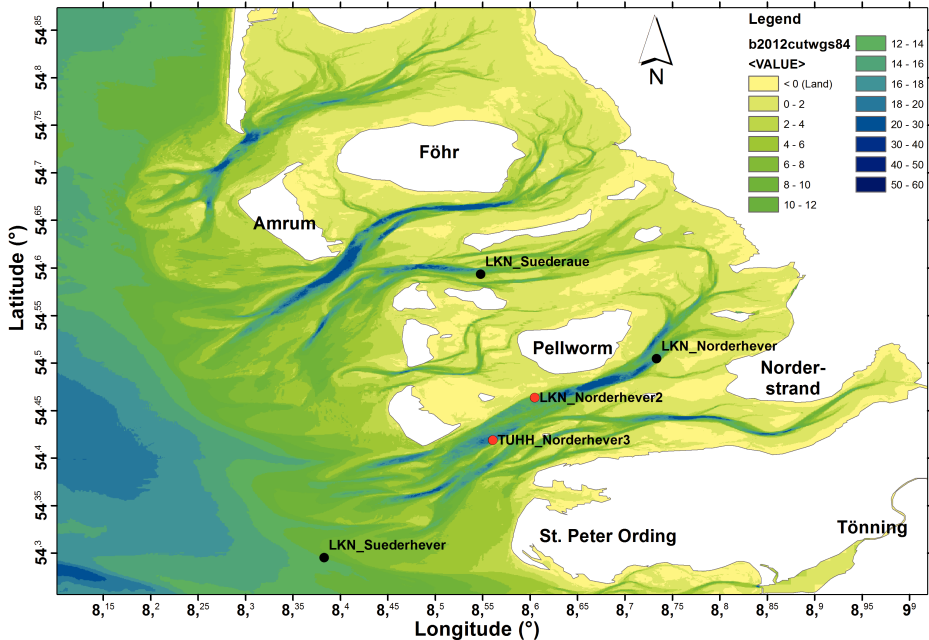


Abbildung 3: Modellgebiet und Bathymetrie (PWSM), verfügbare Seegangmessungen im Übergangsbereich (schwarze Punkte) sowie Lage der Seegangsmessbojen „Norderhever 2 und -3“.

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 starken 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 BSHmod 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 BSHcmod 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  $\theta_m$ ) 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.

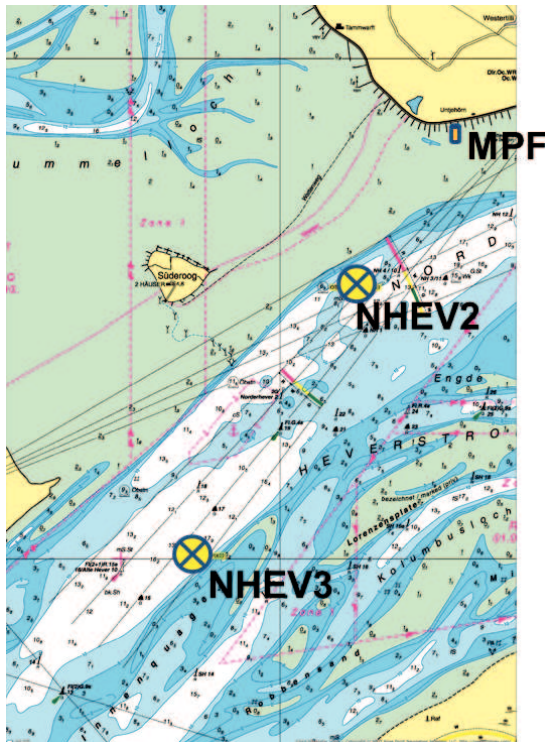


Abbildung 4: Lage der Seegangsmessbojen „Norderhever 2 und -3“ („NHEV2“ und „NHEV3“) sowie des Messpfahls „Untjehörn“ (MPF) vom LKN-SH, (Quelle: Chart Navigator Light).



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. Wellenauflauf 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 Wellenauflaufes am Deich kombiniert (siehe Abbildung 1).

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

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

## 2.4 Wellenauflaufmodellierung

### 2.4.1 Phasenaufgelöste Seegangsmodellierung

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 -ablauf sowie der Wellenüberlauf werden hierbei berücksichtigt. Die phasengemittelten Ergebnisse des SWAN-Modells werden im Analyseprozess phasenaufgelöst und mit einem phasenaufgelösten Seegangsmodell weiterverarbeitet. Für die Ableitung einzelner Wellen aus dem phasengemittelten Spektrum wurde zunächst davon ausgegangen, dass die Phasenverteilung der einzelnen Wellenkomponenten zufällig ist.

Als phasenaufgelöstes Seegangsmodell wurde ein numerisches Zwei-Phasen-Strömungsmodell auf Basis von OpenFOAM® zur Bestimmung der Seegangsbelastungen 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 numerischer 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.

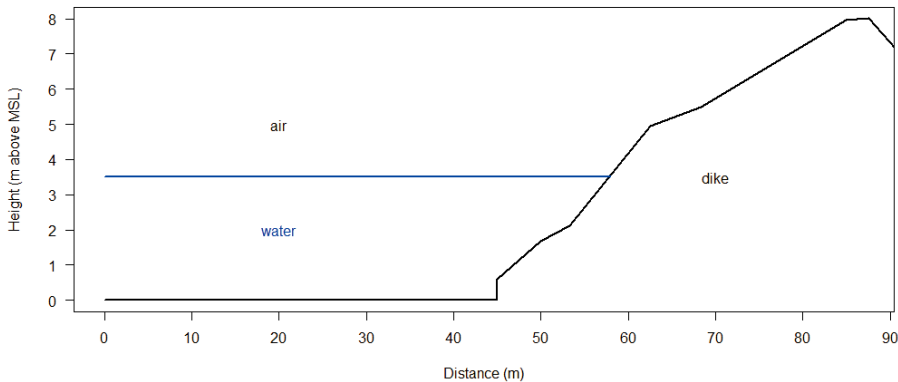


Abbildung 7: Schematische Darstellung des OLAFOAM Deichmodells (Hinweis: die Höhe ist überhöht dargestellt).

### 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:

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

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)  
 $\gamma_b$  = Empirischer Beiwert für den Einfluss der Berme (-), hier = 1  
 $\gamma_f$  = Empirischer Beiwert für den Einfluss der Böschungsrauheit (-)  
 $\gamma_\beta$  = 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 $\gamma$
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  $\gamma$  (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 seeganginduzierten 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.

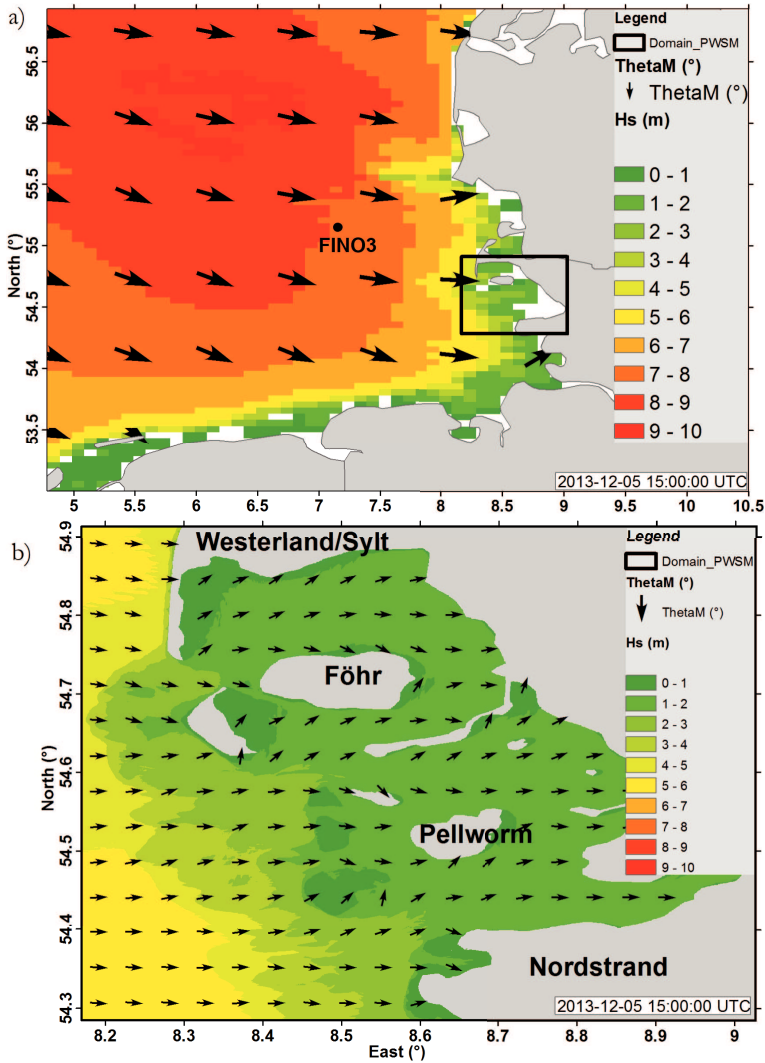


Abbildung 9: Langzeitvorhersage des Seegangs für das Orkantief „XAVER“ am 5.12.2013 16 MEZ (UTC+1) berechnet mit SWAN im Nordseemodell (a) und für ein Detailgebiet (siehe schwarzes Rechteck in a) um Pellworm (b). Die signifikante Wellenhöhe ( $H_{m0}$ ) ist farblich codiert und die mittlere Wellenanaufrichtung ( $\Theta_m$ ) ist mittels Pfeilen in einem größeren Ausgabegeraster als die Berechnungsergebnisse dargestellt.

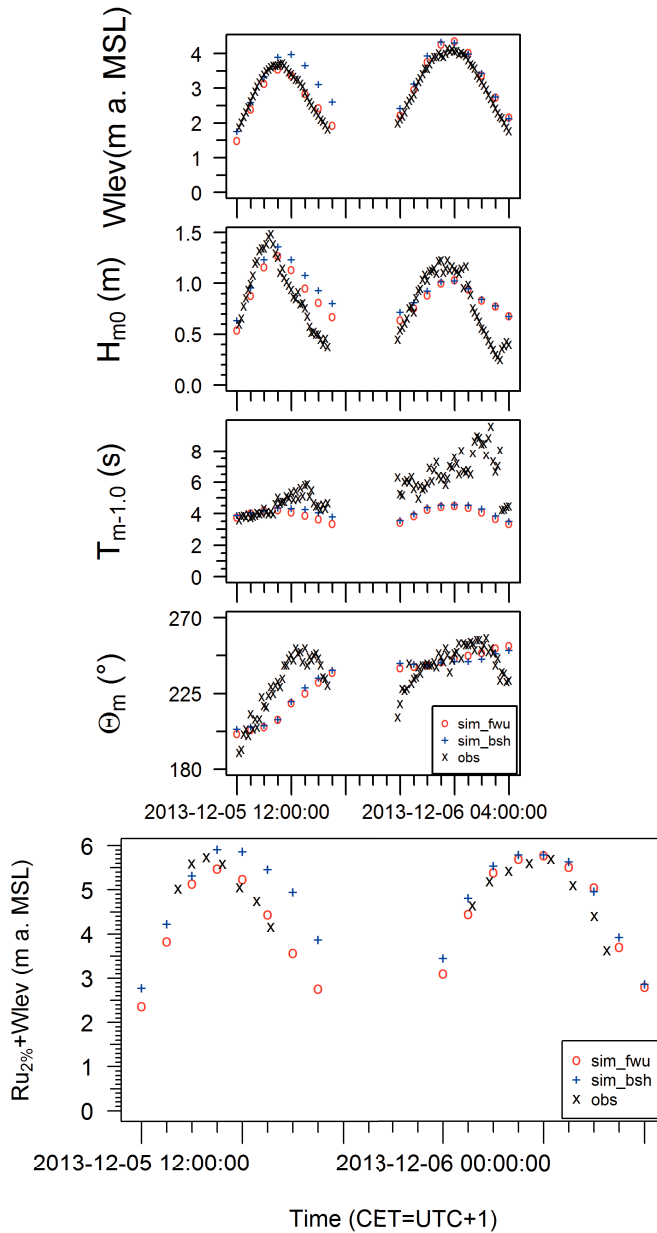


Abbildung 10: Hydrodynamische Parameter ca. 50 m vor dem Deich „Untjehörn“. Von oben nach unten: Wasserstand (Bezug NHN), signifikante Wellenhöhe ( $H_{m0}$ ), Energieperiode ( $T_{m-1,0}$ ), mittlere Wellenanlaufhöhe ( $\Theta_m$ ) sowie absolute mittlere Wellenaufbauhöhe ( $R_{u2\%} + \text{Wasserstand}$  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 Wellenauflauf 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 ( $R_{u2\%}$ ): 0,20 m (BSH) bzw. 0,19 m (FWU)
- die absolute mittlere Wellenaufbauhöhe ( $R_{u2\%} + \text{Wasserstand m ü. NHN}$ ): 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 Wellenauflauf 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 Wellenauflaufes am Seedeich „Untjehörn“ und Messungen sind insgesamt als gering einzustufen, was für eine gute Qualität des Vorhersagesystems spricht.

Die mittleren quadratischen Abweichung der Wellenauflaufvorhersage 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 Wellenauflaufvorhersage mit gemessenen Seegangsdaten (RMSE  $R_{u2\%,MPF} \sim 0,4$  m; vgl. Tabelle 2) im Vergleich zu gemessenen Wellenauflaufereignissen am Seedeich „Untjehörn“.

### 3.1.2 Wellenauflaufmodellierung

Zur beispielhaften Ermittlung des Wellenauflaufes 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 „XAVER“ am 05.12.2013 gewählt. Die zeitliche Auflösung der numerischen Simulation betrug  $\Delta t = 0,05$  s.

Der zeitliche Verlauf des berechneten Wellenauflaufes 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).

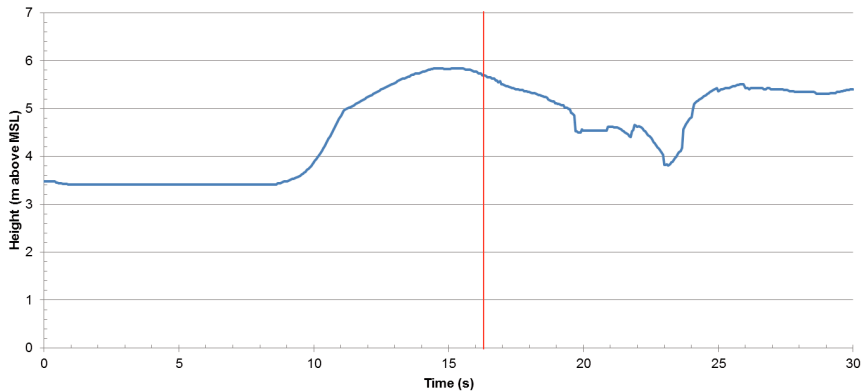


Abbildung 11: Absolute Wellenaufhöhe (Wellenaufhöhe bezogen auf NHN) in Simulation mit regelmäßigen Wellen.

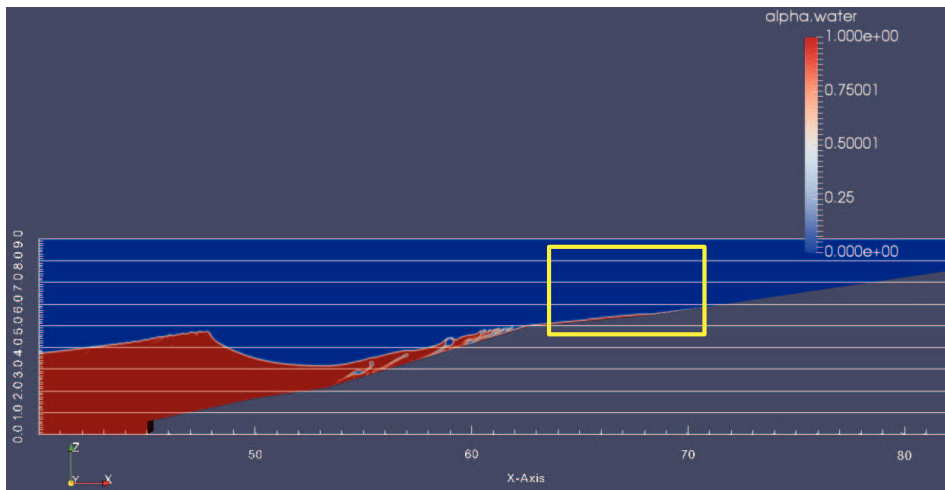


Abbildung 12: Wellenaufsimulation mit regelmäßigen Wellen zum Zeitpunkt  $t = 16,75$  s. Der berechnete  $\alpha$ -Wert ist farblich codiert.

Zur Ermittlung der freien Oberfläche des Wellenauflaufes wurde der sog.  $\alpha$ -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  $\alpha$ -Werte  $> 0,9$  betrachtet werden sollten.

Die absolute mittlere Wellenaufhöhe wurde für diesen Zeitschritt und mit Hilfe der zuvor erläuterten Auswertemethodik mit 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  $\alpha$ -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 dienten 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  $\alpha$ -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 Wellenauflaufereignisse 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 Wellenauflaufereignisse

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 Wellenaufbaueignisse

Um eine robustere Bewertung der Qualität der Langzeitvorhersage zu ermöglichen, welche neben hohen Wellenaufbaueignissen 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 Wellenaufhöhe ( $R_{m2\%}$ ) sowie absolute mittlere Wellenaufhöhe ( $R_{m2\%} + \text{Wasserstand m ü. NHN}$ )  $R_{m2\%} + \text{Wasserstand am Deich}$  „Untjehöm“ während ausgewählter Sturmereignisse und bei unterschiedlichen Wasserstandsvorhersagen (FWU bzw. BSH) und Messungen (DFS=Messung am Deichfuß, MPF=Messung am Messpfehl „Untjehöm“), 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
$R_{m2\%}$ (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
$R_{m2\%} +$ 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



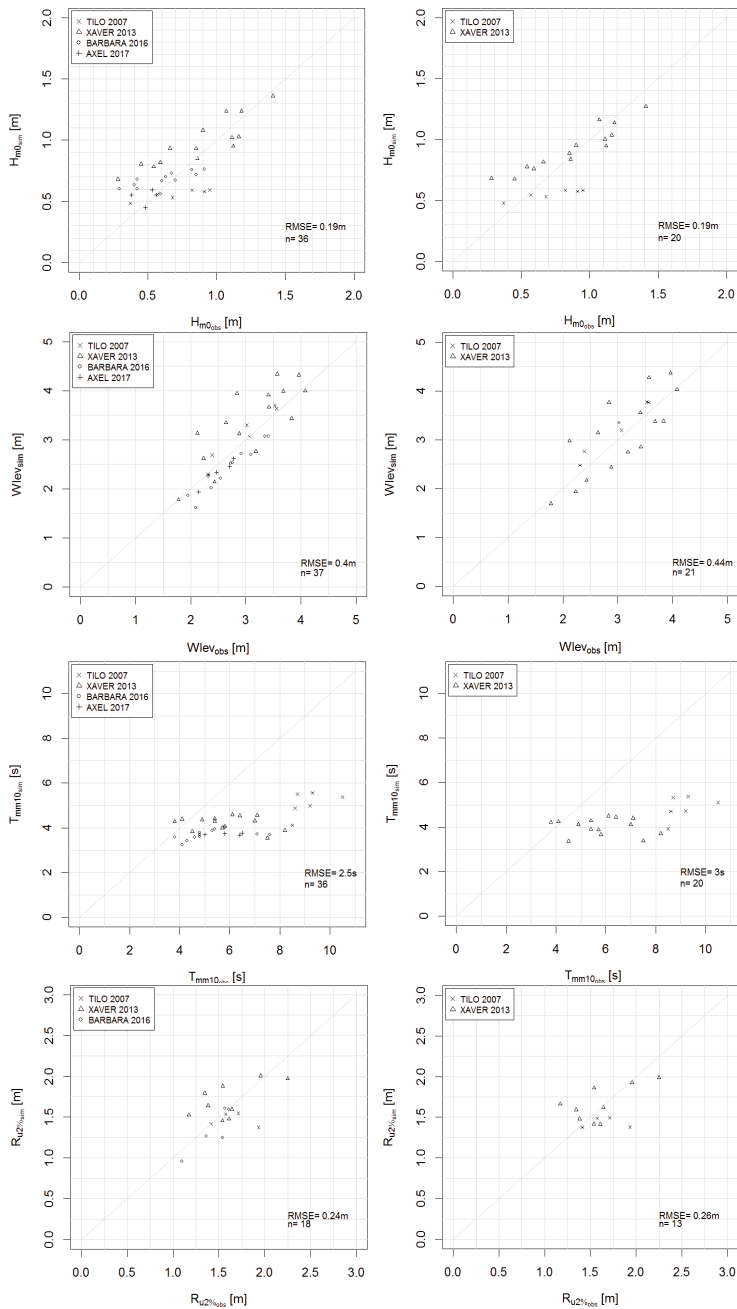


Abbildung 13: Vergleich der Langzeitvorhersage von Seegang und Wasserstand ca. 50m vor dem Deich sowie Wellenauflauf am Deich „Untjehörn“ für die Wasserstandsvorhersage des BSH (links) bzw. des FWU (rechts). Von oben nach unten: signifikante Wellenhöhe ( $H_{m0}$ ), Wasserstand (m ü. NHN), Energieperiode ( $T_{m-1,0}$ ), mittlere Wellenaufbauhöhe ( $R_{0.2\%}$ ). 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](http://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.; Mulekau, 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.; Niemyer, 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](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 Ostgroden-deich, 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](http://www.dr-smai.de/PDF_Projekte/hauptdeich_wangerooge_2004.pdf), zuletzt geprüft am 17.11.2017.



# Entwicklung eines sensorbasierten Deichmonitorings

Verena Krebs<sup>1</sup> und Holger Schüttrumpf<sup>2</sup>

<sup>1</sup> RWTH Aachen University; Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft,  
Verena.Krebs@wsv.bund.de

<sup>2</sup> RWTH Aachen University; Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

## Zusammenfassung

See- und Ästuardeiche zählen zu den wichtigsten Küstenschutzanlagen in Deutschland und ein Versagen dieser Bauwerke hat meist schwerwiegende Konsequenzen. Ein frühzeitiges Erkennen von Gefahren und das rechtzeitige Verhindern eines möglichen Deichversagens sind elementar, um einen zuverlässigen Küstenschutz zu ermöglichen. Bestehende Frühwarnsysteme für Sturmfluten und Hochwasserereignisse berücksichtigen den Zustand der Hochwasserschutzanlagen selbst nicht. Es ist jedoch bekannt, dass es durch Vorschädigungen des Bauwerks bereits vor Eintritt des Bemessungsereignisses zu einem frühzeitigen Versagen der Schutzanlagen kommen kann. Vor Gefährdungen infolge eines solchen Ereignisses kann derzeit nicht rechtzeitig gewarnt werden. Ziel des Arbeitspakets *Deichmonitor und -simulator* im Rahmen des Verbundvorhabens *EarlyDike* war die Entwicklung eines sensorbasierten Frühwarnsystems, welches in der Lage ist, Schäden im Deich frühzeitig zu erkennen und so die tatsächliche Widerstandsfähigkeit des Bauwerks zu berücksichtigen. Hierzu wurden am *Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University (ITA)* garnbasierte Sensoren in ein Geotextil integriert. Diese neuartigen, intelligenten Geotextilien wurden in der Versuchshalle des *Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University (IWW)* in Deichmodellen auf unterschiedlichen Skalen getestet, validiert und in Zusammenarbeit mit dem *ITA* für den Einbau im Deich optimiert. Die Messsignale der entwickelten Sensorvliese wurden in eine Sensor- und Geodateninfrastruktur übermittelt und automatisiert ausgewertet. Über ein webbasiertes Deich-Dashboard sind die Daten sowie deren Auswertung abrufbar, wodurch eine internetbasierte Echtzeitüberwachung des Modeldeichs in der Versuchshalle des *IWW* realisiert wurde.

## Schlagwörter

Sensorbasiertes Deichmonitoring, Frühwarnsystem für Seedeiche, intelligente Geotextilien, textile Sensorik, Modeldeich

## Summary

*Sea and estuarine dikes are among the most important coastal protection structures in Germany and potential sea dike failure has serious consequences. Therefore, an early detection of damages and the timely prevention of possible dike failures are fundamental for reliable coastal protection. Existing early warning systems for storm surges in the German Bight only take into account the prediction of water levels, while the condition of the coastal protection structure itself is not included. However, it is known that for instance a deteriorated structure might fail even before the design water level is reached. It is currently not possible to*

*give timely warnings of hazards due to such an event. The aim of work package 3 (dike monitor and simulator) within the framework of the joint project EarlyDike was the development of a sensor-based early warning system, which is able to detect damages in the dike at an early stage and thus take into account the actual resistance of the structure. For this purpose, yarn-based sensors are integrated into a geotextile at the Institute of Textile Technology of RWTH Aachen University (ITA). These smart geotextiles are tested in dike models of different scales at the Institute of Hydraulic Engineering and Water Management of RWTH Aachen University (IWW). There, in cooperation with ITA, the smart geotextiles are optimized for installation in a dike. By the use of conventional measurement technique, the smart geotextiles can be validated during long-term tests over several months. The measured signals of the developed smart geotextiles are transmitted to a sensor and spatial data infrastructure and analyzed automatically. Via a web interface ("dike monitor"), the data and its evaluation can be accessed online, yet enabling real-time monitoring of the model dike in the laboratory of IWW.*

## Keywords

*Sensor-based dike monitoring, early warning system for sea dikes, smart geotextile, yarn-based sensor, dike model*

## 1 Einleitung

Seit Menschen in Küstengebieten siedeln, müssen sie sich an die zerstörerischen Kräfte des Meeres anpassen, um die Küstenbewohner sowie ihre Lebens- und Wirtschaftsräume vor Sturmfluten zu schützen. Die Küstenschutzstrategien haben sich dabei im Laufe der Zeit weiterentwickelt und verbessert. Heutzutage setzt ein moderner Küsten- und Hochwasserschutz auf eine Kombination aus technischen und nicht-technischen Komponenten: Zum technischen Hochwasserschutz zählen alle Küstenschutzanlagen wie sie z. B. in Form von Wellenbrechern, Deckwerken, Mauern und Deichen gebaut werden. Die Küstenschutzanlagen sollen die Küstenlinie vor Erosion und die dahinterliegenden Tiefebenen vor Überschwemmungen schützen. Die nichttechnischen Maßnahmen des Küstenschutzes umfassen die menschliche Reaktion auf bzw. die Anpassung an mögliche Überschwemmungen. Sie gliedern sich in das Flächenmanagement sowie die Hochwasser- bzw. Katastrophenvorsorge. Die Katastrophenvorsorge umfasst dabei die Bestandteile Hochwasservorhersage, Warnung und schließlich das Ergreifen von entsprechenden Notfallmaßnahmen. Eine wesentliche Aufgabe kommt dabei dem Vorhandensein von funktionierenden und verlässlichen Frühwarnsystemen zu.

In Deutschland zählen Seedeiche zu den wichtigsten Küstenschutzanlagen (Schüttrumpf 2008 und EAK 2002). In den vergangenen Jahrzehnten trugen eine Vielzahl von durchgeführten Forschungsprojekten rund um das Thema Seedeiche zu einem vertieften Prozessverständnis, zu einer Beschreibung der wichtigsten Versagensmechanismen und vor allem zu einer sichereren Deichbemessung bei. Daraus resultierten neben einer Vielzahl von Veröffentlichungen Anpassungen in der Deichbemessung und -konstruktion sowie milliardenschwere Deichsanierungsprogramme (MELUND Schleswig-Holstein 2013, NLWKN 2007). Wesentliche Erkenntnisse zu den Themen Deichbemessung, -entwurf und -bau sind beispielsweise in den „Empfehlungen für Küstenschutzwerke“ (EAK 2002), im „EurOtop Manual“ (EurOtop 2016) und im „International Levee Handbook“ (CIRIA 2013) zusammengetragen.



Aber auch die bestentwickelten und vermeintlich sichersten Küstenschutzbauwerke können keine absolute Sicherheit garantieren: Durch den Klimawandel und den damit verbundenen Meeresspiegelanstieg werden Extremereignisse, die über die Bemessungswerte hinausgehen, wahrscheinlicher (MELUND Schleswig-Holstein 2013). Schäden oder Schwachstellen innerhalb der Bauwerke können unerkannt bleiben und den Widerstand der Anlagen verringern. Ferner zeigen Auswertungen vergangener Schadensereignisse, dass das gleichzeitige Auftreten mehrerer Belastungen bereits vor dem Überschreiten des Bemessungswasserstandes zu einem Versagen der Bauwerke führen kann (Vrijling 2001). In all diesen Fällen ist es wichtig, über effiziente Frühwarnsysteme zu verfügen, die Gefahren rechtzeitig erkennen und damit ein Versagen der Schutzanlagen verhindern sowie im Katastrophenfall bei der Steuerung von Notfallmaßnahmen helfen. Das Vorhandensein technisch ausgefeilter Frühwarn- und Monitoringsysteme ist folglich ebenso elementar für einen zuverlässigen Küstenschutz wie die ständige Verbesserung der Küstenschutzanlagen selbst.

Bestehende Frühwarnsysteme für den Küstenschutz in Deutschland basieren auf Wasserstandmessungen und -vorhersagen, die durch das *Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)* zur Verfügung gestellt werden (<http://www.sturmflutwarnungen.de/>). Informationen über den inneren Zustand der Küstenschutzanlagen selbst, die bei der Sicherheit eine wichtige Rolle spielen, fehlen bislang vollständig. Das Projekt *EarlyDike* versucht diese Lücke zu schließen: Am Beispiel von Seedeichen wird ein sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem entwickelt, das eine kontinuierliche Überwachung der Deichstrecken ermöglicht, sodass im Schadensfall durch die Generierung automatischer Warnungen rechtzeitige Instandsetzungs- sowie Notfallmaßnahmen eingeleitet werden können (Becker et al. 2021).

Der folgende Teilbericht im Rahmen von *EarlyDike* beschäftigt sich mit der Entwicklung und Umsetzung eines sensorbasierten *Deichmonitorings* für Seedeiche. Er beschreibt, wie intelligente Geotextilien als Sensoren in die Deichstruktur integriert werden können und wie die zusätzlichen Informationen, die die intelligenten Geotextilien generieren, dazu beitragen können, ein verbessertes Frühwarnsystem für Seedeiche aufzubauen. Die Arbeit hieran erfolgte in Kooperation mit dem *Institut für Textiltechnik (ITA)* sowie dem *Geodätischen Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme (gia)* der *RWTH Aachen University* (Schwab et al. 2021, Herle et al. 2021).

Die Entwicklung des sensorbasierten Deichmonitorings erfolgte in mehreren Arbeitsschritten (vgl. Abbildung 1). Es fanden Literaturstudien zu den Themen Deichaufbau und -bemessung, Deichversagensmechanismen sowie Deichmonitoring-Verfahren statt, aus denen relevante Informationen für die weitere Arbeit identifiziert wurden (Kapitel 2).

Nachdem auf Grundlage der Literaturrecherche die Anforderungen an ein umfangreiches Monitoring für Seedeiche ermittelt wurde, konnte hieraus ein Konzept für die Verwendung der intelligenten Geotextilien abgeleitet werden (Kapitel 3). In der Versuchshalle des IWW wurden die intelligenten Geotextilien in einen Modelldeich eingebaut und in physikalischen Versuchen getestet und validiert. Hierzu fanden vorerst kleinmaßstäbliche Untersuchungen mit Prototypen der Deichsensoren statt. Die Versuche am kleinen Modelldeich werden in Kapitel 4.2, deren Auswertung und Ergebnisse in Kapitel 5.1 beschrieben.

Im Anschluss erfolgten der Aufbau eines großmaßstäblichen Modelldeichs und die Untersuchung der entwickelten Sensorvliese in ebendiesem. Die Beschreibung des Versuchstandes, der eingesetzten konventionellen Messtechnik sowie der eingesetzten Sensorvliese

sind in Kapitel 4.2 zusammengestellt. Hierbei flossen wichtige Erfahrungen aus den kleinmaßstäblichen Untersuchungen in die Entwicklung der großmaßstäblichen Sensorvliese ein (Kapitel 5.2). Die großmaßstäblichen Sensoren wurden in einem umfangreichen Versuchsprogramm getestet, anhand der konventionellen Messtechnik validiert und die Sensorsignale schließlich in einer auf Grundlage der gesammelten Daten entwickelten Auswerterroutine analysiert (Kapitel 5.3).

Die aufgenommenen Daten der Versuche in der Versuchshalle des IWW werden bereits so analysiert und verarbeitet, dass sie in die im Rahmen von *EarlyDike* aufgebaute Geo- und Sensordateninfrastruktur eingespeist werden können und Rückschlüsse auf den Zustand des Modelldeiches zulassen. Hierzu wurden in Kooperation mit dem *gia* Schnittstellen entwickelt, über die die Daten aus den Messvorrichtungen am IWW in das Sensornetzwerk eingespeist und von der entwickelten Auswerterroutine „abonniert“ werden können. Eine Beschreibung des zugrundeliegenden Konzepts und des entwickelten Deich-Dashboards, welches schon jetzt ein Echtzeit-Monitoring des Modelldeichs erlaubt, findet sich in Kapitel 5.3.4.

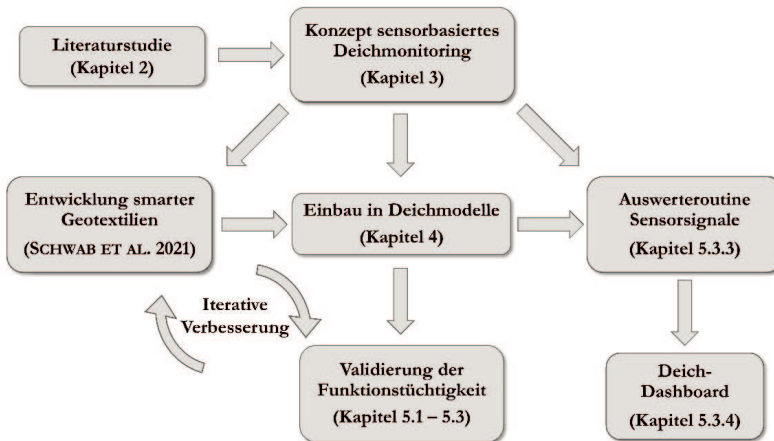


Abbildung 1: Vorgehensweise bei der Entwicklung des sensorbasierten Deichmonitorings.

## 2 Grundlagen zur Entwicklung des Deichmonitors

### 2.1 Typischer Seedeichaufbau

Deiche sind längs eines Gewässers aufgeschüttete Erddämme, die das tiefergelegene Hinterland im Fall einer Sturmflut oder eines Hochwassers vor Überflutungen schützen. Sie bilden eine Barriere zwischen Gewässern mit wechselnden Wasserständen, wie Flüssen oder Meeren, und dem Hinterland. Deiche sind im Gegensatz zu Dämmen keine ständig eingestauten Bauwerke, sondern erfahren nur im Hochwasser- oder Sturmflutfall einen vorübergehenden Einstau.

An der deutschen Küste schützen Seedeiche auf einer Länge von insgesamt 1.200 km die tiefergelegenen Küstengebiete vor Überschwemmungen (Schüttrumpf 2008). Seedeiche sind damit die in Deutschland bedeutendsten Küstenschutzbauwerke und vielfältigen Belastungen ausgesetzt, denen sie standhalten und dabei stets ihre wasserrückhaltende

Funktion aufrechterhalten müssen. Zu den Belastungen zählen vor allem hydrodynamische Belastungen durch Tide, Seegang und Strömungen, aber auch Einzelbelastungen infolge Eisgang oder Treibgut.

Während in der Vergangenheit homogene Deichquerschnitte aus bindigen Materialien mit steilen bis senkrechten Böschungsneigungen weit verbreitet waren, hat sich die Bemessungsphilosophie seit den schweren Sturmfluten des 20. Jahrhunderts verändert. Hierzu haben zum einen eine verbesserte Beschreibung der einwirkenden Belastungen und vor allem ein verbessertes Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Bauwerk und Belastung beigetragen (Waal und van der Meer 1992, Richwien 1996, Schüttrumpf 2001, EAK 2002). Zum anderen konnten aus der Analyse der während vergangener Sturmfluten aufgetretenen Deichschäden wichtige Handlungsempfehlungen abgeleitet werden (MELF Niedersachsen 1962, MELF Schleswig-Holstein 1962).

Gemäß der Regelbauweise werden Seedeiche heute meist mit einem Deichkern aus Sand, einer abdichtenden Klei- oder Mergelschicht von 0,5 bis 2 m Dicke und einer begrünten Deckschicht ausgeführt. In Sonderfällen ist auch die Ausführung erosionsfester Deckwerke (z. B. aus Asphalt) möglich. Während die Deichhöhen nicht zuletzt als Anpassung an den durch den Klimawandel prognostizierten Meeresspiegelanstieg immer weiter erhöht wurden, sind die Böschungsneigungen flacher geworden und liegen heutzutage bei Neigungen bis zu 1:10. Abbildung 2 zeigt den Querschnitt durch ein heute typisches Regelprofil eines scharliegenden Deiches. Die Bandbreite der angegebenen Abmessungen zeigt, dass Deichaufbau bzw. Deichprofil dabei jedoch je nach Lage, Baustoffvorkommen und Zuständigkeiten stark variieren können. Details zu Deichaufbau und -bemessung für Küstenschutzdeiche einschließlich der regionalen Unterschiede sind z. B. in den „Empfehlungen für Küstenschutzwerke“ (EAK 2002) festgehalten.

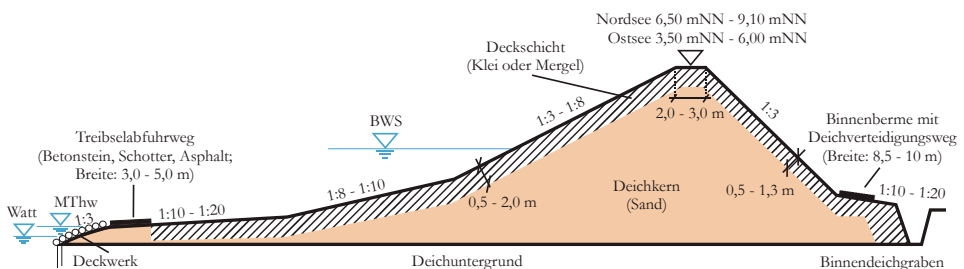


Abbildung 2: Querschnitt durch ein heute typisches Regelprofil eines scharliegenden Seedeichs (nach Schüttrumpf 2008 und EAK 2002).

## 2.2 Versagensmechanismen von Seedeichen

Für die Entwicklung eines sensorbasierten Deichmonitorings sind Kenntnisse über die während eines Deichversagens stattfindenden Prozesse unerlässlich, weshalb im Folgenden hierzu ein kurzer Überblick gegeben wird.

Deichversagen bezeichnet den Zustand, in dem ein Deich unter der einwirkenden Belastung nicht mehr in der Lage ist, seine wasserrückhaltende Funktion aufrecht zu erhalten (Allsop et al. 2007). Dabei kann nach Simm et al. 2013 zwischen drei verschiedenen Stadien unterschieden werden: einer Deichverschlechterung, einem Deichschaden und schließlich dem Deichbruch. Deichverschlechterungen (hierzu zählen z. B. Setzungen, Rissbildungen

oder Wühltierschäden) resultieren aus langfristigen Prozessen als Folge von Alterungerscheinungen und wiederkehrenden Belastungen, die den Zustand der Deichstruktur verändern und das Risiko eines Deichschadens erhöhen. Ein Deichschaden bezeichnet in diesem Zusammenhang einen Teilausfall der wasserrückhaltenden Funktion, der nach einem einzigen Lastereignis auftritt, und zwar meist insbesondere dann, wenn der Deich bereits über Vorschädigungen bzw. Verschlechterungen verfügt. In Kombination mit sehr hohen Belastungen können Deichverschlechterungen und -schäden schließlich zu einem totalen Deichbruch führen. Als Deichbruch versteht sich dabei ein strukturelles Versagen des Deiches vor Erreichen seiner Bemessungslast. Im Gegensatz zu den drei beschriebenen Mechanismen tritt ein operatives Versagen auf, sobald die Bemessungslast der Struktur überschritten wird. Ein typisches Beispiel für ein operatives Versagen ist eine Deichüberströmung infolge einer Überschreitung des Bemessungswasserstands.

Neben dieser Beschreibung der Stadien eines Deichversagens finden sich in der Literatur zahlreiche Zusammenstellungen von physikalischen Versagensmechanismen, meist gegliedert nach dem Ort ihrer Entstehung oder der zum Versagen führenden Belastung. Ohle et al. 2006 beispielsweise differenzieren nach den verursachenden Belastungen in Versagen infolge äußeren (Seegang, Wasserstand, Eis), inneren (Untergrund, Deichmaterial, Erosion, Suffosion) oder menschlichen Einflüssen (Bemessung, Bauausführung, Unterhaltung). Schüttrumpf und Oumeraci 2004 sowie Allsop et al. 2007 untersuchten Seedeichversagen vor allem auf Grundlage der Dokumentation schwerer Sturmflutschäden aus der Vergangenheit. Sie leiten daraus die wichtigsten Einwirkungs- und Widerstandsfaktoren ab, die Deichausfälle beeinflussten, und beschreiben die Hauptversagensmechanismen von Seedeichen getrennt für die seewärtige und landseitige Deichböschung.

Eine umfangreiche Zusammenstellung, Kombination und Ergänzung bestehender Arbeiten findet sich in Kortenhaus und Oumeraci 2002. Dort werden – unterschieden nach hydrodynamischen Versagensmechanismen, Versagensmechanismen an der Binnenböschung, der Außenböschung und im Inneren des Deiches, Deichbruch und sonstigen Versagensmechanismen – 25 unterschiedliche Versagensmechanismen definiert und mit Grenzzustandsgleichungen beschrieben.

Hydrodynamische Versagensmechanismen sind dabei als diejenigen Versagensmechanismen definiert, „die direkt aus dem Wasserstand vor dem Deich oder den Seegangparametern am Deichfuß ableitbar sind“ (Kortenhaus und Oumeraci 2002). Hierzu gehören neben Wellenüberlauf, Druckschlägen und Infiltration auch das Überströmen und die Durchströmung. Da Deiche in der Regel nicht für Überströmungen konzipiert sind, ist jeder Anstieg des Wasserstands über die Kronenhöhe bzw. Freibordhöhe nicht gewollt und wird in vielen Ansätzen bereits als Versagen bewertet. Tatsächlich ist mit einer Beschädigung des Deiches jedoch erst dann zu rechnen, wenn weitere Voraussetzungen wie eine ausreichend große Überströmrates gegeben sind. Eine intakte Begrünung als Deckschicht bietet einen gewissen Schutz, bei fehlender Grasnarbe oder intensiver bzw. langanhaltender Überströmung wird die Böschung jedoch schnell beschädigt. Es kann zu einem lokalen Versagen wie Erosion der Binnenböschung und des Böschungsbewuchses und schließlich zum Abtrag des Deichkörpers kommen. Hydrodynamisches Versagen führt dann zum Eintritt konstruktiver Versagensmechanismen, also der Beschädigung von Binnen-, Seeböschung oder dem Inneren des Deichs.

Durchströmung liegt vor, wenn Wasser einen Deich durchsickert und an der Luftseite austritt. Dies tritt bei langanhaltendem Einstau, hohem Feuchtezustand des Deiches oder

einer beschädigten Dichtungsschicht ein. Wenn das Sickerwasser nicht am Deichfuß, sondern weiter oben auf der Böschung des Deiches austritt, ist dort ein typischer Entstehungsort für rückschreitende Erosion. Deichmaterial wird an der Deichoberfläche ausgespült und abgetragen, entlang der Fließwege entstehen Kanäle parallel zur Böschung und in den Deichkörper hinein. Strömt Wasser durch einen mehrschichtigen Deichaufbau, kann zusätzlich Kontakterosion zwischen verschiedenen Schichtgrenzen auftreten. Feinkörniges Material bindiger Böden kann in Richtung der Strömungskraft in die grobkörnigeren Schichten einer durchlässigeren Schicht gelangen. Das Porenvolumen des feinkörnigen Materials nimmt an der Schichtgrenze ab, man spricht von einer Matrixerosion.

Bereits an den nun beschriebenen Beispielen des Überströmens und der Durchströmung wird deutlich, wie verschiedene meist unbekannt Parameter (Zustand der Grasnarbe, Zustand der Deck- und Dichtungsschichten, Vorfeuchte des Deiches, etc.) das tatsächliche Eintreten eines Deichbruchs beeinflussen.

Alle im Schrifttum beschriebenen Mechanismen beschädigen den Deich zunächst lokal, breiten sich aber schnell großflächig aus und können schließlich zu einem Teil- oder sogar Gesamtdeichbruch führen. Ferner ist es in der Regel das Zusammenspiel mehrerer Parameter, welches ein Versagen verursacht: Das Versagen wird nicht nur durch die tatsächliche Belastung auf den Deich, sondern auch durch meteorologische, geometrische und biologische Faktoren, durch die lokale Bodenbeschaffenheit und Vorschädigungen ausgelöst, die allesamt den Widerstand des Deichs beeinflussen. Der tatsächliche Widerstand eines Seedeiches gegen Wellen- und Strömungsangriff während Sturmfluten ist dementsprechend zeitabhängig und nicht zwingend identisch mit dem Bemessungswiderstand (Kortenhaus und Oumeraci 2002, Schüttermpf und Oumeraci 2004).

### 2.3 Deichmonitoring

Deichmonitoring dient dazu, Anomalien in der Deichgeometrie oder der Deichbeschaffenheit frühzeitig zu erkennen, sodass durch Reparaturen einem Deichversagen vorgebeugt werden kann. Da die Verantwortung für Seedeiche in Deutschland auf Landesebene liegt, gibt es keine einheitlichen Richtlinien bezüglich des Monitorings deutscher Seedeiche. In den jeweiligen Generalplänen für Küstenschutz der Länder sind Details zur Instandhaltung und Überwachung der Küstenschutzbauwerke niedergeschrieben (MELUND Schleswig-Holstein 2013, NLWKN 2007). In §18 des Niedersächsischen Deichgesetzes (NDG) ist eine zweimal jährlich (im Frühjahr und im Herbst) durch die untere Deichbehörde gemeinsam mit den Deichverbänden durchzuführende Deichschau vorgeschrieben. Die Pflicht zur Deicherhaltung, -instandhaltung und -verteidigung (bis zur Feststellung des Katastrophenfalls) obliegt dabei den verantwortlichen Deichverbänden (Niedersachsen) bzw. dem Regiebetrieb (Schleswig-Holstein). Für Flussdeiche werden entsprechende Sicherheitsstandards deutschlandweit in DWA Merkblatt 507-1 empfohlen (DWA 2011).

Die Grundlagen des Deichmonitorings bilden sowohl für Fluss- als auch für Seedeiche Höhenmessungen und eine (visuelle) Inspektion der Deichoberfläche durch Deichbegehungen. Eine intakte Deichoberfläche ist integraler Bestandteil eines funktionstüchtigen Deiches und daher regelmäßig auf sichtbare Schäden, auf Spuren von Wühltieren und den Zustand der Vegetation zu untersuchen. Die Sichtkontrollen (Deichschau) werden jährlich bis halbjährlich durchgeführt sowie zusätzlich nach jedem Extremereignis. Unter

Normalbedingungen werden Höhenmessungen alle zehn Jahre durchgeführt, um eventuelle Setzungen oder Absenkungen zu erkennen. Hinzu kommen in Schleswig-Holstein die seit dem Jahr 2001 im „Generalplan Küstenschutz“ festgeschriebenen Sicherheitsüberprüfungen, mit denen in einem zehn- bis fünfzehnjährigen Intervall der Sicherheitsstatus aller Deiche zu überprüfen ist (MELUND Schleswig-Holstein 2013). Hierbei wird auf Grundlage des maßgebenden Sturmflutwasserstandes entlang der gesamten Küste jeweils für Deichabschnitte mit einer Länge von je 500 m die zu erwartende Wellenüberlaufrate berechnet. Diese darf zur Erfüllung des Sicherheitsstandards maximal 2 l/s m betragen.

Während Extremereignissen verschiebt sich der Fokus der Deichinspektion, zusätzlich erfolgen geotechnische Sicherheitseinschätzungen. Zur Bewertung der Deichstabilität werden nun weitere Indikatoren visuell aufgenommen: Hierzu zählen Freibord, Erosionsschäden, Eisstau und Böschungsrutschungen auf der wasserseitigen Böschung sowie ein erhöhter Sickerwasseranfall, Bodenhebungen, Trichterbildung und große Bodenrisse auf der Binnenseite (DWA 2011).

Die Deichschau bzw. Deichwacht durch geschultes Personal stellt folglich nach wie vor das Hauptwerkzeug bei der Überwachung von Deichen dar. Schlechtes Wetter und die Länge der Deiche machen es jedoch schwierig, alle Indikatoren durch visuelle Kontrolle zu erfassen. Und auch unter idealen Bedingungen bietet eine rein visuelle Bewertung keine vollständig verlässlichen Daten, da einige Versagensmechanismen (z. B. ein Versagen durch einen Erosionsgrundbruch) in ihren anfänglichen Stadien nicht visuell erkennbar sind (Bersan et al. 2015). Eine kontinuierliche und zuverlässige Überwachung der Deiche ist zurzeit folglich nicht möglich, wird jedoch beispielsweise in DWA M 507-1 zumindest als Sicherheitsverbesserungsmaßnahme für Deiche mit hoher Sicherheitsklassifikation oder besonderen Sicherheitsbestimmungen empfohlen (DWA 2011).

Da der Schutz vor Überflutungen und die Verbesserung der Hochwasserschutzanlagen ein globales Thema sind und die sensorgestützte Überwachung in allen Lebensbereichen zunimmt, lassen sich weltweit Arbeiten zur Entwicklung neuartiger, sensorgestützter Deichmonitoring-Verfahren finden. Als Ergänzung zur klassischen Deichschau kann der Einsatz sensorgestützter Verfahren ein kontinuierliches Deichmonitoring ermöglichen. Neuartige Deichmonitoring-Verfahren lassen sich grundsätzlich in drei Kategorien unterteilen (Cundill 2016):

- Fernerkundungsmethoden
- Nicht-intrusive bzw. geophysikalische Messmethoden
- Intrusive Messmethoden

Durch Fernerkundungsverfahren wird die von der Erdoberfläche reflektierte elektromagnetische Strahlung gemessen und ausgewertet. Die elektromagnetische Strahlung kann dabei aktiv von den luft- oder weltraumgestützten Trägersystemen (z. B. Flugzeugen, Drohnen oder Satelliten) ausgesandt werden oder es wird die von den Objekten reflektierte Sonnen- oder Eigenstrahlung gemessen. Auf Grundlage des Anteils der reflektierten Strahlung lassen sich Informationen über die Eigenschaften der untersuchten Geländeoberflächen ableiten. So können Bodenarten unterschieden, Rückschlüsse auf den Zustand der Vegetation gezogen, aber auch Änderungen in der Bodenfeuchte oder Anomalien in der Geländeoberfläche erkannt werden (Ohle et al. 2006). Hinsichtlich ihrer Eignung zum Deichmonitoring wurden bereits Verfahren mit Wellenlängen im Bereich der Infrarot-

Mikro- und Radiowellen untersucht. Hierzu zählen die Verwendung von Radar- und Lidarverfahren sowie der Einsatz von Infrarot- und Multispektralkameras sowie photogrammetrische Verfahren (Ohle et al. 2006, Royet et al. 2013, Naumann et al. 2014, Cundill 2016).

Auf Grundlage der Daten kann der Ist-Zustand der Deiche für eine mögliche Gefährdung der Standsicherheit in gewissen Grenzen gut erfasst werden. Der Einsatz von Fernerkundungsmethoden kann die Katalogisierung weiter Teile eines Deiches verbessern, jedoch sind einige Verfahren, insbesondere optische und thermale Verfahren, stark von meteorologischen Bedingungen abhängig (Ohle et al. 2006, Royet et al. 2013). Methoden der Fernerkundung ermöglichen zwar ein vergleichbar schnelles und flexibles, jedoch diskontinuierliches Deichmonitoring, da sie ähnlich einer visuellen Inspektion der Deiche nur eine Momentaufnahme zum Zeitpunkt der Befliegung liefern können.

Geophysikalische Messmethoden bezeichnen hier Verfahren, die von der Oberfläche des Deiches physikalische Eigenschaften des Deichkörpers und -untergrundes erfassen. Dabei ist das Einbringen von Messtechnik in den Deichkörper nicht erforderlich, die Messungen finden jedoch im Gegensatz zur Fernerkundung direkt am Deich statt. Eine Übersicht über geeignete und bereits eingesetzte Verfahren findet sich in Royet et al. 2013 und Cundill 2016. Der Einsatz von geophysikalischen Messmethoden liefert detaillierte Informationen über den inneren Zustand des Deiches und kann eine Deichinspektion sinnvoll ergänzen. Er ist allerdings personal-, zeit- sowie materialaufwendig und für ein kontinuierliches Deichmonitoring ungeeignet.

Für intrusive Monitoringverfahren werden Sensoren unmittelbar in den Deich eingebaut, um Parameter wie Temperatur, Porenwasserdruck, Neigung, Vibration oder Spannungen direkt zu messen. Die Sensoren messen kontinuierlich und können zeitlich hochaufgelöste Daten zum Deichzustand bereitstellen. Falls Anomalien der Messwerte einen definierten Schwellenwert überschreiten, können Beziehungen zwischen Messwerten und Sicherheitsrisiken mit geo-historischen Daten kombiniert und eine Sicherheitsberechnung durchgeführt werden (Ponziani und Bachmann 2016, Krzhizhanovskaya et al. 2011).

Bislang entwickelte Sensoren zum intrusiven Deichmonitoring lassen sich grundsätzlich in sogenannte Microelectromechanical Systems (MEMS) und Faseroptische Sensoren (FOS) unterteilen. MEMS werden als ein Netzwerk bestehend aus verschiedenen Sensor-knotenpunkten (z. B. Piezometern, Temperatursensoren, Neigungsmessern, Drucksensoren) in den Deich eingebracht. Das Sensornetzwerk erstreckt sich über große Bereiche des Deiches und kann so ein umfassendes und räumlich hoch aufgelöstes Bild des Deichzustands liefern. In der Literatur lassen sich einige vielversprechende Anwendungsfälle finden (Desrosiers et al. 2013, Peters und van der Vliet, P. P. 2011, Abdoun et al. 2007, Pyayt et al. 2013), jedoch erweist sich die detaillierte Untersuchung der Deichabschnitte mittels MEMS mit Kosten im Bereich von bis zu 5.000 \$/10 m als kostspielig (Zeghal et al. 2013).

Faseroptische Sensoren agieren über ihre gesamte Länge als Sensor. Hierzu wird ein definiertes optisches Signal eines energiereichen Lasers durch ein Glasfaserkabel gesendet. Die zurückgestreuten Signale können hinsichtlich ihrer Frequenzverteilung analysiert werden und erlauben Rückschlüsse auf die Temperatur am Punkt der Reflexion (Dornstädter 2015). Auswertungen der Laufzeitlänge wiederum erlauben eine lokale Bestimmung des Orts der gemessenen Temperatur, sodass sich Veränderungen in der Umgebungstemperatur des Sensors ortsaufgelöst messen lassen, dieses Verfahren wird als verteilte faseroptische Temperaturmessung (VFTMS) bzw. distributed temperature sensing (DTS) bezeichnet. Bei

einem Einbau in Stauanlagen kann durch die Messung von Temperaturveränderungen indirekt auf einen erhöhten Sickerwasserfluss und damit auf bevorzugte Sickerwege innerhalb des Bauwerks geschlossen werden (Aufleger et al. 2007). Die Reflexion des Lasersignals wird zusätzlich durch Verformungen der Glasfaser beeinflusst, wodurch bei entsprechender Frequenzanalyse auch Informationen über die Spannungsverteilung am Sensor abgeleitet werden können (DTSS = distributed temperature and strain sensing).

Faseroptische Sensoren finden seit den 1990er Jahren vielfach Anwendungen bei der Leckage-Ortung in Wasserbauwerken sowie dem Monitoring von geotechnischen Anlagen (Aufleger et al. 2007 und Pei et al. 2014). Hierzu zählen auch einige testweise Einsätze in Deichbauwerken: Im Rahmen des *Ijkdijk* Projekts wurden Faseroptische Sensoren parallel zur Längsachse eines Versuchsdeiches an der Grenzfläche einer Sand- und einer Ton-schicht eingebaut. Mittels der Sensoren ließen sich Piping-Prozesse bereits einige Stunden vor Versagen des Deiches erkennen. Durch detaillierte Analysen war es im Nachhinein sogar möglich, erste Anzeichen der Versagensmechanismen mehrere Tage im Voraus zu identifizieren. Damit ließ sich zeigen, dass Temperaturmessungen mittels FOS effektiv Anzeichen von Versagen erkennen lassen und für ein kontinuierliches Monitoring in Echtzeit geeignet sind (Bersan et al. 2015, Vries et al. 2014).

## 2.4 Forschungsbedarf

Da sich der tatsächliche, zeitabhängige Widerstand eines Seedeiches und damit auch die Versagenswahrscheinlichkeit des Deiches schwer berechnen lässt, kann ein sensorgestütztes Frühwarnsystem helfen, eine Deichverschlechterung oder einen Deichschaden frühzeitig zu erkennen. Bislang verfügen nur FOS-basierte Systeme über das Potenzial ökonomisch sinnvolle Lösungen für die Überwachung langer Deichabschnitte zu bieten. Die oben vorgestellten Praxisbeispiele zeigen, dass diese Systeme in einigen Anwendungen bereits verlässliche Resultate geliefert haben.

In den bislang vorgestellten Fällen müssen die Sensoren als zusätzlicher Bestandteil in das Bauwerk eingebaut werden, ferner findet ihr Einbau linienhaft und nicht über die gesamte Deichböschung statt. Glasfaserkabel lassen sich jedoch auch in im Wasserbau übliche Filtervliese integrieren, erlauben so ein flächenhaftes Monitoring und machen einen zusätzlichen Sensoreinbau obsolet (Thiele et al. 2008). Ein Forschungsvorhaben im Rahmen des *rimax*-Programms konzentrierte sich auf die Detektion von Deformationen im Deich. Erste Feldversuche verliefen problematisch, da es beim Einbau zum Bruch der Glasfaserkabel kam. Weitere Testeinbauten konnten zufriedenstellende Ergebnisse, in denen die Ausbildung einer Bruchmuschel durch das System detektiert wurde, erlangen.

Weitere erfolgreiche Praxistests zur Integration von Sensoren auf Geotextilien fanden erneut im Rahmen des *Ijkdijk*-Projekts in den Niederlanden statt. In einem Testdeich wurden vier mit Sensoren bestückte Geotextilstreifen von je 100 m Länge an der Deichkrone, mittig des Deichkörpers, am Deichfuß und vor dem landseitigen Deichfuß installiert. Die genutzten Fasern messen laut Herstellerangaben Temperatur und Belastung mit hoher Präzision über eine Ausdehnung von bis zu 20 km. Mithilfe der Sensoren war es möglich, einen instabilen Bereich bereits mehr als einen Tag vor dem tatsächlichen Versagen zu erkennen, erste Anzeichen von Deformationen konnten bereits zweieinhalb Tage vor dem eigentlichen Versagen identifiziert werden (Artières et al. 2011). Auch hier schlussfolgern



die Autoren, dass der Einsatz des Systems eine Reduzierung der Risiko- und Instandhaltungskosten bewirken und als Frühwarnsystem funktionieren kann.

Dennoch, der Einsatz von FOS-basierten Messsystemen birgt einige Herausforderungen: Die Auswertung der Messsignale ist komplex und die Ausbildung der Anschlussstellen zwischen Faser und Messeinheit kritisch. Ferner kann die Messung von Feuchtigkeitsänderungen im Deich – falls überhaupt verfolgt – nur indirekt über die Messung von Temperaturänderungen erzielt werden. Zu einem flächenhaften Einsatz von in Geotextilien integrierten Sensoren ist es trotz der vielversprechenden Ergebnisse bislang nicht gekommen und die damals beteiligten Hersteller bieten die entwickelten Produkte nicht mehr an.

Aus diesen Gründen ist die Entwicklung neuer Verfahren interessant, welche bei möglichst kostengünstiger Herstellung eine einfache und flächenhafte Integration der Sensoren in den Deichkörper erlauben. Diese Sensoren müssen ausreichend robust und für einen langjährigen Einsatz im Deichkörper geeignet sein. Der Betrieb der Sensoren sollte autark und unabhängig vom Stromnetz erfolgen und die Signalübertragung ist so umzusetzen, dass eine stabile und kontinuierliche Datenübertragung gewährleistet wird. Ferner sollte die Auswertung der Sensorsignale automatisch erfolgen, sodass die Ergebnisse einfach verständlich und für Verantwortliche direkt einsehbar sind, um zeitnah Warnungen zu generieren bzw. Instandsetzungsmaßnahmen zu veranlassen.

### 3 Konzept des entwickelten Deichmonitorings

Wie vorab beschrieben, erfolgt die Überwachung von Seedeichen während sowie nach Sturmfluten zurzeit vor allem auf Grundlage visueller Überprüfungen. Um jedoch gemäß dem Ziel des Projekts *EarlyDike* ein verbessertes Frühwarnsystem für Seedeiche zu entwickeln, ist ein Deichmonitoring erforderlich, mithilfe dessen kontinuierlich und möglichst entlang der gesamten Deichlinie gleichzeitig, Informationen über den Zustand der Deiche gewonnen werden können. Hierzu ist ein sensorbasiertes Deichmonitoring zu entwickeln, das flächendeckend eingesetzt werden kann und das dem im Rahmen des Projekts entwickelten GeoPortal Echtzeitdaten zum inneren Zustand der Deiche zur Verfügung stellt.

Ursache oder Auswirkung aller im Schrifttum identifizierten Versagensmechanismen ist im Letzten ein erhöhter Wassereintritt in Teile des Deiches, die unter normalen Bedingungen nicht wassergesättigt sind. Sensoren, die einen Wassereintritt im Deich detektieren, können dazu beitragen, Deichverschlechterungen und beschädigte Deichabschnitte, die zu schwach für extreme Sturmfluten geworden sind, rechtzeitig zu erkennen. Aber auch während einer Sturmflut können die Sensoren dazu beitragen, besonders gefährdete Deichabschnitte zu identifizieren und im schlimmsten Fall Warnungen für einen drohenden Deichbruch zu generieren, damit entsprechende Notfallmaßnahmen eingeleitet werden können (vgl. Abbildung 3).

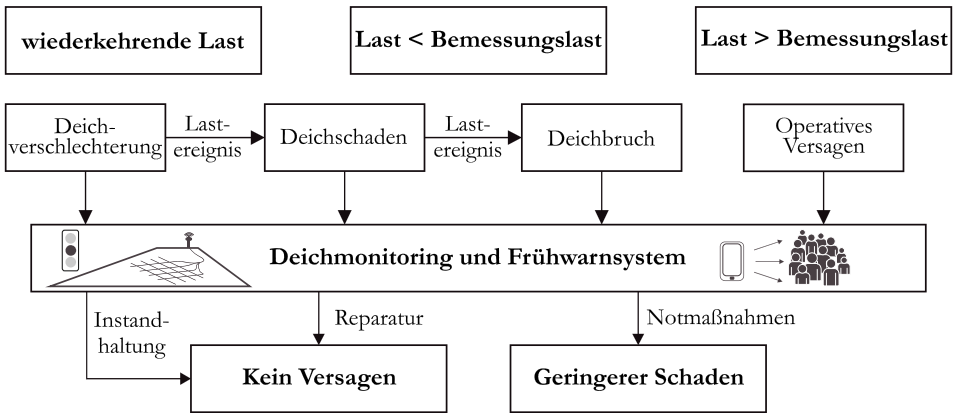


Abbildung 3: Möglichkeit eines Frühwarnsystems, den Prozess, der zur Entwicklung eines Deichbruchs führt, zu unterbrechen.

Das entwickelte Monitoringsystem basiert daher primär auf der Messung eines veränderten Wassergehalts innerhalb der Deichstruktur, darüber hinaus wird auch die Entwicklung von Sensoren zur Bestimmung von Verformungsänderungen verfolgt. Die Identifizierung dieser Parameter erfolgt durch intelligente Geotextilien, die in Zusammenarbeit mit dem *ITA* entwickelt werden. Im Folgenden wird das Funktionsprinzip der intelligenten Geotextilien beschrieben und im Anschluss skizziert, wie die mithilfe der Sensoren gewonnenen Daten zur Detektion von Schäden in der Deichstruktur genutzt werden können. Für eine detaillierte technische Beschreibung der Sensorentwicklung wird auf Schwab et al. 2021 verwiesen.

Zur Herstellung der intelligenten Geotextilien werden Carbonfaserbündel mittels Sticktechnik auf ein textiles Trägermaterial (z. B. ein Wasserbauvlies) aufgebracht. Der Einsatz hocheffizienter Stickmaschinen erlaubt dabei die schnelle und kostengünstige Integration der Sensoren in das Textil (vgl. Abbildung 4). Beide Sensortypen (Feuchtesensoren und Dehnungssensoren) basieren auf der Detektion von Änderungen in der Leitfähigkeit. Die Detektion von Feuchtigkeit im Deich erfolgt mittels eines Sensorpaars: Zwei nicht isolierte Carbonfaserbündel werden mit einem Abstand von wenigen Zentimetern auf ein wasser-durchlässiges Trägermaterial (Geotextil) aufgebracht. Zwischen den beiden Faserbündeln wird ein geringes elektrisches Potential angelegt und anschließend der Potentialabbau zwischen den beiden Sensoren gemessen. Die Carbonfasern selbst weisen eine hohe elektrische Leitfähigkeit auf. Die Sensorumgebung bei Einbau des Sensortextils im Deich wiederum verfügt bei geringem Wassergehalt über eine geringe elektrische Leitfähigkeit. Damit geht der elektrische Widerstand zwischen den beiden Fasern gegen unendlich, sodass nahezu das komplette Potenzial zwischen den Sensorfasern abfällt. Steigt der Wassergehalt in der Sensorumgebung stark an, so fungiert das umgebende Wasser als Dielektrikum, der Widerstand zwischen den Sensorpaaren sinkt und es kommt zu einem kleinen Stromfluss zwischen den Faserbündeln, was sich wiederum in einem abfallenden Potenzialunterschied am Faserpaar messen lässt. Je feuchter die Umgebung der Fasern wird, desto höher ist die Leitfähigkeit und desto geringer ist der gemessene Potenzialunterschied. Abbildung 5 skizziert das Messprinzip für die Feuchtigkeitsdetektion.



Abbildung 4: Aufsticken der Sensoren (Carbonfasern) auf Wasserbauvlies unter Einsatz einer acht-köpfigen Stickmaschine (Foto: Schwab 2018).

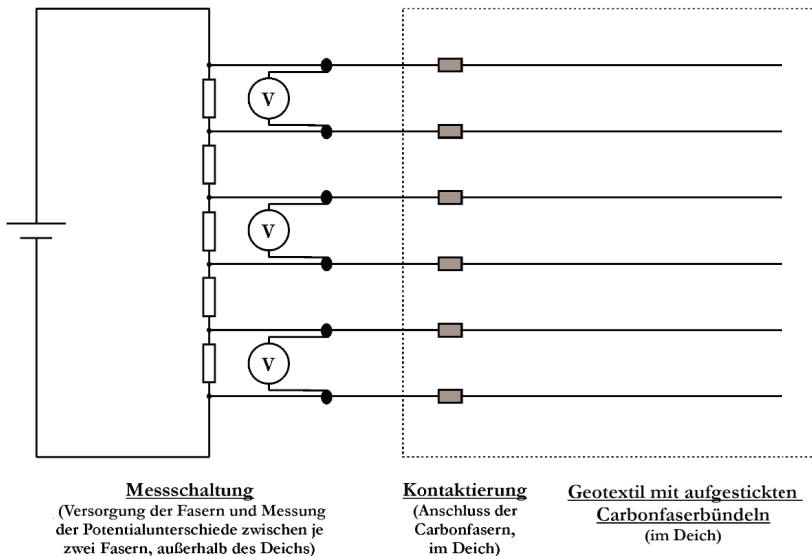


Abbildung 5: Vereinfachte Skizze zum Funktionsprinzip der entwickelten Feuchtesensoren (hier für drei Feuchtesensoren dargestellt).

Die Bestimmung der Dehnung soll auf Grundlage der Spannungsmessung entlang eines isolierten Carbonfaserrovings erfolgen. Hierbei wird die Eigenschaft genutzt, dass sich die Leitfähigkeit der Carbonfasern mit der Dehnung der Faser verändert. Untersuchungen hierzu fanden bislang lediglich im Rahmen von Labortests am ITA statt und werden im vorliegenden Beitrag nicht weiter diskutiert (s. hierfür Schwab et al. 2021). Das im folgenden beschriebene Monitoringsystem fußt auf der Detektion von Wassergehaltsänderungen

im Deichkörper, während die Detektion von Dehnungsänderungen (die das System weiter verbessern kann) außer Acht gelassen wird.

Abbildung 6 skizziert schematisch den vorgeschlagenen Einbau des neuentwickelten Sensortextils auf der Binnenböschung eines Deiches. Die Carbonfaserpaare verlaufen in regelmäßigen Abständen entlang der Deichböschung parallel zur Deichlinie. Das mit den Fasern bestickte Textil wird dabei zwischen Deichkern und Außendichtung (Kleischicht) eingebaut. Solange Grasnarbe und Kleischicht des Deiches an allen Stellen intakt sind, liegen die Fasern entlang der Böschung außerhalb der wassergesättigten Zone des Deiches und Sickerwasser erreicht das Sensortextil nicht.

Unter Sturmflutbedingungen kann der Deich durch Wellenauf- und Wellenüberlauf belastet werden. Beginnender Wellenaufbruch kann zu einer Erosion der Grasnarbe führen, die sich unter anhaltendem Wellenangriff zu großräumiger Erosion ausweiten kann. Wellendruckschläge können zu Kleiausbrüchen führen und bei langanhaltender Belastung kann es schließlich zu Böschungsabbrüchen und der Ausbildung von Abbruchkanten kommen (Schüttertrumpf und Oumeraci 2004). All diese Prozesse haben eine starke Beschädigung bis hin zur vollständigen Zerstörung der Außendichtung der seeseitigen Böschung zur Folge, was das Eindringen von Wasser in den Deichkörper ermöglicht und zu einem Anstieg der Sickerlinie bzw. wassergesättigten Zone an der Binnenböschung des Deiches führt: Die Sensorfasern würden einen Wasserspiegelanstieg vom Deichfuß her detektieren (1). Durch Einbau der Sensortextilien auf der Binnenböschung ließen sich Schäden an der Außenböschung folglich indirekt detektieren.

Kommt es zu einem Wellenüberlauf, kann dies auf der Binnenböschung eine Erosion der Grasnarbe und später der Kleischicht verursachen. Es kann ferner zur Infiltration von Wasser in Risse oder Hohlräume der Kleischicht kommen, die eine Schwächung des Bodens zur Folge hat und schließlich zu Hangrutschungen und Rasenverlegung der landseitigen Böschung führt (Schüttertrumpf und Oumeraci 2004). In diesem Fall unterscheidet sich das Sensorsignal von Fall (1), da zu Beginn nur einzelne Sensoren, sehr bald darauf aber alle Sensoren auf der Binnenseite des Deiches Wassereintritte detektieren werden. Hier erfolgt die Detektion von Schäden direkt (2).

Sobald die Kleischicht abgetragen ist und eine Erosion des Sandkerns beginnt, wird der Deich schnell zerstört. Daher ist es unter Sturmflutbedingungen notwendig, eine kontinuierliche Überwachung der Sensoren und eine automatische Datenanalyse zu gewährleisten, sodass Auffälligkeiten und Schäden sofort erkannt werden und die Generierung von rechtzeitigen Warnungen ermöglicht wird. Aber auch unter Nicht-Sturmflutbedingungen sollten die vom intelligenten Geotextil generierten Daten regelmäßig abgerufen und analysiert werden. Auf diese Weise können entstandene Schäden in der Kleischicht (z. B. als Folge von Wühltierangriffen, Trittschäden, Frost oder Trockenheit siehe MELF Niedersachsen 1962) durch eine erhöhte Infiltration von Regenwasser in den Deich bereits vor dem Auftreten einer Sturmflut detektiert und der Deich kann rechtzeitig in Stand gesetzt werden. Für ein zuverlässiges Monitoring der seeseitigen Außendichtung ist hierfür allerdings zusätzlich der Einbau des Textils unterhalb der seeseitigen Kleischicht empfehlenswert.

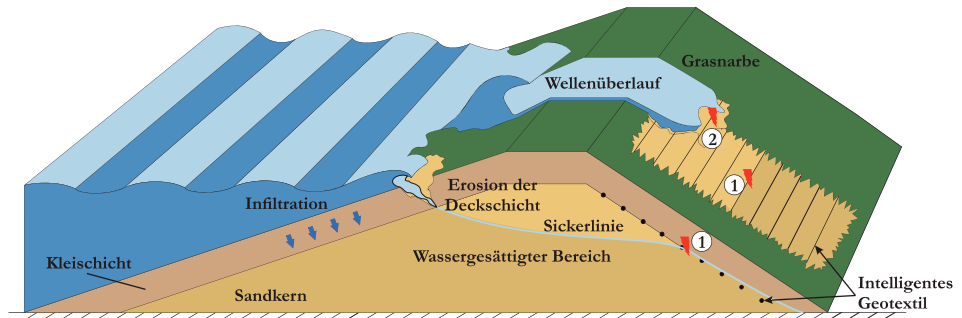


Abbildung 6: Monitoringkonzept unter Verwendung der geotextilen Sensoren: Bei Einbau des Sensortextils zwischen Kleinschicht und Deichkern auf der Binnenböschung lassen sich Schäden an der Außenböschung des Deiches durch einen Anstieg der wassergesättigten Zone indirekt erkennen (1), während Schäden auf der Binnenböschung des Deiches direkt identifizierbar sind (2).

Während die Prozesse im Sturmflutfall sehr schnell vonstattengehen und auch bei sofortiger Schadensdetektion ein größerer Deichschaden vermutlich kaum verhindert werden kann, bietet insbesondere das kontinuierliche Monitoring unter normalen Witterungsbedingungen die Möglichkeit, nach außen nicht sichtbare Schwachstellen im Deich frühzeitig zu detektieren und in Stand zu setzen, sodass Deichschäden infolge geschwächter Deichquerschnitte, wie sie in den Schadensanalysen während vergangener Sturmfluten beschrieben wurden (siehe z. B. MELF Niedersachsen 1962, MELF Schleswig-Holstein 1962), deutlich reduziert werden können.

## 4 Material und Methoden

### 4.1 Konzeption der Modellversuche

Die Entwicklung des in Kapitel 3 beschriebenen sensorbasierten Deichmonitorings ist eng mit der Entwicklung der intelligenten Geotextilien bzw. Sensorvliese verbunden. Die technische Entwicklung und Herstellung der Sensortextilien erfolgen am *IT4*. Die Prüfung der Funktionsfähigkeit der Sensoren, die Entwicklung einer Auswerterroutine zur Interpretation der Messsignale und schließlich die Beurteilung, ob sich das eingesetzte Messprinzip zum Deichmonitoring eignet, können jedoch nur durch Einbau und Test der Sensorvliese in einer möglichst realitätsnahen Umgebung erfolgen. Physikalische Modellversuche, die in der Versuchshalle des *IWW* durchgeführt werden, leisten hier den entscheidenden Beitrag. Ein zum Test der Sensorvliese geeigneter Versuchsstand muss dabei die folgenden Kriterien erfüllen:

- Aufbau eines typischen Deichprofils unter Verwendung geeigneter, in der Natur verwendeter Materialien
- Möglichkeit zur Einstellung von definierten und reproduzierbaren Belastungen
- Möglichkeit zur Simulation naturnaher Belastungen
- Möglichkeit zur Abbildung und Provokation von Deichversagensmechanismen
- Einsatz herkömmlicher Messtechnik zur kontinuierlichen messtechnischen Überwachung aller Vorgänge


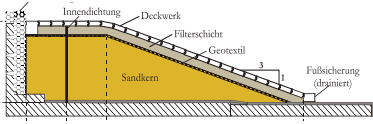
Aus den genannten Aspekten, die bei der Planung eines geeigneten Versuchsstands zu beachten sind, resultieren wiederum konkrete Anforderungen an

- die Größe des Modelldeichs,
- die Beschaffenheit der Modellumgebung,
- die Leistungsfähigkeit der Wasserzu- und -ableitung sowie
- den Einsatz der Messtechnik.

Unter Beachtung all dieser Aspekte wird in der Versuchshalle des IWW ein großmaßstäblicher Modelldeich errichtet, der für die physikalische Untersuchung der Sensorvliese zur Verfügung steht. Das Modell befindet sich in einer 20 m langen und bis zu 3 m hohen Betonrinne, in der die luftseitige Böschung eines 1,8 m hohen Deichs sowie eine angeglichene Deichkrone von 2 m Breite aufgebaut wird. Eine Beschreibung des Versuchsstands, des Modellaufbaus sowie der durchgeführten Versuche findet sich in Kapitel 4.3.

Doch bevor die neu entwickelten, mit Sensorfasern ausgestatteten Geotextilien in einem großmaßstäblichen Modelldeich getestet und validiert werden, erfolgt der Einbau von Prototypensensoren in einen überhöhten, kleinmaßstäblichen Modelldeich (Kapitel 4.2). Ziel ist es hier, die generelle Funktionalität des entwickelten Sensorkonzepts zu testen, während an den untersuchten Prototypen Optimierungen im Sensordesign vorgenommen werden können, ohne großen Aufwand bei Ein-, Aus- und Umbau zu verursachen. Tabelle 1 fasst die durchgeführten Modelluntersuchungen zusammen und stellt die wesentlichen Vor- und Nachteile gegenüber.

Tabelle 1: Durchgeführte Modelluntersuchungen zur Entwicklung der geotextilen Sensoren.

	Kleinmaßstäbliches Deichmodell	Großmaßstäbliches Deichmodell
		
<b>Dimensionen</b>	H = 0,4 m, B = 1,0 m, T = 0,3 m Böschungsneigungen 1:3	H = 1,8 m, B = 7,4 m, T = 2,0 m Böschungsneigung 1:3 $Q_{\max} = 900 \text{ l/s}$
<b>Baustoffe</b>	Homogener Deichkörper aus Quarzsand	Zwei-Zonen-Deich mit Innendichtung; Deckwerksaufbau aus Geotextil, Filterschicht und Betonformsteinen; wasserseitige Böschung nicht abgebildet
<b>Messtechnik</b>	1 Ultraschallsonde Kamera	6 Ultraschallsonden 10 Druckmessdosen (im Deckwerk) 10 Druckmesspunkte (auf Sohle) Induktiver Durchflussmesser Kameras (Photogrammetrie)
<b>Belastung</b>	Durchsickerung	Durchsickerung, Überströmung
<b>Zeitraum je Versuch</b>	ca. 1 h, maximal 1 – 2 Tage	mehrere Stunden, bis zu 8 Monate
<b>Eingesetzte Sensorvliese</b>	Messvlies I, Messvlies II	Messvlies III, Messvlies IV
<b>Ziel der Untersuchung</b>	Bestätigung des Funktionsprinzips; Test verschiedener Designs und Materialien für großes Textil	Test und Validierung der Sensoren unter realitätsnahen Bedingungen
<b>Vorteile</b>	Schneller Auf- und Umbau; flexibler Einsatz mehrerer Textilien; Textil direkt zugänglich; Optische Beobachtung aller Vorgänge	Robustheitstest der Sensoren; Abmessungen und Abstände der Sensoren realitätsnah; Rand- und Modelleffekte vernachlässigbar
<b>Nachteile</b>	Starke Rand- und Modelleffekte	Aufwendiger Auf- und Umbau; Textil unter Deckwerk nicht direkt zugänglich; Einsatz vielfältiger Messtechnik zur Validierung erforderlich

## 4.2 Kleinmaßstäbliche Untersuchungen

### 4.2.1 Aufbau des Modelldeichs

Zum testweisen Einbau von ersten Prototypen der entwickelten Sensorvliese wird ein kleinmaßstäbliches Deichmodell in einer Kipprinne in der Versuchshalle des IWW aufgebaut. Die Seitenwände der Rinne sind aus Glas, was eine optische Beobachtung der Prozesse ermöglicht. Mittels vertikaler Einbauten wird ein Bereich der Rinne abgesperrt, in dem das zu untersuchende Deichmodell eingestaut werden kann.

Der Deich besteht – mit Ausnahme eines später beschriebenen Referenzfalls – aus einem homogenen Sandkörper (Quarzsand,  $d_m = 0,5 \text{ mm}$ ). Die Geometrie orientiert sich an einem klassischen Deichprofil mit Berme, der Deich ist jedoch leicht überhöht und die wasserseitige Böschung steiler ausgebildet als bei Seedeichen üblich. Der Deich wird in einem Überprofil aufgeschüttet, verdichtet und anschließend mit einer Platte entlang angebrachter Profile abgezogen. Im Bereich vor dem Deichkörper befindet sich eine Ultraschallsonde, die die Höhe des anstehenden Wasserspiegels aufzeichnet. Der Verlauf der Sickerlinie im Deich sowie die Entwicklung des Deichprofils werden mittels einer Kamera aufgezeichnet. Abbildung 7 zeigt einen Längsschnitt durch den Versuchsstand.

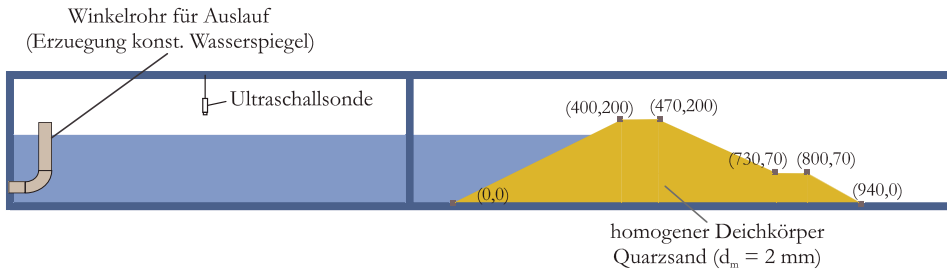


Abbildung 7: Versuchsaufbau in kleiner Kipprinne des IWW, alle Angaben in mm.

#### 4.2.2 Versuchsdurchführung

Nach Aufbau des Deiches und Einbau der intelligenten Geotextilien (s. Kapitel 4.2.4 und 4.2.5) erfolgt eine langsame Erhöhung des Wasserstands und damit ein Einstau des Deiches. Der Wasserspiegel wird bis auf einen maximalen Wasserstand auf Höhe der Deichkrone gesteigert und dort konstant gehalten. Im Folgenden werden die Ergebnisse von drei der durchgeführten Versuche beschrieben und diskutiert:

- Referenzmessung: Deich ohne Sensoren
- Einbau Messvlies I
- Einbau Messvlies II

#### 4.2.3 Referenzmessung

Die Referenzmessungen finden ohne Sensoreinbau an einem Modell eines Zweizonendeiches bestehend aus einem homogenem Sandkörper und einem Kiesfilter statt. Ziel dieser Untersuchungen ist, optimale Verhältnisse für die optische Auswertung der Sickerlinie einzustellen. Ferner gilt es, die zeitliche Entwicklung der Sickerprozesse im kleinen Deichmodell vorab ohne Einbau des Sensorvlieses aufzunehmen, um Anpassungen am Deichaufbau vorzunehmen und später Rückschlüsse auf etwaige Wechselwirkung zwischen Deichdurchströmung und Sensoreinbau identifizieren zu können.



#### 4.2.4 Messvlies I

Bei den Versuchen mit Sensoren werden diese auf der landseitigen Böschung eingebaut. Zur Sicherung gegen Aufschwimmen wird das Geotextil mit einer weiteren Lage Sand beschwert. Abbildung 8 zeigt den fertig aufgebauten Modelldeich mit Sensoren.

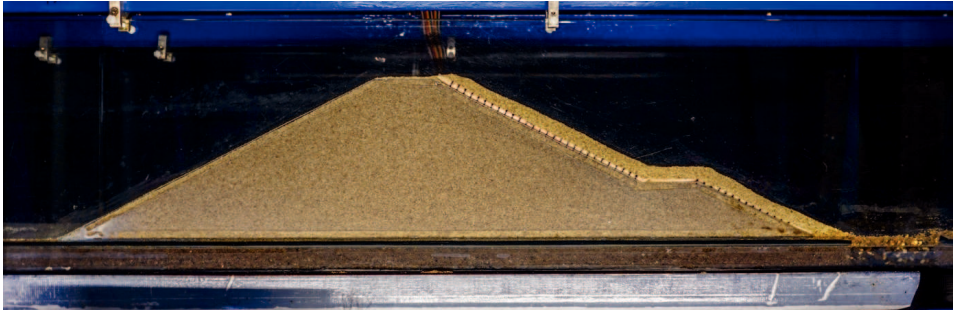


Abbildung 8: Aufgebauter Modelldeich mit Sensoren in der kleinen Kippbinne.

Das auf der landseitigen Böschung eingebaute Messvlies besteht aus einem mechanisch verfestigten Spinnfaservliesstoff der Firma NAUE (Typ Secutex), auf welchem 20 Carbonfaserrovings in einem Abstand von je 10 mm aufgesteckt sind (vgl. Abbildung 9). Jeweils zwei Faserbündel sind über Referenzwiderstände (3,9 k $\Omega$ ) verbunden. Insgesamt sind zehn Kanäle angeschlossen. Die Widerstände befinden sich direkt am Vlies und die Anschlüsse sind nicht isoliert. Jede Faser verfügt über ein Kabel, welches direkt aus dem Sand herausgeführt wird. Nach einigen Zentimetern werden die 20 einzelnen Kabel zu drei Strängen gebündelt. Der Einbau von Messvlies I erfolgt auf dem oberhalb der Berme gelegenen Abschnitt der Binnenböschung. Abbildung 10 zeigt die Lage der einzelnen Sensorkanäle im fertig eingebauten Deich sowie deren Bezeichnung.

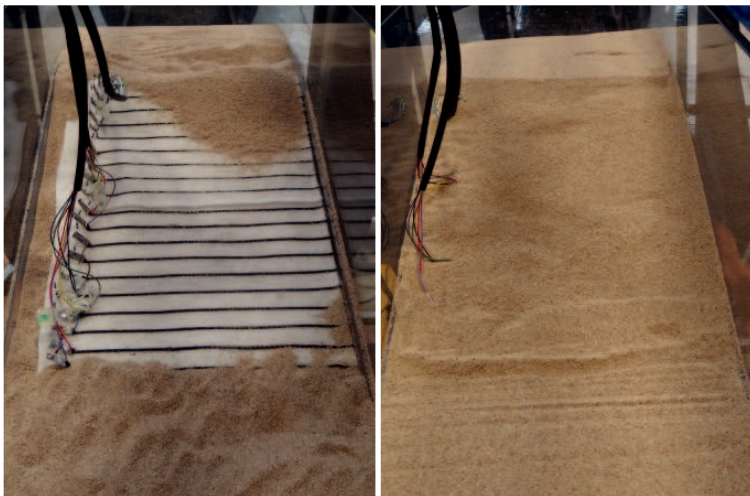


Abbildung 9: Einbau von Messvlies I im kleinmaßstäblichen Deichmodell.

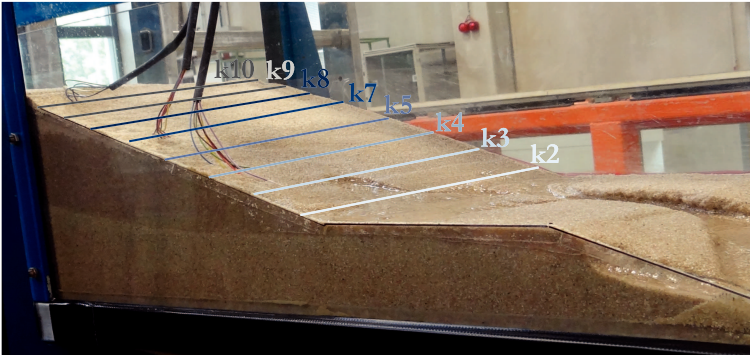


Abbildung 10: Bezeichnung der genutzten Sensorkanäle des Messvlies I.

### 4.2.5 Messvlies II

Messvlies II besteht aus einem im Vergleich zu Messvlies I etwas dünneren mechanisch verfestigten Spinnfaservliesstoff der Firma NAUE (ebenfalls Typ Secutex), auf welchem 42 Carbonfaserrovings aufgesteckt sind. Diesmal reichen die Sensoren über die gesamte Binnenböschung des Deiches (mit einer Aussparung auf der Deichberme), es sind jedoch nicht alle Rovings angeschlossen (siehe Abbildung 11). Die elektronische Verschaltung erfolgt auf einem Steckbrett außerhalb des Deiches. Die Anschlüsse an die Carbonfasern sind mit einer Silikonschicht isoliert, sodass die Fasern die einzigen nicht isolierten Leiter im Deich darstellen. Abbildung 11 zeigt den Einbau von Messvlies II sowie Lage und Bezeichnung der kontaktierten und gemessenen Sensoren.

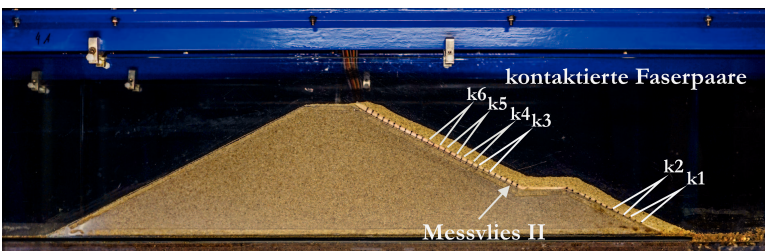


Abbildung 11: Einbau von Messvlies II im kleinmaßstäblichen Deichmodell und Bezeichnung der kontaktierten Faserpaare.

## 4.3 Großmaßstäbliche Untersuchungen

### 4.3.1 Aufbau des Modelldeichs

Der Versuchsstand für den großmaßstäblichen Modelldeich (vgl. Abbildung 12) besteht aus einer Versuchsrinne (VR I – III) und einem vorgesetzten Beruhigungsbecken (BB). Im hinteren Bereich (VR III) ist der Versuchsstand offen. Über eine Rampe ist die Rinne befahrbar und damit das Ein- und Ausbauen des Deichkörpers möglich. Während der Versuchsdurchführung wird die Rinne mit einem Dammbalkensystem verschlossen. Der Aufbau des Deichkörpers erfolgt in Abschnitt VR II.

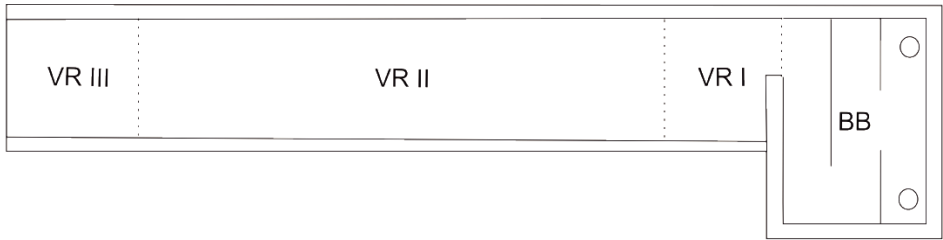


Abbildung 12: Konzeptioneller Aufbau des Versuchsstandes (Ansicht von oben).

Der Zufluss erfolgt durch ein Kunststoffrohr in das vorgesezte Beruhigungsbecken, am Ende der Rinne fällt das Wasser über einen freien Überfall direkt in einen im Boden eingelassenen Ablaufschacht der Versuchshalle. Die Versuchsrinne hat eine Länge von 20 m und eine lichte Breite von 2 m (Versuchsraum) bzw. 6 m (Beruhigungsbecken). Abbildung 13 zeigt eine Skizze des gesamten Versuchsstandes.

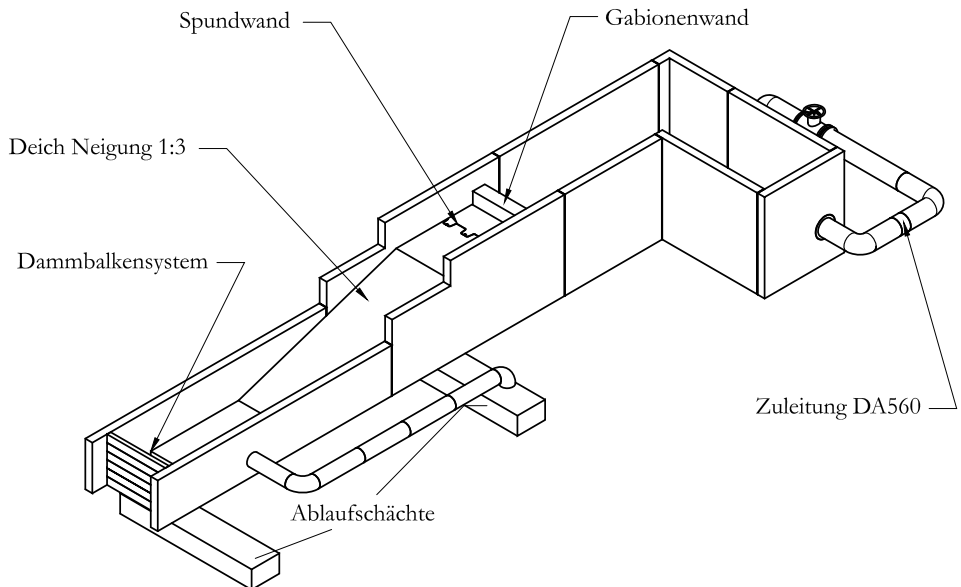


Abbildung 13: 3D-Ansicht des Versuchsstandes mit großmaßstäblichem Modelldeich (oben).

Der aufgebaute Modelldeich dient der Validierung und Weiterentwicklung der intelligenten Geotextilien. Das Deichmodell ist als Zonendeich mit einem Deichkern aus Sand, Innendichtung und überströmbarer Deckschicht ausgeführt. Es wird ein Deichausschnitt betrachtet, die Böschung auf der Seeseite wird nicht abgebildet und ist im Modell vertikal abgeschnitten (vgl. Abbildung 14).

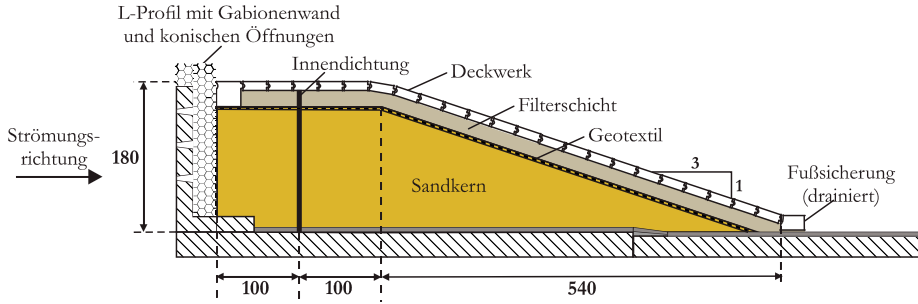


Abbildung 14: Schematischer Aufbau des Modelldeichs.

Da im Versuchsstand lediglich die Abbildung eines halben Deiches erfolgt, verläuft die Wasserseite des Modelldeichs senkrecht und muss entsprechend gestützt werden. Gleichzeitig soll für Durchsickerungsversuche eine gleichmäßige Anströmung gewährleistet werden. Hierzu werden an ein L-Profil aus Beton mit Vulkanstein gefüllte Gabionen angebracht, sodass eine vertikale Gesteinsschicht entsteht, durch die das Wasser den Deich langsam anströmt. Das L-Profil verfügt über konische Öffnungen auf verschiedenen Höhen, durch die das Wasser in die Gesteinsschicht eingeleitet wird. Zur Trennung von Deichkörpermaterial und Vulkangestein wird ein Geotextil mit einer Durchlässigkeit von  $k_f = 6,8 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  über die Vorsatznetze gespannt.

Die EAK 2002 geben ausführliche Informationen zu den geeigneten Baumaterialien für Seedeich. Für den Deichkern sind „*eingespülte und aus dem Spülfeld im Trockenbetrieb aufgesetzte und profilierte Sande der Korngruppe SE (DIN 18196) sowie geschüttete Sande der Korngruppen SE, SW und SI mit  $\leq 5\%$  Schluffkorn (...) als Baustoff (...) optimal geeignet.*“ (EAK 2002). Es wird ein gewaschener Mittelsand (0/2 mm) mit einem Schluffanteil von 0,8 % gewählt. Aufbau und Verdichtung des Deichkörpers erfolgen stufenweise per Hand (Stampfen) und mit Rüttelplatten.

Der Modelldeich verfügt über eine Kunststoffspundwand als Innendichtung. Die Bohlen an sich sind wasserundurchlässig, die Abdichtung der Schlösser ist entscheidend für die Durchlässigkeit der Spundwände. Es wird die Kunststoffspundwand DuoLock® DL610/7,2 2 der Firma G<sup>2</sup> mit und ohne Schlossdichtung verwendet, um eine unterschiedlich starke Durchströmung des Deichkörpers zu erzeugen.

Als Deckwerk wird ein Verkalit® Deckwerksystem aus verzahnten Deckwerksteinen auf Deichböschung und Krone aufgebracht. Vorteil dieses Aufbaus ist, dass die Deichböschung zwar vor Erosion geschützt wird, dennoch eine Durchströmung des Deckwerks erlaubt wird und damit die Funktionstüchtigkeit der Feuchtigkeitssensoren untersucht werden kann. Der Aufbau des Deckwerkes erfolgt nach den in ETA-12/045 (BERDING BETON GmbH 2012) vorgegebenen Richtlinien bestehend aus einem Unterbau mit Filterschicht (Splitt) und Geotextil. Abbildung 15 zeigt einen fertig aufgebauten Modelldeich in der Draufsicht.



Abbildung 15: Der aufgebaute Modelldamm in der Draufsicht (Messtechnik eingeklappt).

### 4.3.2 Konventionelle Messtechnik

Um die Ergebnisse der entwickelten intelligenten Geotextilien validieren zu können, ist der Einsatz konventioneller Messtechnik erforderlich. Dabei gilt es, Messkonzepte für zwei unterschiedliche Ereignisse vorzuhalten: Für die Deichdurchsickerung ist vor allem die Lage der Sickerlinie von Interesse, hierzu wird ein System zur Erfassung des hydrostatischen Wasserdrucks entlang des gesamten Deichquerschnitts eingesetzt: Basierend auf dem Prinzip der kommunizierenden Röhren erfolgt die Druckmessung über wassergefüllte Polyamidschläuche ( $\varnothing = 6 \text{ mm}$ ), welche über eine automatische Ventilsteuerung an einen Druckkalibrator (DP300C, Firma MeCoTec) außerhalb des Versuchsstands angeschlossen sind. Die Schläuche liegen in einem U-Metallprofil in der Mitte der Versuchsrinne, an den Messpunkten wird jeweils ein Schlauchende senkrecht nach oben aus dem Profil geführt und fixiert. Ein pneumatischer Schalldämpfer aus Edelstahl-Drahtgewebe verhindert den Eintrag von Sedimenten in den Schlauch. Die Messung erfolgt für jeden Messpunkt jeweils alle zwei Minuten, wobei für einen Messwert der Mittelwert aus zehn Einzelmessungen (Messfrequenz 3,33 Hz) gebildet wird. Nach jedem Umschalten zwischen zwei Schläuchen wird zum Ausgleich von Druckstößen im Schlauch vor Beginn der Messung eine Verzögerung von 4 sec berücksichtigt. Für die Erfassung der Überströmereignisse kommen Ultraschallsonden (pico+35/I, Firma microsonic) zur Ermittlung der Schichtdicken auf der Deichböschung zum Einsatz (Messfrequenz 10 Hz). Einen Überblick über alle im Deichmodell verwendeten Messverfahren liefert Tabelle 2, wobei die übrigen Messverfahren für die Validierung der Sensorliese keine Bedeutung haben und deshalb hier nicht weiter beschrieben werden. Abbildung 16 zeigt den Modelldeich im Längsschnitt mit den Positionen aller Messpunkte.

Tabelle 2: Messparameter und eingesetzte Messtechnik.

Messparameter	Messverfahren
Lage der Sickerlinie	Druckmessung auf Sohle (U1 – U10)
Sickerwassermenge	Auslitern, Ultraschallsonde
Durchfluss	Ultraschalldurchflussmesser
Wasserstand auf Deichkrone und -böschung	Ultraschallsonde (P1 – P5)
Fließgeschwindigkeit auf Deichkrone und -böschung	Strömungspropeller und VFMS (Void Fracture Measurement System)
Druck auf Deckwerk und in Filterschicht	Druckmessdosen (S1 – S5, F1 – F5)
Verschiebung der Deichböschung	Kamera (Photogrammetrie)
Bodenfeuchte und -temperatur	Bodensensoren ( <i>gia1 – gia4, giaT</i> )
Hydraulische Prozesse und Deichschäden	Webcam und Kameraaufnahmen

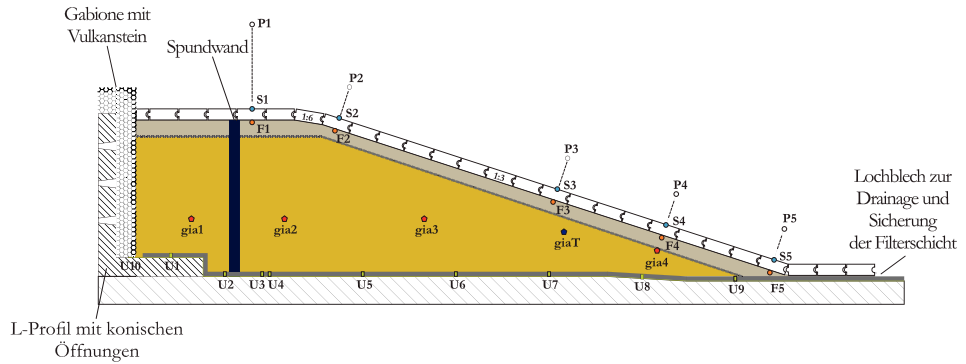


Abbildung 16: Längsschnitt durch den Modelldeich inklusive eingebauter Messtechnik.

### 4.3.3 Einbau der Sensorvliese

Auf der Böschung wird unterhalb der Deckschicht das Sensorvlies eingebaut. Bei dem verwendeten Geotextil handelt es sich um einen mechanisch verfestigten Spinnfaservliesstoff aus vollsynthetischen Kunststofffasern. Als Sensoren werden Carbonfasern mit einer polyacrylnitril-basierten Beschichtung aufgebracht, die Anschlüsse der Carbonfasern werden durch eine Silikonschicht isoliert. Alle weiteren Details zur Wahl der Sensoren sowie zu Herstellung und Verwendung der intelligenten Geotextilien können Schwab et al. (2021) entnommen werden.

Insgesamt werden zwei großmaßstäbliche Messvliese in das Deichmodell am IWW eingebaut und untersucht. Abbildung 17 zeigt die beiden Messvliese. Nach Einbau von Messvlies IV wird der Deckwerksaufbau bestehend aus einer Filterschicht und den verzahnten Deckwerksteinen fortgesetzt.



Abbildung 17: Im großen Modelldeich eingebaute Messvliese (links: Messvlies III, Einbau im August 2017; rechts: Messvlies IV, Einbau im November 2017).

#### 4.3.4 Versuchsprogramm

Auch im großmaßstäblichen Modell finden Referenzuntersuchungen ohne Einbau der intelligenten Geotextile statt, um eine Funktionalität der herkömmlichen Messmethodik sowie eine Reproduzierbarkeit der Belastungen zeigen zu können. Im Anschluss erfolgen Versuche mit den entwickelten Sensorvliesen. Insgesamt werden drei Arten von Versuchen durchgeführt:

- „Gießkannentests“,
- Durchsickerungsversuche,
- Überströmversuche bzw. Langzeitversuche.

Die „Gießkannentests“ finden vor Einbau des Deckwerks an den Sensorvliesen statt. Dabei werden die Sensoren einzeln mit einem Wasserschlauch bewässert, um eine erste Funktionalität der Sensoren zu überprüfen und Kurzschlüsse auszuschließen.

Für die Durchsickerungsversuche wird der Deich auf eine konstante Höhe eingestaut. Während der gesamten Versuchszeit werden die Druckhöhen im Deich gemessen. Eine automatische Füllstandsregelung ermöglicht es, die Wasserspiegelhöhe über beliebig lange Versuchszeiträume mit einer Genauigkeit von  $\pm 2,5$  mm konstant zu halten. Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen Eindrücke der Versuche.



Abbildung 18: Einstau des Modelldeichs für Durchsickerungsversuche.





Abbildung 19: Erster Sickerwasseraustritt am Deichfuß.

Für die Überströmversuche (Abbildung 20) können durch stufenweise Öffnung der Absperrklappe im Modellzulauf Überfallhöhen zwischen 2 und 40 cm generiert werden. Für die Validierung der Feuchtesensoren sind Dauer und Höhe der Überströmung irrelevant, interessant ist jedoch das Langzeitverhalten. Dies kann während eines Einbaus von Messvlies IV über acht Monate hinweg untersucht werden. Während dieses Zeitraums wird das Deichmodell immer wieder für längere Zeit überströmt, während in Zeiträumen von ein bis zwei Wochen ohne Belastung der Deich entwässern und trocknen kann.

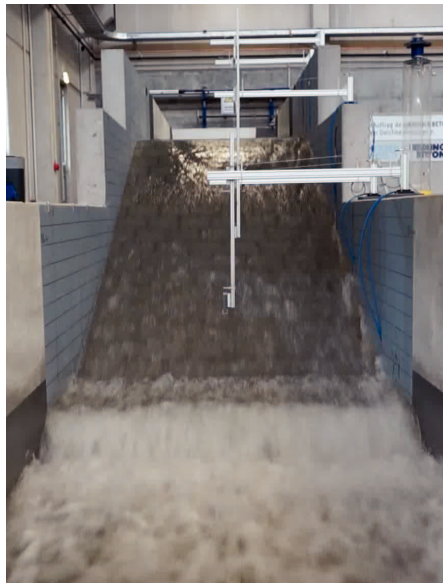


Abbildung 20: Modelldeich während Überströmversuch.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Kleinmaßstäbliche Versuche

#### 5.1.1 Referenzfall ohne Sensoren

Mit steigendem Wasserstand lässt sich die fortschreitende Durchsickerung des Deichkörpers beobachten. Abbildung 21 zeigt die Deichdurchsickerung zu unterschiedlichen Zeitpunkten, während der Wasserspiegel vor dem Deich linear ansteigt.

Der Deich in Abbildung 21 stellt einen Zweizonendeich bestehend aus einem homogenen Sandkörper und einem Kiesfilter dar. Die zwei verwendeten Sande unterschieden sich nur hinsichtlich ihrer Farbe. Aus Gründen des besseren Kontrasts zwischen Sickerlinie und trockenem Deich wird für spätere Versuche der helle Quarzsand verwendet. Der am Deichfuß aufgeschüttete Kiesfilter führt zu einem Austritt der Sickerlinie auf Höhe der Deichberme. Damit in Versuchen mit den intelligenten Geotextilien möglichst viele Sensoren angesprochen werden, wird in weiteren Versuchen auf den Kiesfilter verzichtet.

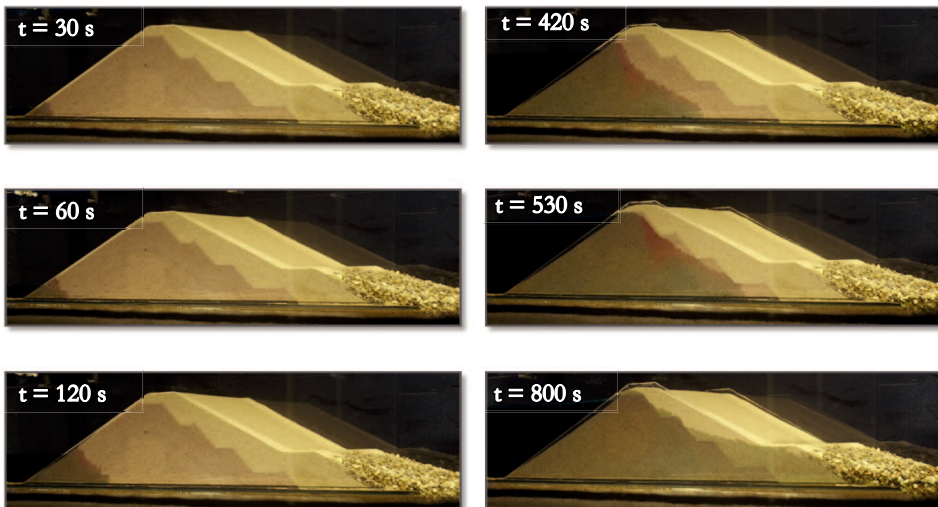


Abbildung 21: Lage der Sickerlinie des Deiches zu unterschiedlichen Zeitpunkten.

#### 5.1.2 Messvlies I

Abbildung 22 zeigt den gemessenen Spannungsverlauf für die auf der Binnenseite eingebauten Sensoren infolge eines linearen Anstiegs des Wasserspiegels. Die Bezeichnung der Sensoren geht aus Abbildung 10 hervor. Das Messvlies wird mit 0,2 mA bestromt, die Messung des Potenzialunterschieds zwischen zwei Sensorfasern erfolgt mit einer Frequenz von 1 Hz, alle Kanäle werden gleichzeitig gemessen. Kanal 1 und Kanal 6 liefern ein fehlerhaftes Signal und sind deshalb nicht dargestellt.

Zu Beginn ist der komplette Deich trocken und an allen Kanälen ist eine Spannung von 0,78 V zu messen. Der Deich wird nun infolge eines ansteigenden Wasserspiegels langsam durchsickert. Zum Zeitpunkt  $t = 750$  s erreicht die Sickerlinie die Deichbinnenseite kurz

oberhalb der Berme, dies führt zu einem Spannungsabfall in Kanal 2. Kurz darauf passiert dies auch an Kanal 3, Kanal 4 und Kanal 5. Kanal 7 wird zum Zeitpunkt  $t = 820$  s von der Sickerlinie erreicht, jedoch findet hier lediglich eine Durchfeuchtung des Sandes und keine starke Durchströmung wie an den tiefergelegenen Kanälen statt, weshalb der Spannungsabfall geringer ausfällt. Kanäle 8, 9 und 10 bleiben während des gesamten Versuchs trocken und die gemessene Spannung konstant.

Abbildung 23 zeigt Aufnahmen der Binnenseite des Modelldeichs nach etwa 15 Minuten (links) und 20 Minuten (rechts). Trotz Freispülung der Kanäle 2, 3 und 4 in der Deichmitte lässt sich für diese Kanäle kein markanter Spannungsanstieg beobachten, nachdem die Spannung einmal abgefallen ist. Dies liefert einen Hinweis auf Fehlkontaktierung der Sensoren: Infolge der nichtisolierten Anschlüsse wird der Spannungsabfall nicht zwischen den Carbonfasern, sondern direkt zwischen den Anschlussdrähten gemessen. Dies führt zwar auf den ersten Blick zu plausiblen Ergebnissen, ist jedoch nicht zielführend hinsichtlich der Entwicklung von carbonfaserbasierten Sensoren, die Informationen über die gesamte Länge des Deiches und nicht nur über die Kontaktierungsstelle liefern sollen.

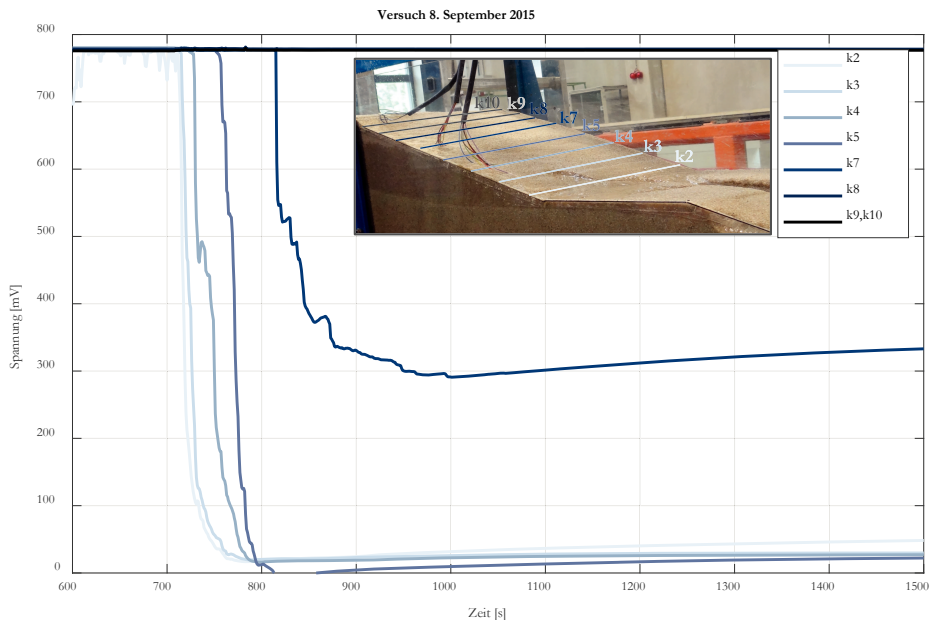


Abbildung 22: Gemessene Spannungen im Messvlies I während einer Deichdurchsickerung infolge eines linearen Anstiegs des Wasserspiegels vor dem Deich bis zum Volleinbau.

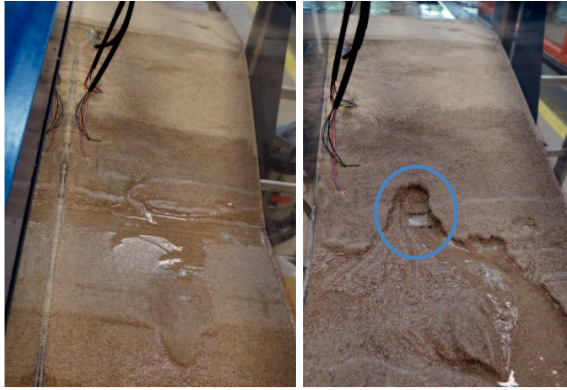


Abbildung 23: Erosion an der Binnenseite des Modelldeiches nach 15 (links) bzw. 20 Minuten (rechts), rechts ist das an einer Stelle freigespülte Geotextil zu erkennen.

### 5.1.3 Messvlies II

In Messvlies II sind die Anschlussstellen isoliert, sodass nun die tatsächliche Spannung zwischen zwei Carbonfaserrovings gemessen wird. Jedoch kommt es zum Ausfall einiger Sensoren. Als Ursachen hierfür sind unsauberes Arbeiten bei der Kontaktierung der Carbonfasern, falsche Verbindungen auf dem Steckbrett und Kabelbrüche infolge des Transports und Einbaus zu nennen. Genutzt werden können schließlich die in Abbildung 25 beschrifteten Sensoren.

Die Analyse der Spannungsverläufe liefern für alle durchgeführten Versuche plausible Ergebnisse: Der Zeitpunkt eines deutlichen Spannungsabfalls stimmt für jeden Sensor mit der optisch beobachteten Durchsickerung überein. Hierzu sollen beispielhaft die gemessenen Spannungsverläufe während eines Durchsickerungsversuchs im Januar 2016 betrachtet werden. Abbildung 24 zeigt den Spannungsverlauf während des gesamten Versuchs, Abbildung 26 den entscheidenden Zeitabschnitt, in dem die einzelnen Sensoren nass werden. Zu Versuchsbeginn liegen die gemessenen Spannungen deutlich unter den Initialspannungen aus Abbildung 22 und der Spannungsverlauf schwankt stärker. Im Gegensatz zum oben dargestellten Versuch mit Messvlies I, bei dem der Einbau im trockenen Sand erfolgte, ist der Sand bereits zu Versuchsbeginn erdfeucht und der Potenzialabbau erfolgt sofort zwischen den Carbonfasern und nicht erst durch die Referenzwiderstände. Der Spannungsabfall bei Erreichen des wassergesättigten Zustands lässt sich dennoch deutlich erkennen: Abbildung 25 und Abbildung 27 zeigen zwei Aufnahmen des Deichquerschnitts zu den Zeitpunkten  $t = 340$  s und  $t = 350$  s, zu denen die Kanäle k1, k2 und k3 einen Spannungsabfall gemessen und damit Wasser an der Deichbinnenböschung detektiert haben. Hier zeigen sich aber auch die Grenzen der optischen Auswertung: k4 müsste gemäß Auswertung des Fotos zum Zeitpunkt  $t = 350$  s ebenfalls einen Spannungsabfall verzeichnen, tatsächlich ist die Oberseite des Vlieses, auf der die Sensoren aufgebracht sind, aber noch nicht durchfeuchtet und die Spannung in k4 fällt erst 10 Sekunden später ab.

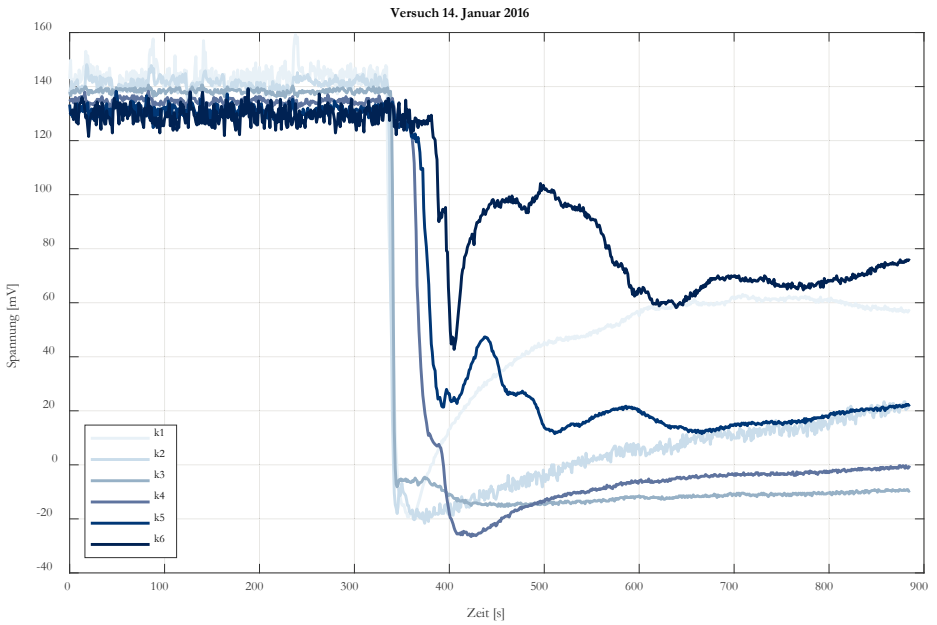


Abbildung 24: Gemessene Spannung während eines Durchsickerungsversuchs mit Messvlies II.

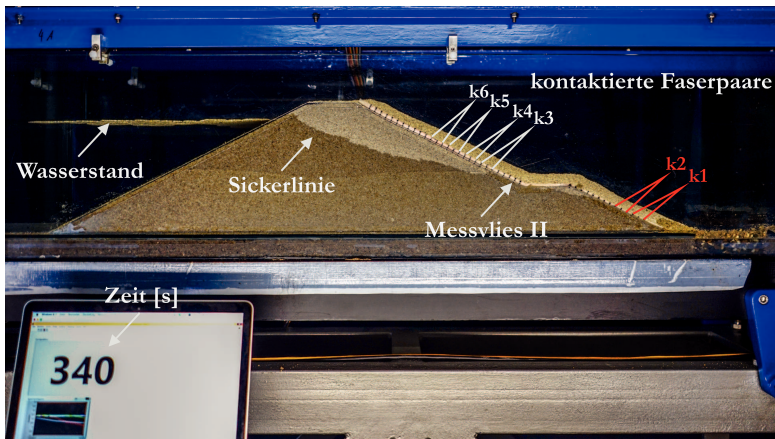


Abbildung 25: Versuch mit Messvlies II zum Zeitpunkt  $t = 340$  s. Die im Bild rot markierten Sensoren verzeichneten bereits einen Spannungsabfall.

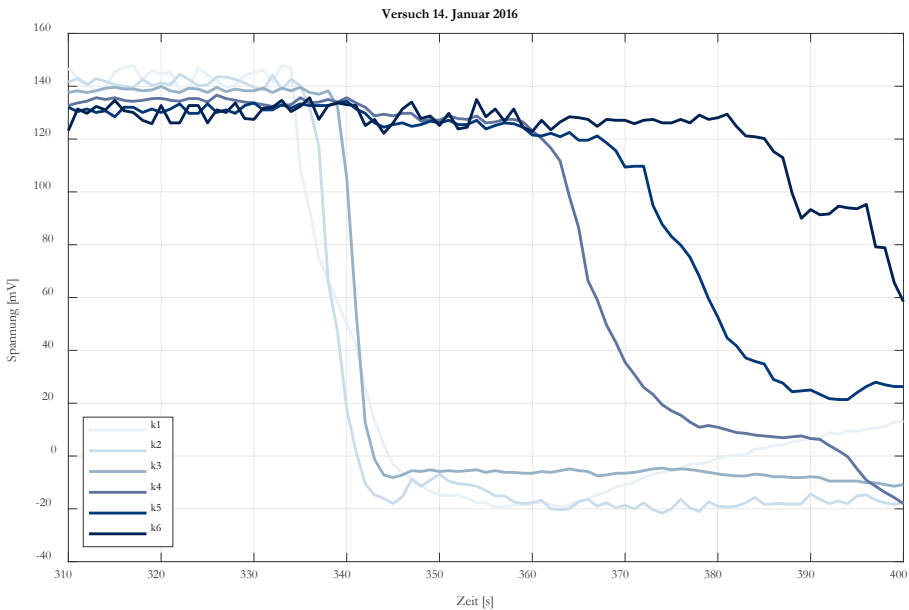


Abbildung 26: Gemessene Spannung während eines Durchsickerungsversuchs mit Messvlies II (Ausschnitt).

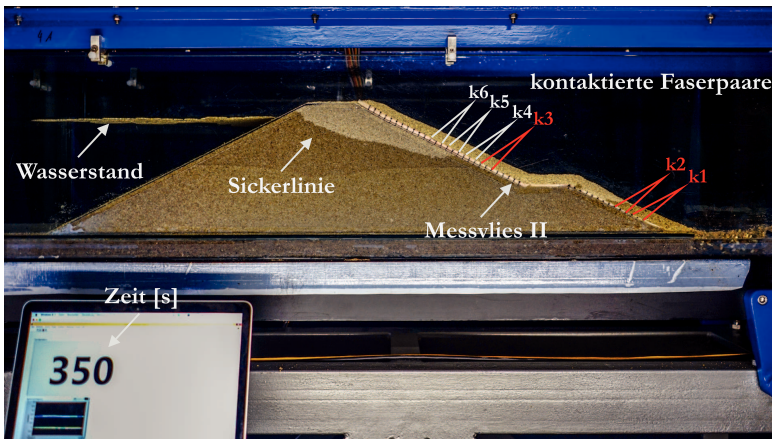


Abbildung 27: Versuch mit Messvlies II zum Zeitpunkt  $T = 350$  s. Die im Bild rot markierten Sensoren verzeichnen bereits einen Spannungsabfall.

Bei der mehrmaligen Wiederholung der Versuche im trockenen sowie erdfeuchten Sand zeigt sich, dass die Spannungsmessungen in ihrer absoluten Höhe und in der Höhe des Spannungsabfalls deutlichen Schwankungen unterliegen und in dieser Hinsicht keine reproduzierbaren Ergebnisse erlauben. Hierbei spielen vor allem die Entstehung von „Fehler“-Strömen eine Rolle: Aufgrund des geringen Abstands zwischen den Sensorpaaren kann es passieren, dass der geringste elektrische Widerstand nicht zwischen zwei nebeneinanderliegenden Sensoren liegt, sondern ein Sensor übersprungen wird (s. Abbildung 28). Dieser

Effekt ist durch den kleinen Maßstab und den daraus resultierenden geringen Abstand der Faserpaare bedingt und führt zu einer gegenseitigen Beeinflussung der Sensoren. Auch kommt es bei einigen Versuchen zu stark verrauschten Spannungssignalen, die auf eine Überlagerung mit Fremdeinflüssen infolge der mangelnden Abschirmung der Messeinheit zurückzuführen sind.

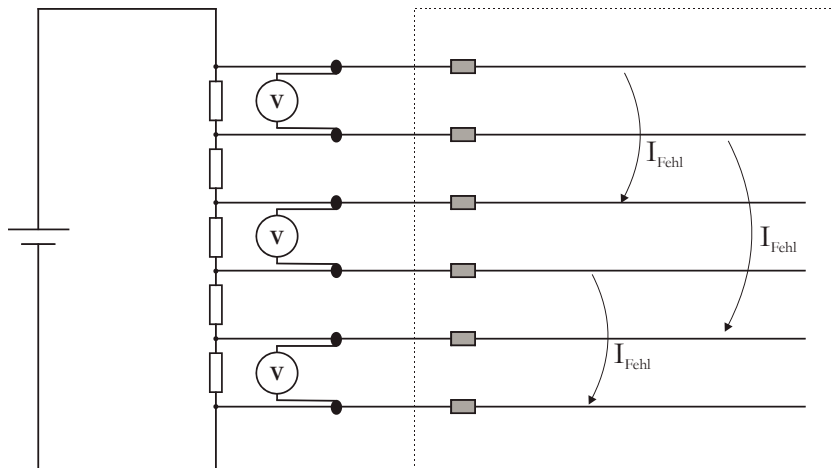


Abbildung 28: Bei den Sensoren, die im wassergesättigten Bereich liegen, kann es infolge des geringen Abstandes der Sensorpaare untereinander zur Entstehung von „Fehler“-Strömen kommen (skizzenhafte Darstellung).

## 5.2 Zwischenfazit

Die Untersuchungen mit den kleinmaßstäblichen Sensorvliesen zeigen, dass das entwickelte Messprinzip zur Detektion eines erhöhten Wassereintritts im Deich geeignet ist. Dabei funktionieren die Messungen nicht nur bei einem Einbau der Vliese im trockenen Material, sondern auch bei Vorliegen eines erdfeuchten Materials, auch wenn die Spannungsabfälle bei Durchfeuchtung des Sandes hier geringer ausfallen. Die Carbonfasern selber und auch ihre Fixierung mittels Stücktechnik auf dem Geotextil erweisen sich als ausreichend robust und für einen Einbau im Deichkörper geeignet.

Dennoch gibt es Schwachstellen, deren Identifikation zu einer iterativen Verbesserung der eingesetzten Sensorvliese führt. Ein größeres Augenmerk ist auf die Kontaktierung der Fasern und die Verschaltung der Sensoren zu legen. Das Umhüllen der Anschlüsse mit Silikon stellt hier eine zufriedenstellende Lösung dar. Ebenfalls erweist es sich als sinnvoll, einen Großteil der Verkabelung und Anschlüsse außerhalb des Deiches anzuordnen und nur die eigentlichen Sensorfasern im Deich zu verbauen. Auch die Anordnung der gesamten Schaltung auf einem kleinen Klemmbrett ist noch fehleranfällig. Einerseits, da die Schaltungen per Hand gebaut und gelötet werden und andererseits, da ausreichender Schutz und geeignete Abschirmung gegen äußere Umwelteinflüsse fehlen.

In enger Abstimmung mit dem ITA, werden auf Basis der gesammelten Erfahrungen Anforderungen an ein großmaßstäbliches Messvlies definiert, das für den Einbau im Modelldeich ausreichend robust und für Langzeitmessungen geeignet ist. Hierzu liegt das Augenmerk insbesondere auf den folgenden Punkten:

- Kaschierung der Sensorfasern zum Schutz vor Beschädigung und Abrasion während des Einbaus
- Verwendung langer und robuster Anschlusskabel, um Beschädigungen am Kabel während des Einbaus und infolge überströmendem Wassers zu vermeiden
- gesammeltes Ausführen der Anschlusskabel aus dem Deichkörper
- Isolation der Kontaktstellen zwischen Sensor und Kabel
- Ausschließen von Kurzschlüssen infolge feiner, loser Carbonfasern im Textil
- Abschirmung der Messschaltung zur Vermeidung von Fremdeinflüssen

Die Anforderungen führen zu Veränderungen in der Herstellung der eingesetzten Messvliese und zu Überarbeitungen an der entwickelten Messschaltung. Für die technischen Details sei auf Schwab et al. 2021 verwiesen. Mit dem auf Basis der gesammelten Erfahrungen entwickelten Messvlies werden dann – auf makroskaliger Ebene – verschiedene Szenarien simuliert, um folgende Fragestellungen detailliert zu untersuchen:

- Wie verhalten sich die Sensoren während einer Trocknungsphase?
- Kann die Beeinflussung der Sensoren untereinander durch die vergrößerten Sensorabstände ausgeschlossen werden?
- Lassen sich unterschiedliche Belastungsfälle (Durchsickerung, Überströmung) an den Messergebnissen erkennen?
- Lassen sich mehrere aufeinander folgende Ereignisse erneut detektieren?
- Wie verhalten sich die Sensoren unter Langzeitbelastung?

### 5.3 Großmaßstäbliche Versuche

#### 5.3.1 Messvlies III

Funktionstests ohne eingebautes Deckwerk („Gießkannentests“) zeigen, dass das erste großmaßstäbliche Sensorvlies (Messvlies III) keine plausiblen Ergebnisse liefert. Im Vergleich zu Messvlies II werden die Sensorfasern mit einer Kaschierung aus einem dünnen Vliesstoff vor Abrasion geschützt und die angeschlossenen Kabel als Flachbandkabel aus dem Textil geführt, die Messschaltung außerhalb des Deiches wurde nicht überarbeitet.

Als Ursache für die Fehlmessungen werden Kurzschlüsse im Textil infolge feiner Carbonfasersplinter identifiziert. Ferner erweisen sich die Ausführung der Anschlusskabel und der Anschluss an die Messeinheit trotz Verbesserungen als nicht ausreichend robust für den Einbau im großen Modeldeich (vgl. Abbildung 29). Messvlies III wird infolgedessen nicht weiter untersucht. Überarbeitungen der Messeinheit und der Anschlüsse führen zur Herstellung eines neuen Messvlieses (Messvlies IV), welches schließlich im November 2017 in den Modeldeich eingebaut wird.



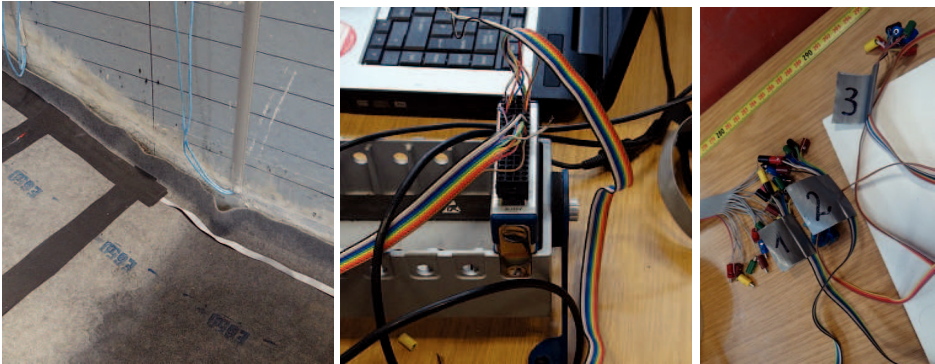


Abbildung 29: Kaschierung der Sensoren, Verbindungskabel zwischen Sensoren und Messeinheit als Flachbandkabel (links) sowie der Anschluss an die Messeinheit für Sensorvlies III (Mitte und rechts).

### 5.3.2 Messvlies IV

Das Anschlusskabel von Messvlies IV ist durch Verwendung von XLR-Kabeln und -Steckern deutlich robuster, die Messschaltungen selbst befinden sich in spritzwassergeschützten Kunststoffboxen (vgl. Abbildung 30). Um bei Messvlies IV die Entstehung von Kurzschlüssen infolge feiner Carbonfasersplitter zu vermeiden, sind die Carbonfaserrovinge beschichtet (s. Schwab et al. 2021).

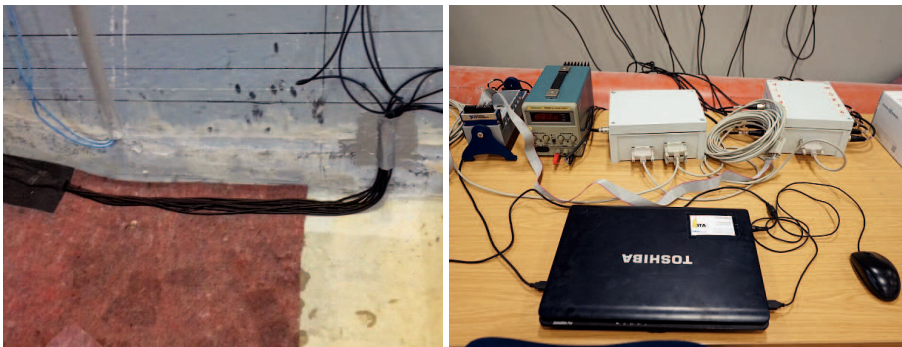


Abbildung 30: Verbindungskabel zwischen Sensoren und Messeinheit (links) sowie der Anschluss an die Messeinheit für Sensorvlies IV (rechts).

Erste Funktionstests („Gießkannentests“) des Sensorvlies IV ohne eingebautes Deckwerk erzielen gute Ergebnisse: Es besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Bewässerung einzelner Sensorfasern und den gemessenen Spannungen. Eine Beeinflussung der Sensoren untereinander, wie sie in den kleinmaßstäblichen Untersuchungen beobachtet wurde, besteht nicht mehr. Ferner erweisen sich die Ausführung der Kabel und Anschlussstellen als ausreichend robust für den Einbau unterhalb des Deckwerks und den Einsatz in Langzeitversuchen. Der Deichaufbau wird fortgesetzt und das Sensorvlies mit einem Filtermaterial und einem Deckwerk aus Betonformsteinen überbaut (Abbildung 31).



Abbildung 31: Ausführung der Verbindungskabel bei Einbau des Filtermaterials (links oben) sowie nach Einbau des Deckwerks (links unten), rechts: Aufbau des kompletten Deckwerks abgeschlossen.

Anschließend wird Messvlies IV in Durchsickerungs- sowie Überströmversuchen für mehrere Monate belastet und die Messungen der Spannungen permanent aufgezeichnet. Hierbei erfolgt die Messung und Datenerfassung mit einer am *gia* entwickelten Messeinheit und die Daten werden mittels MQTT-Protokollen direkt in die Sensordateninfrastruktur übertragen (vgl. Herle et al. 2021). Die Messwerterfassung je Sensorkanal (Messung des Potenzialabbaus zwischen zwei Sensorfasern) erfolgt alle zwei Minuten, wobei für jeden Messwert 30 Einzelmessungen mit einer Frequenz von  $100\text{ Hz}$  gemittelt werden. Die erfassten Daten werden am *IWW* entweder aus einer Datenbank heruntergeladen oder über MQTT-Protokolle in Echtzeit abonniert.

### 5.3.3 Auswertung der Langzeitversuche und Entwicklung einer automatischen Auswerteroutine

Eine erste Validierung der spannungsinduzierten Durchfeuchtungsmessung durch Messvlies IV ist – ähnlich zur Auswertung in den kleinmaßstäblichen Versuchen – durch die grafische Aufbereitung der Messdaten aus dem Sensorvlies sowie des am Boden der Versuchsrinne installierten Druckmesssystems rein optisch möglich (Abbildung 33).

Auf Grundlage der in den Langzeitversuchen gewonnenen Daten wird im folgenden Schritt eine automatische Auswerteroutine entwickelt, mithilfe derer aus den gemessenen Spannungen an einem Sensorpaar automatisch auf einen Wassereintritt geschlossen werden kann. Hiermit lässt sich der exakte Zeitpunkt der Wasserdetektion am Messvlies bestimmen, welcher dann mit dem erwarteten Zeitpunkt der Befuchtung jedes Sensors (bestimmt aus dem Schnittpunkt zwischen der aus den Druckmessungen errechneten Sickerlinie und dem Textil) verglichen werden kann. Bei einer korrekten Funktion des Sensorvlieses sowie der Auswerteroutine sollten diese beiden Zeitpunkte möglichst genau

übereinstimmen. Das Flussdiagramm in Abbildung 32 skizziert den beschriebenen Ablauf zur Validierung des Sensorvlieses und der Auswerterroutine, welche im Folgenden anhand ausgewählter Versuchszeiträume diskutiert wird.

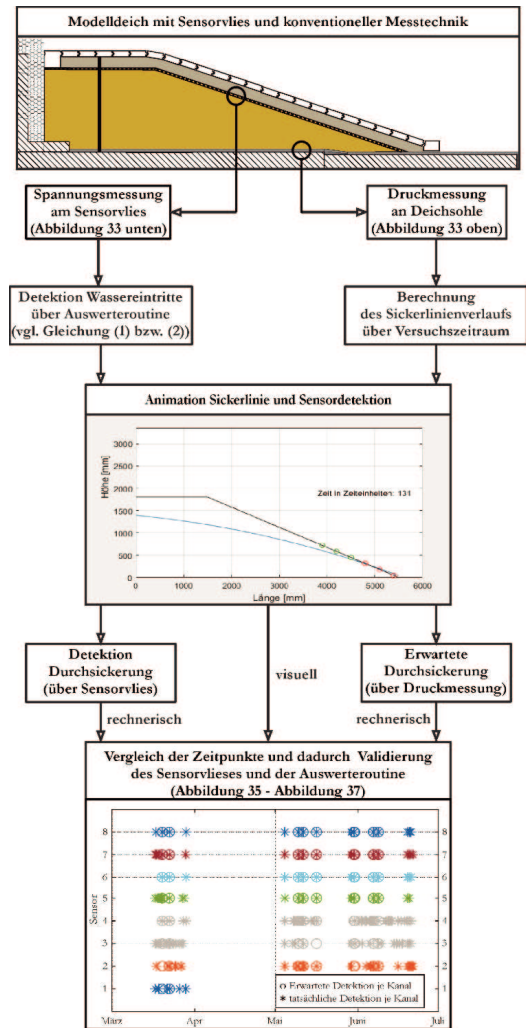


Abbildung 32: Schema zur Validierung des Sensorvlieses und Entwicklung einer automatischen Auswerterroutine mithilfe der Daten aus den Langzeitversuchen.

Abbildung 33 zeigt den Verlauf der Druckmessung am Boden des Modelldeichs (U1 – U10) und die gemessenen Spannungen an den Kanälen des Sensortextils (Ch 1 – Ch 8) für zwei Überströmereignisse im Juni 2018. Die Druckmesspunkte am Boden sind dabei von unmittelbar vor der Deichkrone bis zum Deichfuß von 1 – 10 durchnummeriert (vgl. Abbildung 16). Die Kanäle am Textil sind vom Deichfuß zur Deichkrone von 1 bis 8 durchnummeriert. Ch 1 entspricht folglich dem am Deichfuß liegenden Kanal und Ch 8 dem oben auf der Deichböschung liegenden Kanal. Die Sensoren Ch 3 und Ch 4 sind nicht

dargestellt, da sie aufgrund eines Defekts keine plausiblen Werte lieferten (vgl. Abbildung 34).

Das erste dargestellte Ereignis (Nachmittag des 6. Juni) entspricht einer geringen und kurzen Überströmung, bei der der Deich im Anschluss für kurze Zeit eingestaut blieb (die Schwankungen der Pegel im Deich sind an dieser Stelle zu vernachlässigen). Das zweite Ereignis (Nachmittag des 8. Juni) ist eine ebenfalls kurze, deutlich höhere Überströmung, im Anschluss wurde das Wasser direkt aus dem Becken vor dem Deich abgelassen. Aus der Betrachtung der Daten lässt sich Folgendes erkennen:

- Die an den Sensoren gemessenen Spannungen liegen zu Beginn der Messung auf unterschiedlich hohem, jedoch konstantem Niveau.
- Zum Zeitpunkt der Überströmung lässt sich an allen Kanälen ein deutlicher Spannungsabfall erkennen, der sich in seiner Höhe jedoch stark unterscheidet.
- Nach dem Spannungsabfall lässt sich mit Absinken des Wasserspiegels im Deich ein Anstieg der Spannungen erkennen, wobei die Spannung für die auf der Deichböschung weiter oberliegenden Sensoren zuerst ansteigt.
- Im weiteren Verlauf steigt die Spannung weiter – jedoch weniger stark – an, nachdem der Wasserpegel im Deich bereits abgesunken ist (Trocknungsphase der Sensoren).
- Innerhalb der hier zwei Tage andauernden Trocknungsphase ist die Spannung in den Sensoren noch nicht auf den Ausgangszustand zurückgekehrt.
- Dennoch lässt sich bei erneutem Überströmen des Deichs ein erneuter Spannungsabfall erkennen, der sich charakteristisch ähnlich verhält wie der erste Spannungsabfall.
- Insgesamt weisen die Sensoren unterschiedlich starke Schwankungen auf.

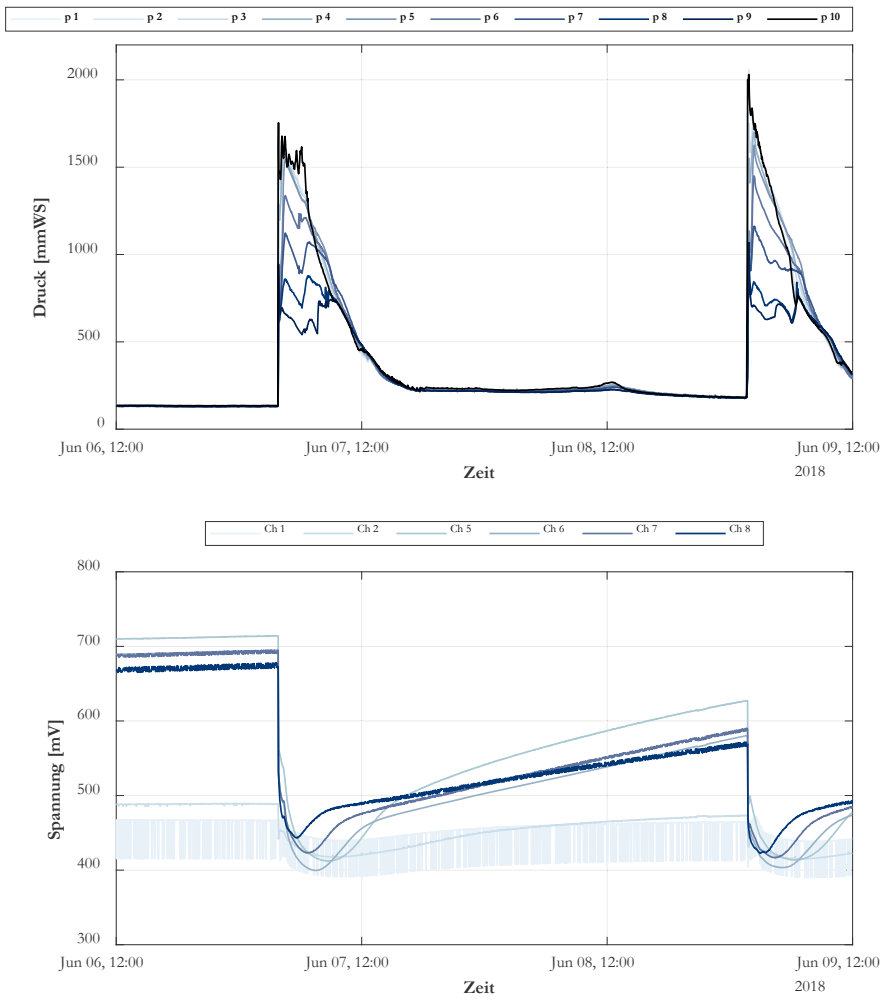


Abbildung 33: Darstellung der gemessenen Wasserspiegelhöhe im Modelldelch (oben) und der Spannungen an den Sensoren des Messvlieses IV (unten) für zwei Überströmereignisse am Modelldelch im Juni 2018.

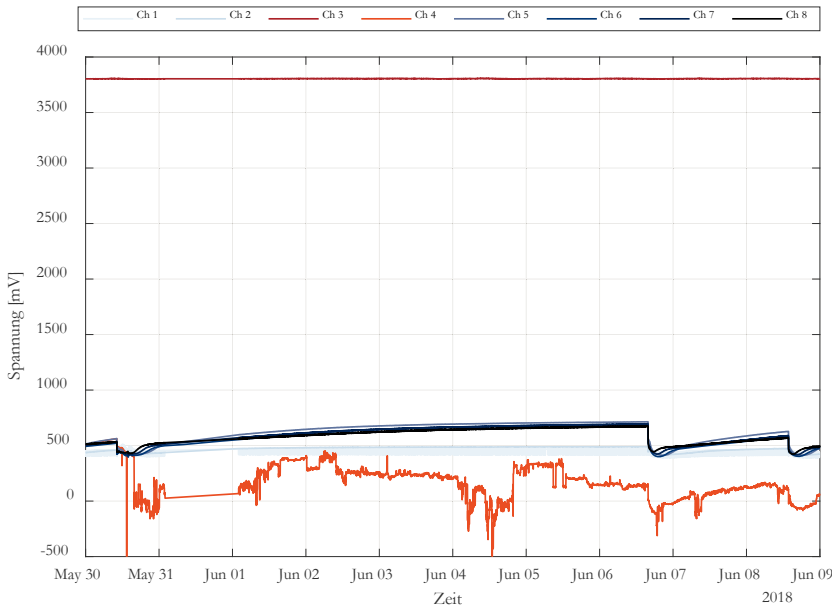


Abbildung 34: Gemessene Sensorspannungen am Messvlies IV (Ende Mai bis Anfang Juni 2018) inklusive der defekten Sensoren Ch 3 und Ch 4 (in rot und orange dargestellt).

Nun soll eine automatische Auswertung der Spannungsverläufe erfolgen, mithilfe derer die Zeitpunkte der Wasserdetektionen an einem Sensor bestimmt und dann mit dem durch die Druckmessung am Boden bestimmten Verlauf der Sickerlinie verglichen werden können. Später soll die Auswerterroutine zur Ermittlung des Sensorzustands in Echtzeit genutzt werden. Folglich ist eine schlanke und schnelle Berechnung erforderlich, auf deren Basis für jeden eintreffenden Spannungswert neu entschieden werden kann, ob der Sensor zum betrachteten Zeitpunkt einen Wassereintritt detektiert hat oder nicht.

Bei Betrachtung der für die zwei Ereignisse im Juni dargestellten Spannungsverläufe wird deutlich, dass die an den Sensoren im „trockenen“ (nicht wassergesättigten) Zustand gemessenen Spannungsverläufe insgesamt auf unterschiedlichen Niveaus liegen und die Sensoren nicht immer auf ihren Ausgangszustand zurückkehren müssen, um einen erneuten Anstieg des Wassergehalts detektieren zu können. Alle Sensoren auf einen trockenen Zustand zu referenzieren und nur relative Spannungsabfälle zu betrachten, erweist sich als ungeeignet, da sich keine eindeutigen Schwellenwerte festlegen lassen. Zielführend ist ein relativer Vergleich: Hierzu wird der einfache gleitende Mittelwert über einen definierten Zeitraum vorangegangener Messungen mit dem einfachen gleitenden Mittelwert der jeweils aktuellsten Messungen verglichen. Unterschreitet dieser den  $n$ -fachen Wert der Standardabweichung der Messwerte des vorangegangenen Zeitraums, so liegt ein charakteristischer Abfall vor, der auf eine Wasserdetektion am Sensor hindeutet. Es gilt folglich für jeden Zeitpunkt  $t$  zu überprüfen:

$$\frac{\left[ \sum_{i=t}^{t+f} U(i) \right]}{f+1} - \left( \frac{\left[ \sum_{i=t-p}^{t-1} U(i) \right]}{p} - n \cdot \sqrt{\frac{1}{p} \cdot \sum_{i=t-p}^{t-1} \left( U(i) - \frac{\left[ \sum_{i=t-p}^{t-1} U(i) \right]}{p} \right)^2} \right) < 0 \quad (1)$$

$$\geq 0$$

Mit:

- $U(t)$  gemessene Spannung zum Zeitpunkt  $t$
- $f$  Anzahl der Messungen nach Zeitpunkt  $t$ , die Berücksichtigung findet, um Zustand zum Zeitpunkt  $t$  zu definieren (*future events*)
- $p$  Anzahl der Messungen vor Zeitpunkt  $t$ , die Berücksichtigung findet, um Zustand zum Zeitpunkt  $t$  zu definieren (*past events*)
- $n$  Vielfaches der Standardabweichung, deren Unterschreitung einen kritischen Spannungsabfall am betrachteten Sensor bedeutet

Solange Gleichung (1)  $\geq 0$  ist, ist der Wassergehalt in der Sensorumgebung unverändert oder abnehmend. Ergibt sich zum Zeitpunkt  $t$ , dass Gleichung (1)  $< 0$  ist, so hat der Sensor einen Wassereintritt detektiert. Zu beachten ist, dass auf Grundlage der Spannungsmessungen stets nur der Zeitpunkt des Wassereintritts detektiert wird. Es erfolgt also keine Unterscheidung zwischen „Sensor nass“ und „Sensor trocken“, sondern eine zwischen „erhöhter Wassergehalt in Sensorumgebung“ oder „konstanter bzw. abnehmender Wassergehalt in Sensorumgebung“.

Vorteil der relativ schlanken Rechenoperation ist die schnelle Umsetzung für die angestrebte automatische Sensorauswertung in Echtzeit: Es genügt die Betrachtung eines kurzen Datenausschnitts zusammengesetzt aus  $p$ -vergangenen und  $f$ -zukünftigen Werten. Durch Einbeziehung der gleitenden Standardabweichung wird dabei die individuelle Schwankungsbreite jedes Sensors berücksichtigt, ohne dass eine aufwändige Analyse der gesamten Zeitreihe erforderlich ist. Die Entscheidung über den Zustand des Sensors zum Zeitpunkt  $t$  ist allerdings erst nach  $f$  weiteren Messungen möglich. Der Wert  $f$  sollte folglich für eine schnelle Entscheidung so niedrig wie nötig sein. Auch der Wert  $p$  sollte so gering wie nötig gewählt werden, da er entscheidend dafür ist, wie schnell ein weiteres auf einen Sensorabfall folgendes Ereignis detektiert werden kann.

Auf Grundlage der durchgeführten Versuche werden nun die Parameter  $f$ ,  $p$  und  $n$  bestimmt. Hierzu wird oben aufgeführte Gleichung mit variierenden Parametern für jeden Zeitschritt auf die mit Messvlies IV über den Zeitraum von März bis Juli 2018 gemessenen Sensordaten angewandt. Die Zeitpunkte der daraus resultierenden Detektionen werden mit den tatsächlich stattgefundenen Überströmereignissen am Modelldeich verglichen. Der Zeitpunkt der Überströmung wird auf Grundlage der gemessenen Druckhöhen im Deich bestimmt. Hierbei ist der Zeitpunkt, ab dem der Wasserstand im Deich die Höhe der Spundwand überschreitet und das Wasser durch den Filter unter dem Deckwerk abfließen kann, entscheidend (da die Messungen der Druckhöhen ebenso wie die Sensormessungen nur alle zwei Minuten aufgezeichnet wurden, können eventuelle Verzögerungen vernachlässigt werden). Ziel ist es, die Parameter  $f$ ,  $p$  und  $n$  so zu wählen, dass alle Überströmereignisse detektiert und Fehldetektionen möglichst vermieden werden.

Abbildung 35 zeigt diesen Vergleich für den Versuchszeitraum von Mai bis Juni 2018 für die Parameter  $p = 50$ ,  $f = 5$  und  $n = 5$ . Auf der  $y$ -Achse sind die acht im Deich verbauten Sensoren aufgetragen, ein Sternchen entspricht einer Sensordetektion, ein Kreis einer Überströmung des Modelldeichs. Liegt das Sternchen im Kreis, bedeutet dies, dass

der Sensor den Zeitpunkt der Überströmung korrekt detektiert hat und die Auswerteroutine funktioniert. Es wird deutlich, dass die gewählten Parameter für die Sensoren 5 bis 8 relativ gut funktionieren und nur wenige Fehlalarme liefern. Für die Sensoren 1 und 2 treten deutlich mehr Fehlalarme auf. Die Sensoren 3 und 4 sind in der Darstellung ausgegraut, da sie ab Mai keine plausiblen Werte lieferten (vgl. Abbildung 34).

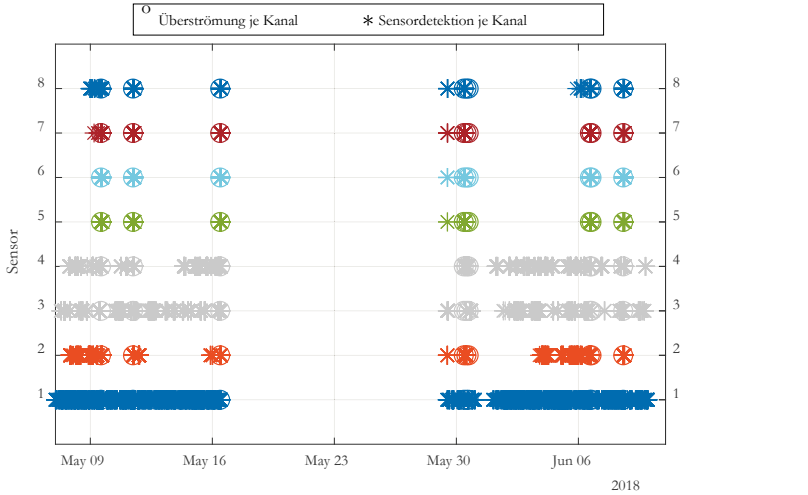


Abbildung 35: Vergleich der Sensordetektion auf Grundlage der beschriebenen Auswerteroutine (für  $p = 50$ ,  $f = 5$  und  $n = 5$ ) mit der tatsächlichen Überströmung des Modelldeichs für den Zeitraum 7. Mai bis 10. Juni 2018: Alle Ereignisse werden korrekt erkannt, jedoch treten wenige Fehldetektionen an den Sensoren 5 bis 8 und viele Fehldetektionen an Sensor 1 und 2 auf.

Eine Variation der Parameter (hier nicht grafisch dargestellt) zeigt: Eine weitere Reduzierung von  $f$  funktioniert für die Sensoren 5 bis 8 gut, führt bei Sensor 2 jedoch dazu, dass erste Ereignisse nicht mehr detektiert werden. Eine Erhöhung von  $p$  verbessert die Auswertung nicht, erhöht jedoch die Rechenzeit. Eine Veränderung des Parameters  $n$  wirkt sich am sensitivsten aus, da hierüber der Schwellenwert, ab wann ein Spannungsabfall kritisch ist, festgelegt wird. Wird  $n$  erhöht, um die Anzahl an Fehldetektionen zu verringern, führt dies dazu, dass an Sensor 2 ein Ereignis nicht mehr erkannt wird, während weiter Fehldetektionen stattfinden (vgl. Abbildung 36).



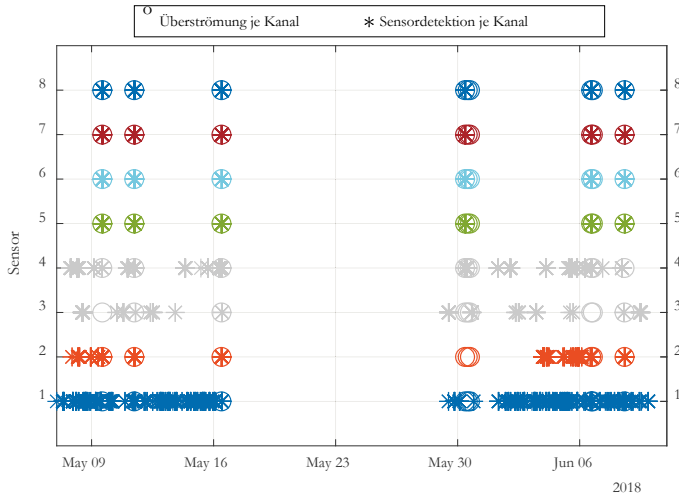


Abbildung 36: Vergleich der Sensordetektion auf Grundlage der beschriebenen Auswerteroutine (für  $p = 50$ ,  $f = 5$  und  $n = 15$ ) mit der tatsächlichen Überströmung des Modelldeichs für den Zeitraum 7. Mai bis 10. Juni 2018: Fehldetektionen werden reduziert (Sensor 5 bis 8), aber Ereignisse am 30. Mai wird von Sensor 2 nicht erkannt.

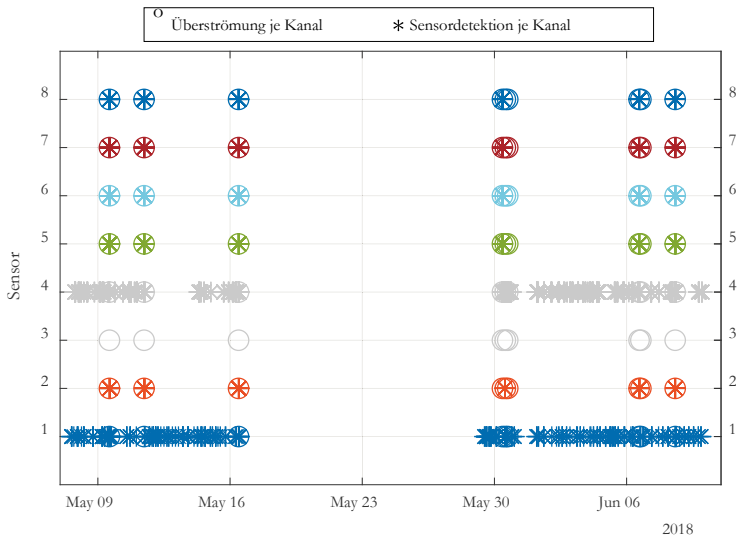


Abbildung 37: Vergleich der Sensordetektion auf Grundlage der beschriebenen Auswerteroutine (für  $p = 50$ ,  $f = 5$  und  $n = 5$ ) unter Berücksichtigung des zusätzlichen Kriteriums, dass der Spannungsabfall  $> 10\%$  sein muss: Alle Ereignisse werden detektiert, Fehlalarme treten für Sensoren 2 bis 8 nicht mehr auf.

Insgesamt zeigt sich, dass die Auswerteroutine für die Sensoren 5 bis 8 bereits hinreichend gut funktioniert, während eine zuverlässige Detektion an den Sensoren 1 und 2 kritisch ist. Eine genauere Betrachtung der Spannungsverläufe zeigt, dass insbesondere nach langen Zeiten gleichmäßiger Messungen ohne Wassereintritt (wie beispielsweise Anfang Juni)

kleinste Schwankungen im Spannungsverlauf zum Auslösen von Fehldetektionen führen. Dieses Problem konnte durch Einführung eines zweiten Kriteriums gelöst werden (s. Abbildung 37). Eine Detektion findet nun erst statt, wenn Gleichung (1) < 0 ist und die Spannung gleichzeitig um mindestens 10 % abfällt:

$$\frac{\left[\sum_{i=t}^{t+f} U(i)\right]}{f+1} - \frac{\left[\sum_{i=t-p}^{t-1} U(i)\right]}{p} < -0,1 \cdot \frac{\left[\sum_{i=t-p}^{t-1} U(i)\right]}{p} \tag{2}$$

Die Auswertung von Sensor 1 zeigt sich jedoch weiterhin fehlerbehaftet. An diesem Sensor kam es zu starken, sehr gleichmäßigen Spannungsausschlägen. Dieses Phänomen zeigte sich zu Beginn der Messung auch an anderen Sensoren und lag in einem technischen Problem bei der Messwerterfassung im Sensorknoten des *gia* begründet. Das Problem konnte durch veränderte Einstellungen seitens des *gia* für die Sensoren Ch 2 – Ch 8 bereits Ende März behoben werden, für Ch 1 war dies am Ende des Versuchszeitraums ebenfalls möglich, weshalb die Schwierigkeiten mit Ch 1 bei der Auswertung des gezeigten Zeitraums vernachlässigbar sind.

Für die durchgeführte Versuchsreihe mit Messvlies IV wird folglich für  $p = 50, f = 5$  und  $n = 5$  eine zuverlässige Detektion mit allen Sensoren (Ausnahme Ch 1, s. o.) ermöglicht, sodass sich für die am Modelldeich zu verwendende Auswerteroutine eine Sensordetektion bei Eintreten folgender Bedingung ergibt:

$$\frac{\left[\sum_{i=t}^{t+5} U(i)\right]}{6} - \left( \frac{\left[\sum_{i=t-50}^{t-1} U(i)\right]}{50} - 5 \cdot \sqrt{\frac{1}{p} \cdot \sum_{i=t-50}^{t-1} \left( U(i) - \frac{\left[\sum_{i=t-50}^{t-1} U(i)\right]}{50} \right)^2} \right) < 0 \tag{3}$$

und  $\frac{\left[\sum_{i=t}^{t+5} U(i)\right]}{6} - \frac{\left[\sum_{i=t-50}^{t-1} U(i)\right]}{50} < -0,1 \cdot \frac{\left[\sum_{i=t-50}^{t-1} U(i)\right]}{50}$

Es gilt zu beachten, dass die Parameter  $p$  und  $f$  abhängig von der Messfrequenz der Sensoren sind. In den im Modelldeich durchgeführten Versuchen beträgt das Messintervall zwei Minuten (0,0055 Hz). Eine Variation der Frequenz wurde nicht durchgeführt, sodass keine Angaben über die Übertragbarkeit auf höhere oder niedrigere Frequenzen gemacht werden können. Zu erwarten ist jedoch, dass Parameter  $p$  konstant bleiben wird, da er dazu dient, die Messschwankungen bei unverändertem Wassergehalt abzubilden, welche sich mit steigender Frequenz kaum verändern werden. Parameter  $f$  ist abhängig davon, wie hoch aufgelöst der Sensorabfall gemessen wird, sodass sowohl  $f$  als auch  $n$  mit veränderter Messfrequenz variieren können. Da die ermittelten Parameter lediglich auf der Analyse der Messungen mit Messvlies IV bei Einbau unter einer Kiesschicht beruhen, bleibt ferner offen, ob sich die Parameter auch auf andere Messvliese und Einbausituationen übertragen lassen. Die entwickelte Auswerteroutine kann jedoch mit dem hier beschriebenen Vorgehen für neue Messvliese und Deichaufbauten identisch kalibriert und die Faktoren der Gleichung (1) können entsprechend neu bestimmt werden.

### 5.3.4 Entwicklung des Echtzeit-Deichmonitors

Die durch das Sensortextil in der Versuchshalle des *IWW* aufgenommenen Daten werden über einen Sensorknoten unter Verwendung von MQTT-Protokollen in die am *gia* erstellte

Sensordateninfrastruktur übermittelt (Herle et al. 2021). Ein am *IWW* erstelltes Programm („*Broker*“) abonniert für die in Abschnitt 5.3.3 beschriebene Auswerterroutine die Sensorsignale (topic: „*sensor 1*“ – „*sensor 8*“). Die Auswerterroutine erhält nun in Echtzeit mit jeder Messung für jeden Sensor einen gemessenen Spannungswert. Für jeden neu eingehenden Messwert werden die Bedingungen aus Gleichung (3) überprüft und als Ergebnis schließlich ein Sensorzustand „Wassergehalt konstant“ („*good*“) oder „Wassergehalt erhöht“ („*bad*“) ausgegeben. Der Sensorzustand wird im Anschluss über ein neu definiertes topic „*sensor state 1*“ – „*sensor state 10*“ ebenfalls in die Sensordateninfrastruktur eingespeist und kann dort wiederum von anderen Interessenten abonniert werden.

Ein Abonnent der topics „*sensor state 1*“ – „*sensor state 10*“ ist die Warnungsanalyse. Diese abonniert neben den Sensorzuständen zusätzlich den durch eine Ultraschallsonde im Versuchsstand gemessenen Wasserspiegel vor dem Modelldeich („*water level*“). Infolge des Wasserspiegels vor dem Deich ergibt sich eine zu erwartende Durchsickerung der Deichböschung. Der Verlauf der stationären Sickerlinie kann bei bekannten Bodenkennwerten und homogenem Aufbau über analytische Ansätze, z. B. nach Cozeny-Casagrande, berechnet werden (Casagrande 1934). Für komplexere Aufbauten und zur Berücksichtigung von Dichtungsschichten kann die Berechnung mithilfe von FE-Programmen erfolgen. Hierzu ist vorab der Verlauf der Sickerlinie für den gegebenen Deichaufbau für verschiedene Wasserstände zu berechnen und in Tabellen zu hinterlegen, sodass nicht für jeden ermittelten Wasserstand eine neue Berechnung gestartet werden muss, sondern der zu erwartende Sickerwasseraustrittspunkt aus den hinterlegten Berechnungsergebnissen ermittelt werden kann. Für den Modelldeich wird für den Verlauf der Sickerlinie auf die Messergebnisse des Druckmesssystems am Boden der Versuchsrinne zurückgegriffen. Entspricht der berechnete Austrittspunkt der Sickerlinie dem von den Sensoren detektierten Wasseraustritt oder liegt darüber (dies wird der Fall sein, sofern der Verlauf der berechneten stationären Sickerlinie angesetzt wird und mit der tatsächlichen instationären Durchsickerung des Deiches verglichen wird), ist der Deichzustand in Ordnung (topic: „*dike state*“ = „*good*“). Wird durch die Sensoren ein infolge des Wasserstands vor dem Deich nicht zu erwartender, erhöhter Wasserstand detektiert, so deutet dies auf Fehlstellen in der Dichtungsschicht hin (vgl. Kapitel 3). Der Deich verfügt folglich über Schäden, der Deichzustand wird als kritisch (topic: „*dike state*“ = „*critical*“) definiert und es wird eine automatische Warnung generiert.

Die Datenvisualisierung erfolgt in einem Deich-Dashboard. Das Deich-Dashboard abonniert die unter den Topics „*sensor state*“, „*dike state*“ und „*water level*“ veröffentlichten Daten und kann damit den Zustand jedes einzelnen Sensors, den Wasserstand vor dem Deich, den Gesamtzustand des Deichs sowie eventuell generierte Warnungen in Echtzeit anzeigen. Zusätzlich erfolgt eine Speicherung der Daten, sodass Ereignisse aus der Vergangenheit ebenfalls über das Deich-Dashboard visualisierbar sind.

Abbildung 38 stellt die beschriebenen Zusammenhänge und Datenströme bis zum Deich-Dashboard grafisch dar, Abbildung 39 zeigt einen Screenshot des für den Modelldeich entwickelten Deich-Dashboards kurz nach einem Überströmereignis. Der Sensorzustand ist hier bereits für alle Sensoren auf „*good*“ gesprungen, da mit der Auswerterroutine lediglich der Zeitpunkt des Wassereintritts detektiert wird: Für das aufgezeichnete Ereignis ist dies bereits erfolgt und an den Ausschlägen im Verlauf des Sensorzustands (unten links) sichtbar. Der Deichzustand ist für den gezeigten Modelldeich trotz des gemessenen Wassereintritts an allen Sensoren unkritisch („*good*“), da der durch die Sensoren gemessene Wassereintritt

dem erwarteten Wassereintritt bei einem Überströmereignis über ein durchlässiges Deckwerk entspricht und für den im Modelldiich umgesetzten Deichaufbau entsprechend keinen kritischen Zustand bedeutet.

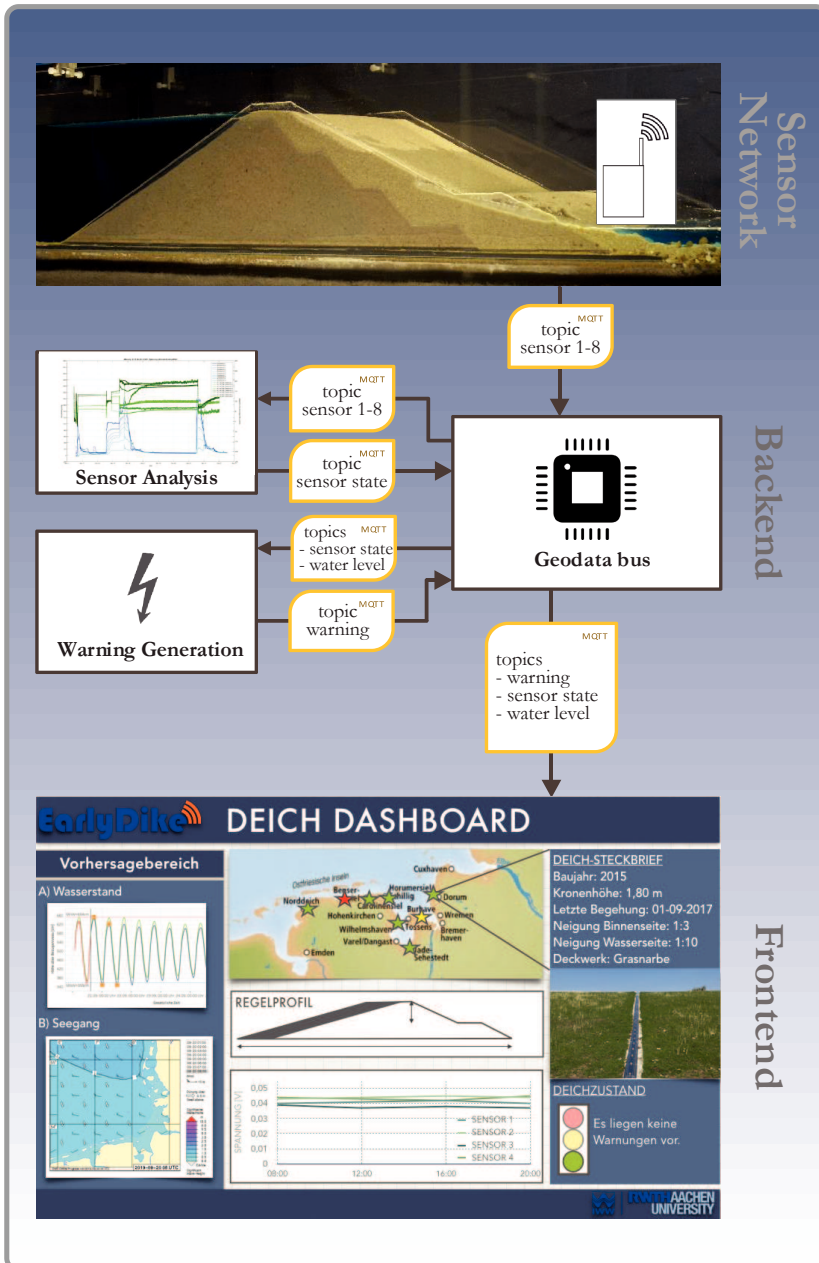


Abbildung 38: Informationsfluss zum Echtzeit-Deichmonitor.



Abbildung 39: Screenshot des Deich-Dashboards für den Modelldeich kurz nach erfolgtem Überströmereignis.

## 6 Fazit und Ausblick

In Arbeitspaket 3 des Projekts EarlyDike wurde ein Konzept für ein verbessertes und kontinuierliches Deichmonitoring erarbeitet, welches sich auf den Einsatz von mit Sensoren ausgestatteten Geotextilien stützt. Hierzu wurden neuartige intelligente Geotextilien entwickelt, die eine erhöhte Durchfeuchtung des Bodens erkennen können. Bei Einbau der Sensortextilien in der Deichböschung und entsprechender Auswertung der generierten Daten ist es möglich, einen Anstieg der Sickerlinie innerhalb des Deichkörpers sowie eine Infiltration durch die Deckschicht des Deiches zuverlässig zu erkennen. Eine Analyse der im Schrifttum identifizierten Deichversagensmechanismen zeigte, dass ein erhöhter Wassergehalt unter der Kleischicht eines Seedeiches, kritisch für die Stabilität des Deiches sein kann. Über die Detektion eines unter den gegebenen Belastungen nicht zu erwartenden Anstiegs des Wassergehalts lassen sich folglich Schäden am Deich frühzeitig erkennen. Im Vergleich zu konventionellen Monitoring-Verfahren, die sich vor allem auf regelmäßige Sichtkontrollen der Deiche beschränken, ermöglicht das nun vorgeschlagene Konzept ein kontinuierliches Monitoring sowie die Erkennung von äußerlich nicht sichtbaren Schäden.

Die entwickelten Sensortextilien wurden in klein- und großmaßstäblichen Deichmodellen getestet und das Design der Sensoren sowie das Messkonzept in enger Zusammenarbeit mit dem *ITA* optimiert. In über mehrere Monate stattfindenden Langzeitversuchen wurden die Sensoren kontinuierlich belastet und vielfachen Nass-Trocken-Wechseln ausgesetzt. Die erfolgten Untersuchungen mit den Sensortextilien verliefen vielversprechend und das entwickelte Messprinzip erwies sich als geeignet für den Einsatz im Deichmonitoring.

Es wurde ein Verfahren entwickelt, die Messsignale der textilen Sensoren automatisch auszuwerten, in eine Sensor- und Geodateninfrastruktur zu übermitteln und schließlich

über ein Deich-Dashboard online abrufbar zu machen. Hierdurch ist eine Echtzeitüberwachung des aufgebauten Modelldeichs in der Versuchshalle des *IWW* möglich und damit eine erste Umsetzung des entwickelten Frühwarnsystems realisiert worden.

Im Rahmen zukünftiger modelltechnischer Untersuchungen sollte vor allem der Einbau der Sensoren unterhalb einer Kleischicht untersucht und das Verhalten während Regeneriegnissen analysiert werden. Ferner sind im Vergleich zur Lebensdauer eines Deichs die bislang untersuchten Zeiträume gering. Die Langzeitbeständigkeit der Sensoren ist jedoch elementar und sie gilt es, vor einem Einsatz unter Naturbedingungen mit geeigneten Verfahren zu simulieren. Nach erfolgreicher Absolvierung weiterer Modellversuche empfiehlt sich der testweise Einbau in der Natur. Hierbei ist das Augenmerk auf die Robustheit der Sensoren bei der Verwendung schweren Geräts zu legen. Ferner sollte geprüft werden, inwieweit die entwickelte Auswerterroutine zur Interpretation der Messsignale auch für andere Messvliese und Einbausituationen gültig ist und ob die Analyse unter Verwendung selbstlernender Algorithmen verbessert werden kann. Weitere praktische Fragestellungen ergeben sich für den Einsatz der Sensoren unter extremen Wetterbedingungen. So gilt es, die Sensoren bspw. vor Blitzeinschlägen zu schützen. Auch ein Ausfall aufgrund fehlender Stromversorgung bzw. Telekommunikation im Hochwasserfall wäre fatal, sodass durch Redundanzen und autarke Lösungen eine möglichst sichere Stromversorgung und Datenübertragung zu gewährleisten ist.

## 7 Danksagung

Das Verbundprojekt *EarlyDike* wurde vom 1. Juni 2015 bis zum 31. Mai 2018 mit Mitteln des *Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)* im Rahmen des Sonderprogramms *Geotechnologien* gefördert (BMBF-Förderkennzeichen: 03G0847A). Die Autoren danken für die intensive Betreuung durch den Projektträger Jülich sowie dem BMBF für die Förderung und Ermöglichung des Projekts. Weiterer Dank gilt allen Projektpartnern für die gute und fruchtbare Zusammenarbeit.

## 8 Literaturverzeichnis

Abdoun, T.; Bennett, V.; Danisch, L.; Shantz, T.; Jang, D.: Field installation details of a wireless shape-acceleration array system for geotechnical applications. In: Tomizuka, M., Yun, C.-B.; Giurgiutiu, V. (Eds.): San Diego, California, 65293O. <https://doi.org/10.1117/12.714413>, 2007.

Allsop, W.; Kortenhaus, A.; Morris, M.: Failure Mechanisms for Flood Defence Structures. FLOODsite Project Report (T04\_06\_01), 211 S., 2007.

Artières, O.; Beck, Y. L.; Khan, A. A.; Cunat, P.; Fry, J. J.; Courivaud, J.-R.; Guidoux, C.; Pinettes, P.: Assessment of dams and dikes behavior with a fibre optics based monitoring solution. In: Garca, R. R.; Mir, M. A.; Bitrián, F. H.; Dios, R. L.; Rubín de Célix Caballero, M.; Rodríguez-Trelles, M. d. A. (Eds.): Dam maintenance and rehabilitation II. Proceedings of the 2. International Congress an Dam Maintenance and Rehabilitation, Zaragoza, Spain, 23–25 November 2010. Boca Raton, London, New York, Leiden, 79–86. 2011.

Aufleger, M.; Dornstädter, J.; Strobl, T.; Conrad, M.; Perzlmaier, S.; Goltz, M.: 10 Jahre verteilte faseroptische Temperaturmessungen im Wasserbau. In: *Wasserwirtschaft*, 10, 2007.

Becker, R.; Blankenbach, J.; Dreier, N.; Fröhle, P.; Gries, T.; Herle, S.; Jensen, J.; Krebs, V.; Lehfeldt, R.; Mulckau, A.; Niehüser, S.; Quadflieg, T.; Schüttrumpf, H.; Schwab, M.: EarlyDike - Entwicklung eines sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems für Seedeiche. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben EarlyDike – Teil 1, BMBF-Förderkennzeichen Förderkennzeichen 03G0847A, 03G0847B, 03G0847C, 03G0848A. In: *Die Küste*, 90, 2021.

BERDING BETON GmbH 2012: Europäische Technische Zulassung – Verkalit-Beton-elemente zur Verwendung in Deckwerken. Angemeldet durch Deutsches Institut für Bautechnik. Veröffentlichungsnr: ETA-12/0245.

Bersan, S.; Koelewijn, A. R.; Simonini, P.: Application of distributed temperature sensors in piping-prone dikes. In: Dight, P. (Eds.): *Proceedings of the Ninth International Symposium on Field Measurements in Geomechanics*, 9–11 September 2015, Sydney, Australia. 475–486. 2015.

Casagrande, L.: Näherungsverfahren zur Ermittlung der Sickerung in geschütteten Dämmen auf undurchlässiger Sohle. In: *Die Bautechnik*, 15, 205–208. 1934.

CIRIA: *The international levee handbook*. Construction Industry Research and Information Association, London, 1332 S., 2013.

Cundill, S. L.: *Investigation of remote sensing for dike inspection*. Dissertation. University of Twente, Twente, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, 236 S., 2016.

Desrosiers, T.; Bennett, V.; Abdoun, T.; Simm, J.: Comprehensive Real-Time Field Monitoring at Active Embankment subjected to Tidal Loading. In: Meehan, C. L.; Pradel, D.; Pando, M. A.; Labuz, J. F. (Eds.): *GeoCongress 2013*. San Diego, California, United States, 1549-1558. <https://doi.org/10.1061/9780784412787.155>, 2013.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA): *Merkblatt DWA-M 507-1, Deiche an Fließgewässern Teil 1: Planung, Bau und Betrieb*. Hefen, 2011.

Dornstädter, J.: *Temperaturmessung im Wasserbau - Sichere Überwachung von Dämmen und Deichen seit mehr als 60 Jahren*. In: Technische Universität Dresden – Fakultät Bauingenieurwesen Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik (Hg.): 38. Dresdner Wasserbaukolloquium. Dresden, 2015.

EAK: *Empfehlungen für Küstenschutzwerke*. Korrigierte Ausgabe 2007 In: *Die Küste*, 65, 2002.

EurOtop: *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures*. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application 264 S., 2016.

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 und 03G0848A: Teilprojekt 5 – Sensor- & Geodateninfrastruktur, Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme der RWTH Aachen University und Bundesanstalt für Wasserbau. In: *Die Küste*, 90, 2021.

Kortenhaus, A.; Oumeraci, H.: Probabilistische Bemessung für Seedeiche (ProDeich). Leichtweiss-Institut für Wasserbau, Braunschweig, (877), 403 S., 2002.

Krebs, V.; Schüttrumpf, H.: EarlyDike – Sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem für Seedeiche, AP 3: Deichmonitoring und Deichsimulator. 2. Zwischenbericht Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen University, 2017.

Krzhozhanovskaya, V. V.; Shirshov, G. S.; Melnikova, N. B.; Belleman, R. G.; Rusadi, F. I.; Broekhuijsen, B. J.; Gouldby, B. P.; Lhomme, J.; Balis, B.; Bubak, M.; Pyayt, A. L.; Mokhov, I. I.; Ozhigin, A. V.; Lang, B.; Meijer, R. J.: Flood early warning system: design, implementation and computational modules. In: *Procedia Computer Science*, 4, 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2011.04.012>, 2011.

MELF Niedersachsen: Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 im niedersächsischen Küstengebiet. Die Sturmflut vom 16./17. Bericht der vom Niedersächsischen Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten eingesetzten Ingenieur-Kommission In: *Die Küste*, 10, 1, 17–53, 1962.

MELF Schleswig-Holstein: Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 an der Schleswig-Holsteinischen Westküste. Bericht des Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten – Landesamt für Wasserwirtschaft – Schleswig-Holstein In: *Die Küste*, 10, 1, 55–80, 1962.

MELUND Schleswig-Holstein: Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein. Fortschreibung 2012 Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, Kiel, 102 S., 2013.

Naumann, M.; Bill, R.; Niemeyer, F.; Nitschke, E.: Deformation Analysis of Dikes Using Unmanned Aerial Systems (UAS). In: Saathoff, F.; Cantré, S. (Eds.): *Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction*. Rostock, Hohe Düne, 119–128. 2014.

NLWKN: Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/Bremen – Festland. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, 78 S., 2007.

Ohle, N.; Elsner, A.; Zimmermann, C.: Deichüberwachung unter Einsatz der Fernerkundung. In: *Franzius-Mitteilungen*, 92, 2006.

Pei, H.-F.; Teng, J.; Yin, J.-H.; Chen, R.: A review of previous studies on the applications of optical fiber sensors in geotechnical health monitoring. In: *Measurement*, 58, 207–214. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.08.013>, 2014.

Peters, E. T.; van der Vliet, P. P.: GeoBeads, multi-parameter sensor network for soil stability monitoring. In: *8th International Symposium on Field Measurements in GeoMechanics*. Berlin, 2011.

Ponziani, M.; Bachmann, D.: Real-time monitoring and forecasting of dike strength. In: *International Journal of Safety and Security Engineering*, 6, 2, 122–131. <https://doi.org/10.2495/SAFE-V6-N2-122-131>, 2016.



- Pyayt, A. L.; Kozionov, A. P.; Mokhov, I. I.; Lang, B.; Krzhizhanovskaya, V. V.; Sloom, P. M.A.: An Approach for Real-time Levee Health Monitoring Using Signal Processing Methods. In: *Procedia Computer Science*, 18, 2357–2366. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.05.407>, 2013.
- Richwien, W.: Kritische Beanspruchungen von Deichböden – Versagensformen und Nachweiskonzepte. In: *HANSA, Zentralorgan für Schifffahrt, Schiffbau, Hafen*, 133, 5, 56–58. 1996.
- Royet, P.; Palma-Lopes, S.; Fauchard, C.; Mériaux, P.; Ariaux, L.: WP3: Reliability of Urban Flood Defences. D3.2: Rapid and cost-effective dike condition assessment methods: geophysics and remote sensing 136 S., 2013.
- Schüttrumpf, H.; Oumeraci, H.: Learning from Seadike Failures. In: *PIANC Bulletin*, 117, 47–60. 2004.
- Schüttrumpf, H.: Sea Dikes in Germany. In: *Die Küste*, 74, 189–199, 2008.
- Schüttrumpf, H.: Wellenüberlaufströmung bei Seedeichen - Experimentelle und theoretische Untersuchungen. Dissertation. Technische Universität Braunschweig, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, 174 S., 2001.
- Schwab, M.; Quadflieg, T.; Gries, T.: Intelligente Geotextilien für das Echtzeit-Deichmonitoring. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben EarlyDike – Teil 5, BMBF-Förderkennzeichen 03G0847A: Teilprojekt 3 – Deichmonitor und Deichsimulator, Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University. In: *Die Küste*, 90, 2021.
- Simm, J.; Wallis, M.; Smith, P.; Tourment, R.; Veylon, G.; Deniaud, Y.; Durand, E.; McVicker, J.; Hersh-Burdick, R.: The significance of failure modes in the design and management of levees—a perspective from the International Levee Handbook team. In: Klijn, F. (Eds.): *Comprehensive flood risk management. Research for policy and practice. Proceedings of the 2nd European Conference on Flood Risk Management Floodrisk 2012 Rotterdam The Netherlands 19–23 November 2012*. Boca Raton, Fla, <https://doi.org/10.1201/b13715-43>, 2013.
- Thiele, E.; Glötzl, R.; Werth, K.; Krebber, K.; Schlurmann, T.: Entwicklung von multifunktionalen sensorbasierten Geotextilien zur Deichertüchtigung, für räumlich ausgedehntes Deichmonitoring, sowie für die Gefahrenerkennung im Hochwasserfall bei der Deichverteidigung. *rimax – Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse* 96 S., 2008.
- Vries, G. de; Koelewijn, A. R.; Hopman, V.: IJkdijk Full Scale Underseepage Erosion (Piping) Test: Evaluation of Innovative Sensor Technology. In: Burns, S.; Bhatia, S.; Avila, C. (Eds.): *Scour and Erosion*. San Francisco, California, United States, 649–657. [https://doi.org/10.1061/41147\(392\)63](https://doi.org/10.1061/41147(392)63), 2014.
- Vrijling, J. K.: Probabilistic design of water defense systems in The Netherlands. In: *Reliability Engineering & System Safety*, 74, 3, 337–344. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(01\)00082-5](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(01)00082-5), 2001.
- Waal, J. P.; van der Meer, J.: Wave Runup and Overtopping on Coastal Structures. In: *Coastal Engineering Proceedings*, 23, 1992.

Zeghal, M.; Abdoun, T.; Exton, M.; Mercado, V.; Lv, X.; Bennett, V.; Yazici, B.; Marr, A.: Development of a Multiscale Monitoring and Health Assessment Framework for Effective Management of Levee Infrastructure. In: Meehan, C. L.; Pradel, D.; Pando, M. A.; Labuz, J. F. (Eds.): GeoCongress 2013. San Diego, California, United States, 1605–1614. <https://doi.org/10.1061/9780784412787.161>, 2013.

# Intelligente Geotextilien für das Echtzeit-Deichmonitoring

Max Schwab<sup>1</sup>, Till Quadflieg<sup>1</sup> und Thomas Gries<sup>1</sup>

<sup>1</sup> RWTH Aachen University, Institut für Textiltechnik, [max.schwab@ita.rwth-aachen.de](mailto:max.schwab@ita.rwth-aachen.de)

## Zusammenfassung

Im Rahmen des Arbeitspakets 3 „Deichmonitoring und -simulator“ des BMBF-Projekts *EarlyDike* wurden am *Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University (ITA)* intelligente Geotextilien zur Echtzeit-Feuchtigkeitsmessung im Deich entwickelt und validiert. Dazu wurden unterschiedliche leitfähige Faserwerkstoffe untersucht und elektrisch leitfähige Carbonfasern als Sensorfasern für den Untersuchungsraum ausgewählt. Weiterhin wurden Integrationskonzepte in bestehende textile Herstellungsverfahren für Geotextilien untersucht und verschiedene Füge-technologien für die Geotextilien bezüglich der Verbundfestigkeit charakterisiert. Das Messprinzip beruht auf der Korrelation des elektrisch messbaren Signals zweier Sensorfasern und der physikalischen Umgebungsänderung der Feuchte. Es wurden Langzeitmessungen an einem Modelldeich durchgeführt, in den das intelligente Geotextil auf der Böschungsseite eingebracht ist. Die Versuche zeigen die Eignung der textilbasierten Sensorik sowie der konzipierten Messschaltung zur Detektion von Feuchtigkeitsereignissen.

## Schlagwörter

Geotextil, Smart Textiles, Stickverfahren, Füge-technologien, Carbonfasern

## Summary

*As part of work package 3 "Dike Monitoring and Simulator" of the project EarlyDike, smart geotextiles for real-time humidity measurement within the dike were developed and validated by the Institut für Textiltechnik of RWTH Aachen University (ITA). Different conductive fibre materials were investigated and electrically conductive carbon fibres were selected as sensor fibres for the test area. Furthermore, integration concepts into existing textile manufacturing processes for geotextiles were investigated and various joining technologies for geotextiles were characterized regarding their joint strength. The measuring principle is based on the correlation of the electrically measurable signal of two sensor fibres and the physical change of the humidity of the environment. Long-term measurements were carried out on a model dike channel in which the smart geotextile is inserted on the slope side. The tests show the suitability of the textile-based sensor technology as well as the designed measuring circuit to detect moisture events.*

## Keywords

*geotextiles, smart textiles, embroidery, joining technologies, carbon fibres*

## 1 Einleitung

Intelligente Geotextilien zur Detektion von Belastungen und Beschädigungen von Flussdeichen wurden im BMBF Projekt „Entwicklung von multifunktionalen, sensorbasierten Geotextilien zur Deichertüchtigung“ (FKZ: 02WH0570 bis 02WH0574 und im EU Projekt „UrbanFlood“ (Pengel 2013) eingesetzt. In beiden Projekten wurde der Forschungsschwerpunkt auf Deiche im Binnenbereich und die damit verbundenen hydrodynamischen Prozesse (Hochwasser) gelegt. Die aus dem Hochwasser resultierenden Beschädigungen im Deich ereignen sich langsamer und weniger dynamisch als in Küstenregionen. In den Projekten wurden daher Technologien zur Erkennung nicht sichtbarer, langsam eintretender Versagensmechanismen berücksichtigt.

Zur Zustandsüberwachung in Verstärkungstextilen werden üblicherweise faseroptische Systeme, sogenannte Fibre Bragg Grids, mit einem Lichtwellenleiter im Kern eingesetzt. Dabei wird über eine Lichtquelle ultraviolettes Licht in das Faserende eingekoppelt. Mit einem zweiten Gerät wird das durch die Faser reflektierte Licht gemessen und die Änderungen in der Lichtwelle ermöglichen eine Aussage über die lokale Längenänderung der Faser (Frank 2001). Solche Systeme haben eine hohe Messgenauigkeit und sind in verschiedenen Ausprägungen als kommerzielle Produkte bei einer Vielzahl von Industrieunternehmen erhältlich. Faseroptische Sensoren werden zur Überwachung von Gebäuden und Geotextilien eingesetzt und sind besonders geeignet um sehr kleine Längenänderungen, z. B.  $< 1\%$  zu messen (Elsner 2009, Thiele 2009). Das Sensor-Prinzip im Projekt *EarlyDike* zielt auf die Erschließung flächiger Messungen mittels kostengünstigerer elektrisch leitfähiger Sensorfasern, die über weite Lauflängen in die bereits verwendeten Geotextilstrukturen integriert werden. Dabei wird ganz bewusst eine geringere Auflösung der Messgenauigkeit zu Gunsten einer vollflächigen Überwachung genutzt. Der Vorteil der Verwendung von Carbonfasern gegenüber den faseroptischen Sensoren liegt in der Robustheit der Materialien, da die faseroptischen Sensoren bei Einwirkung höherer Belastung unter Knicken zerstört werden können. Außerdem ist die Schnittstelle zur Lichteinkopplung aufwändig und komplex.

Im folgenden Teilbericht des Projekts *EarlyDike* wird die Entwicklung, Prototypenherstellung und Validierung des intelligenten Geotextils für das Deichmonitoring von Seedeichen beschrieben. Die Entwicklung erfolgte in enger Kooperation zwischen dem *ITA*, dem *Institut für Wasserbau und Wasserrwirtschaft (IWW)* der *RWTH Aachen University* und dem *Geodätischen Institut (gia)* der *RWTH Aachen University* (Krebs und Schüttrumpf 2018, Herlé et al. 2018).

Zunächst werden im Stand der Technik (Kapitel 2) die Grundlagen zu textilen Sensormaterialien zur Messung von Feuchtigkeit bzw. Dehnung in Deichbauten vorgestellt. Anschließend wird kurz auf ausgewählte Textilverfahren zur Herstellung von Sensortextilien eingegangen. In Kapitel 3 werden die Grundlagen zum Messprinzip der Feuchtigkeitsmessung mit Sensorfasern, sowie die notwendige Messelektronik zur Sensorauswertung vermittelt. Zur Validierung eines ersten Prototyps des intelligenten Geotextils (Messvlies I) wurden kleinmaßstäbliche Untersuchungen am *IWW* durchgeführt. Das im Anschluss entwickelte intelligente Geotextil für den großmaßstäblichen Modelldeich wird in Kapitel 4 beschrieben. Dabei werden zunächst textile Fügeverfahren zur Integration der Feuchtigkeitssensoren in das Geotextil vorgestellt. Auch die Möglichkeiten der Sensor-Beschichtung bzw. -Kaschierung spielen eine Rolle. Der Aufbau des großmaßstäblichen

Modelldeichs und die dort durchgeführten Validierungsversuche des intelligenten Geotextils wurden am *IWW* durchgeführt und sind in Krebs und Schüttrumpf (2018) beschrieben. Die Auswerteeinheit zur Messung der Feuchtigkeit am intelligenten Geotextil wird in Kapitel 5 dargestellt, vor allem die Weiterentwicklung der Messelektronik und die gesamte Messkette. Dabei steht vor allem die Datenübergabe zum GeoPortal im Vordergrund, das vom *gia* im Projekt entwickelt wurde. In Kapitel 6 wird eine Simulation eines Feuchtigkeitsereignisses vorgestellt. Dabei soll die Validierung der Messkette gezeigt werden.

## 2 Stand der Technik

Im Forschungsprojekt *EarlyDike* werden Carbonfasern sowie Edelstahlgarne als Sensormaterialien betrachtet, die als Grundlage der Entwicklung von intelligenten Geotextilien dienen. In den folgenden Unterkapiteln werden der Stand der Technik für beide Materialien sowie ausgewählte Textilverfahren zur Herstellung von intelligenten Geotextilien dargestellt.

### 2.1 Textile Sensorfasern

Als Sensorfasern werden sowohl Metallfasern aus Edelstahl, als auch Polyacrylnitril (PAN)-basierte Carbonfasern eingesetzt. Beide Arten von Fasern weisen einen vollen textilen Charakter auf. Daher ermöglichen ihre Steifigkeit und Handhabbarkeit eine Verarbeitung mit Textilmaschinen. Die Sensorfunktion ist abhängig vom elektrischen Widerstand, welcher wiederum vom eingesetzten Werkstoff und vom Querschnitt der Faserbündel (Rovings) bzw. Garne abhängt. Bei Garnen wird das spezifische Längengewicht, der Titer (Garnfeinheit), in der Einheit tex (Gramm pro 1000 m) angegeben. In der Anwendung werden für jede Art der Fasern zwei unterschiedlicher Faserfeinheiten untersucht. Die Fasern aus Tabelle 1 werden im Projekt hinsichtlich ihrer Eignung als Deichsensorfasern untersucht und getestet.

Tabelle 1: Übersicht relevanter technischer Eigenschaften für Carbonfasern und Edelstahlgarn.

Fasertyp	Herstellerbezeichnung	Garnfeinheit [tex]	El. Widerstand [ $\Omega$ /m]	Zugfestigkeit [MPa]	Preis [€/kg]
AISI 316L Edelstahlgarn	ZF 12/275/2	530	28 $\Omega$ /m	500	1
AISI 316L Edelstahlgarn	ZF 12/1000/2	1730	13 $\Omega$ /m	500	1
24K Carbonfaser	SIGRAFIL C40 T024 EPY	1600	17 $\Omega$ /m	5000	30
50K Carbonfaser	SIGRAFIL C30 T050 EPY	3300	8 $\Omega$ /m	5000	25

#### 2.1.1 Carbonfasern

Carbonfasern vereinen die Eigenschaften hohe Zugfestigkeit und hohe Steifigkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht. Daher sind sie der ideale Konstruktionswerkstoff für hochbeanspruchte Bauteile in Leichtbauanwendungen. Sie bestehen zu 92 % bis 99,9 % aus

Kohlenstoff. Reiner Kohlenstoff lässt sich nicht zu Fasern verspinnen, da der Tripelpunkt bei rund 4.600 K in einer Überdruckatmosphäre von etwa 10 MPa liegt. Daher wird zur Herstellung von Carbonfasern ein Umweg über eine kohlenstoffreiche Endlosfaser, den Precursor, gemacht. Dieser ist bei den meisten technischen Verfahren ein hochverstrecktes Polyacrylnitril(PAN)-Filament. Das Herstellungsverfahren selbst gliedert sich in die Stufen Pyrolyse, Carbonisierung und Graphitisierung. Der Durchmesser eines Carbonfilaments beträgt zwischen 5  $\mu\text{m}$  und 7  $\mu\text{m}$ . Die Einzelfilamente werden zu einem Roving zusammengefasst. Dessen Bezeichnung richtet sich üblicherweise nach der Anzahl der Filamente, die zusammengefasst sind. Je 1.000 Filamente werden mit der Angabe 1K bezeichnet. Übliche Lieferformen für Rovings sind 1K (67 tex), 3K (200 tex), 6K (400 tex), 12K (800 tex), 24K (1600 tex) sowie Heavy Tows mit 50K und mehr. Die elektrische Leitfähigkeit und das Festigkeitsverhalten sind anisotrop ausgeprägt. In Faserrichtung weisen Carbonfasern aufgrund ihrer molekularen Struktur hohe Zugfestigkeiten und eine hohe elektrische Leitfähigkeit auf. Quer zur Faserrichtung sind Festigkeit und Leitfähigkeit gering (Cherif 2011).

### 2.1.2 Edelstahlgarne

Metallgarne haben eine ausgezeichnete elektrische Leitfähigkeit unter den elektrisch leitfähigen Fasern. Zudem wird die elektrische Leitfähigkeit nicht von der Umgebungsfeuchtigkeit beeinflusst. In jüngster Zeit wurden Edelstahlfasern entwickelt, die zwar schwieriger zu verarbeiten sind, jedoch Garneigenschaften für den Einsatz in Hightech-Anwendungen bieten.

Neben der hohen Zugfestigkeit ist ein weiteres wichtiges Merkmal von Edelstahlgarnen, dass sie sich chemisch inert verhalten. Sie sind hitze-, korrosions- und säurebeständig. Besonders Edelstahlfasern und -garne können als Verstärkung von Geotextilien zur Herstellung von Geogittern eingesetzt werden. Dabei werden Metallfasern mit anderen synthetischen Garnen gemischt (Uddin 2010).

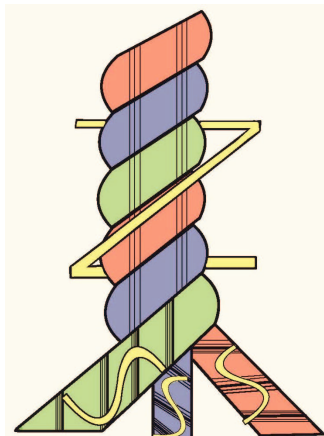


Abbildung 1: Verdrehung von Garnen schematisch (Gries 2015).

In der Form von Garnen wird das Dehnungsverhalten durch die Garnstruktur beeinflusst. Durch sogenannte Z- oder S-Drehung (siehe Abbildung 1) sowie das Verzwirnen mehrere Garne lassen sich Dehnungsbereiche einstellen (Gries 2015).

## 2.2 Faserbasierte Strukturüberwachung (Structural Health Monitoring)

Zur Zustandsüberwachung mittels textilintegrierter Strukturen kommen vornehmlich zwei physikalische Prinzipien zum Einsatz: optische und das elektrische Messverfahren. Bei optischen Messverfahren wird die mechanische Änderung der Faser mit Hilfe einer optischen Auswerteeinheit gemessen und anschließend in ein elektrisches Signal umgewandelt. Bei elektrischen Messverfahren wird ein elektrisch leitendes Material eingesetzt, welches bei einer Längenänderung seine Leitfähigkeit ändert. Ähnlich wie bei dem Einsatz von Dehnmessstreifen lässt sich so ein fadenförmiger Sensor – wie im Projekt *EarlyDike* eingesetzt – direkt kontaktieren.

Zur Dehnungsmessung mittels elektrisch leitender Garne wurden im BMBF Projekt V3TEX038 „Smart Rope“ fadenförmige Sensoren in die Geflechtstruktur eines synthetischen Faserseils integriert. Der Einsatz von Sensorik dient zur Überlast- und Verschleißkontrolle in synthetischen geflochtenen Seilen. Die Entwicklung eines integrierten textilbasierten Monitoringsystems ermöglicht eine objektive Beurteilung des Belastungs- und Verschleißzustands. Durch die Vereinfachung und Verkürzung der Wartung werden Kosten eingespart. So wird die Wartung eines Gleitschirmes mit Hilfe des Systems von zwei Stunden auf zehn Minuten verkürzt. Zudem wird eine ressourcenschonende Verwendung durch die Vermeidung prophylaktischen Austauschs erzielt. Die Überlastkontrolle ermöglicht zudem die Reduzierung der konstruktiven Sicherheit, woraus Materialeinsparungen resultieren (Wipfler 2010).

Messgitter aus Kohlenstofffasern wurden bereits erfolgreich in glasfaserverstärkten Laminaten als Sensoren integriert. Mittels relativ dünner Carbonfaserovings, meist 1K-Fasern, wurden hier die Korrelation zwischen Dehnung und die proportionale Änderung des elektrischen Widerstands nachgewiesen (Christner 2013, Horoschenkoff 2009, Horoschenkoff 2011).

## 2.3 Ausgewählte Textilherstellungsverfahren für intelligente Geotextilien

Textilstrukturen, wie sie für die Anwendung im Wasserbau zum Einsatz kommen, sind durch ihre Funktion gekennzeichnet. Die Funktionen, die sie übernehmen, sind Bewehrung, Filtration, Trennung, Erosionsschutz und Drainage. Bei verstärkenden Strukturen kommen aufgrund des geringen Bewehrungsgrades gitterartige Strukturen zum Einsatz, die üblicherweise gewebt oder gewirkt sind. Bei flächigen Textilien werden Gewebe und Vliese eingesetzt (siehe Abbildung 2).

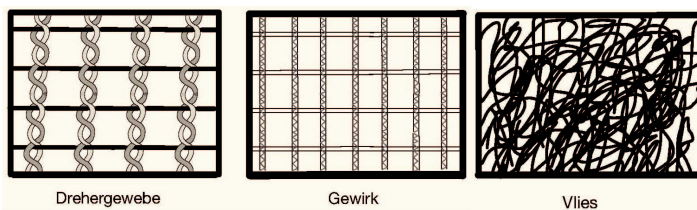


Abbildung 2: Typische Textilstrukturen (Quadflieg 2017).

Alle zum Einsatz kommenden Textilien haben eine begrenzte Breite quer zur Produktionsrichtung, die je nach Typ und Maschine zwischen 1 m und 5 m liegt. In Produktionsrichtung werden hohe Lauflängen aufgerollt, die in der Regel nur durch Prozesse wie Transport

und Handhabung limitiert sind, hier sind mehrere 100 Laufmeter üblich. Für den Einsatz flächiger Sensoren, die bereits im textilen Herstellungsverfahren integriert sind, eignet sich daher eine Einbringung in Produktionsrichtung. Die einzige Textilstruktur, in der die Garne in Produktionsrichtung (Kettfäden) gestreckt vorliegen, sind Gewirkstrukturen. Bei den anderen Verfahren muss ein gestrecktes Fadensystem in einem weiteren Bearbeitungsschritt gefügt werden (Quadflieg 2017).

### 3 Grundlagen der Feuchtigkeitsmessung im Deich

Zur Integration faserbasierter Sensoren werden die physikalischen Größen, in diesem Fall Feuchte und Dehnung, in ein elektrisches Signal (Spannung) übertragen. Elektrische Signale können durch eine Auswerteinheit verarbeitet werden. Die Sensoranordnung erfolgt in Korrelation zur Änderung der Messgröße und des sich daraus ergebenden auszuwertenden elektrischen Signals (siehe Abbildung 3). Der Feuchtesensor besteht aus zwei parallelen Leiterbahnen, die auf ein Geotextil aufgebracht sind. Durch Änderung der Umgebungfeuchte ändert sich das Dielektrikum zwischen den Leiterbahnen. Im trockenen Zustand ist der Widerstand zwischen den Leiterbahnen nahezu unendlich groß. Durch die Präsenz von Flüssigkeit (z. B. elektrolythaltiges Wasser) ändert sich der Widerstand zwischen den Leiterbahnen messbar. Die Interpretation der Zustände in der Auswerteeinheit ist abhängig von den umgebenden Materialien und der Menge an eingebrachter Flüssigkeit.

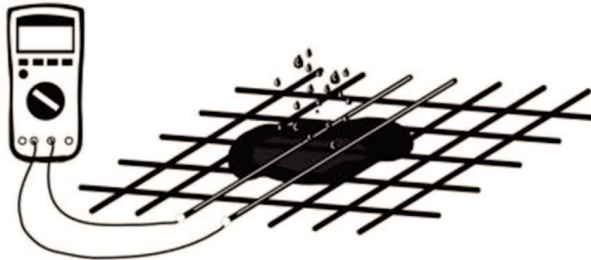


Abbildung 3: Messprinzip für die faserbasierte Feuchtigkeitsmessung im Deich.

#### 3.1 Messprinzip

Ein einzelner Kanal besteht aus einem Referenzwiderstand  $R_{Ref}$  und zwei Carbonrovings, welche das Sensorpaar bilden. Das Funktionsprinzip wird anhand des in der Abbildung 4 links eingezeichneten trockenen Zustandes beschrieben. Durch Wasserkontakt bildet sich eine elektrische Verbindung zwischen den Carbonrovings. Das Ersatzschaltbild eines solchen Kanals im feuchten Zustand ist in Abbildung 4 rechts dargestellt.



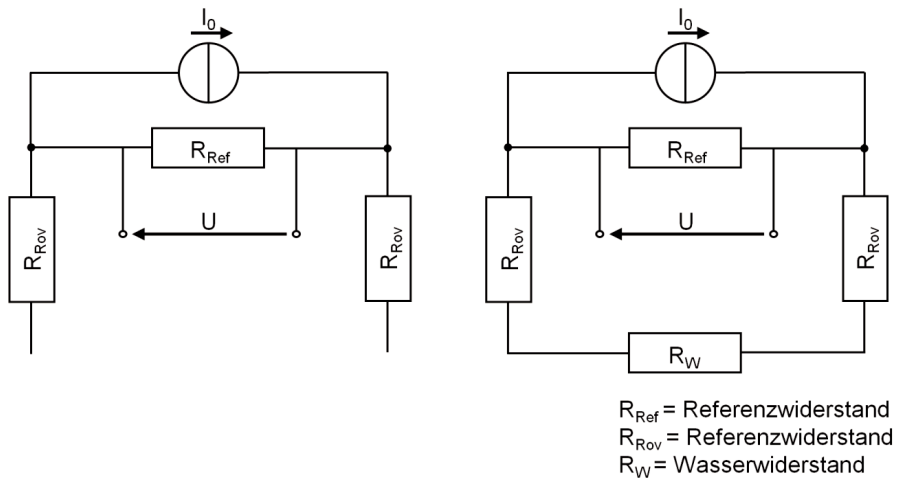


Abbildung 4: Ersatzschaltbild eines Sensorkanals in der Messschaltung mit Gleichstromquelle im trockenen Zustand (links) und bei Wasserkontakt (rechts).

Zu Beginn des Projekts *EarlyDike* wurde für die Messung der elektrischen Signale der Wasserstandsmessung eine Messschaltung entwickelt (Abbildung 5). Für Versuche wurde als Signaleingang eine Messelektronik mit einer Gleichstromquelle entwickelt. Es lassen sich beliebig viele Kanäle (Sensorpaare) in die Schaltung einfügen.

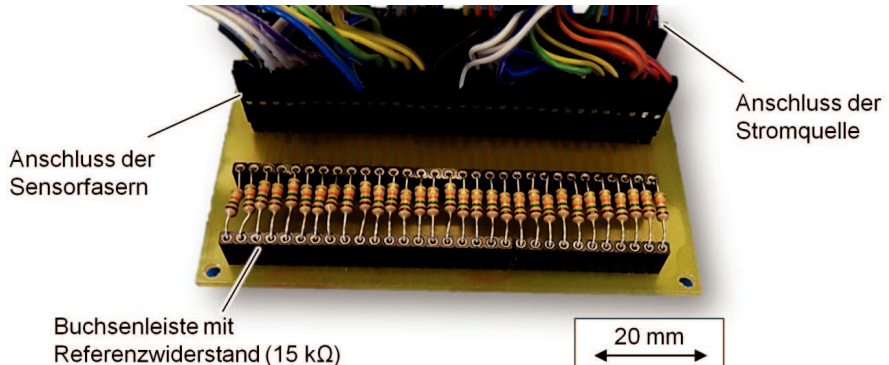


Abbildung 5: Erster Prototyp der Messschaltung für die Feuchtigkeitsmessung im Geotextil.

Auf der Messschaltung sind die Sensorfasern kontaktiert sowie die Referenzwiderstände implementiert. Die Zuführung zu den Sensorpaaren wurde zunächst über Stiftleisten und Stiftbuchsen realisiert.

### 3.2 Prototyp des Geotextils

Für erste Versuche am kleinmaßstäblichen Modelldeich des *IWW* wurden die Messvliese I und II entwickelt. Dafür wurden Polypropylen-Geotextilien mit Flächengewichten zwischen 300 und 600 g/m<sup>2</sup> der Firma *Nauw GmbH & Co. KG, Espelkamp-Fiestel* genutzt.

Carbonfasern der Firma *SGL CARBON SE, Wiesbaden* mit einem Titer von 1.600 tex (24.000 Filamente) wurden über ein spezielles Stickverfahren (Tailored Fibre Placement) auf das Geotextil aufgestickt (siehe Abbildung 6), das in Kapitel 4.1.3 beschrieben wird. Die Carbonfilamente eines jeden Carbonfaserbündels wurden über versilberte Aderendhülsen formschlüssig verbunden und mit Kupferdrähten angelötet und entsprechend zur Messschaltung aus Kapitel 3.1 geführt. Die Validierung von Messvlies I ist im folgenden Kapitel beschrieben.

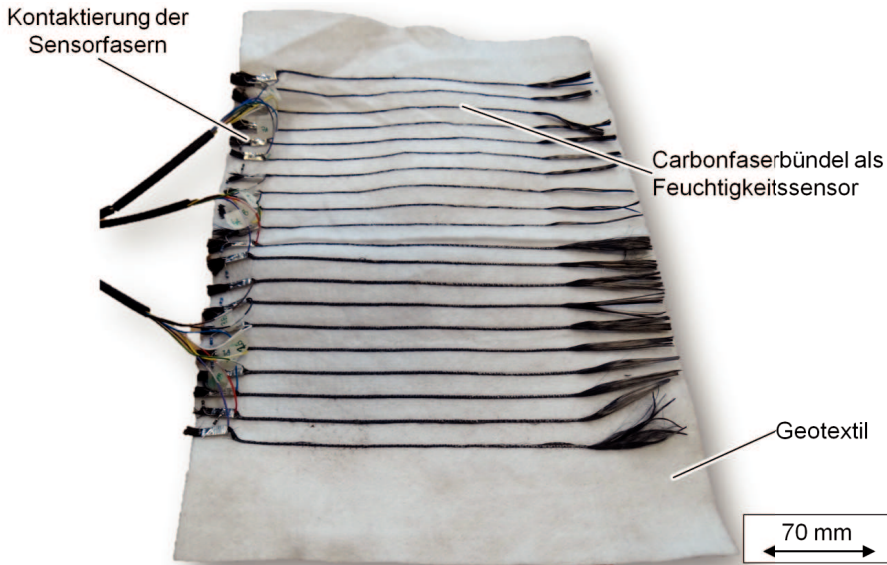


Abbildung 6: Erster Prototyp eines intelligenten Geotextils zur Feuchtigkeitsmessung mit angestickten Carbonfaserrovings (Messvlies I).

### 3.3 Validierung am kleinmaßstäblichen Modelldeich

Die Prototypen der Messschaltung sowie das intelligente Geotextil (Messvlies I und II) wurden am *IWW* in einem Versuchsaufbau validiert (Abbildung 7). In einer Kipprinne wurde ein kleinmaßstäblicher Sanddeich aufgebaut und das Sensor-Geotextil unter einer ca. 1 cm dicken Sandschicht integriert. Die Anschlusskabel wurden entlang der Deichrinne seitlich herausgeführt. Mit stetig steigendem Wasserstand ist die Sickerlinie innerhalb des Deichquerschnitts in Abbildung 7 erkennbar. Der Aufbau des kleinmaßstäblichen Modelldeichs und die Versuchsdurchführung am Deich können Krebs und Schüttrumpf (2018) entnommen werden.

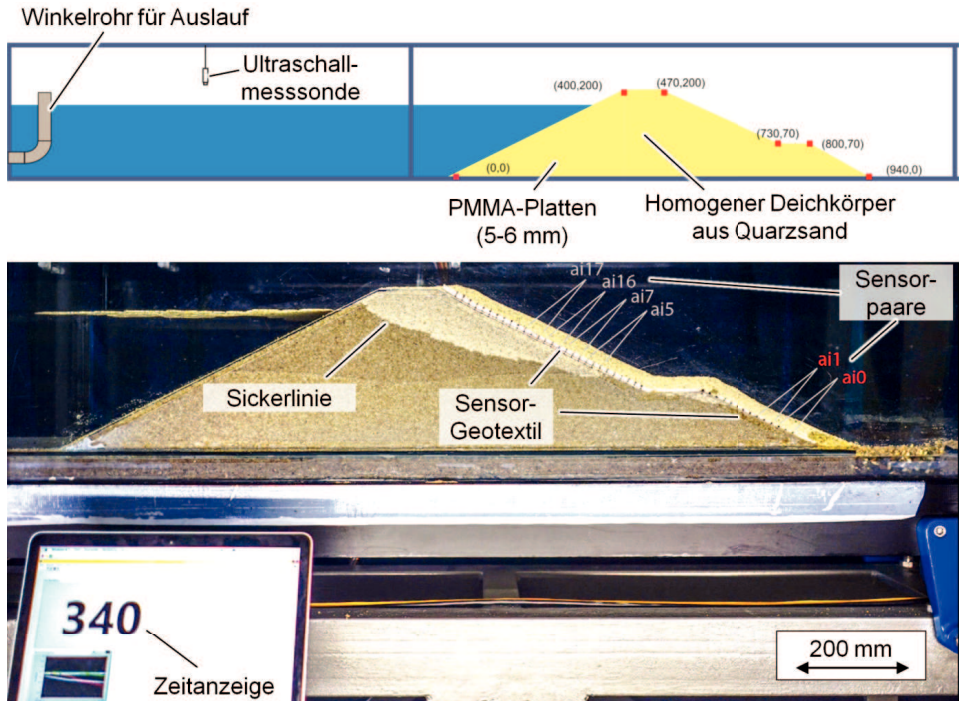


Abbildung 7: Prinzipskizze (oben) und realer Versuchsaufbau (unten) des kleinen Modelldeichs mit eingebautem Sensor-Geotextil; alle Angaben in mm.

Im zeitlichen Spannungsverlauf (Abbildung 8) wird deutlich, wie die Sensorkanäle nacheinander auf den steigenden Wasserstand reagieren. Aufgrund des Durchsickerns des Wassers durch den Sand kommt es zeitverzögert zum Herabsetzen des elektrischen Widerstands innerhalb der Sensorpaare. Dadurch kommt es zum Spannungsabfall. Am unteren Teil der Deichböschung fällt Spannung an den Kanälen ai0 und ai1 zeitlich aufgrund des Sickerlinienverlaufs ab. Im oberen Teil des Deiches ist der vertikale Anstieg der Sickerlinie mit einer größeren Zeitverzögerung verbunden. Die Spannungen an den Sensorpaaren ai5, ai7, ai16 und ai17 fallen nacheinander ab. Der Versuch zeigt, dass die Machbarkeit der Feuchtigkeitsdetektion mit einem Sensor-Geotextil gegeben ist.

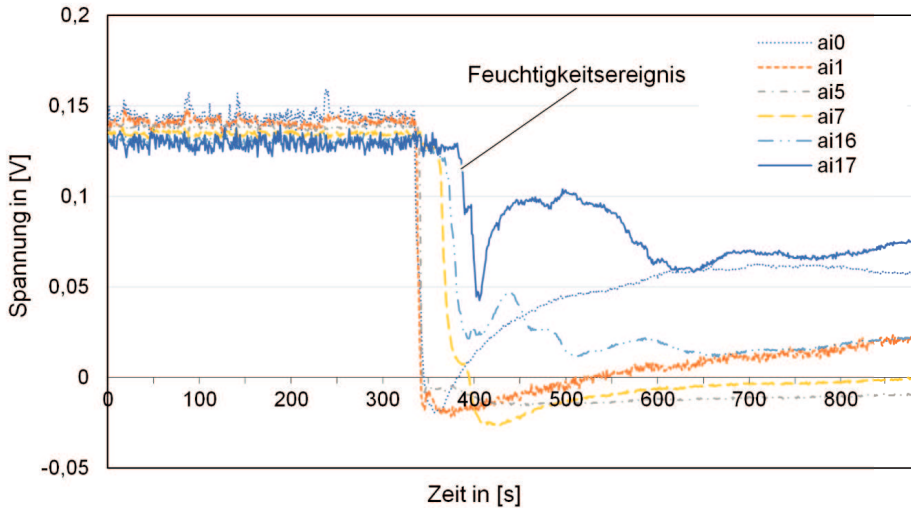


Abbildung 8: Zeitlicher Spannungsverlauf an den Sensorpaaren im kleinmaßstäblichen Modelldeich bei ansteigendem Wasserstand.

#### 4 Entwicklung eines intelligenten Geotextils

Die Anforderungen an die Sensorik zur Feuchtigkeitsmessung im Deich wurden zusammen mit dem *IWW* ausgearbeitet und sind nachfolgend aufgelistet.

##### Parallele Sensorablage

Die entwickelten Sensoren sollen parallel und waagrecht zur Deichkante bzw. Wasserstandshöhe verlaufen. Dabei setzt sich eine Messstelle aus einem Sensorpaar, das wiederum aus zwei einzelnen Sensoren besteht, zusammen. Diese müssen auch zueinander möglichst durchgehend den gleichen Abstand haben, um eine gute Messgenauigkeit zu gewährleisten. Maßgeblich für die Auflösung des Feuchtigkeitsgehalts im Deich ist die Anzahl und Anordnung der Sensorpaare auf der Deichinnenseite. Aufgrund der konstanten Abschrägung der Böschungsseite im Deichbau ist dabei ein gleichmäßiger Abstand zu gewährleisten.

##### Kompaktheit der Sensorfaser

Für den Einsatz von Carbonfasern für die Feuchtigkeitsmessung ist die Ablagebreite des Faserbündels (hier: Kompaktheit) wichtig für die elektrische Stabilität des Signals. Eine geringe Ablagebreite erhöht zum einen die Kontaktfläche der Filamente zueinander, so dass ein gleichmäßig geringer Kontaktwiderstand der Filamente vorliegt. Zum anderen ist der Abstand zum nächsten Roving bei einer schmalen Ablagebreite definierter, da der Abstand zwischen dem äußersten und dem innersten Filament zu dem freien Abstand zwischen den Rovings hinzugefügt wird und sich je nach Filament unterschiedlich ausprägt.

##### Kaschierung der Sensorfaser

Das eingesetzte Textilverfahren kann durch zusätzliche Wirk- oder Stickfäden die Multifilamente des Sensorgarns schützen. Dabei spielt der Abstand des Fadens (bzw. die Wiederholung der Abbildung pro laufenden Meter) maßgeblich eine Rolle. Je geringer dieser gewählt wird, desto mehr ist die Sensorfaser durch den zusätzlichen Faden geschützt.

Weiterhin können dünn aufgetragene, elektrisch leitfähige Polymerbeschichtungen für Carbonfasern dazu beitragen, dass die Carbonfasern durch Partikel wie z. B. Sandkörner nicht beschädigt werden. Die Polymerbeschichtung verhindert zudem, dass sich einzelne Carbonfasern lösen und zwischen den Sensorpaaren zu Kurzschlüssen führen. Ferner können Textilien – sogenannte Klebevliese – als nachträgliche Kaschierung auf die Sensorfasern aufgetragen werden.

#### 4.1 Textile Fügeverfahren für die Herstellung von Sensortextilien

Fügeverfahren werden in der DIN 8580 als vierte Hauptgruppe folgendermaßen definiert: das „auf Dauer angelegte Verbinden oder sonstige Zusammenbringen von zwei oder mehr Werkstücken geometrisch bestimmter Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosem Stoff; dabei wird jeweils der Zusammenhalt örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt.“ (DIN 2003, S. 5).

Eine mögliche Einteilung der Fügeverfahren nach ausgewählten Kriterien kann anhand Abbildung 9 getroffen werden (Gries 2015).

Bindungsprinzip	
Formschluss	nähen/sticken Kurzwaren
Kraftschluss	tuften vernadeln
Adhäsion	kleben
Stoffschluss	schweißen (thermisch)

Abbildung 9: Einteilung der Fügeverfahren nach (Gries 2015).

Im Folgenden werden die Fügeverfahren näher beschrieben, die für das Projekt grundsätzlich anwendbar sind.

##### 4.1.1 Schweißen

Unter Schweißen versteht man das Verbinden von gleichen oder verschiedenen Materialien. Dabei werden die Materialien unter Wärme und/oder Druck, mit oder ohne Schweißzusatzwerkstoffe gefügt. Die Qualität der Verbindung wird durch Druck, Temperatur und Erwärmungszeit vorgegeben. Der Vorteil des Schweißens gegenüber dem Kleben oder dem Nähen/Sticken ist, dass eine homogene Verbindung ohne weitere Zusatzstoffe erzeugt werden kann.

Durch Energiezufuhr in der Fügezone werden die Fügepartner in den schmelzflüssigen Zustand überführt und gefügt. Durch die Verknäuelung der Molekülketten der thermoplastischen Fügepartner in der Grenzfläche wird eine stoffschlüssige Verbindung erreicht. Um diesen Zustand zu erreichen, stehen verschiedene Prozesse zur Auswahl.

In der klassischen Textilkonfektion kommen dafür folgende Schweißverfahren zum Einsatz:

- Heizkeilschweißen
- Heißluftschweißen
- Tapeschweißen
- Hochfrequenzschweißen
- Ultraschallschweißen

Beim Heizkeil-, Heißluft- und Tapeschweißen werden die Fügepartner direkt durch Festkörper oder durch heiße Luft erhitzt. Das Tapeschweißen stellt eine Variante des Heißluftschweißens dar, bei dem ein zusätzliches Tape, z. B. zum Abdichten von Nähten zugeführt wird. Bei den genannten Verfahren sind die Fügepartner unabhängig von der Materialzusammensetzung, während das Hochfrequenz- und das Ultraschallschweißen nur bei thermoplastischen Werkstoffen mit entsprechendem Dämpfungsverhalten durchgeführt werden können (Gries 2015).

#### 4.1.2 Kleben

Kleben ist das Fügen unter Verwendung eines Klebstoffes, d. h. eines nichtmetallischen Werkstoffes, der Fügepartner durch Flächenhaftung und innere Festigkeit (Adhäsion und Kohäsion) verbinden kann. Adhäsion umfasst die Haftkräfte an den Kontaktflächen zweier unterschiedlicher oder gleicher Stoffe durch Molekularkräfte. Die adhäsionbildenden Wechselwirkungen zwischen Klebstoff und Fügepartneroberfläche haben mit weniger als 1 nm eine nur äußerst geringe Reichweite. Deshalb ist eine gute Benetzung der Fügepartner durch den noch nicht verfestigten, also flüssigen Klebstoff, eine notwendige Voraussetzung für die Herstellung einer qualitativ hochwertigen Klebung. Mit zunehmender Verfestigung des Klebstoffes steigt dessen innere Festigkeit, die Kohäsion, an. Das Kleben ist in zwei Gruppen unterteilt. Auf der einen Seite gibt es das Kleben mit physikalisch abbindenden Klebstoffen, d. h. Klebstoffe, die durch Abkühlen oder Verdunsten abbinden. Auf der anderen Seite gibt es das Kleben mit chemisch abbindenden Klebstoffen. Hierbei führt eine chemische Reaktion, z. B. Vernetzen, zum Abbinden (Cherif 2011).

#### 4.1.3 Textiles Fügen durch das Stickverfahren

Textiles Fügen umfasst alle Fertigungsverfahren, die das Fügen von und mit textilen Werkstoffen implizieren. Dazu gehören das Herstellen von Fäden aus textilen Fasern, deren Weiterverarbeitung zu textilen Flächengebilden und das Nähen mit verschiedenen textilen Werkstoffen. Beim Sticken wird ein Roving mittels eines Stickgarns, das durch einen Stickgrund gezogen wird, auf dem Stickgrund befestigt. Für das Aufbringen der Sensorstruktur wird das Tailored Fibre Placement (TFP) verwendet, ein Stickverfahren zur Funktionalisierung und Verstärkung von Textilien. Bei diesem Verfahren wird über ein Ober- und Unterfadensystem ein Doppelsteppstich gebildet. In einem dritten Fadensystem wird ein weiteres Garn, in diesem Fall die Sensorfaser, abgelegt (siehe Abbildung 10). Durch dieses Verfahren lassen sich die Sensorfasern gestreckt auf der Oberfläche ablegen und in der gewünschten Position fixieren. Typischerweise werden hier Vliese als Stickgrund vorgespannt eingesetzt (Cherif 2011).

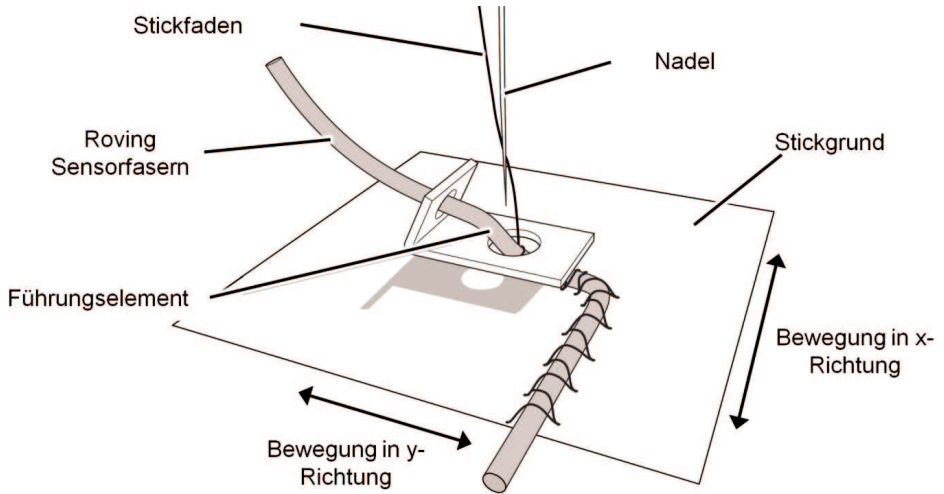


Abbildung 10: Prinzip des TFP-Stickverfahrens zum Ablage von Sensorfasern nach (Eichhoff 2011).

Beim TFP-Verfahren gibt es unterschiedliche Typen von Stickmustern, die als Zick-Zack-Doppelstepstich realisiert werden können (Abbildung 11). Aufgrund anderer Legetechnologien mit Carbonfasern oder Drähten, ist der Stichtyp 5 bevorzugt. Er weist gegenüber Stichtyp 3 einen deutlich geringeren Fadenverbrauch sowie höhere Produktivität auf und wird daher hier weiter betrachtet.

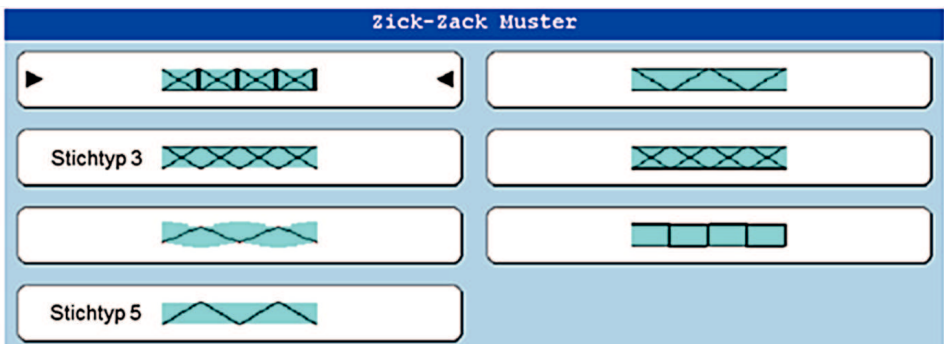


Abbildung 11: Auszug der verfügbaren Stichtypen der Stichparameter.

Wesentlich größeren Einfluss auf Kompaktheit, Fixierung und Produktionsgeschwindigkeit für die Sensorfaser-Ablage haben die Parameter Stichabstand, Stichweite (Hub) und Stickgeschwindigkeit (siehe Abbildung 12).

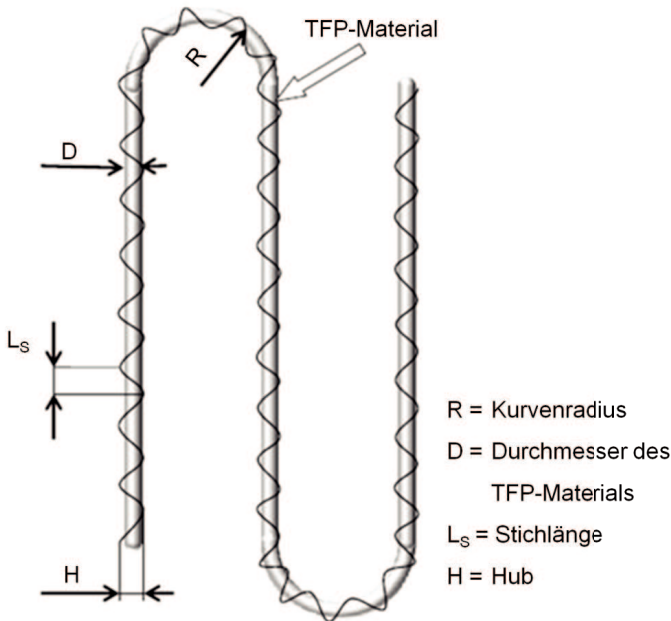


Abbildung 12: Wichtigste Parameter bei der TFP-Sticktechnologie.

Der Stichabstand gibt dabei die Genauigkeit und Festigkeit der Fadenfixierung sowie die Kaschierung durch den Stickfaden vor. Dieser Parameter ist maßgeblich für die resultierende Produktionsgeschwindigkeit. Die Stichweite (auch Hub genannt) sorgt vor allem für die Kompaktheit der Faserbündel. Dieser Hub sollte so gering wie möglich sein. Dabei muss er eine Mindestablegebreite vorweisen, um alle Filamente im Faserbündel vollständig zu umschließen. Ansonsten kommt es zum Faserspliss. In Versuchen wurde ein Hub zwischen 2 und 5 mm ermittelt. Die Produktionsgeschwindigkeit gibt nicht nur die Prozessdauer vor, sondern hat auch einen Einfluss auf die Qualität des Stickbildes. Üblicherweise wird beim TFP-Verfahren je nach Maschinentyp mit einer Drehzahl von 400 bis 600 U/min gestickt. Dies entspricht der Anzahl an Stichen pro Minute.

## 4.2 Herstellung eines Sensor-Geotextils

Für die Messungen am großmaßstäblichen Modelldeich am *IWW* wurden die Messvliese III und IV am *ITA* entwickelt. Im folgenden Kapitel werden die Herstellungsverfahren vorgestellt, die zum Einsatz kamen.

### 4.2.1 Beschichtung der Carbonfasern

Grundlage für das intelligente Geotextil ist Vliesstoff aus Polyester/Polypropylen mit 4,5 mm Dicke und 650 g/m<sup>2</sup> Flächengewicht, welches auch für den Aufbau des Modelldeiches am *IWW* verwendet wird. Für das Messvliese III wurden unbeschichtete verwirkte Biaxialgelege mit Carbon- und Glasfasern hergestellt und aufgebracht. Diese werden hier als Carbon-Glasfaser-Gewirke bezeichnet. Aufgrund der im Verarbeitungsprozess



auf tretenden Querkräfte wurden einzelne Filamente aus der Struktur gelöst. Es zeigt sich, dass bereits einzelne Filamente ausreichen, um das Messsignal signifikant zu beeinflussen. Für Messvlies IV wurden in einem weiteren Verarbeitungsschritt auf dem intelligenten Geotextil beschichtete Sensorbahnen aufgebracht. Alle Sensorgarne wurden mittels Signalleitungen mit der Messeinrichtung verbunden. Die Sensorbahnen bestehen aus jeweils zwei Carbonrovings mit einer Feinheit von 1.600 tex. Der spezifische elektrische Widerstand der Carbonfasern beträgt ca.  $14 \mu\Omega\text{m}$ . Die Carbonfaserbündel sind in einem Abstand von 4 cm in einem Glasfasergewirk mit AR-Glasfasern (Feinheit 1.200 tex) mit PES-Wirkfäden integriert. Das Gewirk dient dazu, die Carbonfasern parallel und äquidistant voneinander zu positionieren. Zusätzlich stellen die Glasfaserrovings einen mechanischen Schutz dar.

Die Beschichtung verhindert, dass einzelne abgebrochene Carbonfilamente die beiden Carbonrovings verbinden und einen Kurzschluss erzeugen. Dafür wird eine zehnpromtente Dispersion von selbstvernetzendem carboxylierten Styrol-Butadien-Copolymeren (SBR-Beschichtung) in einer Beschichtungsanlage (siehe Abbildung 13) aufgetragen. Zwei Walzen entfernen die überschüssige Beschichtung bei einem Druck von  $p = 2,8 \text{ bar}$ . Die Aushärtung der Beschichtung erfolgt unter einer Zugspannung von 40 N auf das Gewirk in einem 60 cm langen Heizofen. Die Verweildauer zum Trocknen beträgt mindestens 6 min bei  $140 \text{ }^\circ\text{C}$ . Daraus ergibt sich eine Zuggeschwindigkeit von  $0,1 \text{ m/min}$ .

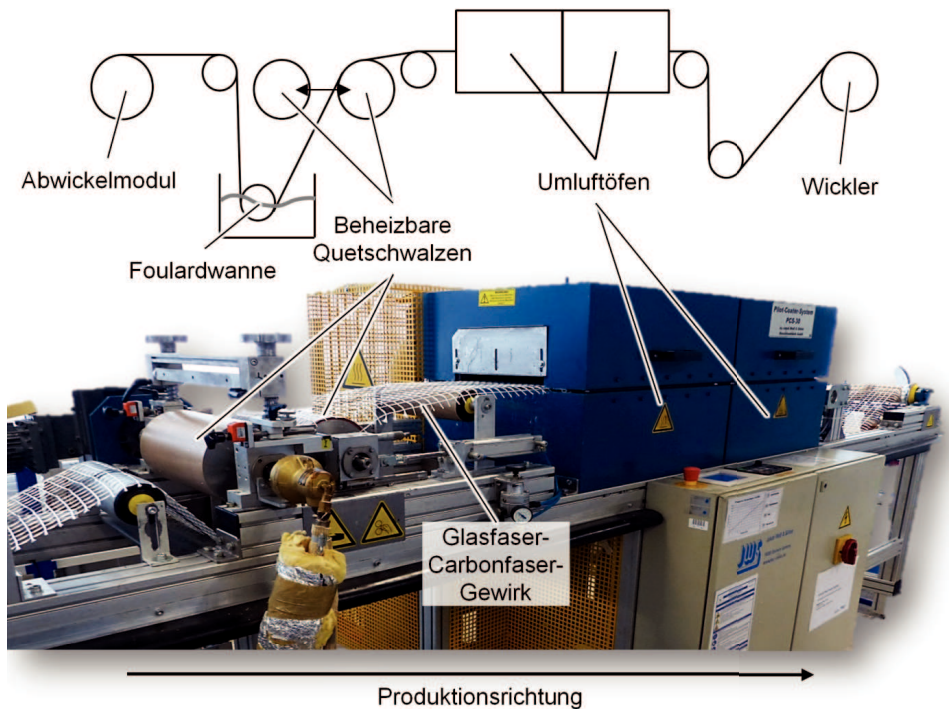


Abbildung 13: Kontinuierliche Tauchbeschichtungsanlage mit Konvektionsofen am ITA.

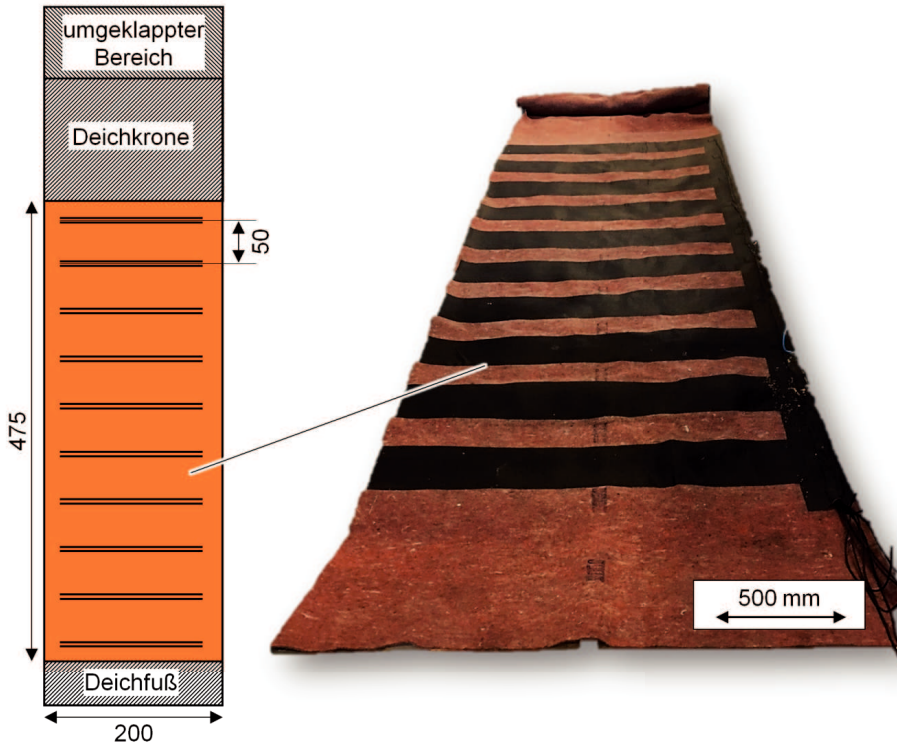


Abbildung 14: Schematischer Aufbau für die Sensorablage (links) im Sensor-Geotextil für die Versuche im Modelldamm, sowie verkabeltes Sensor-Geotextil (rechts).

#### 4.2.2 Aufbringen der Sensorfasern

Entsprechend Abbildung 14 werden die Carbonfaser-Gewirke nach einer Einlauflänge von 2 m im Abstand von jeweils 50 cm mittels Bindervlies aufgebracht. Dieses wird durch Hitze einwirkung bei ca. 115 °C aufgeschmolzen und verbindet nach Abkühlen das Gewirk mit dem Vlies. Zum Schutz der Sensorbahnen vor Kies und scharfkantigen Steinen werden die Bahnen nach dem Kontaktieren mit einem Bindervlies kaschiert (siehe Abbildung 15).

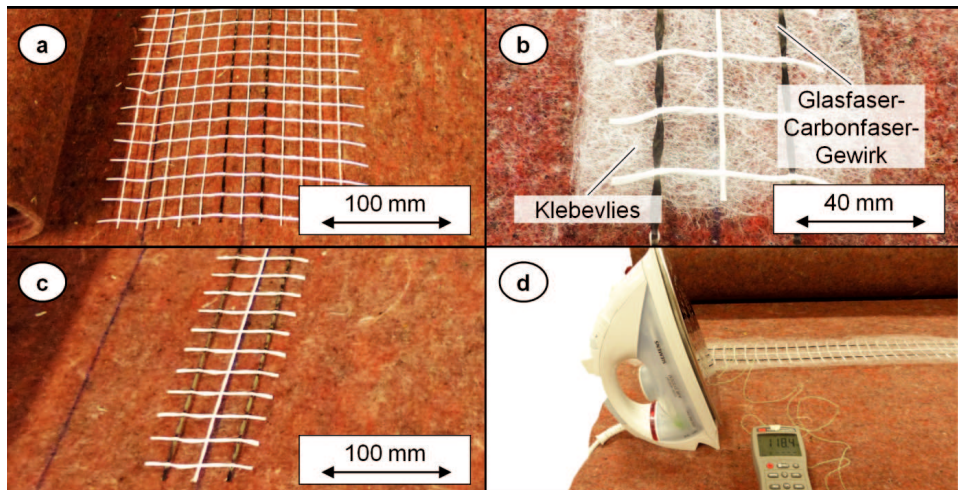


Abbildung 15: Verarbeitungsschritte zum Aufbringen der Gewirkstruktur.

Die Carbonrovings sind mit Aderendhülsen durch eine Crimpverbindung formschlüssig verbunden und anschließend mit 3-polig abgeschirmten Kabeln auf die Aderendhülsen gelötet (siehe Abbildung 16). Die Verwendung von 3-poligen XLR-Kabeln bringt die Vorteile einer hohen Robustheit und einer guten Abschirmung mit sich. Die Isolierung der Lötverbindungen ist durch Einbettung in ein additionsvernetztes Silikon umgesetzt. Aufgrund der geringen Verarbeitungsviskosität von  $\eta = 8\text{-}10\text{ Pa}\cdot\text{s}$  wurden Silikonplatten als Fließbarrieren während der Verarbeitung eingesetzt.

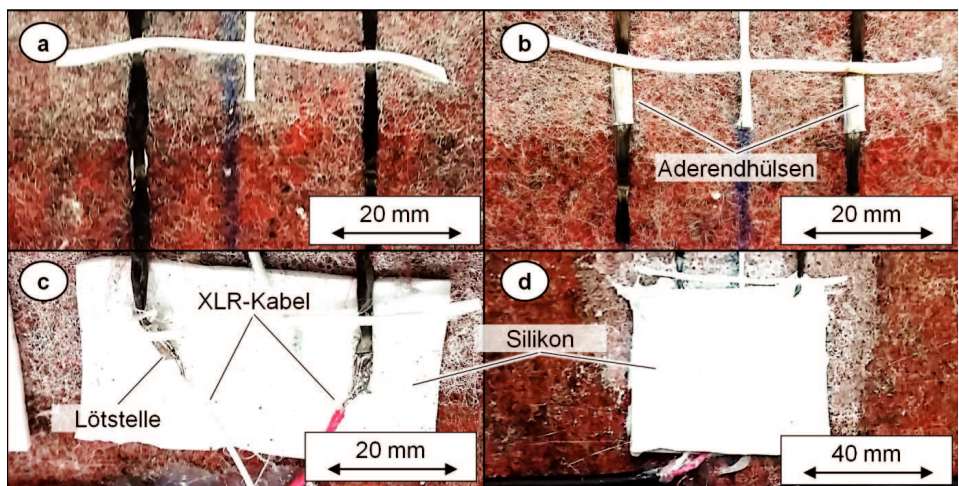


Abbildung 16: Kontaktierung der Carbonfaserbündel (a) durch Aufbringen von Aderendhülsen (b), Anlöten des XLR-Kabels (c) und Isolierung durch Einbettung in Silikon (d).

Im Rahmen der Sensor-Geotextilherstellung wurden auch einzelne Carbonfaserbündel beschichtet und auf Stickmaschinen mittels des zuvor beschriebenen TFP-Stickverfahrens aufgebracht. Um die Beschichtungsgeschwindigkeit bei dennoch gleicher Verweildauer im

Ofen zu erhöhen, wurden die Carbonfasern im Ofen umgelenkt und damit die Strecke im Ofen vervielfacht (Abbildung 17). Die beschichteten Carbonfasern wurden auf einer Mehrkopfstickmaschine vom Typ „CZCW 0800-900D-1500“ bei der Firma *ZSK Stickmaschinen GmbH, Krefeld* aufgestickt. Als Substrat wurde ein Polypropylen-Geotextil mit der Schichtdicke 3 mm der *Huesker Synthetic GmbH, Gescher*, verwendet. Da bestickte Geotextil wurde jedoch nicht im großmaßstäblichen Modelldamm eingesetzt und nicht validiert.

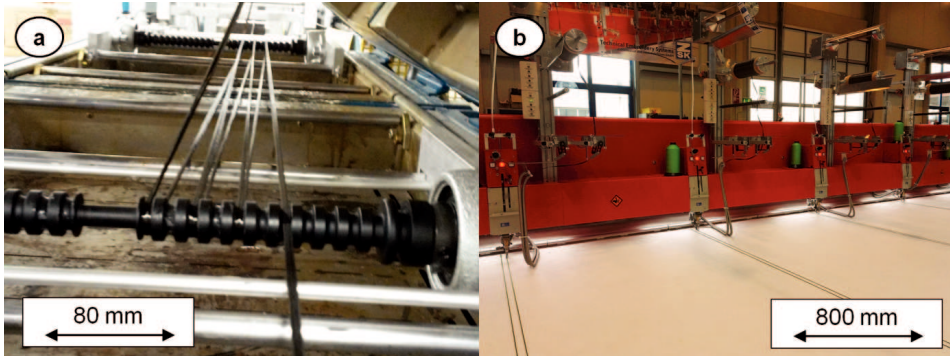


Abbildung 17: Umlenkung der Carbonfaserbündel im Ofen nach der Beschichtung (a) und TFP-Sticken der Sensorfaser auf 8-Kopfstickmaschine (b) bei *ZSK Stickmaschinen GmbH, Krefeld*.

## 5 Aufbau der Messkette für das Sensor-Geotextil am Modelldamm

Die Feuchtigkeitsversuche wurden am großmaßstäblichen Modelldamm des *IWW* durchgeführt. Dabei wurde das Geotextil in den Modelldamm eingebaut. Die Messkette ist in einer Modulbauweise aufgebaut, um je nach Messaufbau unterschiedliche Konfigurationen sowie den einfachen Austausch einzelner Module zu ermöglichen. Als Messperipherie kam zunächst ein A/D-Wandler vom Typ NI 9205 der Firma *National Instruments, USA*, zur Messung der Spannungen sowie die dazugehörige Messsoftware LabView zum Einsatz. Der A/D-Wandler wurde bei den Langzeitversuchen durch einen 16-Kanal Arduino A/D-Wandler ersetzt. Die Daten werden an den Sensorknoten (Libelium) weitergeleitet und anschließend an das GeoPortal übermittelt, das vom *gia* entwickelt wurde und in Herlé et al. (2018) beschrieben ist. Die Gleich- bzw. Wechselspannung zur Feuchtigkeitsmessung wird durch eine externe Spannungsquelle in die Messschaltung eingespeist. Die verwendete Messkette ist in Abbildung 18 zu sehen.

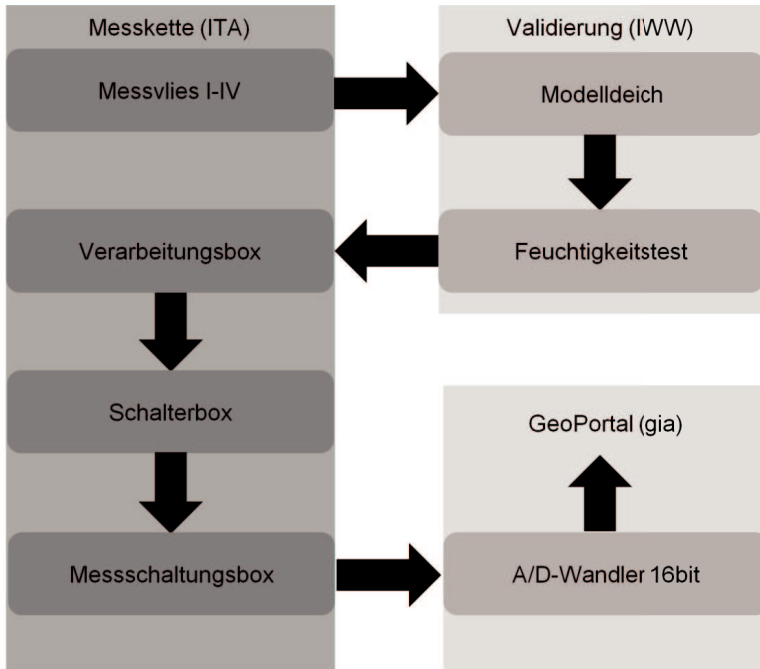


Abbildung 18: Messkette zur Versuchsreihe am Modelldeich.

## 5.1 Entwicklung der Sensorschaltung

Zur Messung von Feuchtigkeitsereignissen, ist es notwendig, die Sensorpaare im intelligenten Geotextil zum einen mit elektrischem Strom zu versorgen und gleichzeitig Änderungen im elektrischen Widerstand zu messen. Dafür wurde im Rahmen des Projekt *EarlyDike* eine Sensorschaltung entwickelt, deren Grundlagen und Herstellung in den folgenden Kapiteln näher beschrieben wird.

### 5.1.1 Gleichstrommessung

Eine Gleichstromquelle mit einer Stromstärke von  $10\ \mu\text{A}$  wird dazu genutzt, eine Spannung über dem Referenzwiderstand zu erzeugen. Der Referenzwiderstand  $R_{Ref}$  hat einen Widerstand von  $15\ \text{k}\Omega$ . Diese Größe wurde experimentell an den Widerstand des Wassers  $R_W$  (siehe rechte Seite der Abbildung 4, nasser Zustand) angenähert und so gewählt, dass sie um ein Vielfaches höher liegt, sodass  $R_W < R_{Ref}$  gilt. Nach dem ohmschen Gesetz gilt für die resultierende Spannung über dem Referenzwiderstand  $U = I \cdot R$  und damit  $U = 10\ \mu\text{A} \cdot 15\ \text{k}\Omega = 150\ \text{mV}$ . Diese Spannung wird dann mittels eines Sensors aufgenommen und ausgewertet.

Ohne Wasserkontakt fließt dabei durch die Carbonrovings kein Strom. Erweitert man diese Anordnung nun um einen zweiten Kanal, werden die Kanäle durch einen weiteren Widerstand voneinander getrennt (Abbildung 19) und seriell miteinander verschaltet. Die

rechte Hälfte von Abbildung 4 zeigt das Funktionsprinzip eines Kanals mit Gleichstromquelle als Basis. Hier kommt zur Schaltskizze des trockenen Zustandes der Widerstand  $R_W$  hinzu. Dies führt zu einer Parallelschaltung von Widerständen, nach welcher der Gesamtwiderstand immer geringer ist als die jeweiligen Einzelwiderstände. Die Regel für die Berechnung des parallelen Widerstands lautet:

$$R_{gesamt} = \frac{R_{Ref} \cdot R_W}{R_{Ref} + R_W} \tag{1}$$

Es ergibt sich ein Gesamtwiderstand von 7,5 kΩ im nassen Zustand, wenn der Wasserwiderstand genauso groß ist wie der Referenzwiderstand. Da insgesamt der Strom von 10 μA durch den Kanal fließt, beträgt die gemessene Spannung in diesem Fall 75 mV. Vereinfacht existieren somit nur zwei definierte Zustände, nass und trocken, welche sich anhand des gemessenen Spannungsniveaus unterscheiden lassen. In der Praxis führt dieses Messprinzip zu einer Elektrolyse des Wassers, welche ein wesentliches Problem darstellt.

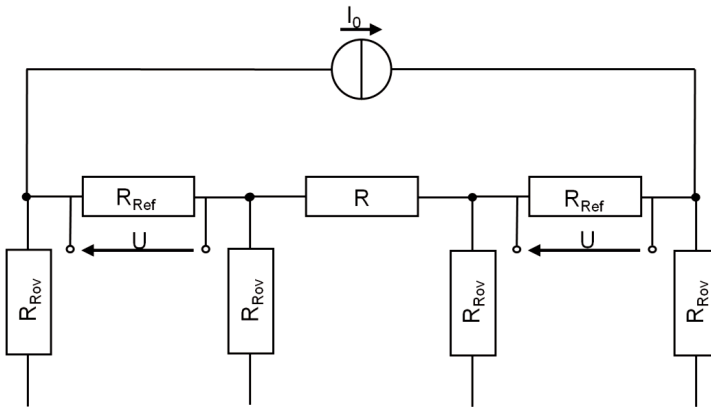


Abbildung 19: Ersatzschaltbild zweier getrennter Kanäle in der Messschaltung mit Gleichstromquelle.

Die Messung des Wasserstands ist mit der gegebenen Schaltung nicht möglich. Die Elektrolyse zwischen den Carbonrovings führt dazu, dass sich im Wasser nicht nur ein Widerstand bildet, sondern auch eine Kapazität. Diese entsteht durch eine Ladungstrennung der Wassermoleküle aufgrund der Verwendung von Gleichstrom. In den Ergebnissen macht sich dies durch ein sofortiges Abfallen der Spannung bei Wasserkontakt der Carbonrovings auf den Nullwert deutlich, woraufhin die Spannung dann langsam in einer logarithmischen Kurve gegen einen festen Spannungswert ungleich dem Nullwert strebt. Bei manchen Kanälen schwankt die Spannung um den Nullwert und bei anderen ist ein konstanter negativer Wert festzustellen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Strom im nassen Vlies nicht notwendigerweise in eine Richtung fließt und es somit in den Kanälen auch Rückströme geben kann, welche zu negativen Spannungen führen.

Ein Vergrößern der Abstände zwischen den Faserpaaren, führt zu keinen wesentlichen Verbesserungen. Die Messung mit Gleichstrom ist somit unzureichend, da es zur Ausbildung einer Kapazität durch Ladungstrennung kommt. Die Lösung ist somit die Umsetzung einer neuen Messelektronik, bei der Wechselstrom/-spannung als Eingangssignal verwendet werden kann.

Bei einer Wechselspannungsquelle ist die Nutzung der vorherigen Platine (Gleichstromquelle) nicht möglich. Dort liegt eine serielle Verschaltung der Kanäle vor. Bei einer neuen Platine müssen die Kanäle parallel verschaltet sein. In einer seriellen Schaltung findet eine Spannungsumverteilung statt, sobald nasse Kanäle vorhanden sind. Eine Unterscheidung zwischen den Zuständen nass und trocken ist demnach nicht mehr möglich.

Das Ziel der Spannungsmessung ist die Diskreditierung zweier Zustände, bzw. Messwerte. Das heißt, es gibt einen definierten konstanten, positiven Spannungswert der als Zustand trocken definiert wird und einen Zustand mit dem Nullwert, welcher als Zustand nass festgelegt wird.

### 5.1.2 Gleichspannungsmessung

Um den Einfluss des Messprinzips auf die Signalstabilität der eingesetzten faserbasierten Sensoren zu bewerten, wurde die elektrische Schaltung zur Bestimmung der Sensorfeuchtigkeit auf das Messprinzip der Gleichspannungsmessung erweitert. Bei der bisherigen Messmethode – basierend auf Gleichstrom – kommt es zur Ladungstrennung und damit zur Elektrolyse. Zur Kompensation wurden gleichzeitig Versuche mit einer Gleichspannungsquelle durchgeführt. Bei letzterem Ansatz wird nicht mehr die Stromstärke konstant gehalten, sondern die Spannung. Im Gegensatz zur Gleichstrommessung wird nicht mehr die Spannung über dem Referenzwiderstand gemessen, sondern über die Messbrücke, wie im Ersatzschaltbild in Abbildung 20 dargestellt. Bei Wasserkontakt verringert sich der Widerstand  $R_W$  zwischen den Carbonfaserrovings  $R_{Rov}$ , sodass die Spannung signifikant abfällt. Zur Verringerung von Messartefakten in den weiteren Kanälen der Sensorpaare ist ein Referenzwiderstand  $R_{Ref}$  parallelgeschaltet. Weitere Kanäle sind in der gleichen Konfiguration aus Widerstand für Lastausgleich  $R_{Last}$  und Rovingpaar parallel hinzugefügt. Die Widerstände in der Auswertungsperipherie sind um einige Größenordnungen höher als der Widerstand im Wasser gewählt, sodass dieser im Gegensatz zur Schaltung mit Gleichstrom als widerstandslose Verbindung vereinfacht werden kann ( $R_W \ll R_{Ref} = R_{Last}$ ).

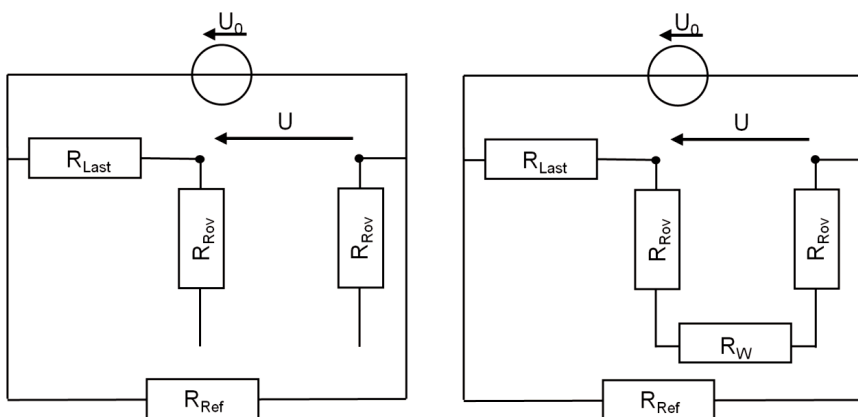


Abbildung 20: Ersatzschaltbild eines Kanals in der Messschaltung mit Gleichspannungsquelle (links trocken und rechts im nassen Zustand).

## 5.2 Assemblierung der Messkette

Im gesamten Messaufbau werden nur Boxen benutzt, welche die IP-Schutzklasse 67 erfüllen, da die Boxen für den Modelldeichversuch sowohl staub- als auch wasserundurchlässig sein müssen. Die Messkette ist modular aufgebaut und die Boxen sind untereinander durch 24-polige Sub-D-Kabel verbunden. Damit können Boxen auch explizit in die Messkette integriert oder aus der Messkette entnommen werden. Der Messkettenaufbau ist in Abbildung 21 dargestellt.

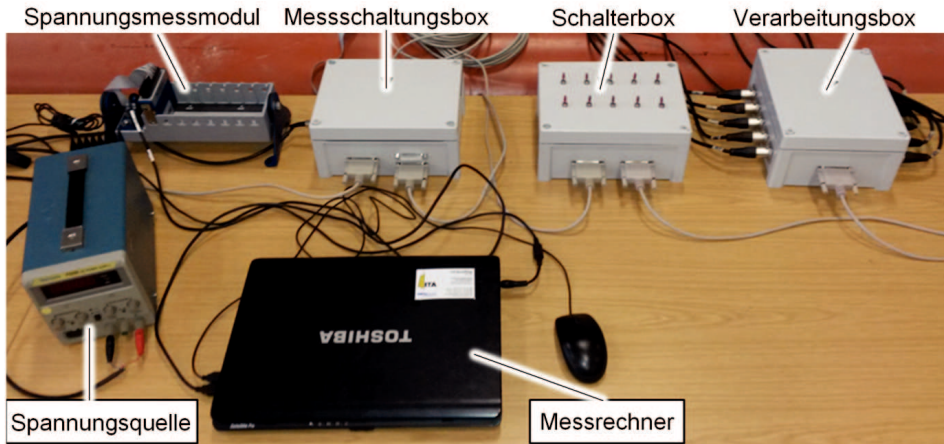


Abbildung 21: Messaufbau zur Feuchtigkeitsmessung mit LabView-Modul der Firma *National Instruments Corp., Texas, USA* und Messrechner zur Spannungsmessung zwischen den Sensoren.

### 5.2.1 Verarbeitungsbox

Den Ausgang des kontaktierten Vlieses bilden zehn 3-polige XLR-Stecker. Von den drei Polen sind jeweils nur zwei in Benutzung. Das Signal des Vlieses ist im weiteren Verlauf der Messeinrichtung über Sub-D-Kabel weitergeleitet. Die Funktion der Verarbeitungsbox ist die Signalübertragung der zehn 3-poligen Kabel auf ein 24-poliges Sub-D-Kabel. Die Verbindung in der Box von den Buchsen der 3-poligen Kabel zu der Sub-D-Buchse erfolgt durch Drahtbrücken, welche angelötet sind.

### 5.2.2 Schalterbox

Im Laufe der Messungen kann es erforderlich sein, einzelne Kanäle des Vlieses abzuschalten, um nur bestimmte Kanäle zu messen oder etwaige Fehler, wie z. B. Beeinflussung der Kanäle untereinander oder gestörte Signale, zu finden und zu beheben. Hierzu werden in der Schalterbox Kippschalter verwendet, die in jeden Kanal eingebracht werden. Die Verbindung von den Sub-D-Buchsen zu den Kippschaltern erfolgt durch drei 8-polige Kabel (siehe Abbildung 21).



### 5.2.3 Messschaltungsbox

Die Box mit der Messelektronik besitzt einen Eingang für die Signale des Vlieses und zwei Ausgänge für Messsensoren, welche alle über Sub-D-Verbindungen hergestellt werden. Außerdem ist ein Eingang zur Stromversorgung der Platine mit Gleich-/Wechselspannung vorhanden. Die Platine ist mit Abstandhaltern mit Klebesockeln an das Gehäuse der Messschaltungsbox befestigt. Die Verbindung der einzelnen Komponenten in dieser Box erfolgt mit 20-poligen Flachbandkabeln.

## 6 Auswertung der Messergebnisse

Im folgenden Versuch wurde das Sensor-Geotextil aus Abbildung 14 für einen Nassversuch benutzt. Hierzu wird der in Abbildung 21 gezeigte Messaufbau verwendet. Die einzelnen Sensoren sind über die Verarbeitungsbox und über die Schalterbox an die Messschaltung angeschlossen. An die Messschaltung angeschlossen sind die Spannungsquelle zur Stromversorgung und das Spannungsmessmodul inklusive des Messrechners, welcher zur Datenerfassung benutzt wird. Der Referenzwiderstand  $R_{Ref}$  und die Lastwiderstände  $R_{Last}$  betragen  $15 \text{ k}\Omega$ . Der Wasserwiderstand  $R_W$  kann innerhalb der Messung mit Hilfe des spezifischen elektrischen Widerstandes von Leitungswasser  $\rho = 2 \cdot 10^7 \text{ }\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$  und dem physikalischen Zusammenhang zwischen dem Widerstand und seinen Geometrieparametern

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2)$$

zu  $R_W = 225 \text{ }\Omega$  abgeschätzt werden. Die Carbonfaserovingwiderstände sowie die Kabelwiderstände sind durch einen Widerstand  $R_{Rov} = 100 \text{ }\Omega$  hinreichend gut abgeschätzt, so dass die Annahme ( $R_W \ll R_{Ref} = R_{Last}$ ) gültig ist. Im Nassversuch werden die verschiedenen Kanäle gezielt nacheinander bewässert und die Spannungen innerhalb eines Kanales differentiell gemessen. Die differentielle Messung der Spannung ist bei großen Leiterlängen zwischen der Spannungsmesseinheit und der Signalquelle bevorzugt zu verwenden. Sowohl die Signalquelle als auch die Spannungsmesseinheit sind mit der Erdungseinheit verbunden, sodass die Erdpotentialdifferenz zwischen der Spannungsquelle und der Spannungsmesseinheit zwischen  $0 \text{ mV}$  und  $100 \text{ mV}$  beträgt. Ziel des Versuchs ist es, das veränderte Messprinzip wie auch die einzelnen Komponenten Geotextil und Messschaltung auf ihre Funktionalität zu testen. Außerdem sollen Nebeneffekte wie die gegenseitige Beeinflussung der Sensorpaare erfasst werden. Die Versuchsreihe führt zu den Messergebnissen aus Abbildung 22.

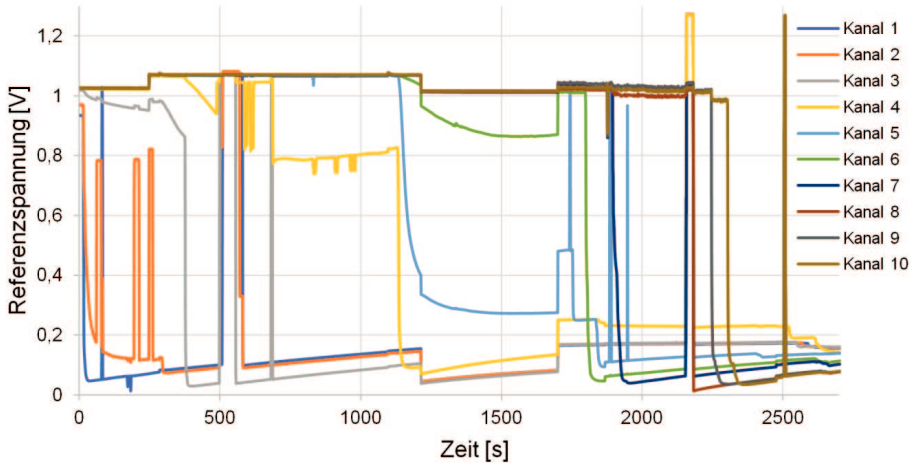


Abbildung 22: Spannungs-Zeitverlauf als Versuchsauswertung zum Nassversuch vom 28.11.17, durchgeführt am IWW.

Auf der Ordinate des Diagramms befindet sich der Quotient aus der am jeweiligen Kanal gemessenen Spannung zur Referenzspannung, welche über die Spannungsquelle auf das Geotextil übertragen wurde. Die Abszisse zeigt die fortlaufende Versuchsdauer in Sekunden. Das Spannungsniveau jedes Kanals fällt zum Zeitpunkt des Wasserkontakts auf einen niedrigen Wert ab. Dieser lässt sich mit dem im Kapitel 5.1 beschriebenen Effekt der Herstellung einer elektrisch leitenden Verbindung durch Wasser zwischen den Sensoren erklären.

Ein solcher Spannungsabfall ist zum Beispiel bei Kanal 4 nach einer Zeit von  $t = 1150$  s zu erkennen. Weitere signifikante Anstiege der Spannung am jeweiligen Kanal entstehen durch das Ausschalten des Kanals mit Hilfe der Schalterbox. Dies führt zu einer Spannungsmessung am Kanal auf der Messplatte, wobei die elektrische Verbindung zwischen dem Sensorpaar am Geotextil und dem dazugehörigen Kanal auf der Messschaltung unterbrochen ist (siehe Abbildung 22, Kanal 10, braun, bei  $t = 2500$  s). Des Weiteren ist zu erkennen, dass der jeweils letzte trockene Kanal auf ein niedrigeres Spannungsniveau als das Ausgangsniveau abfällt. Während zum Beispiel die Spannung von Kanal 4 aufgrund von Wasserkontakt der zugehörigen Sensoren zum Zeitpunkt  $t = 1150$  s abfällt, fällt gleichzeitig auch die Spannung an Kanal 5 auf einen niedrigeren Wert ab. Dieses Phänomen ist aller Voraussicht nach auf einen technischen Fehler zurückzuführen, welcher eine permanente elektrische Verbindung zwischen den Kanälen 1 und 2 zur Folge hat.

## 6.1 Analyse des Spannungsabfalls am Sensor

Im Folgenden wird das Abfallen der Spannung während der Bewässerung eines Kanals näher beschrieben. Die Bewässerung der einzelnen Kanäle erfolgt jeweils nach 10 s. Der Spannungsabfall, der in der Simulation des in Abbildung 4 gezeigten Ersatzschaltbildes dargestellt ist, ist durch eine Sprungstelle beschrieben. Die Simulationen wurden mit Matlab durchgeführt.

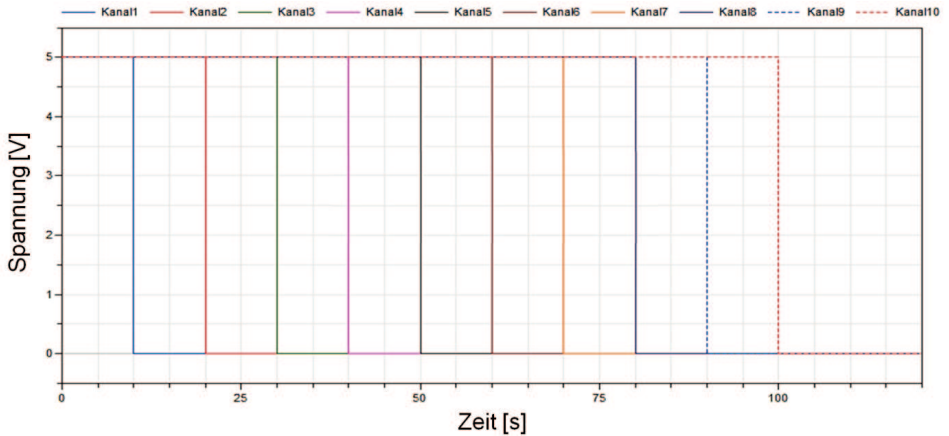


Abbildung 23: Simulation der idealen Messschaltung.

Die realen Messergebnisse zeigen dagegen einen Effekt, welcher durch die Hemmung des Spannungsabfalls bei gleichzeitigem Stromfluss innerhalb des nassen Kanals beschrieben wird. Dieser Effekt ist möglicherweise auf die durch die Verwendung von Gleichspannung entstehende Elektrolyse zurückzuführen. Im nachfolgenden Abschnitt wird dieser Effekt durch eine Spule dargestellt. Das Ersatzschaltbild hierzu ist in Abbildung 24 dargestellt.

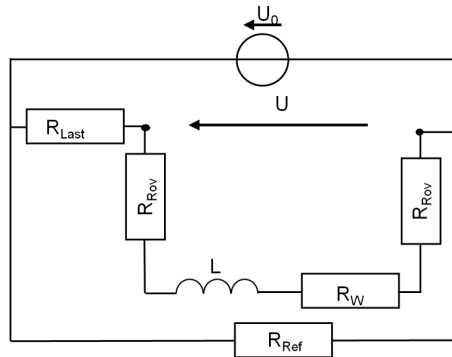


Abbildung 24: Ersatzschaltbild für die Simulation des Spannungsabfalls.

Es gelten die Bauteilgleichungen

$$U_R = RI \tag{3}$$

$$U_L = L \frac{dI}{dt} \tag{4}$$

entsprechend für die Widerstände und für die Spule. Die Differentialgleichung zur Beschreibung der Schaltung

$$IR_{ges} + L \frac{dI}{dt} = U_Q \tag{5}$$

besitzt die eindeutige Lösung.

$$I(t) = \frac{U_Q}{R_{ges}} \left[ 1 - e^{\left( \frac{-R_{ges}(t-t_0)}{L} \right)} \right]. \tag{6}$$

Die gemessene Spannung wird in diesem Fall durch die Gleichung

$$U(t)_{Mess} = U(t_0) \left( 1 - \left( 1 - \frac{R_W}{R_{ges}} \right) \left( 1 - e^{\left( \frac{-R_{ges}}{L} t \right)} \right) \right) \tag{7}$$

beschrieben und setzt sich aus den Spannungen zusammen, welche auf der Spule  $L$  und dem jeweiligen Wasserwiderstand  $R_W$  anliegen. Der Gesamtwiderstand  $R_{ges}$  setzt sich aus dem Wasserwiderstand  $R_W$  den beiden Rovingwiderständen  $R_{Rov}$ , welche die durch Kabelleitungen verursachten Widerstände beinhalten, und dem Lastwiderstand  $R_{Last}$  zusammen. Für die Simulation sind dieselben Parameter wie in der vorherigen Simulation verwendet worden. Zusätzlich gilt für die Induktivität der Spule  $L = 50$  kH. Dieser Wert ist durch Simulationen an die auftretenden Effekte während des Messversuchs angenähert.

Für die Analyse der realen Messergebnisse ist die Zeit  $t_{rel} = t - t_0$  zu verwenden, wobei die Zeit  $t_0$  der Zeit zum Beginn des Spannungsabfalls entspricht. Zudem sind die Spannungen auf den Maximalwert der Spannung in diesen Intervallen bezogen.

$$U_{rel} = \frac{U(t_{rel})_{Mess}}{U(t=t_0)} \tag{8}$$

Mit dem bereits bekannten Lastwiderstand  $R_{Last}$  und den Messdaten kann das Ausgleichsproblem für die Parameter  $R_W$  und  $L$  nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate gelöst werden.

Die Ergebnisse der Berechnungen für die Kanäle 1 und 3 sind in den Abbildungen 25 und 26 dargestellt. Dabei wird erkenntlich, dass die Näherungskurven sich in Bezug auf den Wasserwiderstand  $R_W$  lediglich um 5 % unterscheiden. Die Unterschiede in der Induktivität sind jedoch sehr deutlich (260 %). Allerdings ist es möglich, dass sich die Induktivität von Kanal zu Kanal unterscheidet, da andere Leiterlängen der Sensoren, wie auch minimal unterschiedliche Sensorabstände oder Übergangswiderstände an den Kontaktierungen vorliegen können.

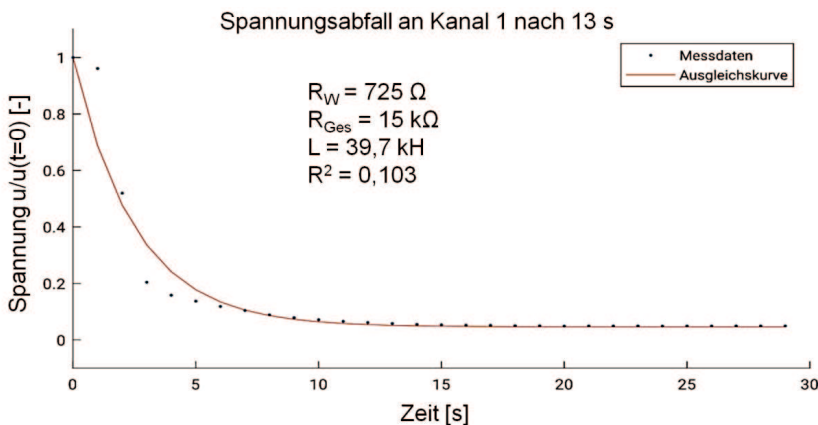


Abbildung 25: Simulation des Spannungsabfalls am Sensorpaar 1 (oben) und Sensorpaar 3 (unten) zu verschiedenen Zeitpunkten.

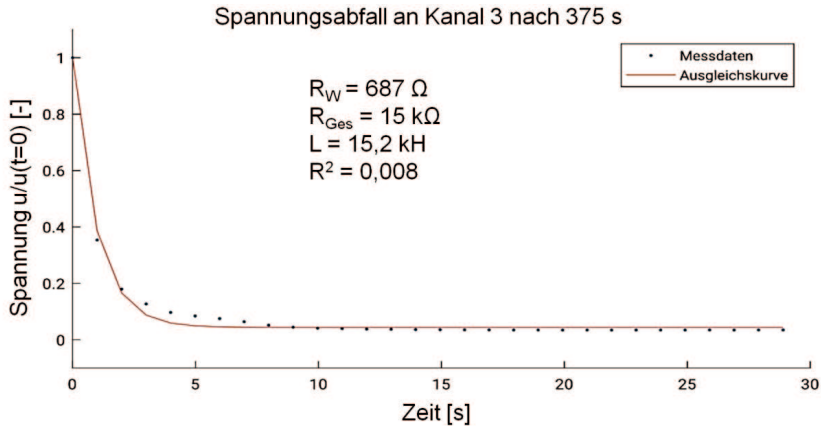


Abbildung 26: Simulation des Spannungsabfalls am Sensorpaar 1 (oben) und Sensorpaar 3 (unten) zu verschiedenen Zeitpunkten.

## 7 Fazit und Ausblick

Im Arbeitspaket 3 „Deichmonitoring und -simulator“ des BMBF-Projekts *EarlyDike* wurden intelligente Geotextilien zur Echtzeit-Feuchtigkeitsmessung im Deich entwickelt und validiert. Dazu wurden unterschiedliche leitfähige Faserwerkstoffe untersucht und elektrisch leitfähige Carbonfasern als Sensorfasern für den Untersuchungsraum ausgewählt. Weiterhin wurden Integrationskonzepte in bestehende textile Herstellungsverfahren für Geotextilien untersucht und verschiedene Fügetechnologien für die Geotextilien bezüglich der Verbundfestigkeit charakterisiert. Das Messprinzip beruht auf der Korrelation des elektrisch messbaren Signals zweier Sensorfasern und der physischen Umgebungsänderung der Feuchte. Es wurden Langzeitmessungen an einem Modelldamm durchgeföhrt, in den das intelligente Geotextil auf der Böschungseite eingebracht ist. Die Versuche zeigen die Eignung der textilbasierten Sensorik sowie der konzipierten Messschaltung, um Feuchtigkeitsereignisse detektieren zu können.

Im Projekt *EarlyDike* wurden am *ITA* verschiedene intelligente Geotextilien entwickelt, hergestellt und validiert. Die Validierungen der Messvliese I-IV fanden in klein- und großmaßstäblichen Modelldämmen am *IWW* statt. Dazu wurden Tests durchgeföhrt, um die Feuchtigkeitsmessung mittels textilintegrierter Sensoren zu untersuchen. Die Daten sollen an das vom *gia* entwickelte GeoPortal global zur Verfügung stehen.

Durch den Einsatz von Carbonfasern lässt sich der trockene vom feuchten Zustand unterscheiden. Die Verarbeitung von Carbonfasern in Form von Carbonrovings hat gezeigt, dass sich diese Sensorfasern auf das Geotextil aufbringen lassen. Dabei weisen die Carbonfasern Beschädigungen in Form Faserbrüchen auf. Die Faserbrüche führen dazu, dass sich Kurzschlüsse vor allem innerhalb von Sensorpaaren ausbilden. Die Kurzschlüsse traten sowohl bei den Carbonfasergerirken als auch bei den aufgestickten Carbonfasern auf. Eine Abhilfe schafft das Beschichten der Carbonfaserrovings bzw. der Carbonfasergerirke. Durch das Aufbringen einer zehnprozentigen Dispersion von SBR werden die Carbonfaserfilamente kompaktiert, so dass eine höhere mechanische Stabilität erreicht wird. Ein Ablösen einzelner Carbonfaserfilamente wird dadurch erschwert. Zusätzlich

schützt die SBR-Beschichtung vor Beschädigungen durch Fremdkörper, wie z. B. Sandkörner. Im Rahmen des Projekts wurden sowohl kleinskalige als auch großskalige Messvliese für die Validierung im Modelldeich hergestellt. Mit den eingesetzten Verfahren – Aufsticken von Carbonfaserrovings und thermisches Fügen von Carbonfasergewirken – ist die Verarbeitung verschiedener Größen möglich. Lediglich das Stickverfahren ist auf die Größe des Stickrahmens (ca. 7,2 x 2,0 m<sup>2</sup>) limitiert. Für das thermische Fügen wird ein automatisierter Kalandrierprozess benötigt.

Die Kontaktierung der Carbonfaserrovings stellt einen zusätzlichen Arbeitsschritt in der Herstellung der intelligenten Geotextilien her. Im Anwendungsfall am Realdeich wird die Kontaktierung nach der Ausbringung durchgeführt, um die sensiblen Kontaktstellen nicht zu beschädigen. Die Kontaktstellen müssen besonders geschützt werden, weil aufgrund der unterschiedlichen Steifigkeiten von Metall und Sensorfaser am Übergang Querkräfte auf die Fasern wirken, die Beschädigungen und Messartefakte verursachen. Die Kontaktstellen wurden daher mit Silikonmatten geschützt, um zusätzlich ein Eindringen von Wasser oder Feuchtigkeit zu verhindern. Dadurch werden zusätzlich Querströme innerhalb eines Sensorpaares vermieden. Die Messergebnisse aus Vorversuchen zeigen, dass sich die Widerstände der Sensorpaare auf unterschiedlichen Niveaus befinden. Die Unterschiede können zum einen aus unterschiedlichen Lauflängen der Sensoren rühren. Jedoch ist es wahrscheinlicher, dass sich die Übergangswiderstände der Kontaktierungen deutlich voneinander unterscheiden. Aufgrund der crimpähnlichen Verbindung von Carbonfaserroving und Aderendhülsen stehen hier unterschiedliche Kontaktflächen der Sensorpaare gegenüber. Die gegenseitige Beeinflussung von Sensorpaaren beim Feuchtigkeitereignis spricht dafür, dass es dennoch Querströme innerhalb des intelligenten Geotextils gibt. Diese können von den Carbonfaserrovings selbst ausgehen (z. B. zwischen Sensorpaar 1 und 2 oder innerhalb der Kontaktierung). Um dies genauer zu untersuchen, wären umfangreiche Feuchtigkeitmessungen notwendig, um den Einfluss zu quantifizieren.

Die entwickelte Messelektronik als Teil der Messkette wurde für Feuchtigkeitversuche im klein- und großmaßstäblichen Modelldeich getestet. Dabei wurden die Sensoren durch Gleichspannung versorgt. Es konnten somit Feuchtigkeitereignisse im intelligenten Geotextil detektiert werden. Bei Langzeitmessungen mittels Gleichspannung kann es jedoch zur Elektrolyse kommen. Dieser Prozess kann zu Partikel-Abscheidungen an den Sensoren führen, wodurch sich deren Widerstand erhöht. Es ist jedoch auch möglich, dass Korrosionsvorgänge zur Zerstörung der Sensoren oder den Kontaktstellen führen.

Um den Elektrolyseprozess während der Feuchtigkeitmessung zu vermeiden, wurde eine Messung mit Wechselspannung durchgeführt. Aufgrund des ständigen Wechsels von Anode und Kathode, können sich dauerhaft keine Partikel abscheiden. Zusätzlich hat die Wechselspannungsmessung den Vorteil, dass ein Bandpassfilter eingesetzt werden kann, damit Störsignale aus dem Messsignal entfernt werden können. Diese Störsignale rühren aus elektromagnetischen Feldern her, die in die Sensorleitungen einstreuen, da die Sensoren wie große Antennen fungieren. Störsignale können bei Labormessung am Modelldeich (Versuchshalle des *IWW*) zum Beispiel durch Wasserpumpen oder schwere Elektromotoren hervorgerufen werden. In einer realen Messstrecke am Deich können Störsignale von Oberleitungen (Stromnetz oder Bahnnetz) hervorgerufen werden. Die Wechselspannungsmessung wurde am großmaßstäblichen Modelldeich des *IWW* mit Messvlies IV vorgenommen. Die Elektronik, bestehend aus dem Generator zur Erzeugung der Wechselspannung und der nachfolgenden Signalaufbereitung, wurde so ausgelegt, dass die Speisespannung

kompatibel zur Speisespannung des Libelium-Systems ist. Der Spannungsabfall am Sensorpaar wird durch einen Instrumentenverstärker verstärkt. Durch die Differenzbildung am Eingang des Instrumentenverstärkers werden eingestreute Störsignale deutlich verringert. Der anschließende Präzisionsgleichrichter erzeugt aus dem verstärkten Wechselspannungssignal eine Gleichspannung, die direkt mit dem A/D-Wandlereingang des Libelium-Systems verbunden wird. Über das Messprinzip besteht die Möglichkeit, mit nur einem Generator alle Sensoren im Textil (z. B. zehn Sensoren) zu speisen. Für jeden Sensor wird lediglich nur ein Instrumentenverstärker und Präzisionsgleichrichter benötigt. Zum Schutz vor Blitzeinschlag ist eine Schutzvorrichtung für die Elektronik notwendig, welche zwischen der Messkette und den Sensoren zu implementieren ist.

Im Rahmen der Anbindung an das GeoPortal konnten mit den im Projekt *EarlyDike* entwickelten Messvliesen Feuchtigkeitsereignisse registriert und an das GeoPortal weitergegeben werden. Dabei bleibt noch zu klären, ob und wie weit eine Langzeitbeständigkeit der intelligenten Geotextilien besteht. Dies bezieht sich insbesondere auf die Sensoren und deren Kontaktierung. Zusätzlich lassen sich Feuchtigkeitsereignisse registrieren, jedoch noch nicht ausreichend quantifizieren. Eine höhere Reproduzierbarkeit der Sensorkontaktierung ist daher erwünscht. Für die Anwendung in einer Testdeichstrecke wird ein Produktionsprozess benötigt, der die textile Flächenherstellung der intelligenten Geotextilien ermöglicht. Sowohl der Beschichtungs- als auch der Fügeprozess sind hierbei jedoch skalierbar.

## 8 Danksagung

Das Verbundprojekt *EarlyDike* lief vom 1. Juni 2015 bis zum 31. Mai 2018. Das Vorhaben wurde mit Mitteln des *Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)* im Rahmen des Sonderprogramms *Geotechnologien* gefördert (BMBF-Fördernummer: 03G0847A). Weiterführende Informationen zum Sonderprogramm *Geotechnologien* finden sich unter: <https://www.planeterde.de/projekte/geowissenschaften>.

## 9 Literaturverzeichnis

Cherif, C. (Hg.): *Textile Werkstoffe für den Leichtbau: Techniken - Verfahren - Materialien - Eigenschaften*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-642-17992-1, 2011.

Christner, C.; Horoschenkoff, A.; Rapp, H.: Longitudinal and transverse strain sensitivity of embedded carbon fibre sensors. In: *Journal of Composite Materials*, Band 47, 2, 155–167, 2013.

DIN 8580: *Fertigungsverfahren – Begriffe, Einleitung*. Berlin, Beuth, 2003.

Eichhoff, J.; Wendland, B.; Gries, T.: Tailored-Fiber-Placement: direktes dreidimensionales Sticken für bessere mechanische Bauteileigenschaften. In: *Technische Textilien*, 54, 3, 156–158, 2011.

Elsner, H.; Ulbricht, J.; Gelbrich, S.; Kroll, L.: Anwendung neuartiger Textilsensorsysteme zur Online-Überwachung von Tragstrukturen im Anlagenbau und im Bauwesen. In: *Tagungsband zur 12. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung*, Chemnitz, 30.09.2001–01.10.2009.

Frank, A.: Dehnungs- und Temperaturmessung in Verbundwerkstoffen mit eingebetteten faseroptischen Bragg-Gitter-Sensoren. Dissertation. ETH Zürich, 2001.

Gries, T.; Veit, D.; Wulforth, B.: *Textile technology. An introduction.* 2nd edition. ISBN 978-1-56990-565-4, 2015.

Herlé, S.; Becker, R.; Blanckenbach, 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.

Horoschenkoff, A.; Mueller, T.; Kroell, A.: On the characterization of the piezoresistivity of embedded carbon fibres. In: *International Conference on Composite Materials, ICCM 17th*, 2009.

Horoschenkoff, A.; Mueller, T.; Stroessner, C.; Farmbauer, K.: Use of carbon-fibre sensors to determine the deflection of composite-beams. In: *International Conference on Composite Materials ICCM, 18th*, 2011.

Krebs, V.; Schüttrumpf, H.: *Entwicklung eines sensorbasierten Deichmonitorings.* Abschlussbericht zum Verbundvorhaben EarlyDike – Teil 4, BMBF-Förderkennzeichen 03G0847A: Teilprojekt 3 – Deichmonitor und Deichsimulator, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University, 2018.

Pengel, B.; Shirshov, G. S.; Krzhizhanovskaya, V. V.; Melnikova, N. B.; Koelewijn, A. R.; Pyayt, A. L.; Mokhov, I. I.: *Flood Early Warning System: Sensors and Internet.* In: Chavoshian, A.; Takeuchi, K. (Eds): *IAHS Red Book N 357, Floods: From Risk to Opportunity*, 445–453, ISBN 978-1-907161-35-3, 2013.

Quadflieg, T.: *Gewirkte Verstärkungstextilien mit kohlenstofffaserbasierter Sensorik im Verbundwerkstoff mit mineralischer Matrix.* Dissertation. RWTH Aachen University, 2017

Thiele, E.; Weigeand, F.; Helbig, R.; Barthel, A.: *Bau- und Geotextilien auf Basis integrierter faseroptischer Sensoren.* MFC Dornbirn 2009, *Communicating the Textile Future*, 48. Chemiefasertagung, *Communicating the Textile Future*, 48th Dornbirn International Man-Made Fibres Congress, Österreichisches Chemiefaser-Institut, Dornbirn, AT, 16.–18. Sep, 2009.

Uddin, A. J.: *Novel technical textile yarns.* In: Alagirusamy, R; Das, A. (Eds): *Woodhead Publishing Series in Textiles, Technical Textile Yarns*, Woodhead Publishing, 259–297, ISBN 9781845695491, 2010.

Wipfler, M.; Gries, T.; Giannikopoulos, T.: *Smart Rope: smartes Prüfen.* *Technische Textilien*, Band 53, 4, 144–145, 2010.



# EarlyDike: Sensor- und Geodateninfrastruktur für ein sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem für Seedeiche

Stefan Herle<sup>1</sup>, Ralf Becker<sup>1</sup>, Jörg Blankenbach<sup>1</sup>, Alexander Mulckan<sup>2</sup> und Rainer Lehfeld<sup>3</sup>

<sup>1</sup> RWTH Aachen University, Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik und Geoinformationssysteme, [herle@gia.rwth-aachen.de](mailto:herle@gia.rwth-aachen.de)

<sup>2</sup> Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

<sup>3</sup> Bundesanstalt für Wasserbau

## Zusammenfassung

Eine echtzeitfähige Überwachung von Deichen als Basis eines Frühwarnsystems bedarf Daten unterschiedlicher Quellen. Neben den durch Sensoren vor Ort erfassten Daten sind dies ebenso von Dritten bereitgestellte Daten wie auch die Ergebnisse von Vorhersagesimulationen. Für ein webbasiertes Frühwarnsystem gilt es, alle Daten in einer geeigneten Sensor- und Geodateninfrastruktur (Englisch: Sensor and Spatial Data Infrastructure, SSDI) möglichst aktuell und zu mindestens partiell in Echtzeit zusammenzuführen und in einem geeigneten webbasierten Geoportal den Nutzern zur Verfügung zu stellen.

In diesem Beitrag wird die Realisierung einer solchen SSDI mit dem notwendigen hohen Maß an Skalierbarkeit und Interoperabilität im Rahmen des Projektes „Early Dike“ (Becker et al. 2018) beschrieben. Für die Gewährleistung von Interoperabilität beim Datenaustausch werden Standards wie die Geodatenstandards des Open Geospatial Consortium (OGC) verwendet. Die Skalierbarkeit und Echtzeitfähigkeit, z. B. bei der Übermittlung der Sensordaten, kann durch Verwendung neuartiger push-basierter Protokolle des Internet of Things (IoT) gewährleistet werden; mit der Eigenentwicklung GeoMQTT ist dabei auch eine zeitliche und/oder räumliche Filterung möglich.

Anhand des Projektes „EarlyDike“ zeigt der Beitrag das Zusammenspiel aller Komponenten einer Online-Geomonitoring- und Simulationsanwendung, von der Erfassung durch neue Sensoren in Sensornetzwerken bzw. Datengenerierung in verschiedenen Simulationen über die Echtzeitkommunikation mit neuen Benachrichtigungsmechanismen bis zur Speicherung der Sensordaten in einer entsprechenden serviceorientierten Architektur und der browserbasierten Datenvisualisierung und -bereitstellung in Echtzeit. Mit dem Erfassen von projektbezogenen Metadaten und dem Erstellen eines Präsentationsgeoportals erfolgt zudem die Einbindung in die deutsche marine Geodateninfrastruktur (MDI-DE) sowie in nationale (GDI-DE) und internationale (INSPIRE) Geodateninfrastrukturen.

## Schlagwörter

Sensor- und Geodateninfrastruktur, Geosensornetzwerke, SSDI, GeoMQTT, Sensor Observation Service, GeoPortal, Marine Dateninfrastruktur Deutschland (MDI-DE), Metadaten, Geodateninfrastruktur Deutschland (GDI-DE), INSPIRE

## Summary

*Online monitoring systems for sea dikes have various requirements to data, simulations and communications. Sensors, which are deployed in the dike body and measure the inner state, and simulators, which forecast the outer influential factors such as wind or waves, must be coupled in a real-time-ready architecture. Additionally, third party data which are accessible by standardized protocols must be integrated as well. Therefore, an event-driven Sensor and Spatial Data Infrastructure (SSDI) is implemented in the 'EarlyDike' project to realize a real-time monitoring system. Furthermore, a web-based geoportal is implemented to enable user-access to the observed and simulated data.*

*This contribution describes the realization of such a SSDI as part of the 'EarlyDike' project, complying with the necessary requirements of high scalability and interoperability. The interoperability is ensured by geodata standards of the Open Geospatial Consortium (OGC). Especially, the standards of the sensor web are used to access historical sensor data by means of the WWW. The scalability and real-time capability are realized by innovative push-based protocols of the Internet of Things (IoT). The protocol 'GeoMQTT' was developed to extend the MQTT protocol by spatiotemporal filtering capabilities.*

*The 'EarlyDike' project shows the interaction of real-time data measurements by sensor networks, real-time dissemination utilizing suitable protocols, the storage and provisioning of sensor data in a service-oriented architecture (SOA) and the browser-based visualization in a geoportal. By acquiring project-related metadata and creating a presentation geo-portal, the integration into the German marine spatial data infrastructure (MDI-DE) and the national (GDI-DE) and international (INSPIRE) spatial data infrastructures is realized.*

## Keywords

*Sensor and Spatial Data Infrastructure (SSDI), Geo-Sensor Networks, GeoMQTT, Sensor Web, WebGIS, Marine Data Infrastructure Germany (MDI-DE), metadata, German Spatial Data Infrastructure (GDI-DE), INSPIRE*

## 1 Einleitung

Die Realisierung eines sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems basiert auf unterschiedlichen Informationsquellen, die innerhalb des Systems zusammengeführt werden müssen. Der Datenraum reicht dabei von in situ erfassten Sensordaten über Basisdaten aus externen Quellen bis hin zu Daten aus Vorhersagesimulationen, so dass sich die Daten sowohl hinsichtlich der Aktualisierungsraten (z. B. hochfrequente Sensordaten vs. quasi-statische Basisdaten) als auch ihrer Struktur (z. B. skalar, vektoriell oder rasterförmig), Formate (Bildformate, Textdateien etc.) sowie der zu verarbeitenden Datenmengen stark unterscheiden. Diese Heterogenität erfordert den Aufbau einer speziellen Dateninfrastruktur für die Erfassung, Integration und Präsentation aller Daten, die zudem erweiterbar in Hinblick auf weitere Datenquellen sein sollte.

Dateninfrastrukturen werden derzeit insbesondere zur Verbesserung der Verfügbarkeit und des Austauschs von Geodaten (Geodateninfrastrukturen, GDI) weltweit aufgebaut (Groot 2003, Bocher und Neteler 2012, Harvey et al. 2012, GSDI 2012, Onsrud und Kuhn 2016). In Europa folgen sie der INSPIRE-Richtlinie (INSPIRE 2007) zur „Schaffung der Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft für die Zwecke der gemeinschaftlichen Umweltpolitik sowie anderer politischer Maßnahmen oder sonstiger

Tätigkeiten, die Auswirkungen auf die Umwelt haben können“. Die in INSPIRE und ihren Spezifikationen definierten Datenstrukturen nutzen OGC-Standards (OGC 2018) wie Web Service-Schnittstellen (z. B. Web Map Service (WMS), Web Feature Service, (WFS)) (Benedict 2005) oder Datenbeschreibungsformate (z. B. GML, O&M, WaterML). GDIs werden derzeit in den EU-Mitgliedsstaaten zu unterschiedlichen Themen aufgebaut (Craglia und Annoni 2006). Zum aktuellen Stand der Geodateninfrastruktur in Deutschland (GDI-DE) berichtet das Lenkungs-gremium GDI-DE im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU 2016). Bezüglich Wasser- und Küstenschutz förderte das BMBF den Aufbau der MDI-DE (Rüh und Bill 2012, Lehfeldt und Melles 2011) durch die Fusion von NOKIS (Nokis 2018) und GDI-BSH (GDI-BSH 2018) (MDI-DE: PT Jülich 03KIS089 (2010–2013); NOKIS: PT Jülich 03KIS49 (2004–2008)). Die MDI-DE (Lehfeldt und Melles 2014) integriert Daten aus dem Küsteningenieurwesen, dem Küstengewässerschutz, dem Meeresschutz und den Meeresnaturschutz von Bundes- und Landesbehörden.

Erweitert man – wie es für das vorliegende Frühwarnsystem der Fall ist – die GDI um ein Sensornetzwerk zur räumlich verteilten Erfassung eigener Daten, so wird aus der GDI eine Sensor- und Geodateninfrastruktur (SSDI). Die mitunter große räumliche Ausdehnung erfordert eine drahtlose Variante des Sensornetzwerkes. Drahtlose Sensornetze haben sich in den letzten Jahren rapide entwickelt. Moderne Sensorknoten werden mit multiplen Sensoren für unterschiedlichste Umweltindikatoren (z. B. Lufttemperatur, Luftverschmutzung, Wasserqualität) ausgerüstet. Die Weiterentwicklungen führen zum Einsatz von georeferenzierten, vernetzten Sensorknoten als Geosensornetzwerk in verschiedenen Domänen z. B. im Katastrophenmanagement, dem Umweltmonitoring, in der öffentlichen Sicherheit und im kommunalen Überflutungsschutz (Iyengar und Brooks 2012, Akyildiz und Vuran 2010, Pengel et al. 2013). Zur Verbesserung der Sensorintegration und zur Sicherstellung der Interoperabilität hat das OGC die Sensor Web Enablement (SWE)-Initiative (Grothe und Kooijman 2008) initiiert. SWE wurde bereits vereinzelt in Forschungsprojekten z.B. OSIRIS (Monitoring von Luftverschmutzung) (Jirka et al. 2009), SLEWS (Frühwarnung vor Hangrutschungen) (Walter und Nash 2009) oder FluGGs (FlussGebietsGeoinformationssystem) (Spies und Heier 2010) berücksichtigt.

SSDIs sind somit eine Weiterentwicklung von traditionellen Geodateninfrastrukturen, die als serviceorientierte Architekturen (SOA) umgesetzt werden und sich dabei des Request/Response-Nachrichtenaustauschmusters bedienen. Dabei fragen Clients eine gewisse Ressource an (Request) und der Server beantwortet diese Anfrage synchron mit den angefragten Informationen oder einer Fehlermeldung. In modernen Anwendungen und erweiterten verteilten Systemen erweist sich dieses Muster allerdings als problematisch, da die Echtzeitfähigkeit nahezu unmöglich ist. Um dies umzusetzen, müssen andere Kommunikationsmuster eingesetzt werden. Ein Beispiel ist das Publish/Subscribe Muster, das erlaubt, die Benachrichtigung von Clients asynchron durchzuführen. Hierbei können sich Clients auf bestimmte Ereignisse abonnieren, sodass sie benachrichtigt werden, wenn diese eintreten.

Um die Echtzeitfähigkeit des Deich-Frühwarnsystems in EarlyDike (Becker et al. 2018) zu gewährleisten, wurde die Datenintegration innerhalb der SSDI konsequent auf dem Publish/Subscribe-Muster aufgebaut. Die Architektur der SSDI besteht aus mehreren Schichten (Abbildung 1). In der Sensorschicht (Sensor Layer) werden Daten an über den Deich verteilten Sensoren räumlich-zeitlich erfasst und über drahtlose Geosensornetze in die

Datenbasis überführt. In der Integrationsschicht (Integration Layer) werden bereits existierende räumlich-zeitliche Daten mit den eigenerfassten Messungen fusioniert und schließlich in einem Deich-Geoportal präsentiert (Präsentationsschicht/Presentation Layer).

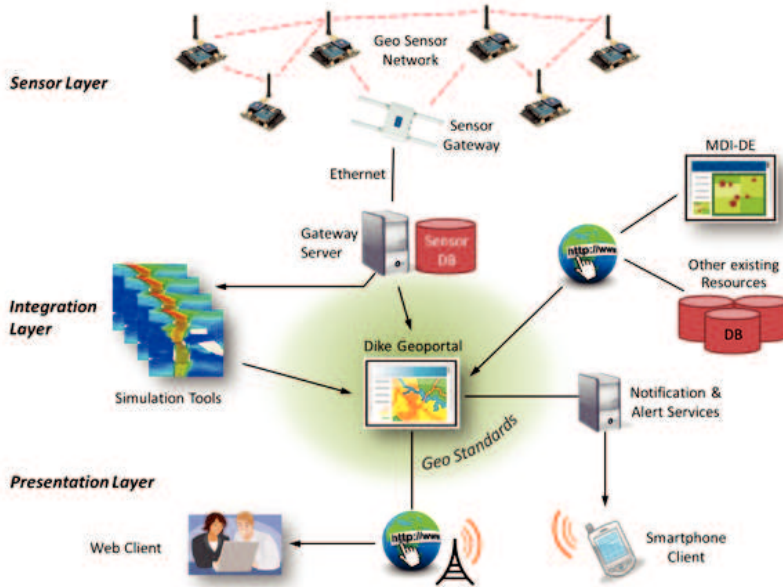


Abbildung 1: Sensor- und räumliche Dateninfrastruktur für das Deich-Monitoring.

## 2 Sensorschicht

### 2.1 Anforderungen an das Geosensornetzwerk

Da die für die Simulationen und das Monitoring erforderlichen Daten möglichst aus existierenden und nutzbaren (Online-)Datenbeständen bezogen werden, werden mit Hilfe des Geosensornetzwerks nur diejenigen relevanten Parameter erfasst, die entweder nicht anderweitig bezogen werden können oder spezielle, projektspezifische Anforderungen (z. B. hinsichtlich räumlicher und zeitlicher Auflösung) aufweisen. Dies sind – auch aus Beschränkung des Aufwandes einer flächendeckenden Erfassung – Messgrößen bezüglich der örtlichen Verhältnisse für den Zustand des Deiches, wie sie das vorgesehene Verfahren zur Detektion von Veränderungen im Inneren des Deiches mittels textiler Sensoren (Schwab et al. 2018) erfordern.

Zur Umsetzung von Sensornetzwerken existieren grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten sowohl hinsichtlich der verwendeten Hard- wie auch der Software. Bei der Hardware spielt die räumliche Ausdehnung eines solchen Netzwerkes eine entscheidende Rolle, d. h. insbesondere, ob eine kabelgebundene Lösung möglich ist oder auf kabellose Technologien zurückgegriffen werden muss. Im vorliegenden Projekt werden Deiche überwacht, die entlang der Küstenlinie eine große räumliche Ausdehnung besitzen. Aufgrund der damit verbundenen Raumbezogenheit wird das Sensornetzwerk zu einem Geosensornetzwerk. Eine kabelgebundene Lösung kann dabei nur schwer umgesetzt werden. Somit ist es notwendig,

ein kabelloses (Wireless) Geosensornetzwerk (WGSN) einzusetzen, um eine flächen-deckende Überwachung zu gewährleisten.

Diese Anforderung beschränkt die Sensorknoten in einem solchen Geosensornetzwerk in verschiedenerlei Hinsicht. Da die Sensorknoten autonom agieren müssen, insbesondere keine stetige Stromversorgung besitzen und somit auf andere Stromquellen zurückgegriffen werden muss, darf die zugrundeliegende Plattform nur einen geringen Stromverbrauch aufweisen. Des Weiteren sind die Kosten für einen Sensorknoten ein wichtiger Faktor, da durch die große räumliche Ausdehnung von Deichen eine Vielzahl von Sensorknoten für eine vollständige Abdeckung notwendig ist. Insgesamt muss die Basisplattform, mit der die unterschiedlichen Sensoren, insbesondere das Geotextil, verbunden werden sollen, eine wenig Energie verbrauchende (low-power) und kabellose Lösung sein. Als Sensorplattform für die Messungen am Deich mittels eines Geosensornetzwerks wurde die Internet-of-Things (IoT)-Plattform „Waspote Plug and Sense“ vom spanischen Unternehmen Libelium (Libelium 2018) gewählt. Die Basiskomponente ist der sogenannte Waspote, ein Sensorknoten basierend auf der open source Hardware-Plattform Arduino (Arduino 2018). Das Board des Sensorknotens besteht aus einem Mikrocontroller sowie analogen und digitalen Ein- und Ausgängen. Im Vergleich zum Arduino besitzt der Waspote noch einige weitere Hardwarekomponenten wie bspw. eine Echtzeituhr (Real-Time Clock, RTC). Durch die Nähe zur Arduino-Plattform können Arduino-Bibliotheken, die bspw. im WWW zu finden sind, mit kleinen Anpassungen auch auf der Waspote-Plattform betrieben werden. Dies stellt einen großen Vorteil dar, da so auf Bibliotheken Dritter zurückgegriffen werden kann.

Libelium verbaut diese Basiskomponente in spezielle Sensorknoten, die in verschiedenen Ausführungen mit unterschiedlichen Sensoren ausgestattet sind. Der im Projekt verwendete Sensorknotentyp trägt den Namen „Waspote Plug and Sense“, da es im Plug and Play (PnP) Modus betrieben werden kann. Diese speziellen Ausführungen der Sensorknoten sind für verschiedenste Aufgabenstellungen gedacht. Insgesamt existieren 11 verschiedene Modelle, die mit mehr als 150 Sensoren bestückt werden können. Für die Deichüberwachungen wurden die Modelle „Waspote Plug and Sense - Smart Agriculture“ und „Smart Ambient“ gewählt, die eine Integration der gerade für den Zweck des Projektes benötigten Sensoren bieten. Die Sensoren, die beim EarlyDike Projekt von Interesse sind, sind die Folgenden:

- Lufttemperatur- und Luftfeuchtesensoren
- Luftdrucksensor
- Bodentemperatursensor in verschiedenen Tiefen
- Bodenfeuchtesensor in verschiedenen Tiefen
- Anschlussmöglichkeit für eine Wetterstation, die Windrichtungs-, Windgeschwindigkeits- und Niederschlagsmessung vornimmt

Die Sensorknoten bieten neben dem einfachen Anschluss und Betrieb der Sensoren einige Vorteile, welche die Installation im Gelände erlauben. So ist die Hardware in einem robusten, wasserfesten IP65-Gehäuse eingebaut, sodass bei starken Wettereinflüssen am Deich immer noch zuverlässig Daten erfasst und versendet werden können. Des Weiteren kann ein Solarpanel zur autarken Stromversorgung angeschlossen werden.

Die Sensorknoten sind in der Lage, sich autonom zu vernetzen (Stern-, Baum- und Mesh-Topologie) und bilden im Verbund ein kabelloses Geosensornetzwerk, welches an

unterschiedlichen Stellen am Deich Umweltdaten erfassen kann. Die Daten werden direkt oder über das Sensorknotennetzwerk an eine Basisstation übermittelt. Das Unternehmen Libelium stellt dazu ein sogenanntes „Gateway“ bereit, das den Namen „Meshlium“ trägt. Diese Hardwarekomponente empfängt die Daten von den Sensorknoten und verarbeitet sie weiter, d. h. die Daten werden entweder in einer lokalen Datenbank (MySQL) gespeichert oder über das Internet weitergeleitet. Das Meshlium ist mit verschiedenen Konnektoren wie Ethernet, WLAN oder Mobilfunk (3G/GPRS) ausgestattet. Gerade Letzteres ist gut geeignet, um das Geosensornetzwerk auch in ortslagenfernen Regionen, wie an Küstenabschnitten, betreiben zu können. Da auch das Meshlium eine open source-Hardwarelösung ist, kann dieses frei konfiguriert und programmiert werden. Auch das Meshlium ist mit einem robusten Gehäuse ausgestattet, um es im Freien betreiben zu können.

Die Kommunikation zwischen den Sensorknoten und dem Gateway erfolgt über die Protokolle ZigBee und IEEE 802.15.4. ZigBee ist ein Framework für drahtlose Funknetzwerke und erweitert den IEEE 802.15.4-Standard um eine Vermittlungs- und Anwendungsschicht. Laut Herstellerangaben ist (bei freier Sichtverbindung) eine maximale Entfernung von 7 km zum nächsten Knoten möglich. So kann mit den Sensorknoten und dem Gateway ein ZigBee Wireless Personal Area Network (WPAN) aufgebaut werden. Teilnehmer in einem solchen WPAN können als Endgerät, Router oder Koordinator konfiguriert werden. Das Gateway übernimmt hierbei die Rolle des Koordinators, da es das Netzwerk mit festgelegten Parametern initiieren muss. Die Sensorknoten selbst sind als Router konfiguriert, da diese ggf. ZigBee-Nachrichten an andere Teilnehmer weiterleiten können.

Auf diese Kommunikationsprotokolle setzt der Hersteller Libelium ein proprietäres Format zur Kapselung der Daten auf, den sogenannten WaspFrame. Je nach Konfiguration der Sensorknoten, d. h. Abtastrate der Sensoren etc., werden WaspFrames von den Sensorknoten an das Gateway versendet. Das proprietäre Protokoll hat den Nachteil, dass die Nutzer an die Plattform des Herstellers gebunden sind und keine andere/weitere Hardware hinzugefügt werden kann. Da die Plattform jedoch quelloffen (open source) mit vollem Zugriff auf Software und Hardware ist, können sowohl die Sensorknoten als auch das Gateway erweitert werden, sodass bspw. offene Standards verwendet werden können, um auch alternative Hardware zu unterstützen (siehe Abschnitt 3.1).

## 2.2 Anbindung des Geotextils an den Sensorknoten

Für das Feuchtigkeits- bzw. Deformationsmonitoring innerhalb des Deichbauwerks hat das Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen (ITA) ein spezielles Geotextil entwickelt (Abbildung 2), dessen Zustandsdaten mittels der Sensorknoten ausgelesen werden, um die Daten in die SSDI einzuspeisen (Krebs und Schüttrumpf 2018). Dieser Sensor „Geotextil“ wird im Projekt an den Sensorknoten angebunden, ausgelesen und die gemessenen Werte werden ins Internet weitergeleitet. Da nur die Zustandsänderung (Feuchtigkeit, Dehnung) gegenüber der vorherigen Messung von Interesse ist, ist eine relative Messung ausreichend. Dazu wird auf Seiten der Sensorknoten die Veränderung der elektrischen Spannung bzw. des elektrischen Widerstandswertes gegenüber einer aufgebrauchten Referenzspannung bzw. eines Referenzwiderstandes gemessen, was gegenüber der absoluten Spannungs- bzw. Widerstandsmessung mit einem geringeren technischen Aufwand verbunden ist.

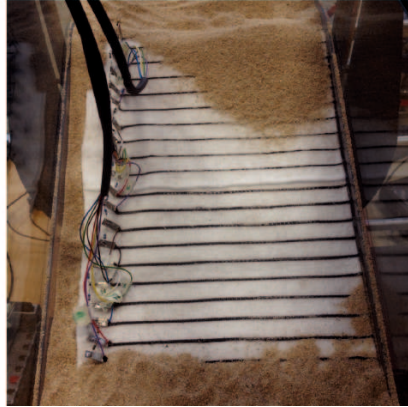


Abbildung 2: Prototyp des Messvlieses im kleinmaßstäblichen Deichmodell (Foto: Krebs 2015).

Die Erfassung mit Hilfe der Sensorknoten kann grundsätzlich entweder durch Verwendung handelsüblicher Labormesstechnik, wie sie ebenfalls vom Projektpartner ITA für die Labormessversuche mit den Geotextilien verwendet wird, oder durch den Aufbau eines eigenen miniaturisierten Messmoduls erfolgen. Die erstgenannte Variante besticht vor allem durch den Vorteil einer professionellen und bereits voll funktionstüchtigen, erprobten, präzisen und hochaufgelösten Datenerfassung. Dem steht jedoch eine Reihe von Nachteilen gegenüber:

- Labormesstechnik ist nicht für den Einsatz im Feld ausgelegt und häufig nicht autonom einsetzbar. Es wäre daher nicht nur erforderlich, die wenig kompakte Labormessanordnung am Deich robust gegen Umwelteinflüsse aufzubauen, sondern auch mit der erforderlichen Infrastruktur, insbesondere Energieversorgung, zu versehen.
- Für die Anbindung an das Geosensornetzwerk wären zum Teil aufwendige Hard- und Softwareschnittstellen notwendig.
- Die Kosten sind mit zum Teil mehreren tausend Euro für nur ein Modul und damit für einen zu bestückenden Sensorknoten vergleichsweise hoch.

Aufgrund dessen wurde ein separates, miniaturisiertes Messmodul entwickelt, mit dem das Geotextil direkt durch den Waspnote ausgelesen werden kann. Der Betrieb am Sensorknoten (Waspnote) bietet dabei erhebliche Vorteile, da keine Synchronisierung und zusätzliche Stromversorgung notwendig sind. Gleichzeitig ist die Realisierung extrem kostengünstig.

Das Messmodul besteht im Kern aus einem Analog-Digital (AD)-Wandler (ADS1115), mit dessen Hilfe die relative Spannung der Sensoren erfasst wird. Der Arduino ADS1115 ist ein 16 Bit Analog Digital Wandler von Texas Instruments (Abbildung 3). Er besitzt vier Einzel-Analogeingänge mit 16 Bit Auflösung oder zwei differentielle Eingänge. Je nach gewähltem Messbereich variiert die Spannungsauflösung.

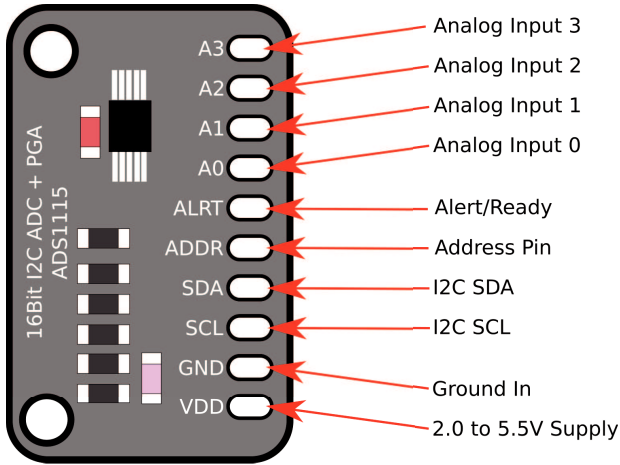


Abbildung 3: Arduino ADS1115 Modul (angelehnt an Henry’s Bench o. J.).

Durch das I2C Interface können die Eingänge mit vier verschiedenen Adressen ausgelesen werden. Es lassen sich vier dieser Wandler an einem Waspote betreiben, sodass insgesamt 16 Kanäle ausgelesen werden können. Da ein Sensor am Geotextil aus einem Paar besteht, können auf diese Weise acht Sensorgarne angeschlossen werden. Abbildung 4 zeigt die entwickelt Wandlerbox am Waspote.

Die Vorteile dieser Lösung bestehen insbesondere darin, dass kein zusätzliches Mikrocontroller-Board erforderlich ist und das Geotextil als weiterer Sensor am Waspote angeschlossen werden kann. Da auf existierende Arduino-Bibliotheken durch kleinere Anpassungen zurückgegriffen werden kann, ist der Programmieraufwand überschaubar. Die Kosten eines Arduino ADS1115 liegen dabei lediglich bei ca. 5 Euro.

Nachdem das intelligente Geotextil in den Modeldeich eingebracht wurde, konnte das umgesetzte Messsystem angeschlossen und bei den folgenden Versuchskampagnen die Funktionalität überprüft werden. Eine parallel laufende Messung mittels Labormesstechnik bestätigte die Validität der Messungen. Diese konnten anschließend ausgewertet und analysiert werden (vgl. Krebs und Schüttrumpf 2018).



Abbildung 4: Waspote mit angeschlossener A/D-Wandler Box.



### 3 Integrationsschicht - Datenfusion

In der Integrationsschicht werden alle Daten und Prozesse fusioniert. Dazu wird eine entsprechende Softwarezwischen-schicht (Middleware) eingesetzt, um eine Kommunikation zwischen den Komponenten zu ermöglichen (Abbildung 5).

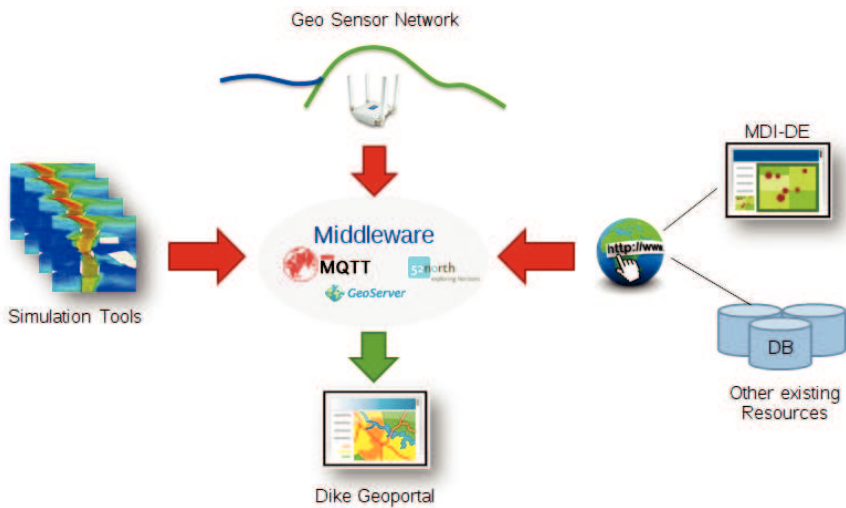


Abbildung 5: Datenfusion in einer Zwischenschicht.

Die selbsterfassten Daten des Geosensornetzwerks (z. B. Geotextil, Bodentemperatur- und -feuchte) werden in Echtzeit ins Internet weitergeleitet und nach dem Konzept des Sensor Webs (vgl. Abschnitt 3.2) für den Abruf bereitgestellt. Sie werden daher mittels geeigneter Methodik (Hard- und Software) in das Sensor Web überführt. Für die externen Daten (Daten Dritter) sind je nach Art der Datenbereitstellung und der Art der Verwendung im Projekt mögliche und geeignete Methoden zum Datenzugriff bzw. Download ermittelt und festgelegt worden. Die von den Projektpartnern entwickelten Simulatoren und deren Ergebnisse sind ebenfalls über die Integrationsschicht eingebunden. Die Geodaten werden in Echtzeit zwischen den verschiedenen Komponenten verschickt, sodass zunächst geeignete Mechanismen erforscht werden mussten.

#### 3.1 Mechanismus zum Austausch von Geodaten in Echtzeit

Die verbauten Sensoren im Deich, aber auch die verschiedenen Simulatoren, erzeugen raumzeitliche Ereignisse, d. h. Geodaten mit zeitlicher Dimension. Ein solches sogenanntes GeoEvent besteht neben den eigentlichen Nutzdaten, dem Payload, aus den folgenden Meta-Komponenten:

1. Phänomen von Interesse (Eventname)
2. Räumlicher Bezug (Koordinate/Geometrie)
3. Zeitpunkt/Zeitspanne

Diese GeoEvents werden in der EarlyDike-Architektur in Echtzeit an interessierte verteilte Architekturkomponenten übermittelt. Unter anderem nehmen die datenhaltenden Dienste

des Sensor Webs die GeoEvents der Sensoren auf, speichern diese ab und stellen sie durch standardisierte Dienste bereit.

Um diesen Echtzeitmechanismus zu gewährleisten, wird im Projekt EarlyDike das Prinzip der GeoPipes benutzt. Dieses stellt eine push-basierte Kommunikation zwischen Produzenten und Konsumenten von GeoEvents dar. Konsumenten spezifizieren ihr Interesse an einer GeoPipe bei einer zentralen Event-Verteilerstelle, sodass an der Verteilerstelle eintreffende GeoEvents unmittelbar an diese weitergeleitet werden, ohne dass sie wiederholte Anfragen durchführen müssen. Wie bereits in Abschnitt 2.1 erwähnt, wird dieser GeoPipe-Mechanismus durch eine Erweiterung des leichtgewichtigen MQTT-Protokolls realisiert, um dessen Vorteile für ressourcenbeschränkte Hardware zu nutzen. Das GeoMQTT Protokoll wurde im Rahmen des Projektes EarlyDike entwickelt und soll im Folgenden vorgestellt werden.

### 3.1.1 Message Queuing and Telemetry (MQTT)

Das Message Queuing and Telemetry Transport (MQTT) Protokoll ist ein Standard, der für verteilte Anwendungen in Netzen mit geringer Bandbreite entwickelt wurde. Es ist sehr leichtgewichtig und daher auch für Geräte mit eingeschränkten Ressourcen geeignet (OASIS 2014).

MQTT implementiert das Publish/Subscribe-Kommunikationsmuster, ein ereignisbasiertes Modell zwischen Sendern und Empfängern. Clients publizieren ein Ereignis (event) und versehen dieses mit einem sogenannten Topic-Namen. Interessierte Clients können sich mittels eines Topic-Filters auf Ereignisse registrieren. Sobald ein Ereignis publiziert wird und der Topic-Name einem Topic-Filter entspricht, wird das Ereignis an den interessierten Client weitergeleitet. Diese Benachrichtigung (notification) wird von einer zentralen Komponente, dem Broker, gesteuert. Er erhält und speichert die Abonnements (subscriptions), evaluiert die Topic-Namen einkommender Nachrichten gegen die Topic-Filter der Abonnenten und verteilt die Benachrichtigungen an interessierte Clients. Clients sind durch Ereignisse und Benachrichtigungen verbunden, aber dennoch entkoppelt in Zeit, Raum und Synchronisation. Abbildung 6 zeigt das MQTT Publish/Subscribe System.

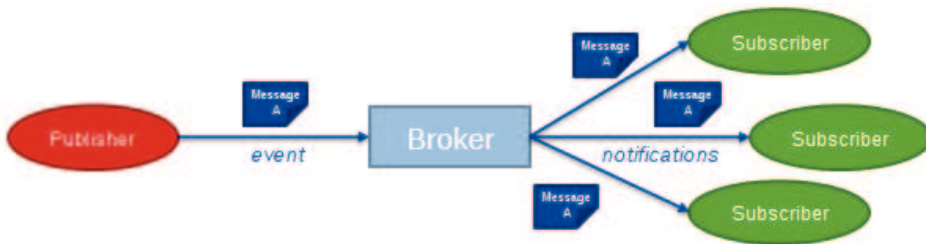


Abbildung 6: Das Publish/Subscribe Modell von MQTT.

Während der Inhalt einer MQTT-Nachricht beliebig ist, folgt der Topic-Name der Nachricht einem Muster. So kann der Topic-Name mittels eines Vorwärtsschrägstrichs "/" hierarchisch strukturiert werden. Beispielsweise könnte eine Nachricht, mit einem Topic-Namen *Raum/217/Temperatur* markiert, die Temperatur des entsprechenden Raumes beinhalten. Ein Feuchtesensor in Raum 237 könnte hingegen den Topic-Namen *Raum/237/Feuchte* benutzen, um seine Nachrichten zu markieren. Topic-Filter sind von

ähnlichem Muster, können aber außerdem die Platzhalter + und # beinhalten. Das Zeichen + kann für eine Hierarchiestufe stehen, das # für beliebig viele, dafür nur einmal am Ende des Topic-Filters auftreten. Ein interessierter Client kann sich beispielsweise auf den Topic-Filter *Raum/+/Temperatur* abonnieren und würde sämtliche Temperaturnachrichten aus allen Räumen erhalten. Abbildung 7 zeigt dieses Beispiel mittels zwei Clients, die unterschiedliche Topic-Filter gesetzt haben.

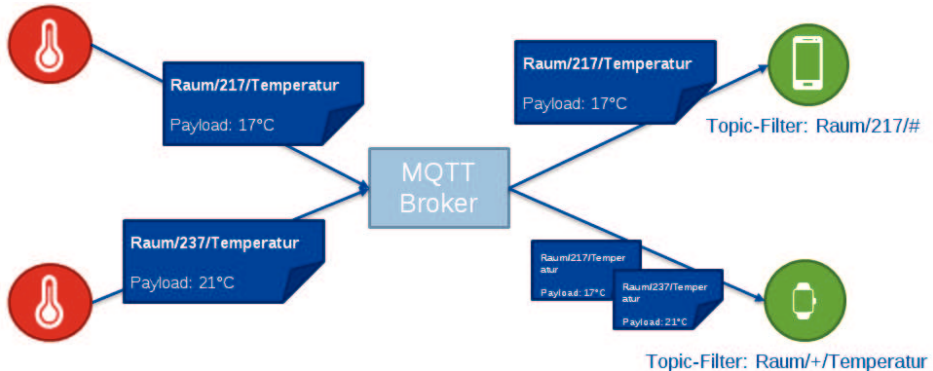


Abbildung 7: MQTT Ereignisse und Benachrichtigungen.

MQTT basiert auf TCP. Allerdings existiert mit der Erweiterung MQTT-SN (MQTT for Sensor Networks) eine Möglichkeit auch verbindungslose Kommunikationsprotokolle wie UDP oder ZigBee einzusetzen (Stanford-Clark und Truong 2013).

### 3.1.2 GeoMQTT

Bei MQTT wird jede Nachricht von einem Produzenten (Publish) mit einem Topic-Namen markiert. In der Erweiterung GeoMQTT besitzt jede Nachricht zusätzlich zu dem Topic eine Geometrie und einen Zeitstempel bzw. ein Zeitintervall als Metainformation. Dazu wurde das Protokoll um den GeoPublish-Nachrichtentyp erweitert. Der Zeitstempel bzw. das Zeitintervall können in ISO8601-Format oder als Unixzeit angegeben werden. Die Geometrie kann durch verschiedene Encoding Standards für Geometrien spezifiziert werden. Als kleinere Varianten sind bspw. GeoBuf oder Well-known Text (WKT) im räumlichen Koordinatenreferenzsystem WGS84 möglich. Es können aber auch andere Formate wie Extended WKT (EWKT), GeoJSON oder GML gewählt werden. Dadurch können auch komplexe Geometrien und beliebige räumliche Referenzsysteme verwendet werden.

Durch die zu einer Nachricht hinzugefügten Metainformationen können ebenfalls neue Interessen beim Abonnieren von Nachrichten definiert werden. Mittels der neu eingeführten GeoSubscribe-Nachricht lassen sich neben dem Topic-Filter auch ein temporaler Filter und ein räumlicher Filter setzen. Der GeoMQTT-Broker leitet nur dann eine Nachricht an den interessierten Client weiter, wenn alle drei Filter, der temporale, der räumliche und der Topic-Filter, positiv evaluiert werden.

Der temporale Filter definiert Zeitpunkte oder -intervalle nach dem ISO8601-Standard (ISO 2004). Zusätzlich wird eine zeitliche Relation angegeben. Ein Intervall kann durch einen Startzeitpunkt und eine Dauer spezifiziert sein, wie *2016-10-28T11:15:00Z/PT2H30M* mit dem Vorwärtsschrägstrich als Trennzeichen. Die zeitliche Relation wird mit

Allens Intervallalgebra für Intervall-Intervall Beziehungen (Allen 1983) oder Vilains Interval-Zeitpunkt Relation (Vilain 1982) definiert. Mit der Relation *contains* würde ein Client im Beispiel alle Nachrichten mit einem Zeitstempel oder Zeitintervall zwischen 2016-10-28T11:15:00Z und 2016-10-28T13:45:00Z erhalten. Für wiederkehrende Zeitintervalle kann der Startzeitpunkt zusätzlich durch einen CRON-Ausdruck definiert werden.

Der räumliche Filter besteht aus einer Geometrie und einer topologischen Beziehung. Die Geometrie kann wie in der GeoPublish-Nachricht mit verschiedenen Encoding Standards für Geometrien angegeben werden. Als topologische Beziehung kann eine aus dem DE-9IM Modell (Herring 2011) und zusätzlich die Beziehungen *covers* oder *coveredBy* ausgewählt werden. Eintreffende GeoPublish-Nachrichten werden vom Broker mittels der abonnierten Geometrie hinsichtlich der topologischen Beziehung evaluiert.

Neben der Erweiterung für MQTT wurde auch die Erweiterung GeoMQTT-SN entwickelt, um auch verbindungslose Netzwerke zu unterstützen. So ist es auch möglich Sensorknoten, die bspw. in einem ZigBee-Netzwerk angeordnet sind, mit dem GeoMQTT-Broker zu verbinden (Abbildung 8).

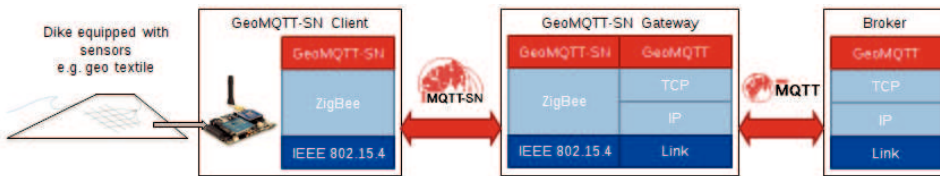


Abbildung 8: Anbindung von Sensorknoten an einen GeoMQTT-Broker.

Dazu ist ein GeoMQTT-SN Client auf dem Sensorknoten (hier ein Arduino Board) installiert. Mittels des Funkstandards ZigBee werden Nachrichten an ein GeoMQTT-SN Gateway übertragen. Die Gateway übersetzt das für ressourcenarme Hardware angepasste Protokoll in Standard-GeoMQTT-Nachrichten und sendet sie mittels TCP/IP an den Broker zur Verteilung.

Das Konzept der GeoPipes kann damit vergleichsweise einfach umgesetzt werden. Ressourcenarme Geräte im IoT können Geodatenströme initiieren, in dem sie GeoMQTT-Nachrichten mit einer Geometrie, einem Zeitstempel/-intervall und einem Eventnamen (Topic-Namen) versehen und ihre Sachdaten, bspw. erfasste Umweltparameter, in dieser Nachricht an einen Broker schicken. Interessierte Clients können sich auf diese Datenströme mit den beschriebenen Mechanismen abonnieren.

Der GeoMQTT Broker wurde in Java implementiert. GeoMQTT Clients wurden in Python und Java sowie ein GeoMQTT-SN Client für Arduinos und Wasmotes umgesetzt. Der Übersetzer in der GeoMQTT-SN Erweiterung ist in C++ implementiert und läuft auf der Gateway in den Sensornetzwerken.

Abbildung 9 zeigt den Aufbau der verschiedenen Komponenten am Modelldeich in der Halle des IWW. Der Sensorknoten (Wasmote, oben rechts) misst punktuell die Bodenfeuchte, die Bodentemperatur im Deich, sowie die Lufttemperatur und den Luftdruck. Die gemessenen Daten werden mittels GeoMQTT-SN an das Gateway (Raspberry Pi, links) weitergeleitet. Dieses übersetzt die Nachrichten in das GeoMQTT-Nachrichtenformat und versendet die GeoEvents an einen Broker, der diese an die entsprechenden Interessenten weiterleitet. In der Abbildung ist dies der Deichmonitor, eine Web-Anwendung, die für die Überwachung des Modelldeiches implementiert wurde (unten rechts).



Abbildung 9: Deichüberwachung des Modeldeiches.

### 3.2 Sensor Web

Zur Verbesserung der Sensorintegration und zur Sicherstellung der Interoperabilität hat das OGC die Sensor Web Enablement (SWE)-Initiative (OGC-SWE 2018) zur Speicherung sowie zum schreibenden und lesenden Zugriff auf Mess- und Sensordaten initiiert. In EarlyDike wird dazu die freie Software der Firma 52°North (52°North 2018) benutzt. Mit ihr erfolgt der interoperable Zugriff auf Sensordaten unter Verwendung von Datentypen und Diensten der SWE-Initiative. Als Datenbank werden von dieser Software PostgreSQL/PostGIS, Oracle, MySQL und Microsoft SQL Server unterstützt, wobei im vorliegenden Fall PostgreSQL/PostGIS (PostgreSQL 2018) eingesetzt wird.

Die Herausforderung ist es, die gemessenen Daten aus den Geosensornetzwerken auf geeignete und im Idealfall auf standardisierte Weise in die datenhaltende Schicht des Sensor Webs zu überführen. Dies geschieht unabhängig von der eingesetzten Hardware, sodass in Zukunft auch andere Sensornetzplattformen problemlos integriert werden können. Die Webdienste der SWE-Initiative wie der Sensor Observation Service (SOS) (OGC-SOS 2018) (Broering et al. 2012) bieten bereits Methoden, um bspw. Sensorwerte der Datenbank hinzuzufügen. Diese Dienste basieren allerdings auf klassischen HTTP-Anfragemethoden und damit auf TCP/IP, das nicht auf den Sensorknoten einsetzbar ist. Daher ist es notwendig, ein low-level Protokoll zu verwenden, um die gemessenen Daten in die datenhaltende Komponente zu überführen. Diese Lücke der Interoperabilität lässt sich am effizientesten durch eine Zwischenschicht lösen, wie es in Broering et al. (2010) vorgeschlagen wird. Diese Zwischenschicht wird „Sensor Bus“ genannt und basiert auf dem „Message Bus“-Architekturmuster. Hierdurch wird der Aufwand, einzelne Sensoren in eine SWE-Infrastruktur zu integrieren, signifikant verringert. Durch Adapterprogramme, die sich als Clients in den Sensor Bus einklinken, können die Daten an die high-level SWE-Dienste auf einfache Weise weitergereicht werden. Im Falle des SOS werden dann bspw. die

Sensordaten in einer Datenbank persistent gespeichert und sind über die Methoden des Dienstes abrufbar. Die beschriebene Lücke der Interoperabilität ist in Abbildung 10 dargestellt.

Es existiert bereits eine Reihe von Kommunikationsprotokollen (z. B. Extensible Messaging and Presence Protocol, XMPP oder Internet Relay Chat, IRC), die grundsätzlich für die Implementierung eines Sensor Bus geeignet sind. Damit die EarlyDike-Sensorknoten jedoch direkt mit dem Sensor Bus kommunizieren können, sind Protokolle, die ausschließlich TCP/IP unterstützen, – wie im vorigen Absatz erwähnt – nicht geeignet. Außerdem mussten die Hardware-Beschränkungen der Sensorknoten berücksichtigt werden.

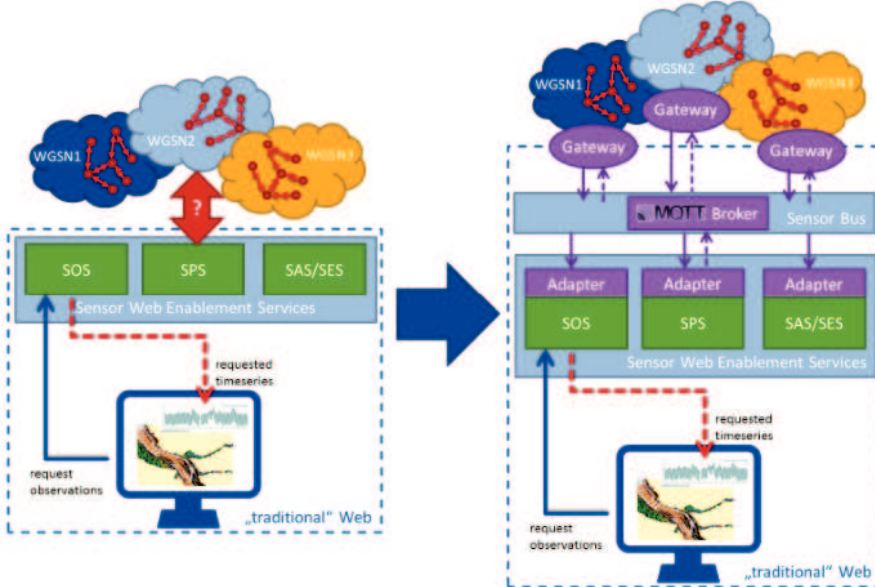


Abbildung 10: Interoperabilitätslücke.

Daher wird im EarlyDike Projekt als Kommunikationsprotokoll das leichtgewichtige Message Queuing and Telemetry Transport (MQTT)-Protokoll (MQTT 2018) verwendet, da mit der Erweiterung MQTT for Sensor Networks (MQTT-SN) ebenfalls eine Version für verbindungslose Protokolle wie ZigBee existiert. Durch MQTT-Clients, die als Adapter fungieren, werden die Daten anschließend in den SOS geladen. Für die Sensorknoten (Waspnote Plug and Play) wurden MQTT-SN-Clients entwickelt, sodass diese leicht an den Sensor Bus angeschlossen werden können. Das Gateway dient als Übersetzer zwischen MQTT und MQTT-SN. Wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben wurden die Clients und das Gateway ebenfalls durch die GeoMQTT-Funktionalitäten erweitert, sodass eine Nachricht neben dem Thema auch einen Zeitstempel bzw. ein Zeitintervall sowie eine Geometrie besitzt.

### 3.3 Anbindung der Simulatoren

Die dritte Komponente, die es in die Integrationsschicht einzubinden galt, sind die Simulatoren der Projektpartner. Dazu wurde die Zwischenschicht (der Sensor Bus) (siehe Abschnitt 3.2) in einen sogenannten GeoEvent Bus erweitert. Neben der Verteilung von Sensordaten können nun auch andere Ereignisse oder prozessierte Daten auf demselben Bus publiziert werden (Abbildung 11). Prozessierungsdienste registrieren sich beim GeoEvent Bus und abonnieren die Topics, auf denen die Sensordaten, die sie verarbeiten sollen, veröffentlicht werden. Die Ergebnisse der Verarbeitung werden wieder zurück in den GeoEvent Bus publiziert. Zum einen können so die Sensordaten auf einfache Weise post-prozessiert werden, um bspw. fehlerhafte Messwerte (Outlier) direkt herauszufiltern. Zum anderen können die Simulatoren der Projektpartner unmittelbar die aktuellsten Messwerte oder Simulationsergebnisse erhalten.

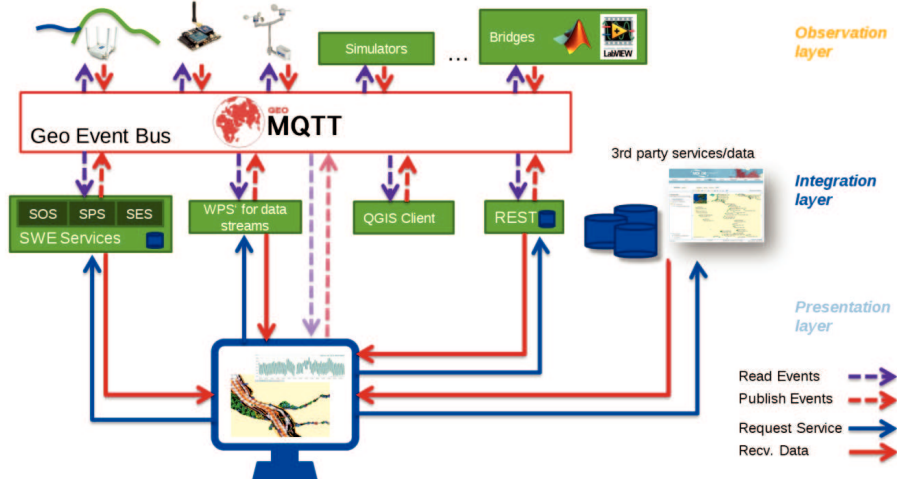


Abbildung 11: GeoEvent Bus in der EarlyDike-Architektur (angelehnt an Herle et al. 2016).

Auf diese Weise können ganze Prozessketten umgesetzt werden, die auf Datenströmen agieren. In EarlyDike stellt sich eine solche Prozesskette wie in Abbildung 12 dar.

Die simulierte Wasserpegel aus dem Sturmflutsimulator (Niehüser et al. 2018) werden mittels GeoMQTT über den GeoEvent Bus sowohl an den SOS Server übertragen, um die Daten persistent abzuspeichern und als Dienste bereitzustellen, als auch an den Wellensimulator (Dreier und Fröhle 2018). Letzterer wird gestartet, sobald die Wasserstandsvorhersagen vorliegen. Die simulierte Seegang- und Wellenaufwurfsvorhersagen werden ebenfalls wieder in den GeoEvent Bus publiziert, sodass diese im SOS abgespeichert und als Dienst angeboten werden können.

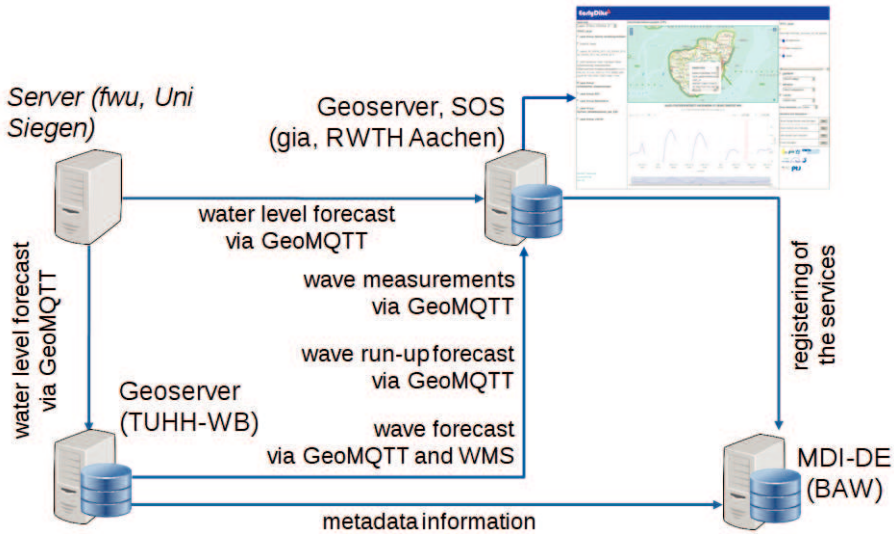


Abbildung 12: Anbindung von Simulatoren und Umsetzung von Prozessketten.

## 4 Präsentationsschicht

Die Präsentationsschicht wird im Wesentlichen durch ein Webportal (Geoportal) zur Visualisierung der Ergebnisse des Monitorings und der Simulatoren gebildet. Durch den Internetansatz wird der Zugriff jederzeit und an jedem Ort auf alle relevanten Informationen mittels stationärer und mobiler Endgeräte ermöglicht.

Web-Portale dienen dem Auffinden, Visualisieren, Zugriff und Abfragen von Geoinformationen (Bernard et al. 2005). Viele Geoportale bieten heute einen zentralen Einstiegspunkt zu Geodateninfrastrukturen, z. B. das GeoPortal NRW, die Portale der Metropolregionen Hamburg (Metropolregion Hamburg 2018) und Berlin (Senat Berlin 2018) oder die Marine Daten-Infrastruktur Deutschland (vgl. Abschnitt 5). Zudem bieten Geodatenportale zunehmend INSPIRE-konformen Zugang zu georeferenzierter Information zu Themen wie Energie, Umwelt, Landnutzung etc.

### 4.1 Konzept

Zur Realisierung der webbasierten Benutzeroberfläche werden die 2015 bis 2018 für Webportale verfügbaren Technologien verwendet. Grundlage ist die für die Webseitenerstellung gängige Auszeichnungssprache HTML, die derzeit in der Version 5 vorliegt und von den gängigen Webbrowsern unterstützt wird. Neben HTML werden für die Darstellung der Webseiten Cascading Style Sheets (CSS) eingesetzt. Zur Dynamisierung der Benutzeroberfläche wie Benutzerinteraktionen und die Veränderung von Inhalten sind zusätzliche Mittel erforderlich. Hier wird die Skriptsprache JavaScript benutzt, für die eine Großzahl von vielfach frei verfügbaren Bibliotheken existiert. Zur Präsentation der Geodaten wird vor allem die JavaScript-Bibliothek OpenLayers (OpenLayers 2018) verwendet. Der Zugriff auf HTML- oder XML-Dokumente über das Internet erfolgt mittels



Funktionen der freien JavaScript-Bibliothek jQuery (jQuery 2018) mit der Erweiterung Ajax (Asynchronous JavaScript and XML) (Ajax 2018) zur asynchronen Datenübertragung zwischen Browser und Server. Für nicht über Web-Services verfügbare Daten Dritter wurde zusätzlich ein eigener Mapserver, der Geoserver (Geoserver 2018), eingerichtet, so dass auch diese Daten als Geodatendienste zur Verfügung stehen und zu einem späteren Zeitpunkt ohne zusätzlichen Aufwand auf Web Services der originären Datenanbieter umgestellt werden könnten.

## 4.2 Benutzeroberfläche

Ein Geoportal bedarf einer für den Einsatzzweck geeigneten, intuitiven Benutzeroberfläche. Sie muss den Anforderungen der potenziellen Nutzer gerecht werden, welches in erster Linie Fachanwender sind. Zentrales Element des EarlyDike-Geoportals ist daher ein interaktiver Kartenviewer mit den üblichen Funktionalitäten wie Kartenausschnitt vergrößern bzw. verkleinern, verschieben etc. Verschiedenste für den Anwender wichtige Basis-, Hintergrund wie auch Fachdatenkarten müssen wählbar, zuschaltbar und transparent überlagernd dargestellt werden können, um aus den aggregierten Informationen die notwendigen Schlüsse ziehen zu können. Hinzu kommt der möglichst einfache Zugang zu den und die Auswahl der Fachdaten durch entsprechende Auswahlmenüs in der Portaloberfläche.

## 4.3 Externe Daten

Die Daten Dritter sind einerseits als Grundlage für die Simulationen notwendig. Andererseits sollen sie als Basis- oder Hintergrundkarten (z. B. Topografische Karten) bzw. als weitergehende Informations- und Beurteilungsgrundlage (z. B. Orthofotos) im Geoportal dienen. Hierzu wurden in Zusammenarbeit mit den anderen Projektpartnern die benötigten Daten definiert sowie recherchiert, welche Institutionen die Daten führen und in welchen Datenformaten die Daten über das Internet (kostenfrei) abrufbar sind.

Eine Recherche bezüglich benötigter und verfügbarer Daten für die Anforderungen der verschiedenen an das Geoportal angeschlossener Simulatoren (Sturmflut-, Wellen-, Deich- und Überflutungssimulation) ergab die Tabelle 1.

Priorität im Hinblick auf die Verwendung und Darstellung im Geoportal haben standardisierte Webdienste wie der WMS (OGC-WMS 2018) und der WFS (OGC-WFS 2018). Während die Webdienste gerade auf die Verwendung für Geoportale ausgelegt sind und entsprechende Interpreter in der Präsentationssoftware (z. B. OpenLayers) zur Verfügung stehen, liegen für das in der Meteorologie verwendete GRIdded Binary Format „GRIB“ und das für den Austausch wissenschaftlicher Daten gebräuchliche Network Common Data Form „nc“ zunächst keine einfachen Lösungen vor. Shape-Dateien wurden in einen eigenen Mapserver eingespielt und aus diesem heraus als Dienst in das Geoportal eingebunden. REST (Representational State Transfer)-Dienste wie zum Beispiel beim Dienst „Pegelonline“ der WSV liefern direkt georeferenzierte (Raster)-daten. „Pegelonline“ bietet außerdem Webdienste für z. B. interaktive und statische Visualisierungen von Pegelganglinien an.

Für die Webservices WMS und WFS ergeben sich die genauen Informationen über die GetCapabilities-Abfrage des jeweiligen Dienstes. Sie weisen neben beschreibenden Informationen über die Inhalte auf die verfügbaren Layer, Projektionen und Formate der Daten

hin. Gerade bei WMS ist die Information zur verwendeten Kartenprojektion wichtig, da unterschiedliche Projektionen im Geoportal nicht kombiniert werden können. Bei WFS ist dies unproblematisch, da die Koordinaten zwischen den gängigen räumlichen Koordinatenreferenzsystemen transformiert werden können.

### 4.3.1 Kartenservices

Zur räumlichen Orientierung werden verschiedene mögliche und wählbare Hintergrundkarten über WMS-Dienste angeboten. Da als potenzielle Nutzer von EarlyDike in erster Linie Landesbehörden bzw. deren für den Küstenschutz zuständige Institutionen angesehen werden, sollten die länderspezifischen Grundkartenwerke der beiden an die Nordsee angrenzenden Länder Niedersachsen und Schleswig-Holstein als Basiskartenwerke zur Verfügung gestellt werden. Während der WMS von Schleswig-Holstein im Rahmen der Open-Data-Initiativen frei verfügbar ist, gilt dies für die Daten Niedersachsens noch nicht, so dass dieser derzeit nicht integriert werden kann. Die Landeskartenwerke haben allerdings den Nachteil, dass ihr Karteninhalt auf die entsprechenden Länder beschränkt ist, so dass zusätzlich der WMS WebAtlasDE (WebAtlasDE 2018) in seiner frei verfügbaren Version *WebAtlasDE.light* integriert wurde. Der *WebAtlasDE* bietet den Vorteil einer deutschlandweit einheitlichen Kartendarstellung in unterschiedlichen Zoomstufen auf der Grundlage amtlicher Geobasisdaten. Er wurde von Bund und Ländern gemeinsam entwickelt und wird durch das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) bereitgestellt. Doch auch seine Inhalte enden an der Bundesgrenze. Der erst im Jahre 2017 geschaffene und ebenfalls vom BKG bereitgestellte WMS TopPlusOpen (TopPlusOpen 2018) vereint und kombiniert weltweit verfügbare freie und amtliche Datenquellen, u. a. freie amtliche Geodaten des Bundes und der Open-Data-Länder. Weitere WMS-Dienste wie z. B. Informationen zum Relief oder zur Schummerung sind unter Angabe der Datenquelle (URL) und der gewünschten Layer leicht integrierbar.

Zusätzliche, insbesondere fachspezifische Informationen, die von Dritten im Idealfall über Web Services bereitgestellt werden (siehe Tabelle 1), werden als Überlagerung zur Basiskarte integriert. Um eine Informationsüberfrachtung zu vermeiden und um das Kartenbild übersichtlich zu halten, sind die fachspezifischen Informationen einzeln zu- und abschaltbar sowie über Schieber stufenlos transparent bzw. opak schaltbar. Ebenfalls zu Zwecken der Übersichtlichkeit sind sie themenbasiert und entsprechend der Art des Dienstes (WMS bzw. WFS) gruppiert. Auch diese Dienste können durch Angaben der Datenquelle (URL) und der Layer bzw. des gewünschten Features leicht ergänzt werden. So sind beispielsweise Orthophotos Schleswig-Holsteins, die Bathymetrie (Abbildung 13) und Daten des marinen Umweltnetzes der BSH sowie die gewidmeten Deiche und Schutzdünen aus den Umweltkarten Niedersachsens integriert.

Tabelle 1: Zusammenstellung der Recherche notwendiger bzw. sinnvoller externer Daten.

<b>Daten</b>	<b>Datenführende Institution</b>	<b>Format/ Webdienst</b>
Geobasisdaten (Landtopographie, Orthophotos, Geländemodelle, Grenzen) in Schleswig Holstein	Landesamt für Vermessung und Geoinformation Schleswig-Holstein (L.Verm-Geo SH)	WMS
Geobasisdaten (Landtopographie, Orthophotos, Geländemodelle, Grenzen) in Niedersachsen	Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGLN)	WMS
Geobasisdaten (WebAtlasDE und DGM200)	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG))	WMS
Geobasisdaten (Bathymetrie, Hintergrundkarte)	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)	WMS
Bathymetrie	National Centers for Environmental Information beim National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)	WMS
Wettervorhersagen	Deutscher Wetterdienst (DWD)	GRIB
Meteorologische Daten (z. B. 20th Century Reanalysis)	National Centers for Environmental Information beim National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)	nc
Pegeldaten	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (BAW)	WMS, WFS, REST
Pegeldaten	Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (MELUR)	WMS, WFS, CSV
Stündliche Vorhersage-Windfelder (u- und v-Komponenten) der Modelle Cosmo-EU bzw. Cosmo-DE als Rasterdatensatz	Deutscher Wetterdienst (DWD)	GRIB
Rasterdatensatz Bathymetrie der Nordsee	Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)	WMS
Stündliche Strömungsvorhersagefelder des BSH als Rasterdatensatz	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)	WMS
Seegangsmessdaten der Stationen FINO1 und FINO3, Elbe sowie Nordseeboje 2 bzw. 3	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)	WMS
Vorhersagedaten zu Wasserständen	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)	WMS
Messdaten Seegang, lokale Wasserstände und Strömungen	Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz des Landes Schleswig-Holstein (LKN-SH)	WMS, WFS
Deichlinie Schleswig-Holstein	Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz des Landes Schleswig-Holstein (LKN-SH)	Shape
Deichlinie Niedersachsen	Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (MU)	WMS



Abbildung 13: WMS für die AufMod-Bathymetrie des BSH German North Sea von 2012.

Die Deichlinien Schleswig-Holsteins sind bisher leider nicht über Web Services verfügbar. Für sie konnten, nachdem die Daten als Shape-Dateien zur Verfügung gestellt wurden, eigene WMS- und WFS-Dienste mit der freien Software Geoserver (Geoserver 2018) aufgesetzt werden.

### 4.3.2 Semantische Informationen

Während die Signatur der Fachinformationen im Kartenbild vor allem die örtliche Lage und weniger die ausführlichen semantischen Daten einer Fachinformation nachweist, werden über zusätzliche Dialogfenster weitere Fachdaten dargestellt. Dies geschieht für semantische Fachdaten über sich zusätzlich öffnende Datenfenster. Für komplexere Visualisierungen wie Zeitreihen oder Bildobjekte (png, tif, etc.) steht ein zusätzlicher, großflächiger Bereich der Benutzeroberfläche bereit.

Über den GetFeatureInfo-Request des WMS bzw. den GetFeature-Request des WFS können semantische Informationen zu den angebenen WMS (Abbildung 14, GetFeatureInfo-Request Deich Niedersachsen) bzw. WFS (Abbildung 15) abgerufen und angezeigt werden.

102

GeoSeaPortal  
Das Geodatenportal des BSH

FEATUREID	822973
DATASETDESC	Morphologic data (project AufMod)
NAME	Bathymetry AWZ 2012
SHELFAREA	GermanBight
ORGANIZATION	smile :)
PARAMETER	Bathymetry
PARAMETERDESCRIPTION	data based modelled bathymetry, spatiotemporal interpolation
PARAMETERCLASSIFICATION	20 - 25
UNIT	m (NN)
ASCIIFILE	BathymetryAWZ_2012.csv
FILELOCATION	ftp.bsh.de/outgoing/AufMod-Data/CSV_XYZ_files/Bathymetries1982_2012CSV
SHAPE	Polygon
FEATUREID	821353
DATASETDESC	Morphologic data (project AufMod)
NAME	Bathymetry AWZ 2012
SHELFAREA	GermanBight
ORGANIZATION	smile :)
PARAMETER	Bathymetry
PARAMETERDESCRIPTION	data based modelled bathymetry, spatiotemporal interpolation
PARAMETERCLASSIFICATION	25 - 30
UNIT	m (NN)
ASCIIFILE	BathymetryAWZ_2012.csv
FILELOCATION	ftp.bsh.de/outgoing/AufMod-Data/CSV_XYZ_files/Bathymetries1982_2012CSV
SHAPE	Polygon

Abbildung 14: GetFeature-Request (rechts) für die AufMod-Bathymetrie des BSH German North Sea von 2012.

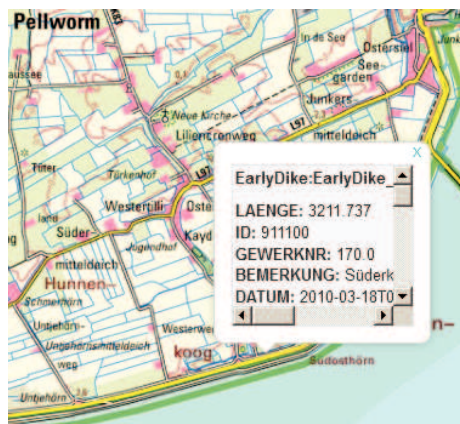


Abbildung 15: GetFeature-Request für die Deichlinie in Schleswig-Holstein.

Weitere relevante Informationen im WFS-Format liefern beispielsweise der Deutsche Wetterdienst (DWD) mit Gewässerdaten, die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) mit Pegeldaten bzw. das Land Schleswig-Holstein mit landeseigenen

Pegelinformationen. Auf Anforderung können im Fall der WSV-Daten über die REST-Schnittstelle des Gewässerkundlichen Informationssystems der WSV des Bundes (Pegelonline) die aktuellen Wasserstandinformationen abgerufen werden (Abbildung 16). Im Fall der Pegeldaten des Landes Schleswig-Holstein werden die Daten automatisch als CSV-Daten abgerufen und in eine Zeitreihendarstellung überführt.



Abbildung 16: WFS der Pegeldaten der WSV und der Umweltverwaltung Schleswig-Holstein mit REST-Schnittstelle des Gewässerkundlichen Informationssystems der WSV (Pegelonline).

#### 4.4 Sensordaten und Ergebnisse der Simulatoren

Im Sensornetzwerk (siehe Abschnitt 2) und bei den verschiedenen Simulatoren fallen Sensordaten bzw. Simulationsergebnisse an, die in einer Postgres/PostGIS-Datenbank gespeichert werden. Der schreibende wie auch lesende Zugriff erfolgt über den Sensor Observation Service (SOS). Sensordaten sind z. B. die Temperatur am Deich und die elektrische Spannung an den Fasern im Geotextil aus dem Deichmonitoring (siehe auch Krebs und Schüttrumpf 2018). Simulationsergebnisse sind z. B. Prognosen der Wasserstände am Deich resultierend aus dem Windstau (siehe auch Niehüser et al. 2018) bzw. dem Wellenmonitoring und der Wellensimulation (siehe auch Dreier und Fröhle 2018). Diese Daten werden unter Nutzung des SOS-Web-Dienstes in das Geoportale eingebunden. Die einzelnen Sensoren sind verortet und werden im Kartenbild an der entsprechenden Stelle mit geeigneter Signatur präsentiert. Sie sind außerdem mit einem Zeitstempel versehen, so dass Zeitreihen visualisiert werden können. Zur Visualisierung der Zeitreihen dient die JavaScript-Bibliothek Highcharts (Highcharts 2018). Abbildung 17 zeigt beispielhaft die Zeitreihe für die Spannungsmesswerte für eines der Geotextile, das in einem Testdeich in der Versuchshalle des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen installiert wurde.

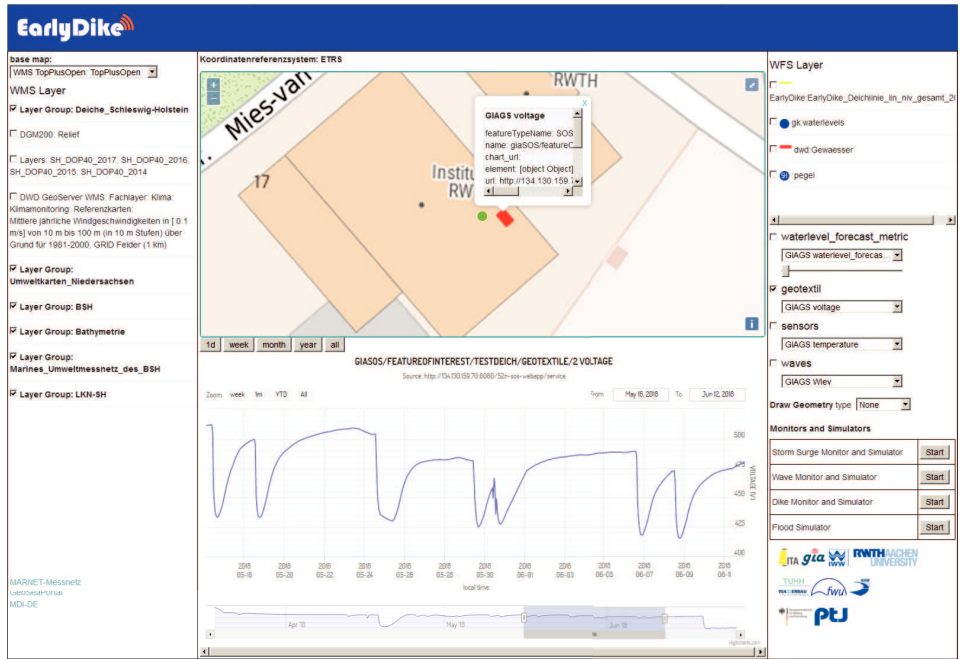


Abbildung 17: Geoport – Spannungsmesswerte eines Geotextils.

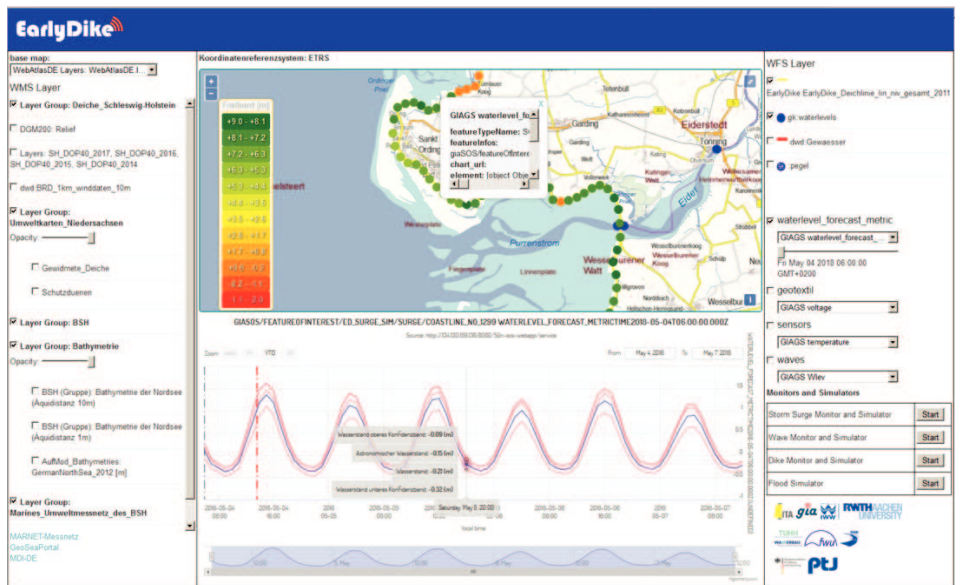


Abbildung 18: Geoport - Wasserstandsvorhersage 2018-05-04 06UTC der FWU.

Die Vorhersagen von Wasserständen an den Küsten sind mit einem Zeitstempel bezüglich der Prognoseerstellung versehen. Einzelne Prognoseerstellungzeitpunkte sind über eine Pull-Down-Liste abrufbar. In Abbildung 18 ist beispielhaft eine Vorhersage von

Wasserständen mit Konfidenzband und astronomischen Anteil dargestellt. Im Kartenbild sind die einzelnen Orte der Prognose farbkodiert nach dem verbliebenen Freibord eingezeichnet. Bei Bewegung eines Schiebers über die Zeit passt sich die Farbkodierung der Prognoseorte automatisch an.



Abbildung 19: Geoportal - Vorhersage der signifikanten Wellenhöhe 2018-07-19 00UTC 50 m vor dem Deich Untjehörn.

Die in der SOS-Datenbank gespeicherten Daten der Wellenaufbausimulation werden in analoger Form visualisiert. In einer Drop-Down-Liste können die gewünschten Parameter zu Visualisierung als Zeitreihe abgerufen werden. Die jeweils aktuellste Simulation wird dargestellt. Abbildung 19 zeigt dies beispielhaft für den Parameter „signifikante Wellenhöhe“ (Hm0).

Derzeit arbeiten die Simulatoren unabhängig von einer Steuerung über das Geoportal und liefern ihre Ergebnisse über den GeoEvent Bus in die dem SOS zugrundeliegende Datenbank (siehe Abschnitt 3.2). Letztlich ist aber auch ein manuelles Anstoßen von Simulationen denkbar. Hierfür sind entsprechende grafische Oberflächenelemente vorgesehen.

### 4.5 Zugriffssicherung

Die SSDI von EarlyDike wurde mit einem internetbasierten Zugriff versehen, um möglichst jedermann jederzeit und an jedem Ort den Zugang auf die Anwendung zu ermöglichen. Bei EarlyDike geht es um den Schutz der Bevölkerung vor Deichversagen und in der Folge um großflächige Überschwemmungen im Deichhinterland. Nicht sachgemäß interpretierte Prognosewerte können im Zweifel zu unkontrollierbarem Verhalten der Bevölkerung führen. Einige Informationen sollten daher lediglich sachkundigen und zuständigen



Nutzern zur Verfügung stehen bzw. vor der Freigabe für jedermann auf ihre Wirkung geprüft werden. Eine entsprechende Zugriffssicherung ist derzeit sowohl durch Abgleich der Rechner-IP des Datenabrufenden als auch durch Passwortschutz gewährleistet. Damit ist das Geoportal im Grundsatz von jedem internetfähigen stationären oder mobilen Endgerät erreichbar.

## **5 Nutzung der Marinen Dateninfrastruktur Deutschland zur Kommunikation**

Mit Hilfe des innovativen GeoEvent-Busses zur Anbindung von Datenquellen und Sensoren zum Online-Geomonitoring wurde das EarlyDike-Geoportal als Basis für ein Frühwarnsystem aufgebaut. Die Veröffentlichung und Bereitstellung der Ergebnisse erfolgt über vorhandene Geodateninfrastrukturen für verschiedene Zielgruppen unter Einhaltung der dabei geltenden Implementierungsregeln.

### **5.1 Informationsplattformen MDI-DE und NOKIS**

Die Vereinbarung zur Weiterentwicklung und Pflege von Konzeptionen und Software für Umweltinformationssysteme (VKoopUIS) bildet die rechtliche Grundlage für den Zusammenschluss von Bundes- und Landesbehörden aus der deutschen Küstenzone, die Informationsplattform „Marine Dateninfrastruktur Deutschland (MDI-DE)“ gemeinsam dauerhaft zu betreiben (Lehfeldt und Melles 2014). Unter Begleitung einer ministeriell besetzten Lenkungsgruppe wird die MDI-DE gemeinsam von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) geleitet.

Im zugehörigen Geoportal (<https://www.mdi-de.org>) stellen die zuständigen Behörden (BSH, BfN, NLWKN, NLPV, LLUR, LKN, LUNG) marine Fachdaten und Informationen bereit, die über einen gemeinsamen Index recherchiert und mit Web-Diensten genutzt werden können.

Die Verbundpartner stellen umfassende Informationen über die Küstenzone zur Verfügung, um die steigenden fachlichen Anforderungen an die Analyse und Bewertung von Umweltsituationen erfüllen zu können sowie den Anforderungen aus der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL), der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL), der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (HWRM-RL), der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH-RL), der Vogelschutzrichtlinie (VRL), der Trilateralen Zusammenarbeit zum Schutz des Wattenmeeres (TMAP), dem „Übereinkommen über den Zugang zu Informationen, die Öffentlichkeitsbeteiligung an Entscheidungsverfahren und den Zugang zu Gerichten in Umweltangelegenheiten“ (Arhus-Konvention), der „Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über den Zugang der Öffentlichkeit zu Umweltinformationen (2003/4/EG)“, dem Umweltinformationsgesetz (UIG) und den Durchführungsbestimmungen der Europäischen Geodaten Infrastruktur (INSPIRE) soweit möglich gerecht zu werden.

Dementsprechend werden die marinen Datenbestände von Bund und Ländern aus den Bereichen Küsteningenieurwesen und Küstengewässerschutz, Meeresumweltschutz und Meeresnaturschutz im MDI-DE Fachportal interoperabel und homogenisiert für Recherche und Nutzung zur Verfügung gestellt, um die Anforderungen von MSRL und INSPIRE termingerecht erfüllen zu können. Neben den Vereinbarungspartnern können weitere Datenquellen in das offene Netzwerk der MDI-DE über standardisierte Metadaten und

Dienste eingebunden werden. Damit werden Datenbestände aus den Küstenbehörden zusammen mit Datenbeständen aus der Forschung einheitlich recherchierbar und nutzbar. Die MDI-DE stellt eine Plattform dar, aus der sich zukünftig die breite Öffentlichkeit, Wirtschaft, Politik, Verwaltung und marine Wissenschaft bedienen können.

Geoportale benötigen Metadaten, um die veröffentlichten Daten für eine gezielte Suche nach Daten, Dokumenten und Diensten zu beschreiben. Mit dem Nord- und Ostsee Küsten-Informationen-System (NOKIS) wurde dazu seit 2001 ein Metadaten-Informationen-System als technische Plattform etabliert (Lehfeldt et al. 2014), das von vielen Behörden in der deutschen Küstenzone genutzt wird. Im Gegensatz zu anderen Erfassungs- und Pflege-Werkzeugen bietet NOKIS ein Metadaten-Profil an, das auf die Belange der Küstenzone zugeschnitten ist und notwendige Zusatzinformationen für Geodaten im Küstenbereich berücksichtigt.

An der Entwicklung dieses „Küstenzonen“-Profils sind die oben genannten MDI-DE Verbundpartner beteiligt gewesen. Auch diese Software wird unter dem Dach der VKoopUIS dauerhaft betrieben. NOKIS stellt zwei weitere Metadaten-Profile zur Verfügung, mit denen die Verbreitung von Informationen über digitale Katalog-Schnittstellen unterstützt wird.

Das „Projekte“-Profil wird insbesondere vom KFKI zur Dokumentation von Küstenforschungsprojekten genutzt und ist eine Adaption des „European Directory of Marine Environmental Research Projects EDMERP“ (Schaap 2000). Für „Digital Object Identifier DOI“ von Publikationen sind Metadaten (DataCite 2018) erforderlich, die als „Publikations“-Profil in NOKIS implementiert sind. Für Geodatensätze werden die benötigten DOI-Metadaten aus dem Küstenzonen-Profil automatisch erzeugt.

Mit NOKIS werden Projekte aus der Küstenforschung, deren Berichte und Ergebnissen umfassend und strukturiert mit Metadaten dokumentiert. Über CSW Katalogschnittstellen können Geoinformationssysteme diese Informationen abrufen (Lehfeldt und Muleckau 2017) und in ihren Rechercheoptionen verwenden.

## 5.2 Infrastrukturknoten der MDI-DE

Zur Präsentation der Projektergebnisse und deren Auffindbarkeit wird der Inhalt des Early-Dike-Geoportals in das Geoportal der Marinen Dateninfrastruktur Deutschlands (MDI-DE) integriert. Dazu werden sowohl Geodatendienste über einen Mapserver (Geoserver) als auch die Beschreibung von Daten und Diensten in einem Metadaten-Informationen-System bereitgestellt. Die Metadaten aller Infrastrukturknoten werden von der MDI-DE abgerufen und in einem gemeinsamen Index zusammengeführt, der für die Recherche im Fachportal genutzt wird. Die Anbindung durch WMS (Visualisierung) und WFS (Download) Dienste für die Daten und durch Harvesten der Metadaten über eine CSW Katalogschnittstelle wird in Abbildung 20 skizziert.

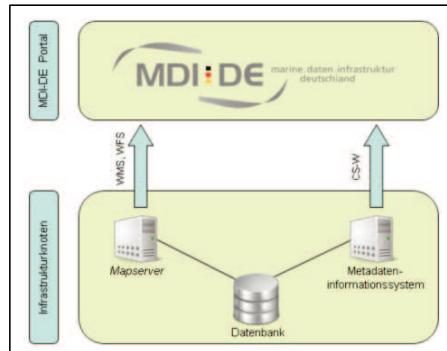


Abbildung 20: Anbindung eines MDI-DE Infrastrukturknotens, vgl. Lehfeldt und Mulckau (2017).

Die Monitoring-Ergebnisse aus dem Projekt standen somit während der Projektlaufzeit durch die technische Integration des EarlyDike-Geoportals über den MDI-DE Infrastrukturknoten bei der BAW für weitere Nutzungen zur Verfügung und konnten mit Daten aus der Modellierung und anderen Beobachtungsdaten verschnitten werden. Ihre Auffindbarkeit und Verfügbarkeit wurde durch die Funktionalität der Web-Service-Schnittstellen nicht nur innerhalb der MDI-DE gewährleistet.



Abbildung 21: Geodaten Infrastrukturen.

Die Anbindung der MDI-DE an die nationale Geodateninfrastruktur GDI-DE, die ihrerseits mit dem INSPIRE-Portal der Europäischen Geodateninfrastruktur verknüpft ist, bewirkt, dass die veröffentlichten Daten in den Such-Indizes dieser Geoportale recherchierbar sind. Standardisierte Web-Dienste zur Visualisierung und zum Herunterladen ermöglichen die durchgängige Nutzung der Daten. Damit sind die wesentlichen Schritte zur Publikation von Daten aus dem Verbundprojekt EarlyDike in bestehenden Geodateninfrastrukturen (vergl. Abbildung 21) mit standardisierten Methoden erfolgt.

### 5.3 Metadaten

Metadaten bilden eine wesentliche Komponente in Portalen von Dateninfrastrukturen. Sie ermöglichen eine gezielte Recherche nach Daten und Diensten zu deren Nutzung. Neben den verpflichtenden Angaben zum Auffinden von Ressourcen kann auch die Datenqualität

ausführlich dokumentiert werden, um die Gebrauchstauglichkeit von Ressourcen zu bewerten.



Abbildung 22: Sichtbarkeit der EarlyDike-Metadaten im Geoportal der GDI-DE (<http://www.geoportal.de>).

Zum Erfassen der Metadaten in EarlyDike dient NOKIS, das von der BAW gehostet wird. Grundlage für das Metadatenprofil und die in ihm dokumentierten Informationen bildet der verpflichtende Kerndatensatz (mandatory, recommended core) von ca. 40 Elementen des ISO Standards 19115 „Geographic Information – Metadata – Part 1: Fundamentals“. Das für marine Geodaten daraus abgeleitete Küstenzonen-Profil garantiert die Erfüllung von Europäischen und nationalen Anforderungen von INSPIRE, GDI-DE und GovData und sichert damit die Sichtbarkeit der Daten in den unterschiedlichen Zielsystemen.

### 5.3.1 Schlüsselwörter

Der Metadatenstandard ISO19115 sieht in der Basisinformation zur eindeutigen Beschreibung einer Ressource eine kurze, beschreibende Zusammenfassung (abstract) des Inhalts einer Ressource, Schlüsselwörter (descriptiveKeywords) mit Quellenangabe, und die Angabe einer Thematik (topicCategory) zur thematischen Einordnung des Datenbestands vor. Die in Klammern stehenden Begriffe sind die englischen Namen der betreffenden Metadaten-elemente im ISO19115 (Koordinierungsstelle GDI-DE 2008).

Zur Systematisierung werden die freien Schlüsselwörter (keyword) in Schlüsselwort-Typen (type) inhaltlich verwandter Sachgebiete (Disziplin, Ebene, Ort, Parameter, Zeitraum, Thema) eingeteilt. Weiterhin wird der Name eines formell registrierten Wortschatzes (ThesaurusName) oder einer ähnlich verbindlichen Quelle von Schlüsselwörtern angegeben, die den verwendeten Schlüsselwortbegriff definiert.

Um eine thematische Klassifizierungen zur Gruppierung von geografischen Datensätzen und zur Suche nach vorhandenen Datensätzen zu ermöglichen, muss ein Datensatz einer von 19 Themenkategorien aus einer vom ISO vorgegebenen Tabelle (MD\_TopicCategoryCode) verpflichtend zugeordnet werden. Nur wenn dieses Pflichtfeld belegt ist, wird der Metadatenatz beim Harvesting z. B. durch die GDI-DE als „gültig“ erkannt.

Für Datensätze, die im Geoportal von INSPIRE angezeigt werden sollen, ist die Angabe einer ISO-Thematik (topicCategory) gemäß einer Zuordnungstabelle vom Arbeitskreis Metadaten (AK Metadaten 2016) erforderlich. Weiterhin muss ein Schlüsselwort aus den 34 INSPIRE Annexthemen benutzt und auf den GeneralMultilingual Environmental Thesaurus (GEMET) als verbindliches Vokabular verwiesen werden (INSPIRE 2007). Zusätzlich muss nach den Konventionen zu Metadaten der Geodateninfrastruktur Deutschland (GDI-DE) der Eintrag „inspireidentifiziert“ in das Feld keyword ohne Angabe von Typ und Thesaurus erfolgen.

Im Kontext von govData für offene Verwaltungsdaten wurde 2018 der Metadatenstandard DCAT-AP.de festgelegt, der ebenfalls verbindliche Vokabulare in Form von Auswahllisten definiert.

Wenn alle Daten und Dienste aus dem Verbundprojekt EarlyDike in ihren Metadaten unter Nutzung des Schlüsselwort-Types „Thema“ das Schlüsselwort „EarlyDike“ eingetragen haben, können bei einer Suchabfragen sämtliche zu diesem Projekt dokumentierten Ressourcen gefunden werden.

Schlüsselwörter aus kontrolliertem Vokabular ermöglichen eine Ordnungsstruktur mit gezielter Filterung über Metadatenelemente in den Trefferlisten, die durch eine Volltextindexierung von Titel (title), Kurzbeschreibung (abstract) oder anderen Freitextelementen nicht möglich ist. Schlüsselwörter dienen im Verbund von verteilten Metadaten-Informationssystemen auch zur Steuerung der Durchgängigkeit von Informationen in hierarchischen Systemen wie die in Abbildung 21.

Die in Abbildung 22 dargestellte Trefferliste einer Anfrage im Geoportal der GDI-DE zeigt an, dass die gefundenen Ressourcen mit Metadaten versehen sind, die die Kriterien von INSPIRE erfüllen. Diese Ressourcen sind daher auch im Geoportal von INSPIRE sichtbar. Die Abbildung 23 verdeutlicht diesen Sachverhalt.

### 5.3.2 Räumlicher Bezug

Der räumliche Bezug einer Ressource wird durch den Schlüsselwort-Type (type) „Ort“ mit dem Eintrag eines geographischen Namens als Schlüsselwort hergestellt. Auch hier wird der Name eines formell registrierten Wortschatzes oder einer ähnlich verbindlichen Quelle von Schlüsselwörtern (ThesaurusName) angegeben. Für die deutschen Küstengewässer kann dazu der Küsten-Gazetteer (Kohlus et al. 2014), der im Rahmen der MDI-DE in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) und dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) bereitgestellt wird, verwendet werden.

Im Küsten-Gazetteer werden den geographischen Namen Koordinaten von Bounding-Boxen bzw. BoundingPolygonen zugeordnet. Im Metadaten-Element Geographische Ausdehnung (geographicElement) wird der geographische Name als Geografischer Identifikator (geographicIdentifier) zusammen mit Koordinatenpaaren, die das Begrenzungspolygon beschreiben (polygon), eingetragen.

In der Regel stellen die Kartenviewer von Geoportalen diese Begrenzungspolygone dar. Die Abbildung 23 zeigt die Bounding Box der Deutschen Bucht im Kartenviewer des INSPIRE Geoportals für eine EarlyDike Ressource.

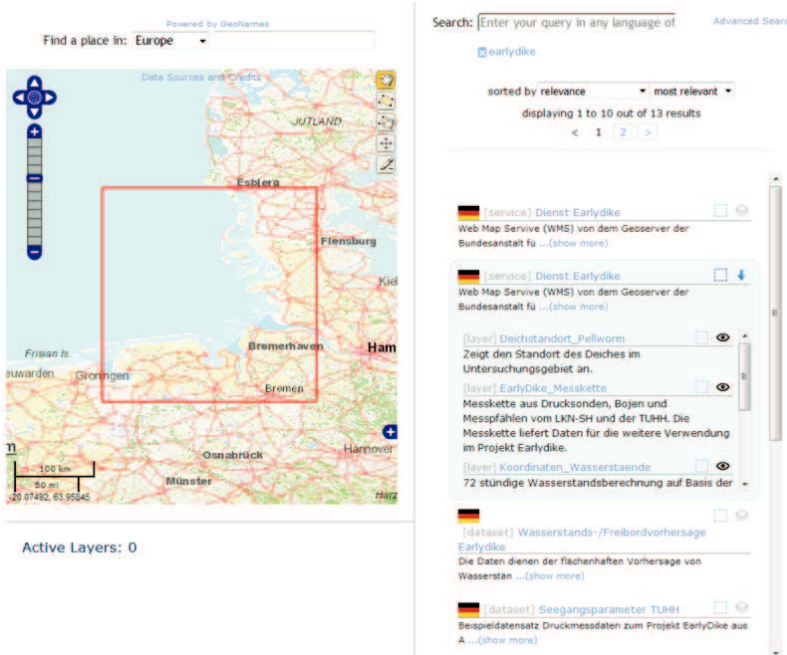


Abbildung 23: Sichtbarkeit der EarlyDike-Metadaten im INSPIRE Geoportal (<http://inspire-geoportal.ec.europa.eu>).

### 5.3.3 Datenqualität

Zum Nachweis der Datenqualität wird im ISO19115 die Herkunft (lineage) der Daten entweder durch eine allgemeine Erläuterung (statement), eine Information über die Bearbeitungsschritte (processStep) oder die Nennung von Datenquellen (source) in den Metadaten erfasst. Die Notwendigkeit einzelner Bearbeitungsschritte kann im Element Veranlassung (rationale) als Freitext beschrieben werden.

Mit diesen Angaben können sowohl Feldmessungen als auch numerische Modelluntersuchungen detailliert dokumentiert werden. Für Simulationsrechnungen wird zur Qualitätssicherung das angewandte Modellverfahren zusammen mit den verwendeten Dateien der Eingangs- und Steuergrößen eingetragen. Jedes Untersuchungsszenario ist damit eindeutig charakterisiert.

Der ISO19115 bietet die Möglichkeit, eine Vorschaugraphik (MD\_BrowseGraphic) zur Darstellung der Ressource in die Metadaten einzubinden. In den Geoportalen der GDI-DE (vergl. Abbildung 22) und der MDI-DE werden diese in den Trefferlisten als Thumbnails angezeigt. Insbesondere bei Zeitreihen bieten diese Graphiken eine schnelle visuelle Orientierungshilfe.

## 5.4 Qualitätssicherung von Metadaten

Um sicherzustellen, dass die Daten- und Dienst-Metadatenätze die Richtlinien der GDI-DE und INSPIRE erfüllen, werden sie in der GDI-DE Testsuite (<https://testsuite.gdi.de.org/gdi/>) auf Inkompatibilitäten zu den Durchführungsbestimmungen (Böhme et al. 2015) geprüft.

Das Testmanagementsystem kann einzelne Metadatenätze als XML Dateien einladen oder über eine GetRecordsByID-Abfrage direkt auf das verwendete Metadaten-Informationssystem verlinken. Es stehen mehrere Test- und Konformitätsklassen zur Verfügung.

Für die EarlyDike Metadaten zu den Daten aus dem Projekt kommt dabei die Testklasse „Konvention der GDI-DE für INSPIRE-relevante Metadaten“ zum Einsatz. Als Konformitätsklassen werden sowohl die erforderlichen Klassen „Metadata: INSPIRE Requirements (Anforderungen an Metadaten gemäß Verordnung (EG) Nr. 1205/2008 zur Durchführung der INSPIRE-Richtlinie hinsichtlich Metadaten)“ und „Metadaten: ISO-Schemavalidierung (Schemavalidierung gegen apiso)“ als auch die optionalen Klassen „Metadaten: GDI-DE Allgemein (Anforderungen gemäß Konventionendokument (Version 1.1.1), die nicht INSPIRE- oder OpenData-spezifisch sind)“, „Metadaten: GDI-DE (INSPIRE-Relevanz) (GDI-DE spezifische Anforderungen gemäß Konventionendokument (Version 1.1.1) für INSPIRE-relevante Metadaten)“ und „Metadaten: GDI-DE OpenData (GDI-DE spezifische Anforderungen gemäß Konventionendokument (Version 1.1.1) für OpenData Metadaten)“ verwendet (GDI-DE 2018). Nachdem der Test durchgelaufen ist, erfolgt je nach Ergebnis ein detaillierter Fehlerbericht oder eine „Metadaten sind fehlerfrei“ Meldung.

## 5.5 Zielsysteme von Metadaten

Die Geodateninfrastrukturen, in denen Informationen von EarlyDike publiziert werden sollen, sind in der Abbildung 21 dargestellt. Jede Hierarchiestufe dieser vernetzten Infrastruktur aus nationalen und internationalen Fach- und Übersichts-Portalen bietet einen eigenen Index zum Suchen nach Informationen an. Die dazu notwendigen Metadaten werden im Rahmen von Vereinbarungen zum Harvesten über Katalogschnittstellen abgerufen.

Das INSPIRE-Portal der Europäischen Geodaten Infrastruktur harvestet derzeit zweiwöchentlich die Metadaten aller Mitgliedsstaaten und präsentiert sie in der in Abbildung 23 dargestellten Form. Die Geodateninfrastruktur Deutschland GDI-DE ist die alleinige Quelle von deutschen Metadaten, die bei INSPIRE sichtbar sind, nachdem sie die Testsuite erfolgreich durchlaufen haben.

Auf nationaler Ebene ist die MDI-DE als marines Fachportal bei der GDI-DE registriert und wird derzeit wöchentlich über eine vereinbarte CSW Katalogschnittstelle geharvestet. Einzelne MDI-DE Infrastrukturknoten mit besonderen Diensten, wie z. B. der Küsten-Gazetteer bei der BAW, sind ebenfalls registriert. Unter der Voraussetzung, dass

die Metadatenätze alle Pflichteinträge des ISO19115 Standards enthalten, sind sie im Geoportal der GDI-DE sichtbar. Metadaten zum EarlyDike-Geoportal werden täglich von der MDI-DE geharvestet.

## 5.6 Themeneinstieg EarlyDike im MDI-DE Fachportal

Sobald Daten und Dienste über Metadaten in einem Geoportal gefunden werden, können Visualisierungen mit WMS und Download mit WFS in der jeweiligen Portal-Umgebung genutzt werden. In der MDI-DE sind zusätzlich Themeneinstiege durch verlinkte Webseiten realisiert, die Hintergrundinformationen zu einzelnen Themen liefern, die nicht als Web-Dienste sondern als illustrierte Textbeiträge mit Links zu weiterführenden Online-Quellen aufbereitet sind.

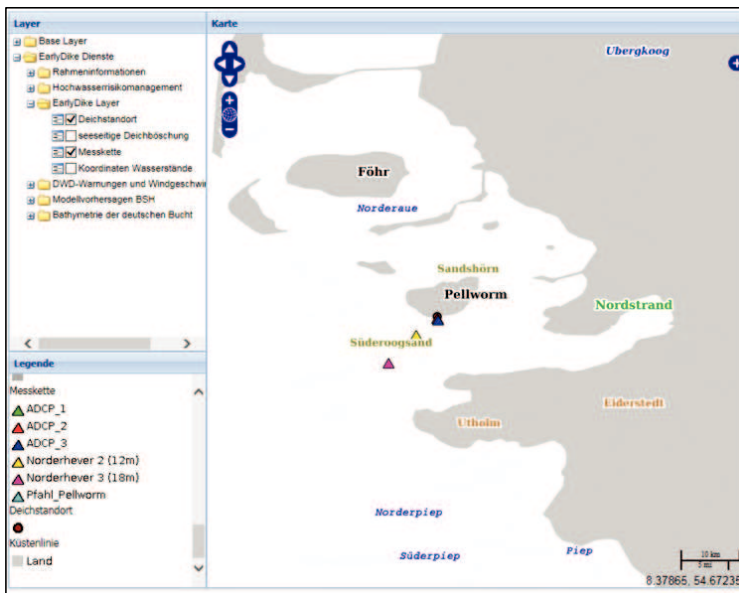


Abbildung 24: EarlyDike Themeneinstieg bei der MDI-DE (<http://mdi-de.baw.de/earlydike/>).

Im Kartenviewer des Themeneinstiegs EarlyDike sind exemplarisch die vorhandenen Dienste von Niedersachsen und Mecklenburg-Vorpommern zum Hochwasserrisikomanagement und zur Hochwasserrahmenrichtlinie sowie der Küsten-Gazetteer eingebunden. Diese Layer können zusammen mit den Vorhersageergebnissen aus dem Projekt angezeigt werden. Jeder Themeneinstieg wird durch eine Auswahl fachspezifischer Dienste für charakteristische Daten unterstützt.

Zu jedem Layer aus dem Projekt wurde eine GetRecords-Abfrage mit individueller Metadaten-UUID im Geoserver, der bei der BAW die Visualisierung der Projektdaten realisiert, gespeichert, sodass jeder Layer bei Bedarf auf seine eigenen Metadaten Zugriff hat. Diese Funktionalität wird in Geoportalen wie dem [geportal.de](http://geportal.de) der GDI-DE ausgenutzt. Im Layertree gibt es dafür eine eigene Schaltfläche (vgl. Abbildung 24), mit der die Metadaten jedes einzelnen Layers angezeigt werden können.



Somit ist der Weg von der Datenbank- bzw. Geoportal-Ebene (Backend) über das MDI-DE Portal (Frontend) nicht nur für Nutzer der MDI-DE erfolgreich aufgebaut worden, sondern steht über die GDI-DE und INSPIRE allen fachlichen Anwendern zur Verfügung.

## 6 Fazit

Eine effiziente, echtzeitfähige Überwachung von Deichen bedarf Daten unterschiedlicher Quellen. Neben den durch Sensoren vor Ort erfassten Daten sind dies auch von Dritten bereitgestellte Daten. Ebenso fallen regelmäßig Simulationsergebnisse durch die verschiedenen Simulatoren an. Sie alle müssen in einer geeigneten Sensor- und Geodateninfrastruktur (SSDI) möglichst aktuell und zu mindestens partiell in Echtzeit zusammengeführt und in einem geeigneten webbasierten Geoportal den Nutzenden zur Verfügung gestellt werden.

Die beschriebene SSDI realisiert eine solche geeignete Infrastruktur mit dem notwendigen hohen Maß an Skalierbarkeit und Interoperabilität. Für die Gewährleistung von Interoperabilität beim Datenaustausch werden Standards, z. B. Geodatenstandards des OGC, verwendet. Die Skalierbarkeit und Echtzeitfähigkeit, z. B. bei der Übermittlung der Sensordaten, kann durch Verwendung neuartiger push-basierter Protokolle des IoT gewährleistet werden; mit der Eigenentwicklung GeoMQTT ist dabei auch eine zeitliche und/oder räumliche Filterung möglich.

Anhand des Projekts EarlyDike zeigt der Beitrag das Zusammenspiel aller Komponenten einer Online-Geomonitoring- und Simulationsanwendung, von der Erfassung durch neue Sensoren in Sensornetzwerken bzw. Datengenerierung in verschiedenen Simulationen über die Echtzeitkommunikation mit neuen Benachrichtigungsmechanismen bis zur Speicherung der Sensordaten in einer entsprechenden serviceorientierten Architektur (SOA) und der browserbasierten Datenvisualisierung und -bereitstellung in Echtzeit.

Schließlich erfolgt mit dem Erfassen von projektbezogenen Metadaten und dem Erstellen eines Präsentationsgeoportals die Einbindung in die marine Geodateninfrastruktur und die nationale (MDI-DE, GDI-DE) und internationale Geodateninfrastrukturen (INSPIRE).

Die SSDI wurde an Versuchsdeichen unterschiedlicher Größen und Simulationen der Wasserstands- und Wellenauflaufprognosen auf unterschiedlichen Testdaten inkl. von Sturmfluten der im Projekt EarlyDike beteiligten Partner getestet. Wünschenswert wäre eine Fortführung an realen Deichen mit kontinuierlichen Messungen und Simulationen, um die Skalierbarkeit und Einsatzfähigkeit der SSDI weiter zu verbessern.

## 7 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei den Projektpartnern im Verbundprojekt EarlyDike sowie für die Förderung des Forschungsvorhabens durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Programms Geotechnologien (Förderkennzeichen: 03G0847A, 03G0848A).

## 8 Literaturverzeichnis

52°North: <http://52north.org>, zuletzt geprüft am 29.10.2018.

Ajax: <http://www.openajax.org/index.php>, zuletzt geprüft am 29.10.2018.

Akyildiz, I. F.; Vuran, M. C.: *Wireless Sensor Networks*. John Wiley, West Sussex, UK, 2010.

Allen, J. F.: Maintaining knowledge about temporal intervals. In: *Communications of ACM*, 832–843, 1983.

Arduino: <https://www.arduino.cc/>, zuletzt geprüft am 29.10.2018.

Becker, R.; Blankenbach, J.; Dreier, N.; Fröhle, P.; Gries, T.; Herle, S.; Jensen, J.; Krebs, V.; Lehfeldt, R.; Mulckau, A.; Niehüser, S.; Quadflieg, T.; Schüttrumpf, H.; Schwab, M.: *EarlyDike - Entwicklung eines sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems für Seedeiche*. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben EarlyDike – Teil 1. BMBF-Förderkennzeichen 03G0847A, 03G0847B, 03G0847C, 03G0848A, 2018.

Benedict, K.: *The Open Geospatial Consortium Web Map, Web Feature and Web Coverage Service Standards – an Overview*. ESIP Federation Meeting, Mexico, 2005.

Bernard, L.; Kanellopoulos, I.; Annoni, A.: The European geoportal – one step towards the establishment of a European Spatial Data Infrastructure. In: *Computers, environment and urban systems*, 29(1), 15–31, 2005.

Bocher, E.; Neteler, M.: *Geospatial Free and Open Source Software in the 21st Century*, Dordrecht, 2012.

Böhme, S.; Högbe, D.; Blank, J.: *Anwender-Handbuch GDI-DE Testsuite [pdf]* CPA Software GmbH/GDI-DE, 2015. [https://testsuite.gdi-de.org/gdi/files/Anwender-Handbuch\\_GDI-DE-Testsuite.pdf](https://testsuite.gdi-de.org/gdi/files/Anwender-Handbuch_GDI-DE-Testsuite.pdf), zuletzt geprüft am 07.07.2018.

Broering, A.; Foerster, T.; Jirka, S.; Priess, C.: *Sensor Bus: An Intermediary Layer for Linking Geosensors and the Sensor Web*. In: *COM.Geo '10 Proceedings of the 1st International Conference and Exhibition on Computing for Geospatial Research and Application*, 2010.

Broering, A.; Stasch, C.; Echterhoff, J.: *OGC® Sensor Observation Service Interface Standard, Version 2.0*. [OGC 12-006], 2012.

BMU: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Hg.): *Statusbericht zum Aufbau der Geodateninfrastruktur Deutschland*. 2016. [http://www.geoportal.de/SharedDocs/Downloads/DE/GDI-DE/INSPIRE\\_Bericht\\_Mitgliedstaat\\_DE\\_2016.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.geoportal.de/SharedDocs/Downloads/DE/GDI-DE/INSPIRE_Bericht_Mitgliedstaat_DE_2016.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 24.06.2016.

Craglia, M.; Annoni, A.: *INSPIRE: an innovative approach to the development of spatial data infrastructures in Europe*. In: *Proc. of GSDI World Conference*, Santiago, Chile, 2006.

DataCite: <https://schema.datacite.org>, zuletzt geprüft am 03.12.2021.

Dreier, N.; Fröhle, P.: *Prä-Operationelle Vorhersage von Seegang und Wellenaufwurf an Seedeichen in der deutschen Bucht*. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben EarlyDike – Teil 3, BMBF-Förderkennzeichen 03G0847C: Teilprojekt 2 – Wellenmonitoring und

Wellenbelastungssimulator, Institut für Wasserbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg, 2018.

GeoPortal NRW: <https://www.geoportal.nrw.de>, zuletzt geprüft am 29.10.2018.

Geoserver: <http://geoserver.org>, zuletzt geprüft am 29.10.2018.

GDI-BSH: Geodateninfrastruktur des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie. <https://www.bsh.de/DE/DATEN/GeoSeaPortal/geoseaportal.html>, zuletzt geprüft am 29.10.2018.

GDI-DE: Geodateninfrastruktur Deutschland [online]. <http://www.geoportal.de>, zuletzt geprüft am 08.07.2018.

Groot, R.: Geospatial Data Infrastructure: Concepts, Cases, and Good Practice, Oxford, UK, 2003.

Grothe, M.; Kooijman, J. (eds.): Sensor Web Enablement. Netherlands Geodetic Commission, Netherlands, 2008.

GSDI: Global Spatial Data Infrastructure Association: Spatial Data Infrastructure Cookbook 2012 Update. [http://gsdiassociation.org/images/publications/cookbooks/SDI\\_Cookbook\\_from\\_Wiki\\_2012\\_update.pdf](http://gsdiassociation.org/images/publications/cookbooks/SDI_Cookbook_from_Wiki_2012_update.pdf), zuletzt geprüft am 03.12.2021.

Harvey, F.; Iwaniak, A.; Coetzee, S; Cooper A. K.: SDI Past, Present and Future: A Review and Status Assessment. In: Proc. of GSDI 13 World Conference, Quebec, Canada, 2012.

Henry's Bench: Arduino ADS1115 Module Getting Started Tutorial, <http://henrysbench.capnfatz.com/henrys-bench/arduino-voltage-measurements/arduino-ads1115-module-getting-started-tutorial/>, zuletzt geprüft am 29.10.2018.

Herle, S.; Becker, R.; Blankenbach, B.: Smart sensor-based Monitoring geospatial architecture for Dike Monitoring. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 34, 2016.

Herring, J.: OpenGIS ® Implementation Standard for Geographic information - Simple feature access - Part 1: Common architecture, 2011.

Highcharts: <http://www.highcharts.com>, zuletzt geprüft am 29.10.2018.

INSPIRE: Richtlinie 2007/2/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. März 2007 zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft (INSPIRE), 2007. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32007L0002:EN:NOT>, zuletzt geprüft am 03.12.2021.

ISO19115-1:2014: Geographic Information – Metadata – Part 1: Fundamentals, 2014.

ISO8601:2004: Representations of dates and times, ISO, 2004.

Jirka, A; Bröring, A.; Stasch, C.: Applying OGC Sensor Web Enablement to Risk Monitoring and Disaster Management. In: Proc. of GSDI 11 World Conference, Rotterdam, Netherlands, 2009.

jQuery: <https://jquery.com>, zuletzt geprüft am 29.10.2018.

Iyengar, S. S.; Brooks, R. R.: Distributed Sensor Networks. CRC Press: Boca Raton, USA, 2012.

Koordinierungsstelle GDI-DE: Deutsche Übersetzung der Metadatenfelder des ISO 19115 Geographic information – Metadata, 2008. [https://www.geoportal.de/Shared-Docs/Downloads/DE/GDI-DE/Deutsche\\_Uebersetzung\\_der\\_ISO-Felder.pdf](https://www.geoportal.de/Shared-Docs/Downloads/DE/GDI-DE/Deutsche_Uebersetzung_der_ISO-Felder.pdf), zuletzt geprüft am 01.02.2019.

Kohlus, J.; Sellerhoff, F.; Vo, T.; Lehfeldt, R.; Roosmann, R.; Alcacer-Labrador, D.: Der Deutsche Küstengazetteer, ein service-basiertes Instrument zur Referenz und Kommunikation von Ortsbezeichnungen. *Die Küste*, 82, 81–96, 2014.

Krebs, V.; Schüttrumpf, H.: Entwicklung eines sensorbasierten Deichmonitorings. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben EarlyDike – Teil 4, BMBF-Förderkennzeichen 03G0847A: Teilprojekt 3 – Deichmonitor und Deichsimulator, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University, 2018.

Lehfeldt, R.; Mulckau, A.: Leitfaden zur Anbindung eines Infrastrukturknotens an die MDI-DE. 2017. [https://www.mdi-de.org/downloads/MDI-DE\\_Leitfaden\\_ISK\\_2.2.pdf](https://www.mdi-de.org/downloads/MDI-DE_Leitfaden_ISK_2.2.pdf), zuletzt geprüft am 07.03.2018.

Lehfeldt, R.; Melles, J.: Die Marine Dateninfrastruktur Deutschland MDI-DE. In: Traub, K.-P.; Kohlus, J.; Lüllwitz, Th. (Hg.): Geoinformationen für die Küstenzone. Norden Halmstad: Points Verlag (3), 107–116, 2011.

Lehfeldt, R.; Melles, J.: Marine Daten-Infrastruktur Deutschland (MDI-DE). *Die Küste*, 82, 1–23, 2014.

Lehfeldt, R.; Reimers, H.-C.; Kohlus, J.: NOKIS – Nord- und Ostsee Küsten-Informationssystem. *Die Küste*, 82, 155–194, 2014.

Libelium: <http://www.libelium.com/>, zuletzt geprüft am 29.10.2018.

Metropolregion Hamburg: <http://geoportal.metropolregion.hamburg.de>, zuletzt geprüft am 29.10.2018.

MQTT: <http://mqtt.org/>, zuletzt geprüft am 29.10.2018.

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.

NOKIS: Nord-Ostsee-Küsten-Informationssystem.

<http://projekt.mdi-de.org/services/nokis.html>, zuletzt geprüft am 29.10.2018.

OASIS: MQTT Version 3.1.1 OASIS Standard, 2014.

OGC: <http://www.opengeospatial.org/standards>, zuletzt geprüft am 29.10.2018.

OGC-SOS: <http://www.opengeospatial.org/standards/sos>, zuletzt geprüft am 29.10.2018.

OGC-SWE: <http://www.opengeospatial.org/ogc/markets-technologies/swe>, zuletzt geprüft am 29.10.2018.

OGC-WMS: <http://www.opengeospatial.org/standards/wms>, zuletzt geprüft am 29.10.2018.

OGC-WFS: <http://www.opengeospatial.org/standards/wfs>, zuletzt geprüft am 29.10.2018.

Onsrud, H.; Kuhn, W. (eds.): *Advancing Geographic Information Science: The Past and Next Twenty Years*. GSDI Association Press. 2016.

OpenLayers: <http://openlayers.org/>, zuletzt geprüft am 29.10.2018.

Pengel, B. et al.: *Flood Early Warning System: Sensors and Internet*. In: IAHS Red Book N 357, *Floods: From Risk to Opportunity*. IAHS Publ. 357, 445–453, 2013.

PostgreSQL: <http://www.postgresql.org/>, zuletzt geprüft am 29.10.2018.

Rüh, C.; Bill, R.: *Concepts, Models and Implementation of the Marine Spatial Data Infrastructure in Germany (MDI-DE)*. In: Proc. of ISPRS Congress, Sydney, Australia, 2012.

Schaap, D.: *European Directory of Marine Environmental Research projects (EDMERP)*. A key resource of the SEA-SEARCH network, 2000. <http://nodc.ogs.trieste.it/documents/EDMERP1.doc>, zuletzt geprüft am 10.12.2014.

Schwab, M.; Quadflieg, T.; Gries, T.: *Intelligente Geotextilien für das Echtzeit-Deichmonitoring*. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben EarlyDike – Teil 5, BMBF-Förderkennzeichen 03G0847A: Teilprojekt 3 – Deichmonitor und Deichsimulator, Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, 2018.

Senat Berlin: *Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen Berlin*, <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/geoinformation>, zuletzt geprüft am 29.10.2018.

Spies, K.-H.; Heier, C.: *Sensor Web Enablement in der Wasserwirtschaft – Von der Hydrologie über das Monitoring zum Management*. In: Schilcher (Hg.): *Geoinformationssysteme: Beiträge zum 15. Münchner Fortbildungsseminar*. Heidelberg, 114–123, 2010.

Stanford-Clark, A.; Truong, H. L.: *MQTT for Sensor Networks (MQTT-SN) Protocol Specification Version 1.2*, IBM Zurich Res. Lab., 2013.

TopPlusOpen: *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie*, [http://www.geodatenzentrum.de/geodaten/gdz\\_rahmen.gdz\\_div?gdz\\_spr=deu&gdz\\_akt\\_zeile=4&gdz\\_anz\\_zeile=4&gdz\\_user\\_id=0](http://www.geodatenzentrum.de/geodaten/gdz_rahmen.gdz_div?gdz_spr=deu&gdz_akt_zeile=4&gdz_anz_zeile=4&gdz_user_id=0), zuletzt geprüft am 29.10.2018.

Vilain, M. B.: *A system for reasoning about time*. In: AAAI'82 Proceedings of the Second AAAI Conference on Artificial Intelligence, 197–201, 1982.

Walter, K.; Nash, E.: *Coupling Wireless Sensor Networks and the Sensor Observation Service – Bridging the Interoperability Gap*. In: Proc. of 12th AGILE International Conference on Geographic Information Science, Hannover, Germany, 2009.

WebAtlasDE: *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie*, [http://www.geodatenzentrum.de/geodaten/gdz\\_rahmen.gdz\\_div?gdz\\_spr=deu&gdz\\_akt\\_zeile=4&gdz\\_anz\\_zeile=4&gdz\\_user\\_id=0](http://www.geodatenzentrum.de/geodaten/gdz_rahmen.gdz_div?gdz_spr=deu&gdz_akt_zeile=4&gdz_anz_zeile=4&gdz_user_id=0), zuletzt geprüft am 29.10.2018.

