

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Becker, Ralf; Blankenbach, Jörg; Dreier, Norman; Fröhle, Peter; Gries, Thomas; Herle, Stefan; Jensen, Jürgen; Krebs, Verena; Lehfeldt, Rainer; Mulckau, Alexander; Niehüser, Sebastian; Quadflieg, Till; Schüttrumpf, Holger; Schwab, Max

EarlyDike - Entwicklung eines sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems für Seedeiche

Die Küste, 90

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/20.500.11970/108623>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Becker, Ralf; Blankenbach, Jörg; Dreier, Norman; Fröhle, Peter; Gries, Thomas; Herle, Stefan; Jensen, Jürgen; Krebs, Verena; Lehfeldt, Rainer; Mulckau, Alexander; Niehüser, Sebastian; Quadflieg, Till; Schüttrumpf, Holger; Schwab, Max (2021): EarlyDike - Entwicklung eines sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems für Seedeiche. In: Die Küste, 90. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 1-11.
<https://doi.org/10.18171/1.090101>.

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.



EarlyDike - Entwicklung eines sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems für Seedeiche

Ralf Becker¹, Jörg Blankenbach², Norman Dreier³, Peter Fröhle³, Thomas Gries⁴, Stefan Herle⁴, Jürgen Jensen⁵, Verena Krebs⁶, Rainer Lehfeldt⁷, Alexander Mulckan⁸, Sebastian Niebuser⁸, Till Quadflieg⁴, Holger Schüttrumpf⁶ und Max Schwab⁴

¹ RWTH Aachen University, Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik und Geoinformationssysteme, ralf.becker@gia.rwth-aachen.de

² RWTH Aachen University, Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik und Geoinformationssysteme

³ Technische Universität Hamburg, Institut für Wasserbau

⁴ RWTH Aachen University, Institut für Textiltechnik

⁵ Universität Siegen, Abteilung Wasserbau und Hydromechanik

⁶ RWTH Aachen University, Institut für Wasserbau und Wassernwirtschaft

⁷ Bundesanstalt für Wasserbau

⁸ 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, now-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 milliardenschwere 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 unerkant 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.

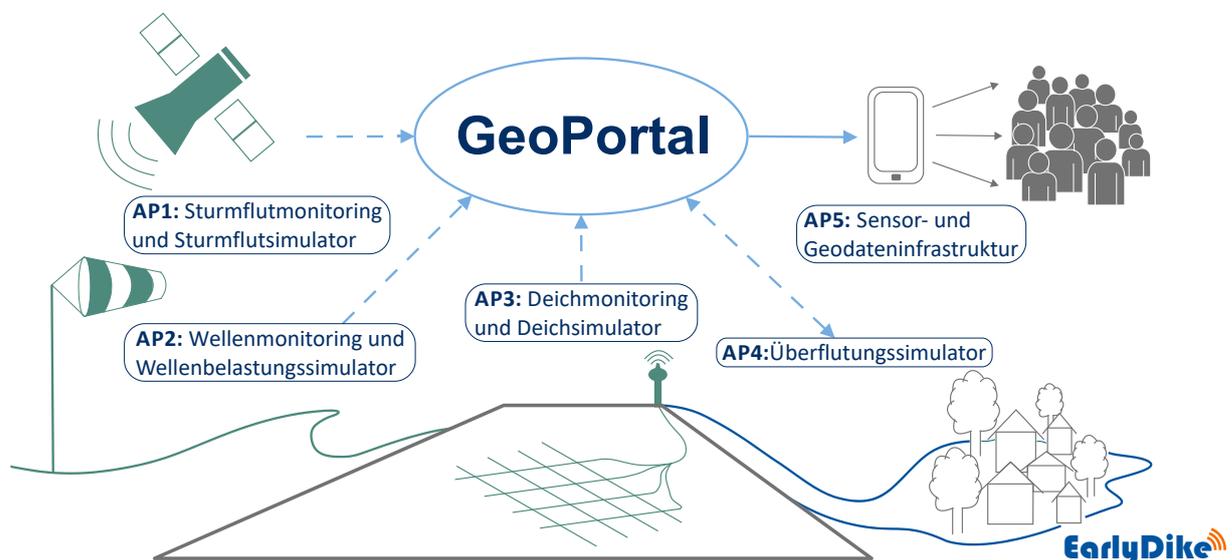


Abbildung 1: Struktur des Verbundprojekt *EarlyDike* mit allen behandelten Arbeitspaketen (AP).

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 Prielen und Wattflächen) räumliche Wasserstandsdifferenzen 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). 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 Modellaufbau 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 Windstaumodelle 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 Windstaumodelle 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 Wasserstandsvorhersage 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 Windstaumodelle 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 Nahezu-Echtzeit-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 Wassernwirtschaft 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 Sensorsignale 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

Frühwarnsysteme 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-Datensenken 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 Simulationenwerkzeuge 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 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.

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., Kortenhuis, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P., Zanuttigh, B., 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.