

EarlyDike — Sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem für Seedeiche

Peter Fröhle¹, Sebastian Niehüser², Norman Dreier¹, Verena Krebs³

¹ Institut für Wasserbau der Technischen Universität Hamburg

² Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), Universität Siegen

³ Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University

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.

Entwicklung einer Methodik zur Wasserstandsvorhersage entlang der gesamten deutschen Nordseeküste

Bestehende Frühwarnsysteme für den Küstenschutz in Deutschland basieren auf Wasserstandmessungen und -vorhersagen, die durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) (in Kooperation mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD)) zur Verfügung gestellt werden (<http://www.sturmflutwarnungen.de/>). Die Vorhersagen des Wasserstands werden derzeit punktuell für ausgewählte Pegelstandorte bereitgestellt. Dabei setzt sich das für die Nordsee verwendete operationelle Vorhersagesystem aus der Tidevorhersage, numerischen Wettervorhersagemodellen, einem Windstaumodell und dem Model Output Statistics (MOS) System zusammen. Für die spezifischen Pegelstandorte werden schließlich präzise und hochaufgelöste Wasserstandsvorhersagen für bis zu sechs Tage im Voraus bereitgestellt. Aus der punktuellen Wasserstandsvorhersage ergibt sich allerdings ein Defizit. Aus Wasserstandsaufzeichnungen und deren

Auswertungen ist bekannt, dass solche punktuellen Wasserstandsdaten nicht repräsentativ für ein größeres Gebiet, z. B. für die Deutsche Bucht oder auch kleinere geografische Einheiten, wie z. B. eine Hallig, sind. So können aus lokalen Effekten (z. B. nichtlineare Interaktionen, komplexe Bathymetrie mit Prielen und Wattflächen) räumliche 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. Durch die Kombination empirisch-statistischer und numerischer Modelle wurde am *Forschungsinstitut Wasser und Umwelt der Universität Siegen (fwu)* daher eine Methodik entwickelt, mit deren Hilfe sich die aktuell verfügbaren Punktdaten der Wasserstandsvorhersage auf die gesamte Küstenlinie (einschließlich Inseln und Halligen) hochaufgelöst (Stundenwerte, Punktabstand ~1km) übertragen lassen.

Entwicklung eines Seegangs- und Wellenbelastungssimulators für ein Frühwarnsystem für Seedeiche

Zur Vorhersage des Seegangs und der seegangsinduzierten Belastungen als Grundlage für das im Verbundprojekt entwickelte Frühwarnsystem wurden Schnittstellen zum Bezug operationeller Vorhersagedaten (Wind bzw. Wasserstand) der Behörden (DWD bzw. BSH) sowie projektbezogener Vorhersagedaten (Wasserstand der Universität Siegen) implementiert. Darüber hinaus wurden umfangreiche Langzeitvorhersagedaten (Wind und Wasserstand) sowie Messdaten zu Seegang, Strömungen und Wellenaufbau (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, in Kooperation zwischen dem *Institut für Wasserbau der TUHH* und dem LKN-SH, die „Messkette Hydrodynamik“ auf und in der Nähe der Insel Pellworm an der Nordseeküste in Betrieb genommen. Die Messkette dient der Erfassung der lokalen Seegangs- und Strömungsverhältnisse, des lokalen Wasserstands und des örtlichen Wellenaufbaus an einem Seedeich auf der Insel Pellworm. Die Messdaten bilden die Grundlage für die Vorhersage der lokalen Seegangsbedingungen und der seegangsinduzierten Belastungen im Nahezu-Echtzeitmodus sowie für das Monitoring von Seegang, Strömung und Wellenaufbau zum Zwecke der Validierung des entwickelten Vorhersagesystems.

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

Mit dem Seegangsvorhersagemodell wurden mehrere Hindcasts der Seegangsbedingungen in der Deutschen Bucht sowie im Deichvorfeld

während ausgewählter historischer Sturmflutereignisse (TILO 2007, XAVER 2013, BARBARA-AXEL 2016-2017) auf Basis von Vorhersagen des Windes sowie des lokalen Wasserstands zur Validierung des numerischen Vorhersagemodells im Langzeitvorhersage-Betriebsmodus durchgeführt.

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

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

Echtzeitmonitoring von Seedeichen und Erprobung von intelligenten Geotextilien

Zurzeit erfolgt die Überwachung von Seedeichen während sowie nach Sturmfluten vor allem auf Grundlage visueller Überprüfungen. Um jedoch gemäß dem Ziel des Projekts ein verbessertes Frühwarnsystem für Seedeiche zu entwickeln, ist ein Deichmonitoring erforderlich, mithilfe dessen kontinuierlich und möglichst entlang der gesamten Deichlinie gleichzeitig, Informationen über den Zustand der Deiche gewonnen werden können. Hierzu wurde ein sensorbasiertes Deichmonitoring entwickelt, welches flächendeckend eingesetzt werden kann und 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 in Kooperation zwischen dem *Institut für Textiltechnik (ITA)* und dem *Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der RWTH Aachen University* garnbasierte Sensoren in ein Geotextil integriert, die bei einem Einbau unterhalb der Außendichtung eines Seedeiches in der Lage sind, einen Anstieg der Sickerlinie innerhalb des Deichkörpers sowie eine Wasserinfiltration durch die Deckschicht des Deiches zuverlässig zu erkennen.

Dafür wurden Integrationskonzepte in bestehende textile Herstellungsverfahren für Geotextilien untersucht und verschiedene Füge-technologien für die Sensorfasern hinsichtlich der Verbundfestigkeit charakterisiert. Um ein Auslesen der Sensoren des intelligenten Geotextils zu ermöglichen, wurde eine Messschaltung und -kette entwickelt.

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

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

Das Verbundprojekt *EarlyDike* wurde vom 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 Landes- sowie Küstenschutzbehörden.