Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
RWTH AACHEN UNIVERSITY

EarlyDike - Sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem für Seedeiche

Schlussbericht nach BNBest-BMBF 98

Projektlaufzeit 06/2015 bis 05/2018

Förderkennzeichen 03G0847A - 03G0847C, 03G0848A

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf
Verena Krebs, M.Sc.
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Blankenbach
Dr.-Ing. Ralf Becker
Stefan Herle, M.Sc.
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Gries
Dr.-Ing. Till Quadflieg
Max Schwab, M.Sc.
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen
Sebastian Niehüser, M.Sc.
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Fröhle
Dipl.-Ing. Norman Dreier
Dr.-Ing. Rainer Lehfeldt
Alexander Mulckau, M.Sc.

Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme
Lehrstuhl für Textilmaschinenbau und Institut für Textiltechnik
RWTH Aachen University

Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Universität Siegen
Institut für Wasserbau, Technische Universität Hamburg
Bundesanstalt für Wasserbau

Aachen, im Februar 19 B2018.031

Vorwort

See- und Ästuardeiche zählen zu den wichtigsten Küstenschutzanlagen in Deutschland und ein Versagen der Bauwerke hat meist schwerwiegende Konsequenzen zur Folge. Überflutungen in niedrig gelegenen Küstengebieten forderten in den vergangenen Jahren weltweit eine hohe Anzahl an Menschenleben und verursachten große wirtschaftliche Schäden. Allein in Deutschland schützen Seedeiche mit einer Gesamtlänge von 1.200 km mehr als 2,4 Millionen Menschen in den Küstengebieten Niedersachsens, Schleswig-Holsteins, Bremens, Hamburgs und Mecklenburg-Vorpommerns. Ein frühzeitiges Erkennen von Gefahren und das rechtzeitige Verhindern eines möglichen Deichversagens sind demzufolge elementar, um einen zuverlässigen Küstenschutz zu ermöglichen.

Ziel des Forschungsvorhabens EarlyDike war die Entwicklung eines sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems für Seedeiche, welches mehrere Belastungsgrößen (z. B. Wasserstand, Wind und Wellen) sowie die Widerstandsfähigkeit des Bauwerks berücksichtigt. Am Beispiel von Seedeichen erfolgte der Aufbau eines GeoPortals, welches potentiellen Endnutzern Echtzeitdaten zum Zustand des Bauwerks und äußeren Belastungen zur Verfügung stellt.

Dieser Schlussbericht stellt die wesentlichen Erkenntnisse und Ergebnisse aus dem Verbundvorhaben EarlyDike zusammen und gibt einen Überblick über die im Rahmen des Projektes durchgeführten Arbeiten. Als Anhang zum formalen Teil, in dem die verkürzte Darstellung der Ergebnisse gemäß der in Anlage 2 zu Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98 vorgegebenen Struktur erfolgt, liegt der fachliche Abschlussbericht „EarlyDike - Sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem für Seedeiche“ bei, der für eine Veröffentlichung in der Schriftenreihe *Die Küste* - herausgegeben durch das *Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KfKI)* - vorgesehen ist. Hier findet sich eine detaillierte Darstellung der erfolgten Arbeiten. An geeigneter Stelle wird im formalen Teil auf diesen ausführlichen Fachbericht verwiesen.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 03G0847A, 03G0847B, 03G0847C und 03G0848A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

EarlyDike - Sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem für Seedeiche	
Förderkennzeichen: 03G0847A, 03G0847B, 03G0847C, 03G0848A	
Projektlaufzeit: 06/2015 – 05/2018	
PROJEKTPARTNER	
IWW | RWTH AACHEN UNIVERSITY	Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf
gia | RWTH AACHEN UNIVERSITY	Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme (gia) Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Blankenbach
ITA | RWTH AACHEN UNIVERSITY	Lehrstuhl für Textilmaschinenbau und Institut für Textiltechnik (ITA) Univ.-Prof. Prof. Dr.-Ing. Thomas Gries
WASSERBAU River and Coastal Engineering TUHH	Institut für Wasserbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH-WB) Prof. Dr.- Ing. Peter Fröhle
fwu | UNIVERSITÄT SIEGEN	Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnen- und Küstenwasserbau Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Dr.-Ing. Rainer Lehfeldt

Anschriften der Projektpartner:

Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University
Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf (Koordination)
Mies-van-der-Rohe-Str. 17
D-52056 Aachen
E-Mail: schuettrumpf@iww.rwth-aachen.de
Tel.: 0241-8025262 ; Fax.: 0241-8022348
Internet: www.iww.rwth-aachen.de

Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme der RWTH Aachen University

Prof. Dr.-Ing. Jörg Blankenbach

Mies-van-der-Rohe-Str. 1; 52074 Aachen

E-Mail: blankenbach@gia.rwth-aachen.de

Tel.: 0241-8095300 ; Fax.: 0241-8092142

Internet: www.gia.rwth-aachen.de

Lehrstuhl für Textilmaschinenbau und Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries

Otto-Blumenthal-Str. 1

52074 Aachen

E-Mail: kontakt@ita.rwth-aachen.de

Tel.: 0241-8023400 ; Fax.: 0241-8022422

Internet: www.ita.rwth-aachen.de

Institut für Wasserbau der Technischen Universität Hamburg

Prof. Dr.-Ing. Peter Fröhle

Denickestr. 22

21073 Hamburg

E-Mail: froehle@tuhh.de

Tel.: 040-428783463 ; Fax.: 040-428782802

Internet: www.tuhh.de/wb/

Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Universität Siegen

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen

Paul-Bonatz-Str. 9-11

57076 Siegen

E-Mail: juergen.jensen@uni-siegen.de

Tel.: 0271-7402172 ; Fax.: 0271-7402722

Internet: www.uni-siegen.de/fb10/fwu/wb/

Bundesanstalt für Wasserbau

Dr.-Ing. Rainer Lehfeldt

Wedeler Landstr. 157

22559 Hamburg

E-Mail: rainer.lehfeldt@ baw.de

Tel.: 040-81908312 ; Fax.: 040-81908373

Internet: www.baw.de

Für die Kapitel des Schlussberichts verantwortliche Projektpartner:

Schlussbericht (formaler Teil)	Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen University Autoren: H. Schüttrumpf; V. Krebs (in Zusammenarbeit mit allen anderen Projektpartnern)

Anlage (Fachbericht):

Teil 1	**EarlyDike - Entwicklung eines sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems für Seedeiche** Alle Projektpartner Autoren: R. Becker, J. Blankenbach, N. Dreier, P. Fröhle, T. Gries, S. Herle, J. Jensen, V. Krebs, R. Lehfeldt, A. Mulckau, S. Niehüser, T. Quadflieg, H. Schüttrumpf, M. Schwab
Teil 2	**Entwicklung einer Methodik zur Wasserstandsvorhersage entlang der gesamten deutschen Nordseeküste** Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), Universität Siegen Autoren: S. Niehüser, S. Dangendorf, A. Arns, J. Jensen
Teil 3	**Prä-Operationelle Vorhersage von Seegang und Wellenauflauf an Seedeichen in der deutschen Bucht** Institut für Wasserbau der Technischen Universität Hamburg Autoren: N. Dreier, P. Fröhle
Teil 4	**Entwicklung eines sensorbasierten Deichmonitorings** Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen University Autoren: V. Krebs, H. Schüttrumpf
Teil 5	**Intelligente Geotextilien für das Echtzeit-Deichmonitoring** Institut für Textiltechnik, RWTH Aachen University Autoren: M. Schwab, T. Quadflieg, T. Gries,
Teil 6	**Sensor- & Geodateninfrastruktur für ein sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem für Seedeiche** Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme, RWTH Aachen University, Bundesanstalt für Wasserbau Autoren: S. Herle, R. Becker, J. Blankenbach, A. Mulckau, R. Lehfeldt

Inhalt

Vorwort iii
1 Kurze Darstellung (Ziele und Voraussetzungen) 1
1.1 Aufgabenstellung 1
1.2 Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens 1
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 4
1.4 Stand der Wissenschaft und Technik 7
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 7
2 Eingehende Darstellung (Arbeitsschritte und Ergebnisse) 9
2.1 Mittelverwendung und Ergebnisse im Einzelnen 9
2.1.1 Sturmflutmonitoring und Sturmflutsimulator 9
2.1.2 Wellenmonitoring und Wellenbelastungssimulator 10
2.1.3 Deichmonitoring und Deichsimulator 11
2.1.4 Sensor- und Geodateninfrastruktur 12
2.1.5 Einbindung in die MDI-DE 13
2.1.6 Studentische Abschlussarbeiten 14
2.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 15
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 15
2.4 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse 16
2.5 Relevante Forschungsergebnisse Dritter 16
2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen 16

1 Kurze Darstellung (Ziele und Voraussetzungen)

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Verbundvorhabens EarlyDike ist es, ein sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem für Seedeiche zu entwickeln, welches mehrere Belastungsgrößen (z. B. Wasserstand, Wind und Wellen) sowie die Widerstandsfähigkeit des Bauwerks selbst berücksichtigt. Am Beispiel von Seedeichen erfolgt 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 soll unter Einbeziehung aller relevanten 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 ein GeoPortal direkt zur Verfügung gestellt werden.

1.2 Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens

In Deutschland zählen Seedeiche zu den wichtigsten Küstenschutzanlagen (SCHÜTTRUMPF 2008 und 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 und NLWKN 2007).

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.

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. Im Folgenden werden die Erfahrungen, die Ausstattung und das Wissen der beteiligten Institutionen beschrieben, woraus hervorgeht, warum das gewählte Konsortium geeignet war, das Vorhaben durchzuführen.

Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu)

Das 1994 gegründete fwu im Fachbereich Bauingenieurwesen der Universität Siegen besteht heute aus den drei Lehrstühlen „Abwasser- und Abfalltechnik“, „Hydromechanik, Binnen- und Küstenwasserbau“ sowie „Wasserwirtschaftliche Risikobewertung und Klimafolgenforschung“. Das Ziel der Abteilung „Hydromechanik, Binnen- und Küstenwasserbau“, geleitet von Professor Jensen, ist es, die Kompetenz der verschiedenen Fachgebiete Binnenwasserbau, Küstenwasserbau, Hochwasserschutzkonzepte, statistische Analysen und Wasserkraft zu vereinen und vorhandene Ressourcen für fächerübergreifende Fragestellungen im Bereich Wasser und Umwelt in Forschung und Praxis effektiv zu nutzen. Dies wird unter anderem durch die enge Zusammenarbeit mit zahlreichen und nationalen Kooperationspartnern unterstützt. Im Bereich der Klimafolgenforschung werden verschiedene Vorhaben zum Thema „Wasserstandsentwicklung an der Deutschen Nord- und Ostseeküste“ sowie zum Thema „Hochwasserschutz“ sowohl im Binnen- als auch im Küstenbereich bearbeitet. Die Forschung der Abteilung „Hydromechanik, Binnen- und Küstenwasserbau“ ist dabei von der Historie auf hydrologische und wasserbauliche Systemanalysen sowie Flussgebiets- und Küstenzonenmanagement gerichtet. Angewendet werden dabei sowohl Techniken des klassischen Wasserbaus bzw. Gewässerausbaus als auch numerische und physikalische Modellverfahren der Hydraulik und Hydrologie.

Institut für Wasserbau der Technischen Universität Hamburg (TUHH WB)

Das (TUHH-WB) hat weitreichende Forschungskompetenz im Bereich des Küsten- und Binnenwasserbaus aufgebaut und ist in verschiedenen nationalen sowie internationalen Forschungsprojekten, wie z.B. PEARL, KLIMGZUG-Nord, XtremRisK, CORFU, SMARTeST, SAWA und MARE, aktiv und zum Teil federführend beteiligt. Mit der Übernahme der Professur für Wasserbau an der TUHH durch Prof. Fröhle wurden zusätzliche wasserbauliche Kenntnisse mit starkem Fokus auf das Küsteningenieurwesen in das Institut eingebracht. Die Erfahrungen von Prof. Fröhle sind in einer Reihe von Forschungsprojekten dokumentiert u.a. mit direkten Bezug zur Seegangsmodellierung, -analyse und –messung mit Fokus auf die deutsche Ostseeküste, z.B. HoRisK, RAdOst und MUSTOK/SEBOK sowie mit Bezug zur deutschen Nordseeküste, z.B. Seegangsbedingungen für die Wattseiten der ostfriesischen Inseln und Optimierung des Küstenschutzes für die Insel Sylt oder HoRisK.

TUHH-WB entwickelt und betreibt numerische Simulationssysteme (z. B. KALYPSO) für die integrierte numerische Simulation hydrologischer und hydrodynamischer Prozesse und hat weitreichende Erfahrungen mit der numerischen Simulation von Seegang und anderen hydrodynamischen Prozessen, z.B. der Bestimmung des Bemessungsseegangs für Hoch-wasserschutzdeiche der schleswig-holsteinischen Ostseeküste und Seegangssimulationen im Bereich der niedersächsischen Wattenmeerküste

(z.B. Ergebnisse aus dem MUSTOK – Projekt (Schlamkow, C. & Fröhle, P. 2009) oder Ergebnisse des RAdOst – Projekts (Dreier, N., Schlamkow, C., Fröhle, P. & Salecker, D. 2013).

Weiterhin besitzt TUHH-WB Erfahrungen in der Messdatenerfassung und betreibt zu Messzwecken ein Forschungsschiff, welches mit Seitensichtssonar (side scan sonar) und einem akustischen Strömungsmessgerät (current profiler) ausgestattet ist und besitzt eine Waverider-Seegangsmessboje der Firma Datawell. Letztere wird beispielsweise in einem Projekt mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde dazu eingesetzt, verschiedene Messverfahren des lokalen Seegangs in der Nähe von Borkum zu vergleichen (Ruetten et al., 2013). Derzeit entwickelt TUHH-WB kleinere Seegangsmessbojen für Flachwasserbereiche und Wattgebiete, welche sich noch in der Erprobungsphase befinden.

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University (IWW)

Forschungsschwerpunkte des IWW liegen in den Bereichen Grundwasser, Hochwasser/Risikoanalyse, Küsten und Ästuare, Morphodynamik und konstruktiver Wasserbau. Zu den angewandten Methoden zählen In-situ Messungen, physikalische Modellversuche und numerische Simulationen. Das Institut ist mit seinen knapp 40 Mitarbeitern in viele internationale und interdisziplinäre Projekte, eingebunden, dazu gehören beispielsweise im Bereich des Küsteningenieurwesens Projekte wie BMBF-EcoDike, BMBF-LivingCoastLab, BMBF-Stencil, BMBF-ProDune und weitere. Prof. Schüttrumpf arbeitet seit mehr als 20 Jahren im Bereich des Küsteningenieurwesens. In der 2013 eröffneten Versuchshalle bieten sich dem Institut auf einer Fläche von 2.250 m² exzellente Möglichkeiten, großmaßstäbliche Modellversuche durchzuführen.

Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University

Das ITA deckt als Alleinstellungsmerkmal die durchgängige textile Prozesskette ab. Vom Rohstoff bis zum Bauteil werden je nach Anwendung Technologiefelder erforscht. Derzeit sind am Institut 100 wissenschaftliche Mitarbeiter und 60 Servicekräfte, sowie 180 studentische Hilfskräfte tätig. Im Technikum stehen 170 Maschinen von der einfachen Doppelsteppstichnähmaschine bis hin zur industriellen 15 m Multiaxialgelegemaschine. 95% des jährlichen Budgets besteht aus öffentlich- und industriegeförderten Forschungsprojekten. Ein besonderer Schwerpunkt des Instituts liegt in der interdisziplinären Zusammenarbeit mit anderen Fachgebieten. So wurden im Bereich der Faserverbundwerkstoffe, des textilbewehrten Betons im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 532, herausragende Ergebnisse zur Verwendung von Textilien im Bauingenieurwesen erzielt. Im Bereich der Medizintextilien und Biomaterialien arbeitet das ITA in enger Kooperation mit der biologischen und medizinischen Fakultät zusammen.

Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme der RWTH Aachen University (gia)

Das gia hat langjährige Erfahrung in der Verarbeitung von Geodaten und Entwicklung von Software für raumbezogene Fragestellungen z. B. zur Haltung bzw. Fortführung von Katasterdaten. Diverse Forschungsprojekte beinhalten die Modellierung und das Management heterogener spatio-temporaler Daten in Geodatenbanksystemen sowie den Aufbau von Geodateninfrastrukturen und (verteilten) Geoinformationssystemen. Weitere aktuelle Forschungsprojekte beschäftigen sich mit Indoor-Lokalisierungssystemen auf der Basis verschiedener Technologien (z. B. breitbandiger Funksysteme, künstlich erzeugter Magnetfelder oder Smartphone-Sensorik) sowie virtuellen Bauwerksmodellen (Ci-

tyGML, BIM). Automatisierte photogrammetrische Auswertungen von Bild- und Laserscannerdaten dienen der digitalen Rekonstruktion von Bauwerken und der Ableitung digitaler Bauwerksmodelle. Des Weiteren werden Geosensornetzwerke und ingenieurgeodätische Messverfahren zur Datenerfassung entwickelt und verwendet.

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)

Die BAW ist die technisch-wissenschaftliche Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Sie ist der zentrale Dienstleister für die Beratung und Unterstützung des Ministeriums und der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) im Rahmen ihrer verkehrswasserbaulichen Aufgaben, insbesondere deren bauaufsichtliche Verantwortung dafür, dass alle Anlagen und Einrichtungen der Bundeswasserstraßen den Anforderungen von Sicherheit und Ordnung genügen.

Die BAW trägt mit ihrer Arbeit in den Dienststellen Karlsruhe und Hamburg wesentlich dazu bei, dass die Wasserstraßen in Deutschland den wachsenden technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Anforderungen gerecht werden. Sie verfügt dazu über eine umfassende Kompetenz und Erfahrung auf dem Gebiet des Verkehrswasserbaus und ist maßgeblich an der Weiterentwicklung dieser Disziplin beteiligt, auch in Forschungsprojekten verschiedenster Art.

Die BAW in Hamburg beherbergt die Geschäftsstelle und die Bibliothek des 1973 als gemeinsame Einrichtung des Bundes und der deutschen Küstenländer gegründeten Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI). Seine Projekte werden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (*BMBF*) finanziert. Die Homepage dieser Bund-Länder-Vereinbarung stellt eine Plattform für Behörden und Forschungseinrichtungen aus der deutschen Küstenzone bereit, die eine Recherche nach Informationen und Daten aus Küsten-Projekten mithilfe von Metadaten anbietet.

Die BAW Hamburg stellt zusammen mit dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) die Leitung der Marinen Daten-Infrastruktur für Deutschland (MDI-DE). Deren Aufbau wurde 2010 - 2013 vom BMBF gefördert und von insgesamt 11 Bundes- und Landesbehörden durchgeführt. Seit April 2014 wird die MDI-DE dauerhaft unter dem Dach der Verwaltungsvereinbarung über die Kooperation bei der Konzeption und Entwicklung von Software für Umweltinformationssysteme (VKoopUIS) geführt und weiterentwickelt. Mithilfe von Metadaten und Webservices werden die Suche und Nutzung von Daten und Informationen aus dem Küsteningenieurwesen, dem Küstengewässerschutz, dem Meeresumweltschutz und dem Meeresnaturschutz über ein gemeinsames Internetportal unterstützt. Die MDI-DE hilft den Behörden in der Küstenzone bei der Erfüllung ihrer Berichtspflichten für EU-Rahmenrichtlinien wie die Meeresstrategie (MSRL) und die gemeinsame Geodateninfrastruktur in Europa (INSPIRE).

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt gliederte sich in fünf Teilprojekte bzw. Arbeitspakete. 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 (fwu) 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).

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.

Am *Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft 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 definiert 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.

Am *Geodätischen Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme der RWTH Aachen University (gia)* wurde eine Sensor- und Geodateninfrastruktur (Sensor and Spatial Data Infrastructure, SSDI) als Schnittstelle zwischen existierenden räumlich-zeitlichen Daten und Echtzeitmessungen durch Geosensornetze entwickelt. Als zentraler Zugang zu jedweder Information wurde ein Webportal (GeoPortal) aufgebaut, welches sowohl den direkten Zugriff auf die in Echtzeit erfassten Sensordaten als auch auf ergänzende Daten Dritter über das World Wide Web 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.

Im Rahmen des Projekts wurden zur Erreichung der Ziele sowohl regelmäßige Projekttreffen mit allen Projektpartnern als auch ein Austausch mit der Praxis und anderen Forschungsinstitutionen durchge-

führt. Alle im Rahmen des EarlyDike-Projekts durchgeführten Treffen sind in der folgenden Tabelle aufgeführt. Zusätzlich fanden Arbeitstreffen der RWTH-Institute (AP 3) in häufigen und kurzen Zeitabständen statt, welche nicht aufgeführt sind. Diese Treffen dienten der detaillierten Planung, Anpassung und Optimierung der Messvliese sowie der entwickelten Messwerterfassung.

Tabelle 1: Projekttreffen im Rahmen des EarlyDike-Projekts

Projekttermin und Ort	Inhalte des Treffens (Kurzzusammenfassung)	Teilnehmer
03. und 04.07.2015, Aachen	Kick-Off Statusseminar EarlyDike Vorstellung aller Partner und Arbeitspakete, Absprachen zu Formalitäten, Arbeitsvorgehen, Veröffentlichungen, etc.	fwu, TUHH, IWW, ITA, gia, BAW
19.10.2015, Hannover	Kick-Off Statusseminar Frühwarnsysteme Vorstellung des Projekts durch Holger Schüttrumpf	TUHH, IWW, fwu, ITA
14. und 15. 01. 2016, Siegen	2. Projekttreffen EarlyDike Vorstellung der Recherchen, Datenaufbereitung, Vorbereitungen der Modellversuche, Absprachen zum Datenaustausch	fwu, IWW, ITA, gia, BAW
05. - 07.09.2016, Heide und Pellworm	3. Projekttreffen EarlyDike Bericht über den aktuellen Stand der Teilprojekte, Besichtigung des durch die TUHH betriebenen Wellenauflaufpegels auf Pellworm, Austausch mit Praxispartnern	fwu, TUHH, IWW, ITA, gia, BAW, Praxispartner
19. und 20.10.2016, Bonn	2. Statusseminar Frühwarnsysteme Vorstellung des Projekts durch Jörg Blankenbach	TUHH, IWW, ITA, gia
19.12.2016, Siegen	„EarlyDike meets MDI-DE“: Absprachen zu Datenaustausch und -verwaltung	BAW, gia, fwu
06.03.2017, Delft	„EarlyDike meets DELTARES“: Vorstellung des EarlyDike-Projekts (speziell AP 3 und 5) und Austausch zu Frühwarnsystemen und Sensoreinsatz in Deichen in den Niederlanden	IWW, gia, Deltares
23.03.2017, Aachen	4. Projekttreffen EarlyDike Bericht über den aktuellen Stand der Teilprojekte, Absprachen zum Zusammenspiel der Teilarbeitspakete im GeoPortal	fwu, TUHH, IWW, ITA, gia, BAW
05. und 06. 09. 2017	5. Projekttreffen EarlyDike Bericht über den aktuellen Stand der Teilprojekte, Austausch mit Praxispartnern	fwu, TUHH, IWW, ITA, gia, BAW, Praxispartner
27. und 28. 09.2017, Dresden	3. Statusseminar Frühwarnsysteme Vorstellung des Projekts durch Holger Schüttrumpf, Jürgen Jensen, Norman Dreier, Till Quadflieg und Ralf Becker	fwu, TUHH, IWW, ITA, gia, BAW
16.02.2018, Aachen	6. Projekttreffen EarlyDike Bericht über den aktuellen Stand der Teilprojekte, Identifikation der noch zu erledigenden Arbeiten für den verbleibenden Projektzeitraum	fwu, TUHH, IWW, ITA, gia, BAW

Projekttermin und Ort	Inhalte des Treffens (Kurzzusammenfassung)	Teilnehmer
08. und 09.05.2018, Hannover	Abschlussseminar Frühwarnsysteme Vorstellung des Projekts durch Holger Schüttrumpf, Jürgen Jensen, Norman Dreier, Verena Krebs, Christian Grimm und Stefan Herle	fwu, TUHH, IWW, ITA, gia, BAW
04.07.2018, Aachen	Abschlusstreffen EarlyDike Absprachen zur Fertigstellung der Schlussberichte, geplanter Veröffentlichungen und der Möglichkeiten einer Folgefinanzierung zur Validierung des entwickelten Systems	fwu, TUHH, IWW, ITA, gia

1.4 Stand der Wissenschaft und Technik

Der wissenschaftliche und technische Stand, an den angeknüpft wurde, ist in den angehängten Fachberichten, den Zwischenberichten I-III der Projektpartner und in den aus dem Projekt hervorgegangenen Veröffentlichungen detailliert dargestellt.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Grundlage für eine erfolgreiche Projektdurchführung war eine enge Zusammenarbeit aller am Vorhaben beteiligter Verbundpartner. Hierzu kamen neben der Durchführung der halbjährlichen Projekttreffen eine Vielzahl von Arbeitstreffen innerhalb der einzelnen Arbeitspakete. Neben den planmäßigen projektinternen Treffen aller Verbundpartner fanden in der Projektlaufzeit zwei Projekttreffen statt, zu dem auch Vertreter aus der Praxis eingeladen waren, in einer Beraterfunktion dem unmittelbaren Austausch zwischen Wissenschaft und Praxis beizutragen. Diese Möglichkeit nahmen Vertreter namhafter Geotextilhersteller sowie Angehörige der Küstenschutzbehörden wahr.

Im Rahmen von AP 1, AP 2 und AP 5 konnte nur durch die enge Zusammenarbeit zwischen dem *fwu*, dem *TUHH WB*, dem *gia* und der *BAW* eine automatische Übertragung der generierten Vorhersage-Datensätze in das aktuelle GeoPortal und die Marine Dateninfrastruktur Deutschland (MDI-DE) erfolgreich realisiert werden.

In enger Zusammenarbeit zwischen dem Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN-SH), Husum sowie dem Institut für Wasserbau der TUHH erfolgte seit 2016 die Einrichtung und der Betrieb der Messkette Hydrodynamik zur Erfassung hydrodynamischer Größen beginnend von der Norderhever bis an den Seedeich Untjehörn auf der Insel Pellworm. Darüber hinaus fand ein intensiver Datenaustausch zwischen LKN-SH sowie der TUHH, zu historischen und aktuellen Messungen im Bereich der Messkette, zur Validierung der entwickelten Vorhersagesysteme für den Seegang und die seegangsinduzierten Belastungen am Deich, statt. In halbjährlichen Arbeitsgruppentreffen beim LKN-SH in Husum wurde der Stand der Arbeiten an der Messkette dargestellt sowie die weitere Vorgehensweise abgesprochen und in Protokollen festgehalten.

Für die Durchführung des Teilprojektes AP 3 war eine gute Kooperation zwischen dem *IWW*, dem *ITA* und dem *gia* erforderlich. Die Planung, Konstruktion und Durchführung der physikalischen Modellversuche, die Entwicklung der untersuchten Messvliese sowie die Erfassung und Übertragung der gewonnenen Messdaten erfolgte in enger Absprache und Zusammenarbeit. Ferner wurden im Rahmen des AP 3

von Textilherstellern Geovlies-Muster für die Herstellung der Messvliese kostenlos zur Verfügung gestellt. Die Geotextilien wurden von der Fa. Naue GmbH & Co. KG, Espelkamp-Fiestel (vertreten durch Herrn Hannes Brune) und der Fa. HUESKER Synthetic GmbH, Gescher (vertreten durch Frau Dr.-Ing. Laura Carbone) bereitgestellt. Im Rahmen der Texitlintegration von Carbonfasern in das Geotextil mittels Stickverfahren wurden Stickversuche auf einer Großanlage beim Stickmaschinenhersteller ZSK Stickmaschinen GmbH, Krefeld durchgeführt. Frau Melanie Hörr war bei der Auslegung als auch der Umsetzung der Stickversuche beteiligt.

Weiterhin fand ein Austausch mit Herrn Daniel Bachmann und Herrn Andre Koelewijn (Deltares, NL) über Erfahrungen mit der Verwendung von Sensoren in Deichen in den Niederlanden statt.

2 Eingehende Darstellung (Arbeitsschritte und Ergebnisse)

2.1 Mittelverwendung und Ergebnisse im Einzelnen

Für eine ausführliche Darstellung der im einzelnen erlangten Ergebnisse sei auf den detaillierten Fachbericht im Anhang verwiesen. Im Folgenden findet sich eine stark verkürzte Darstellung der erlangten Ergebnisse.

2.1.1 Sturmflutmonitoring und Sturmflutsimulator

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 (MÜLLER-NAVARRA ET AL., 2012). Aus der punktuellen Wasserstandsvorhersage ergibt sich allerdings ein Defizit. Aus Wasserstandsaufzeichnungen und deren Auswertungen ist bekannt, dass solche punktuellen Wasserstandsinformationen 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 Punktinformationen der Wasserstandsvorhersage auf die gesamte Küstenlinie (einschließlich Inseln und Halligen) hochaufgelöst (Stundenwerte, Punkabstand ~1km) 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, dass 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 stellten 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 (Gezeitensynthese 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 & 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.

2.1.2 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.

2.1.3 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 Fügetechnologien 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 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. 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.

2.1.4 Sensor- und Geodateninfrastruktur

Frühwarnsystem dienen dazu, aufkommende Gefahren frühzeitig zu erkennen und Betroffene (Bürger, Behörden, Einsatzkräfte) schnellstmöglich über Gefährdungen zu informieren. Die Anforderungen an ein derartiges System 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 Geodätische 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 Simulationswerkzeuge integriert.

2.1.5 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 Verwaltungs¬verein¬barung zusammen¬geschlossen, 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 Küsten¬ingenieurwesen, dem Küsten¬gewäs-serschutz, dem Meeres¬umwelt¬schutz und dem Meeresnatur¬schutz. Sie unterstützt gemäß INSPIRE deren Nut¬zung durch Internetdienste und bildet auch eine Plattform zur Kommunikation von Forschungs¬ergebnissen aus den genannten Themengebieten, die amt¬liche 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-Informations-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 Umwelt-informations- 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.

2.1.6 Studentische Abschlussarbeiten

Nachfolgende themenbasierte studentische Abschlussarbeiten wurden im Rahmen des Projekts bearbeitet:

2018

- HAMMANN, S. (2018): *Kopplung von IoT-Dashboards mit WebGIS-Funktionalitäten zur Visualisierung und Analyse von Echtzeit (Geo)Daten*, Masterarbeit am gia
- MALIK, N. (2018): *Ermittlung von Seegangsparametern aus Druckmessungen*, Bachelorarbeit an der TUHH
- MAAß, L. (2018): *Konzeptentwicklung für die Dehnungsmessung in Deichen zur Frühwarnung bei Hochwasserereignissen*, Bachelorarbeit am ITA
- PETERSEN, M. (2018): *Analyse des Wellenauflaufes an Seedeichen mit einem Stufenpegel basierend auf Druckmesssonden*, Bachelorarbeit an der TUHH
- REINBERG, M. (2018): *Echtzeitdaten in Desktop-GIS-Anwendungen: Integration von raumbezogenen IoT-Datenströmen in QGIS*, Bachelorarbeit am gia
- SEEMANN, A. (2018): *Analyse und Bewertung des Wellenauflaufs an einem Seedeich während Sturmfluten auf Grundlage von Vorhersagen der Windverhältnisse sowie des lokalen Wasserstands*, Masterarbeit an der TUHH
- SUDNIK, A. (IN BEARBEITUNG): *Analyse und Bewertung des Wellenauflaufes an einem Seedeich basierend auf einem Stufenpegel mit unterschiedlichen Messprinzipien*, Projektarbeit an der TUHH
- THIEL, J. (2018): *Prüfung der Verwendbarkeit einer bestehenden Wind-Wellen-Korrelation für die Nordseeinsel Sylt zur Seegangsnachhersage 1992-2015*, Projektarbeit an der TUHH

2017

- GOOS, F. (2017): *Qualitative Bewertung einer Wind-Wellen-Korrelation für die Nordseeinsel Sylt*, Bachelorarbeit an der TUHH

- GROßMANN, F. (2017): *Concepts of Intrusive and Remote Sensing in Dike Monitoring*, Studienarbeit am IWW
- GROßMANN, F. (2017): *Entwicklung einer Auswertemethode zur Interpretation von Sensordaten als Bestandteil eines Frühwarnsystems für Seedeiche*, Bachelorarbeit am IWW
- KRICHEL, C. (2017): *Lasttest eines GeoMQTT-Brokers im Vergleich zu gängigen MQTT-Brokern,* Bachelorarbeit am gia
- SEEMANN, A. (2017): *Vergleich der Auswertung von Wellen basierend auf ADCP-Messungen am Strand von Pellworm*, Projektarbeit an der TUHH
- STOCKBURGER, M. (2017): *Entwicklung einer Programmroutine zur Auswertung von Wellenauflaufmessungen an einem Seedeich auf der Grundlage einer vorhandenen Auswertemethode*, Projektarbeit an der TUHH

2016

- ELSEMANN, N. (2016): *Kleinmaßstäbliche Untersuchungen zum Einsatz von intelligenten Geotextilien in Deichen,* Masterarbeit am IWW
- HINRICHS, S. (2016): *Analyse und Bewertung von Sturmflutseegang im Bereich Weststrand Pellworm auf der Grundlage von Messungen in der Natur,* Bachelorarbeit an der TUHH
- JÄNICKE, L. (2016): *Untersuchung zu vertikalen Landbewegungen im Rahmen der Abschätzung des absoluten mittleren Meeresspiegelanstiegs an der deutschen Nordseeküste*, Studienarbeit am fwu
- JANSKI, J. (2016): *Wirtschaftlichkeitsuntersuchung von faserbasierten Sensoren als Frühwarnsystem zum Schutz vor Hochwasser an einem idealisierten Deich,* Bachelorarbeit am IWW/ITA
- MELL, K. (2016): *Analyse des Wellenauflaufs an einem Seedeich an der deutschen Nordseeküste,* Projektarbeit an der TUHH
- RAUTENBACH, K. (2016): *Untersuchung der Sickerprozesse in einem kleinmaßstäblichen Sanddeich unter Verwendung bildverarbeitender Software,* Bachelorarbeit am IWW
- RECKER, J. (2016): *EarlyDike – Vergleich des innovativen Frühwarnsystems mit konventionellen Monitoringsystemen,* Bachelorarbeit am IWW

2015

- HABERSTROH, C. (2015): *Entwicklung eines Versuchstands zum Test von intelligenten Geotextilien in Deichen,* Bachelorarbeit am IWW
- ORTMANN, I. (2015): I*ntelligente Geotextilien – aktueller Stand der Entwicklung,* Studienarbeit am IWW
- ORTMANN, I. (2015): I*ntelligente Geotextilien – aktueller Stand der Entwicklung,* Studienarbeit am IWW

2.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis wird für jedes Vorhaben separat übermittelt.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Forschungsarbeiten im Verbundprojekt EarlyDike sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie der im Projektantrag formulierten Planung entsprachen und alle wesentlichen im Arbeitsplan formulierten Aufgaben erfolgreich bearbeitet wurden.

Wie im Anhang des Schlussberichtes (Fachbericht) und im zahlenmäßigen Nachweis aufgeschlüsselt, wurden die Arbeiten und die finanziellen Mittel entsprechend der Arbeitspakete und an den im Verlauf des Projektes erhaltenen Ergebnissen ausgerichtet.

2.4 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse des EarlyDike-Projektes wurden und werden auf Konferenzen und in Veröffentlichungen dargestellt. Die genaue Auflistung der Veröffentlichungen kann Kapitel 2.6 entnommen werden.

Die Verwertbarkeit der Ergebnisse ist in vollem Umfang gegeben. Der Nutzen für die potentiellen Anwendergruppen speziell in den Regionen der deutschen Nord- und Ostseeküste wird hoch angesehen. Von den entwickelten Methoden und den gewonnenen Ergebnissen profitieren insbesondere Institutionen und Organisationen des Küstenschutzes sowie des Zivil- bzw. Bevölkerungschutzes und des Katastrophenmanagements wie z. B. das Havariekommando und das technische Hilfswerk (THW). Durch die enge Kooperation der beteiligten wissenschaftlichen Institutionen und staatlicher Behörden (DWD und BSH) sowie Küstenschutzbehörden (LKN-SH und NLWKN) sowie der Einbindung lokaler Gruppen und Ansprechpartner ist gewährleistet, dass die Untersuchungen und Ergebnisse Bezug zu den relevanten regionalen Problemen haben. Darüber hinaus erfolgt die Einbindung beispielhafter Projektergebnisse in der Marinen Dateninfrastruktur Deutschland (MDI-DE) und steht somit zukünftigen potentiellen Nutzern als „Demonstrator“ zur Verfügung. Weitere Details zu den jeweiligen Arbeitspaketen sind in den entsprechenden Erfolgskontrollberichten zu finden.

Ebenso stellt sich die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit des Projektes äußerst aussichtsreich dar. Die Erkenntnisse können in weiteren Forschungsprojekten genutzt und weiterentwickelt werden. Das bestehende Konsortium beabsichtigt hierzu die Beantragung von Folgeprojekten, um das bislang entwickelte System weiter auszubauen und eine Validierungsphase durchzuführen.

2.5 Relevante Forschungsergebnisse Dritter

Im Zeitraum des EarlyDike-Projektes wurden nach Kenntnis der Forschergruppe keine Projekte mit ähnlichem Inhalt an anderen Forschungseinrichtungen bearbeitet bzw. sind deren Erkenntnisse in Form von Tagungsbeiträgen oder Fachartikeln bekannt geworden.

2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Für den fachlichen Schlussbericht (s. Anlage) wird eine Veröffentlichung in *Die Küste*, eine Schriftenreihe herausgegeben durch das *Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KfKI),* angestrebt. Hierzu werden die Manuskripte nach Übersendung des Schlussberichts eingereicht und durchlaufen dann einen Begutachtungsprozess. Darüber hinaus wurden Teilergebnisse des EarlyDike-Projekts bereits zahlreich in Fachzeitschriften veröffentlicht und auf Konferenzen vorgestellt. Eine Übersicht hierzu findet sich im Folgenden.

Die folgenden Publikationen wurden in nationalen und internationalen Zeitschriften veröffentlicht:

2018

BECKER, R.; HERLE, S.; BLANKENBACH, J.: *Interoperable Sensor- und Dateninfrastruktur für das Echtzeitmonitoring von Wasserbauwerken.* – In: D³ - Deckwerke, Deiche und Dämme: 48. Internationales Wasserbau-Symposium Aachen 2018; 18. und 19. Januar 2018.

DREIER, N.; FRÖHLE, P.: Operational wave forecast in the German Bight as part of a sensor- and risk based early warning system. *In:* Shim, J.-S.; Chun, I., and Lim, H.-S. (eds.). *Proc. of 15th International Coastal Symposium (ICS), Busan, Republic of Korea, May 13-18, 2018*, Special Issue No. 85. Coconut Creek (Florida) (Busan, Republic of Korea).

DREIER, N.; FRÖHLE, P. (IN PRESS): Now- and Forecast of Waves and Wave Run-up on Coastal Dikes as Part of an Operational Early Warning System for the German North Sea Coast. *Proc. of 9th Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering, Tainan, Taiwan R.O.C., November 11-17, 2018.*

HERLE, S.; BECKER, R.; BLANKENBACH, J.: *Neue Möglichkeiten des IoT und Sensor Webs zum Echt-zeitmonitoring von Wasserbauwerken am Beispiel einer Sensor- und Geodateninfrastruktur für Seedeiche.* - In: Tagungsband XI. Mittweidaer Talsperrentag 2018.

HERLE, S.; BECKER, R.; BLANKENBACH, J.: *IoT- und Sensor-Web-Technologien für das Echtzeitmonitoring von Wasserbauwerken.* - In: Wasserwirtschaft, Vol.10 (2018).

HERLE, S.; BECKER, R.; BLANKENBACH, J.; QUADFLIEG, T.; SCHÜTTRUMPF, H.: *Dateninfrastruktur für ein kontinuierliches echtzeitfähiges Geomonitoring.* - In: Tagungsband GeoMonitoring 2018.

NIEHÜSER, S., ARNS, A., DANGENDORF, S., JENSEN, J. (2018): *A high resolution storm surge forecast for the German Bight,* In: Proceedings of the 9th Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering (CG JOINT 2018) in Tainan, Taiwan, November 11 to November 17, 2018.

QUADFLIEG, T. (2018): *Trends und Herausforderungen textilintegrierter Sensorik im Wasserbau.* – In: D³ - Deckwerke, Deiche und Dämme: 48. Internationales Wasserbau-Symposium Aachen 2018; 18. und 19. Januar 2018.

RIEKE, M.; BIGAGLI, L.; HERLE, S.; JIRKA, S.; KOTSEV, A.; LIEBIG, T.; MALEWSKI, C.; PASCHKE, T.; STASCH, C.: *Geospatial IoT—The Need for Event-Driven Architectures in Contemporary Spatial Data Infrastructures.* - In: IPRS International Journal of Geo-Information, Vol. 7 (2018), Issue 10; https://www.mdpi.com/2220-9964/7/10/385/pdf

SCHWAB, M.: *Carbon fiber technology for structural health monitoring of sea dike structures.* - In: AZL Aachen GmbH (Hrsg.): NewsLight #12 / ITA. - Aachen: AZL GmbH, 2018, https://azl-aachen-gmbh.de/de/newslight-12-ita/ (Internetveröffentlichung)

2017

DREIER, N.; FRÖHLE, P.: *Operational wave now- and forecast in the German Bight as a basis for the assessment of wave-induced hydrodynamic loads on coastal dikes.* - In: Journal of Ocean University of China, Vol. 16 (2017), Issue 6, S./Art.: 991-997. Berlin/Heidelberg: Science Press and Springer-Verlag; ISSN 1672-5182 https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11802-017-3382-9.pdf

KREBS, V.; QUADFLIEG, T.; GRIMM, C.; SCHWAB, M.; SCHÜTTRUMPF, H.: *Development of sensor-based dike monitoring system for coastal dikes.* - In: Proceedings of the 35th Conference on Coastal Engineering, Antalya, Turkey, November 17 to November 20, 2016 / Ed. by P. Lynett; New York,

N.Y.: ICCE, 2017; S./Art.: 1-14; ISBN 978-0-9896611-3-3
https://journals.tdl.org/icce/index.php/icce/article/view/8271/pdf

NABINEJAD, S.; SCHÜTTRUMPF, H.: *An agent based model for land use policies in coastal areas.* - In: Proceedings of the 35th Conference on Coastal Engineering, Antalya, Turkey, November 17 to November 20, 2016 / Ed. by P. Lynett; New York, N.Y.: ICCE, 2017; S./Art.: 1-11; ISBN 978-0-9896611-3-3
https://journals.tdl.org/icce/index.php/icce/article/view/8180

SCHÜTTRUMPF, H.; KREBS, V.; GRIES, T.; SCHWAB, M.; QUADFLIEG, T.: *Innovative Frühwarnsysteme zur Überwachung von Deichen.* - In: Wasser und Abfall, Vol. 19 (2017), Issue 9, S./Art.: 44-46; Wiesbaden: Vieweg; ISSN 1436-9095

SCHÜTTRUMPF, H.: *Innovationen im Deichbau - Ausgewählte Beispiele.* - In: Mobil oder Nicht-Mobil? Konventioneller und Innovativer Hochwasserschutz in Praxis und Forschung: 46. IWASA, Internationales Wasserbau-Symposium Aachen 2016; 7. und 8. Januar 2016; Aachen: Shaker, 2017; S./Art.: 106-114; (Mitteilungen / Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen University; 170); ISBN 978-3-8440-5183-4
http://www.iww.rwth-aachen.de/download/pdf/symposium/proceeding/IWASA2016/IWASA2016_Tagungsbeitrag_Schuettrumpf.pdf

2016

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; Copenhagen: International Federation of Surveyors, FIG, 2016; S./Art.: 16
http://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2016/papers/ts05e/TS05E_becker_herle_et_al_8000.pdf

HERLE, S., BECKER, R., BLANKENBACH, J. (2016): *Bridging GeoMQTT and REST.* – In: Proceedings of the Geospatial Sensor Webs Conference 2016, August 29 - 31, 2016, Münster.
http://ceur-ws.org/Vol-1762/Herle.pdf

HERLE, S., BECKER, R., BLANKENBACH, J. (2016): *Smart Sensor-based geospatial architecture for dike monitoring.* - In: Proceedings of the 9th Symposium of the International Society for Digital Earth (ISDE), IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 34 (2016).
http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/34/1/012014

HERLE, S., BLANKENBACH, J. (2016): *GeoPipes using GeoMQTT.* - In: Geospatial Data in a Changing World - Selected Papers of the 19th AGILE Conference on Geographic Information Science. Sarjakoski, Tapani; Santos, Maribel Yasmina; Sarjakoski, Tiina (Hrsg.), S. 383-398, Schweiz: Springer International Publishing; ISBN 978-3-319-33782-1
https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-33783-8_22.pdf

KREBS, V., GRIMM, C., SCHWAB, M., QUADFLIEG, T., SCHÜTTRUMPF, H. (2016): *EarlyDike – Experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung eines sensorbasierten Frühwarnsystems.* – In: KfKI-Aktuell, 16. Jahrgang, 1/2016, S./Art.: 11-12.
http://www.kfki.de/files/kfki-aktuell/0/16-1-DE.pdf

KUTSCHERA, G.; ENGELS, R.; BOLLE, F. W.; SCHÜTTRUMPF, H.; BARNEVELD, H.; ZETHOF, M.: *Die Zukunft des Hochwasserschutzes als Teil der Wasserwirtschaft 4.0 – ein erster Blick durch die digitale Brille.* - In: Korrespondenz Wasserwirtschaft, Vol. 9 (2016), Issue 11, S./Art.: 674-680; Hennef: GFA; ISSN 1865-9926

QUADFLIEG, T; GRIES, T.: *Sensor and Risk based Early Warning System for Coastal Dikes: Early Dike. Laufzeit: 06.2015 - 05.2018*. - In: Frankfurt a. M.: WTI, 2016, WTI-Dokumentnummer 20160607279 (Internetveröffentlichung)

SCHÜTTRUMPF, H. (2016): Innovationen im Deichbau - Ausgewählte Beispiele. - In: Wasser und Abfall, Vol. 18 (2016), Issue 11, S./Art.: 12-15; Wiesbaden: Vieweg; ISSN 1436-9095

2015

QUADFLIEG, T., SCHWAB, M., GRIES, T., SCHÜTTRUMPF, H., JENSEN, J., FRÖHLE, P., LEHFELDT, R., BLANKENBACH, J. (2015): *Intelligente Vliesstoffe für den Hochwasserschutz.* - In: Technische Textilien, 5 (2015), S./Art.: 302-304; Frankfurt, M.: Dt. Fachverlag; ISSN 0323-3243

HERLE, S. (2015): *Smarte Wasserbauwerke – Überwachung von Seedeichen mittels Geosensornetzwerken*. - In: Bauinformatik 2015 – Beiträge zum 27. Forum Bauinformatik, Wichmann Verlag, Real Ehrlich/Blut (Hrsg.), S. 113-120, 27. Forum Bauinformatik, 21.-23. September 2015, ISBN 978-3-87907-605-5

Das Projekt wurde zusätzlich in Vorträgen und Postern auf den folgenden Konferenzen vorgestellt, bei denen keine Veröffentlichungen in Konferenzbänden erfolgten:

2018

DREIER, N., FRÖHLE, P. (2018): *Operational wave forecast in the German Bight as part of a sensor- and risk based early warning system* (Poster), Abschlussseminar Frühwarnsysteme in Hannover, Deutschland vom 08. - 09.05.2018

DREIER, N., FRÖHLE, P. (2018): *Operational wave forecast in the German Bight as part of a sensor- and risk based early warning system*, Workshop on “Coastal Ocean Modelling (COMOD) in Hamburg, Deutschland vom 22. - 23.02.2018

DREIER, N. (2018): *Entwicklung eines Seegangs- und Wellenbelastungssimulators für ein Frühwarnsystem für Seedeiche*, 23. KFKI Seminar zur Küstenforschung in Hamburg, Deutschland am 05.12.2018

FRÖHLE, P. (2018): *EarlyDike - Sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem für Seedeiche – Ein Überblick*, 23. KFKI Seminar zur Küstenforschung in Hamburg, Deutschland am 05.12.2018

HERLE, S., BECKER, R., BLANKENBACH, J., LEHFELDT, R., MULCKAU, A. (2018): *EarlyDike: Sensor- und Geodateninfrastruktur* (Poster), Abschlussseminar Frühwarnsysteme in Hannover, Deutschland vom 08. - 09.05.2018

JENSEN, J.; DREIER, N.; KREBS, V.; GRIMM, C. HERLE, S.; SCHÜTTRUMPF, H. (2018): *EarlyDike – Entwicklung eines sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems für Deiche,* Abschlussseminar Frühwarnsysteme in Hannover, Deutschland vom 08. - 09.05.2018

KREBS, V. (2018): *Deich-Monitor und -Simulator: Echtzeitmonitoring von Seedeichen und Erprobung von intelligenten Geotextilien*, 23. KFKI Seminar zur Küstenforschung in Hamburg, Deutschland am 05.12.2018

KREBS, V., QUADFLIEG, T., GRIMM, C., SCHWAB, M., SCHÜTTRUMPF, H. (2018): *Entwicklung eines Sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems für Seedeiche* (Poster), Abschlussseminar Frühwarnsysteme in Hannover, Deutschland vom 08. - 09.05.2018

NIEHÜSER, S. (2018): *Entwicklung einer Methodik zur Wasserstandsvorhersage entlang der gesamten deutschen Nordseeküste*, 23. KFKI Seminar zur Küstenforschung in Hamburg, Deutschland am 05.12.2018

NIEHÜSER, S., JENSEN, J., ARNS, A., DANGENDORF, S. (2018): *EarlyDike AP1 – Sturmflutmonitoring und -simulator* (Poster), Abschlussseminar Frühwarnsysteme in Hannover, Deutschland vom 08. - 09.05.2018

NIEHÜSER, S., ARNS, A., DANGENDORF, S., JENSEN, J. (2018): *A Novel High-Resolution Storm Surge Forecast For The German Bight*, 36th International Conference on Coastal Engineering (ICCE) in Baltimore (Maryland), USA vom 30.07 – 03.08.2018

2017

BECKER, R., DREIER, N., JENSEN, J., QUADFLIEG, T., SCHÜTTRUMPF, H. (2017): *EarlyDike – Entwicklung eines sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems für Deiche,* Statusseminar Frühwarnsysteme in Dresden, Deutschland am 28.09.2017

KREBS, V; HERLE, S.; SCHWAB, M.; QUADFLIEG, T.; GRIES, T.; BLANKENBACH, J.; SCHÜTTRUMPF, H. (2017): *Implementation of sensor-based dike monitoring by smart geotextiles*. SCACR2017, International Short Course on Applied Coastal Research in Santander, Spanien vom 03.10. – 06.10.2017

2016

BECKER, R. (2016): *Distributed Data Collection and Computing for Prediction and Prevention of Coastal Dike Failure in an Early Warning System,* FIG Commission 3: Spatial Information Management – Annual Workshop and Annual Meeting in Iasi, Rumänien vom 03. – 07.11.2016

BLANKENBACH, J. (2016): *EarlyDike – Entwicklung eines sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems für Deiche,* Statusseminar Frühwarnsysteme in Bonn, Deutschland vom 19. – 20.10.2016

DREIER, N. (2016): Hindcast der Seegangsverhältnisse in der Nordsee während des Winter Orkans Xaver (Dezember 2013) – *EarlyDike - Sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem für Küstendeiche*, Maritime Nacht der TUHH in Hamburg, Deutschland am *30.09.2016*

FRÖHLE, P. (2016): *Hydrodynamische Belastungen auf Seedeiche als Grundlage für ein Frühwarnsystem (Projekt EarlyDike),* 8. Hydrologisches Gespräch in Husum, Deutschland am 03.06.2016

HERLE, S. (2016): Smart Sensor Based Real Time Monitoring for Prediction and Prevention of Coastal Dike Failure, 23rd EG-ICE International Workshop in Krakau, Polen vom 29.06 – 01.07.2016

KREBS, V., QUADFLIEG, T., GRIMM, C., SCHWAB, M., SCHÜTTRUMPF, H. (2016): *Entwicklung eines Sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems für Seedeiche* (Poster), 46. Internationales Wasserbau-Symposium Aachen (IWASA) in Aachen, Deutschland vom 07. – 08.01.2016

KREBS, V., SCHÜTTRUMPF, H. (2016): *Development of a sensor-based dike monitoring system for coastal dikes,* Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering (CG JOINT 2016) in Qingdao, China vom 18. – 24.09.2016

KREBS, V.; SCHWAB, M.; GRIMM, C.; QUADFLIEG, T.; SCHÜTTRUMPF, H.: *EarlyDike – Experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung eines sensorbasierten Frühwarnsystems.* - 21. KFKI-Seminar, Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen in Bremerhaven, Deutschland am 10.11.2016 http://www.kfki.de/files/kfki-seminare/0/21_P_EarlyDike.pdf

NIEHÜSER, S., ARNS, A., DANGENDORF, S., JENSEN, J. (2016): *A high resolution water level forecast for the German Bight,* European Geosciences Union General Assembly 2016 (EGU) in Wien, Österreich vom 17. – 22.04.2016

2015

SCHÜTTRUMPF, H. (2015): *EarlyDike – Entwicklung eines sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems für Deiche,* Statusseminar Frühwarnsysteme in Hannover, Deutschland am 19.10.2015

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. doi: 10.1007/s10236-015-0814-1, 2015.

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.

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.

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.: Gezeitenvorausberechnungen mit der Harmonischen Darstellung der Ungleichheiten. Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie Nr. 50, 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.

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.

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

ANHANG

FACHBERICHT

(ungekürzter Fachbericht in dieser Form zur Veröffentlichung in der Schriftenreihe *Die Küste* eingereicht)

EarlyDike - Entwicklung eines sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems für Seedeiche

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, Max Schwab

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

Inhalt

1 Einleitung 2
2 Ziel 3
3 Vorgehen 3
4 Ergebnisse und Ausblick 5
5 Danksagung 10
6 Schriftenverzeichnis 10

1 Einleitung

In Deutschland zählen Seedeiche zu den wichtigsten Küstenschutzanlagen (SCHÜTTRUMPF 2008 und 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 und 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 relevanten 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.

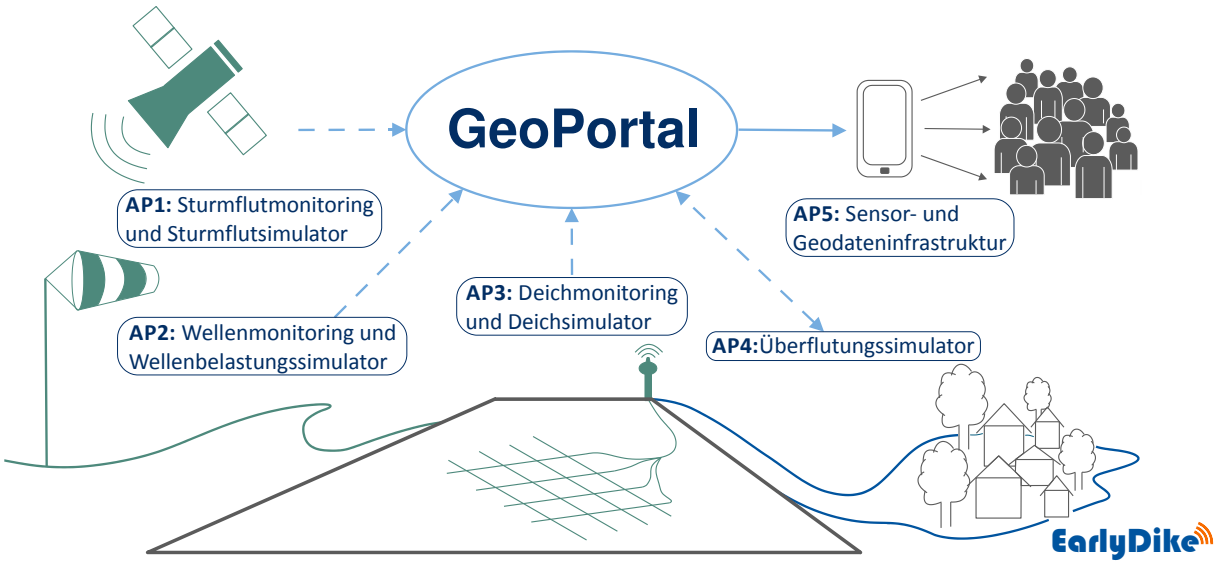


Abbildung 1: Struktur des Verbundprojekt *EarlyDike* mit allen behandelten Arbeitspaketen (AP).

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 (fwu)* 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 & FRÖHLE, 2018).

Am *Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft 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 & SCHÜTTRUMPF, 2018 UND 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 web-basiertes 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 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 (MÜLLER-NAVARRA ET AL., 2012). Aus der punktuellen Wasserstandsvorhersage ergibt sich allerdings ein Defizit. Aus Wasserstandsaufzeichnungen und deren Auswertungen ist bekannt, dass solche punktuellen Wasserstandsinformationen 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 Punktinformationen der Wasserstandsvorhersage auf die gesamte Küstenlinie (einschließlich Inseln und Halligen) hochaufgelöst (Stundenwerte, Punkabstand ~1km) 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, dass 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 stellten 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 (Gezeitensynthese 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 & 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 Seegangsvohersagemodell 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 Fügetechnologien 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 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. 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

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-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 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-Informations-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 Umwelt-

informations- 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 Schriftenverzeichnis

ARNS, A.; WAHL, T.; HAIGH, I.D.; JENSEN, J. (2015): Determining return water levels at ungauged coastal sites: a case study for northern Germany. In: Ocean Dynamics 65 (4), S. 539–554. DOI: 10.1007/s10236-015-0814-1.

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, 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. (2018): 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.

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. (2012): Sturmflutvorhersage für Hamburg 1962 und heute, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie Hamburg und Rostock.

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. (2018): 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.

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

Entwicklung einer Methodik zur Wasserstands-vorhersage entlang der gesamten deutschen Nordseeküste

Sebastian Niehüser, Sönke Dangendorf, Arne Arns und Jürgen Jensen

Zusammenfassung

Im Arbeitspaket 1 von Early Dike (AP1: „Sturmflutmonitoring und Sturmflutsimulator“) werden neue Methoden zur Vorhersage von Wasserständen mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung für die gesamte Küstenlinie (einschließlich Inseln und Halligen) der Deutschen Nordsee entwickelt. Die Ergebnisse aus AP1 werden im Speziellen benötigt, um das übergeordnete Projektziel, d. h. die Entwicklung eines sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems für die Küstenlinie (beispielhaft für Seedeiche) zu erreichen. Die Ergebnisse fließen unmittelbar in die anderen APs ein. In AP1 kommt ein hydrodynamisch-numerisches Modell zum Einsatz, mit dessen Hilfe Wasserstandsinformationen für die gesamte deutsche Nordseeküste simuliert bzw. rekonstruiert werden. Die Modellbildung erfolgt auf Basis aktueller bathymetrischer Informationen, meteorologischer und astronomischer Randbedingungen sowie den für die betrachtete Periode relevanten Änderungen des mittleren Meeresspiegels. Die auf diese Weise generierten Wasserstandsinformationen für die vergangenen Jahre werden zur Ableitung empirisch-statistischer Windstau-Ansätze genutzt, die anschließend unter Verwendung meteorologischer und ozeanografischer Randbedingungen in einen Testbetrieb integriert werden können. Ein Schwerpunkt bei den Windstau-Ansätzen lag auf der Berücksichtigung der Interaktion zwischen der Tide und dem Windstau. Übergeordnetes Ziel von AP1 ist es, eine Methodik zu entwickeln, die die bestehenden operationellen Modelle zur Wasserstandsvorhersage an der Küste verbessert, indem sie von einer punktuellen Betrachtung auf die gesamte Küstenlinie erweitert werden.

Schlagwörter

Wasserstandvorhersage, Windstau, Küstenschutz, Hochwasserrisiko, Sturmflut

Summary

Early Dike work package 1 (WP1; “Storm Surge monitor and simulator”) develops a new methodology to provide high frequency and high resolution water level forecasts along the entire German North Sea coastline with a storm surge simulator. Such information is also crucial for the other WPs in order to meet the overall project objective of developing a sensor- and risk based early warning system for the coastline (exemplarily for sea dikes). In WP1 a hydrodynamic model is built considering the latest bathymetry information together with mean sea level changes, and meteorological and astronomical forcing at the model boundaries. The resulting water levels are used to derive empirical surge formulas at defined locations thereby coupling data driven empirical and numerical models in an innovative way. Various types of atmospheric and oceanographic data are used to develop the statistical models and run them in a pilot operation. One of the focal points of the development of the statistical models is the consideration of the interaction between the

surge and the tide. The overall methodology shows an improvement of the existing operational storm surge warning system in terms of the spatial coverage (currently only point information is available).

Keywords

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

Inhalt

1 Einleitung 2
2 Methodik und verwendete Datengrundlage 7
3 Ergebnisse 21
3.1 Hydrodynamisch-numerisches Modell 21
3.2 Windstau 28
4 Wasserstandsvorhersage 38
4.1 Orkan „Xaver“ 38
4.2 Operationeller Testbetrieb 40
5 Fazit und weiterer Forschungsbedarf 42
6 Danksagung 44
7 Schriftenverzeichnis 45

1 Einleitung

See- und Ästuardeiche schützen in Deutschland mehr als 2,4 Millionen Menschen und zählen damit zu den wichtigsten Küstenschutzbauwerken. Ein Versagen der Bauwerke hätte schwerwiegende Konsequenzen zur Folge. Dabei stehen Landnutzungsänderungen sowie gesteigerte monetäre Werte in überflutungsgefährdeten Gebieten einer stetigen Verbesserung der Küstenschutzanlagen als auch der Vorhersage und des Katastrophenmanagements gegenüber (HAIGH & NICHOLLS, 2017). Daher sind ein frühzeitiges Erkennen von Gefahren und das rechtzeitige Verhindern eines möglichen Deichversagens elementar, um einen zuverlässigen Küstenschutz zu ermöglichen.

Die maßgebliche Einwirkung auf Küstenschutzbauwerke stellen (Extrem-) Wasserstände in Form von Sturmfluten (als Kombination aus Tide, Windstau und mittlerem Meeresspiegel (MSL)) und Seegang dar. Der Fokus von Arbeitspaket 1 (AP1) im Verbundprojekt „EarlyDike“ (siehe BECKER ET AL., 2018) mit dem Titel „Sturmflutmonitoring und Sturmflutsimulator“ liegt auf der Entwicklung einer neuen Methodik zur Vorhersage von Wasserständen (exklusive Seegang; siehe DREIER & FRÖHLE, 2018) mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung für die gesamte Küstenlinie (einschließlich der Inseln und Halligen) der Deutschen Nordsee. 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. 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 & 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 Wasserstandsinformationen 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 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 eines hydrodynamisch-numerischen Modells (HNM) mit empirisch-statistischen Regressionsansätzen wird in AP1 daher eine Methodik entwickelt, mit deren Hilfe sich die aktuell verfügbaren Punktinformationen der Wasserstandsvorhersage auf die gesamte Küstenlinie übertragen lassen.

Der in AP1 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; GRINSTED ET AL., 2015) als auch im Gebiet der Nordsee (LÜDERS, 1936; DIETRICH, 1954; DANGENDORF ET AL. 2014A) 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 Tidenhub. In ARNS ET AL. (2017) wurde beispielsweise eine Erhöhung des Tidenhubs von 0,32-0,77 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 & 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 & 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 (ANNUTSCH, 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).

Aus den genannten Komponenten, deren Interaktion sowie der speziellen Flachwassercharakteristik des Untersuchungsgebietes der Deutschen Bucht ergeben sich folgende Fragestellungen, die bei der Entwicklung der angestrebten Methodik zur Wasserstandsvorhersage einzubeziehen sind:

Wie können in flachen Küstengebieten robuste und hochauflösende Wasserstände erzeugt werden?

Im Untersuchungsgebiet der Deutschen Bucht existiert eine Vielzahl an Tidepegeln, die seit Mitte der 1990er Jahre hochauflösende Wasserstände (Minutenwerte) aufzeichnen (WAHL ET AL., 2011). Die meisten Pegelstandorte liegen in Hafenbecken oder Fahrrinnen, die deutlich tiefer liegende bathymetrische Verhältnisse aufweisen, als das direkte Umland im Wattenmeer. Rückschlüsse auf eine räumliche Verteilung des Wasserstandes sind allein über Tidepegel daher nicht möglich, da enorme Verformungs- und Reibungseinflüsse die Wasserstände beeinflussen. In AP1 kommt daher ein zweidimensionales HNM zum Einsatz, mit dessen Hilfe Wasserstandsinformationen für die gesamte deutsche Nordseeküste simuliert werden. HNM gehören mittlerweile zum Stand der Technik und werden vielfältig angewendet. Die wichtigsten Verwendungsmöglichkeiten im Bereich der Simulation von Wasserständen an der Küste sind zum einen die Vorhersage (z. B. SOETJE & BROCKMANN, 1983; VERLAAN ET AL., 2005; ELSAESSER ET AL., 2010; ZIJL ET AL., 2013) sowie die Informationserweiterung für die Vergangenheit (Hindcast) (z. B. ARNS ET AL., 2013; ELSAESSER ET AL., 2010; PLÜß, 2003), falls keine oder nur wenige Beobachtungsdaten an Pegelstandorten zur Verfügung stehen. Zudem werden numerische Modelle genutzt, um einzelne oder mehrere Szenarien zu simulieren (JENSEN ET AL., 2006; BRUSS ET AL., 2010; ARNS ET AL., 2015). Im vorliegenden Fall wird ein numerisches Modell für die räumliche und zeitliche Informationserweiterung benötigt.

Die Modellbildung erfolgt auf Basis aktueller bathymetrischer Informationen, meteorologischer und astronomischer Randbedingungen, sowie den für die betrachtete Periode relevanten Änderungen des MSLs. Ein besonderes Augenmerk wird bei der Modellerstellung auf die räumliche Auflösung des Rechengitters gelegt, um der komplexen Küstenmorphologie der Deutschen Bucht Rechnung zu tragen. Frühere numerische Modellierungsstudien in der Deutschen Bucht haben die Notwendigkeit von adaptiven und hochauflösenden Rechengittern zur genauen Beschreibung der Charakteristik der vorherrschenden Tidewasserstände einschließlich einer robusten Darstellung der Tnw und der Gezeitenverformung aufgrund von Flachwassereffekten aufgezeigt (siehe z. B. ARNS ET AL., 2015).

Wie kann der Gezeitenanteil anhand der Wasserstandsinformationen unter Berücksichtigung der Flachwassercharakteristik separiert und vorhergesagt werden?

Eine Schwierigkeit besteht in der korrekten Separierung des deterministischen Anteils aus beobachteten Wasserständen an Pegelstandorten. Es stehen dafür unterschiedliche Verfahren zur Verfügung, die hauptsächlich in harmonische (z. B. PAWLOWICZ ET AL., 2002) und nicht-harmonische (z. B. MÜLLER-NAVARRA, 2013) Methoden unterteilt werden können (PUGH & WOODWORTH, 2014). Unabhängig vom angewendeten Verfahren verbleiben im Windstau verschiedene (periodische) Komponenten, die während der Tideanalyse nicht separiert werden. Hierunter fallen beispielsweise Partialtiden, die nicht explizit erfasst werden. Implizit enthalten sind zudem der Einfluss von Fernwellen oder der Interaktion zwischen MSL/Tide und Tide/Windstau. Bei Fernwellen handelt es sich um langperiodische Wellen, die über dem Nordost-Atlantik durch ein Sturmtief generiert werden und gegen den Uhrzeigersinn durch das Nordseebecken laufen TIMMERMAN (1975). Diese können mitunter erhebliche Auswirkungen auf Sturmfluten in der Deutschen Bucht haben (bis zu 1 m; GÖNNERT, 2003).

Eine weitere Problematik ergibt sich aus der Partialtideanalyse von Wasserständen des HNMs. Im Gegensatz zu den Wasserstandszeitreihen, die an Pegelstandorten aufgezeichnet werden, werden die simulierten Wasserstände auch in Bereichen erfasst, die regelmäßig bei Ebbe trockenfallen. Um diesen Umstand als auch die komplexe Küstenmorphologie und die daraus resultierenden Deformationen der Tidekurve zu berücksichtigen, wird das Verfahren der „Harmonischen Darstellung der Ungleichheiten (HDdU)“ (MÜLLER-NAVARRA, 2013; HORN, 1960) verwendet. Dieser Ansatz ist optimiert für Gezeitenvorhersagen in flachen Schelfgebieten wie der Deutschen Bucht und wird für die Tidevorhersage der Hoch- und Niedrigwasser vom BSH verwendet.

Welche physikalischen Prozesse beeinflussen den Windstau und wie können diese in eine flexible und unkompliziert nutzbare robuste Vorhersage integriert werden?

Der Windstau ist in der Deutschen Bucht hauptsächlich durch vorherrschende meteorologische Verhältnisse (auflandige Winde drücken Wassermassen an die Küste) dominiert (z. B. DANGENDORF ET AL., 2012, 2013). Dieser Windstau kann eine ähnliche Größenordnung wie die des mittleren Tidehubs erreichen und somit den astronomischen Wasserstand durch Superposition nahezu verdoppeln (MÜLLER-NAVARRA ET AL., 2012). Der Einfluss ist entsprechend nicht vernachlässigbar und muss mittels der zugrundeliegenden physikalischen Prozesse beschrieben werden. Heutzutage wird die operationelle Sturmflutvorhersage am BSH durch den Gebrauch von HNM durchgeführt (MÜLLER-NAVARRA ET AL., 2003). Diese komplexe und rechenintensive Herangehensweise hat allerdings den Nachteil, dass zwar der Windstau adäquat berechnet werden kann, die Darstellung der Gezeiten jedoch deutlich schlechter funktioniert als es beispielsweise mit der HDdU möglich ist (MÜLLER-NAVARRA ET AL., 2012). Bevor die Qualität der Windstauberechnungen durch numerische Modelle ausreichend genau war, kamen am BSH empirisch-statistische Verfahren zum Einsatz (MÜLLER-NAVARRA, 2009). Diese haben eine lange Tradition und wurden bereits frühzeitig verwendet, um Zusammenhänge zwischen Wind- und Luftdruckverhältnissen und dem Windstau an der Küste zu beschreiben. Die Idee, empirisch-statistische Modelle für die Vorhersage des Windstaus zu nutzen, entstand bereits Ende des 19. Jahrhunderts, nachdem die ersten Pegel- und Windmessungen durchgeführt worden waren. In den Veröffentlichungen LENTZ (1873, 1879) wurde zum ersten Mal die Beziehung zwi-

schen Wind und Wasserstand am Pegel Cuxhaven dargestellt. Hierin werden bereits maßgebende physikalische Prozesse beschrieben, die den Windstau beeinflussen. So beschreibt LENTZ (1873, 1879) den Zusammenhang zwischen Wind und Windstau über eine quadratische Funktion. Für die benachbarten holländischen Pegelstandorte Hoek van Holland und Ijmuiden wurde in ORTT (1897) eine Formel zur Bestimmung des Windstaus für die Belange der Schifffahrt entwickelt. Eine detaillierte Übersicht der Historie der empirisch-statistischen Windstaumodellgeschichte liefern MÜLLER-NAVARRA & GIESE (1999). Durch die stetige Beobachtung der ablaufenden Prozesse, der wachsenden Datengrundlage sowie der rasant steigenden Rechenleistung moderner Computer, wurden die Ansätze zur Beschreibung des Windstaus anhand meteorologischer Parameter kontinuierlich verbessert. Ein sogenannter „Gesamtansatz" aus den späten 1960ern (unveröffentlicht), entwickelt vom Deutschen Hydrographischen Institut, wurde schließlich im operationellen Betrieb zur Vorhersage des Windstaus in Deutschland verwendet (ANNUTSCH, 1977). Der „Gesamtansatz" bildet ebenfalls die Basis für weitere Optimierungen und Entwicklungen zur empirisch-statistischen Beschreibung des Windstaus in der Deutschen Bucht seit den späten 1990er Jahren (MÜLLER-NAVARRA & GIESE, 1999; JENSEN ET AL., 2013; DANGENDORF ET AL., 2014B; STREICHER ET AL., 2015) sowie für die vorliegenden Untersuchungen. Im operationellen Betrieb der Wasserstandsvorhersage in Deutschland wurden die empirisch-statistischen Modelle schließlich weitestgehend in den 1990er Jahren von HNM abgelöst (DICK ET AL., 1993). Aktuell dienen die empirisch-statistischen Verfahren am BSH der Verifizierung von Sturmflutvorhersagen und werden zudem bei technischen Problemen der HNM auch immer noch im operativen Betrieb genutzt (MÜLLER-NAVARRA, 2009).

In MÜLLER-NAVARRA & GIESE (1999) wurde ein empirisch-statistisches Verfahren ausführlich erläutert, welches den Zusammenhang zwischen Windstau und unterschiedlichen meteorologischen und ozeanografischen Prädiktoren (z. B. Temperatur und Nachbarpegel) mittels multipler linearer Regression beschreibt und ähnliche Gütekriterien aufweist, wie die deutlich komplexeren HNM. In JENSEN ET AL. (2013) wurde der Tidepegel in Cuxhaven verwendet, um ein multiples lineares Regressionsmodell auf der Basis von MÜLLER-NAVARRA & GIESE (1999) zu erstellen und weiterzuentwickeln. Im Gegensatz zu MÜLLER-NAVARRA & GIESE (1999) wurden in JENSEN ET AL. (2013) lediglich meteorologische Prädiktoren in Form von Windgeschwindigkeit und atmosphärischem Druck zusammen mit verschiedenen physikalischen Zeitverschiebungen (umgangssprachlich auch Zeitlag genannt) genutzt. Insgesamt besteht das Modell von JENSEN ET AL (2013) aus 14 (statischen) Prädiktoren und zeigt für den Zeitraum von 1918 bis 2008 unter Vernachlässigung der Tide-Windstau Interaktion in Cuxhaven eine Performance von $R^2 = 0{,}80$ und RMSE = 16,6 cm. Unter Berücksichtigung der Tide-Windstau Interaktion konnte eine signifikante Verbesserung auf $R^2 = 0{,}82$ und RMSE = 15,9 cm erreicht werden. Die Tide-Windstau Interaktion wurde berücksichtigt, indem jeweils ein separates Modell für verschiedene Perzentile der Gezeitenkurve erstellt wurde. Ferner konnte die Performance des empirisch-statistischen Modells insbesondere in den höchsten und niedrigsten Perzentilen (z. B. 1%/99%) verbessert werden. Dies zeigt, dass die Berücksichtigung der Tide-Windstau Interaktion dazu beitragen kann, die Beschreibung und Vorhersage der extremsten Wasserstände für den Küstenschutz zu verbessern.

Eine generelle Limitation der bestehenden empirisch-statistischen Ansätze zur Beschreibung des Windstaus besteht bisweilen darin, dass sie nur für ausgewählte Pegelstandorte vorliegen und bisher nicht auf die gesamte Küstenlinie verallgemeinert werden können. In der vorliegenden Arbeit wird das Modell aus JENSEN ET AL (2013) als Basis herangezogen und räumlich auf die gesamte Küstenlinie der Deutschen Bucht erweitert. Eine Weiterentwicklung besteht darüber hinaus in der Verwendung einer schrittweisen Methodik zur Ableitung der signifikanten Prädiktoren an den einzelnen Standorten, was eine flexible Anpassung der Modelle bedeutet und somit die lokale Charakteristik abgebildet werden kann. Diese Herangehensweise wurde ebenfalls in STREICHER ET AL. (2015) genutzt und zeigte eine Verbesserung gegenüber statischen Modellansätzen. Zudem werden die empirisch-statistischen Windstaumodelle unter Berücksichtigung der Tide-Windstau Interaktion (in Anlehnung an JENSEN ET AL. (2013)) erstellt, was ebenfalls eine Erweiterung gegenüber dem operationell genutzten Ansatz von MÜLLER-NAVARRA & GIESE (1999) darstellt.

Anhand der formulierten Fragestellungen wird in Kap. 2 detailliert die entwickelte Methodik sowie die zur Verfügung stehende Datengrundlage von AP1 erläutert. Die jeweiligen Ergebnisse des (i) zweidimensionalen HNM, der (ii) Anwendung der HDdU zur Separierung der simulierten Wasserstandsinformationen in die Komponenten der deterministischen Gezeit und des Windstaus sowie die (iii) Entwicklung der empirisch-statistischen Modelle zur Rekonstruktion und Vorhersage des Windstaus werden in Kap. 3 beschrieben. In Kap. 4 werden die Ergebnisse aus Kap. 2 und Kap. 3 zusammengeführt und zeigt den Ablauf der Wasserstandsvorhersage anhand der entwickelten Methodik. Die Zusammenführung erfolgt durch die Überlagerung der Gezeiten- mit der Windstauvorhersage zu einem Gesamtwasserstand. In Kap. 5 werden schließlich die Vorgehensweise und die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick über weiteren Forschungsbedarf gegeben.

2 Methodik und verwendete Datengrundlage

Die Methodik von AP1 (siehe Abb. 1) ist gegliedert in die Bestandsaufnahme (AP1.1), das Sturmflut-Monitoring (AP1.2), den Sturmflutsimulator (AP1.3) und das GeoPortal (AP1.4). In AP1.1 werden alle benötigten Datengrundlagen zusammengestellt. AP1.2 umfasst den Aufbau des HNM zur Erstellung eines räumlich als auch zeitlich hochaufgelösten Wasserstandshindcasts, die Gezeitenanalyse/-synthese der simulierten Wasserstände sowie die Entwicklung der empirisch-statistischen Windstaumodelle. Die Kombination der Methodik aus AP1.2 zu einer Wasserstandsvorhersage entlang der Küstenlinie (einschließlich Halligen und Inseln) der deutschen Nordseeküste erfolgt in AP1.3 unter Verwendung der meteorologischen Vorhersagen des DWD. Die Ergebnisse aller APs werden AP1.4 in einem GeoPortal zusammengetragen und visualisiert (HERLE ET AL., 2018).

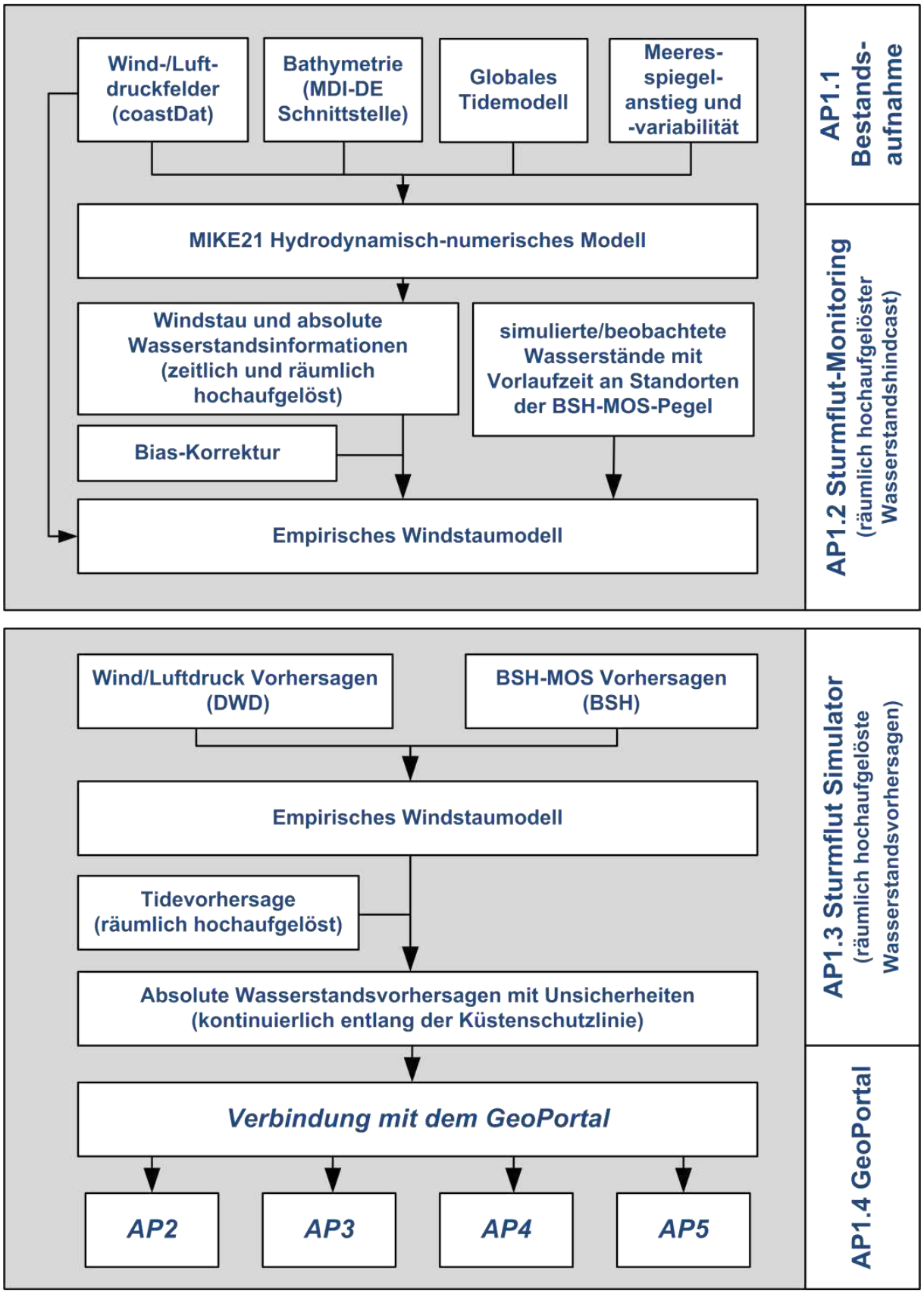


Abbildung 1: Übersicht der Methodik von AP1 „Sturmflutmonitor und Sturmflutsimulator“.

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 an der Stelle, an der sie verwendet werden. Basierend auf diesen Daten 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 (Abb. 2) deckt die gesamte Nordsee und Teile des angrenzenden Nordostatlantiks ab. Die Randbedingungen des HNM liegen somit außerhalb der Schelfregion der Nordsee im tiefen Nordostatlantik. 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.

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 dienten (CHENG & 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 & 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 Frequenzen der einzelnen Partialtiden sind überall auf der Erde identisch. Es ändern sich lediglich die Amplitude (im Wesentlichen abhängig von der Wassertiefe) sowie die Phasenverschiebung. In flachen Schelfen ist die Amplitude deutlich ausgeprägter als im tiefen Ozean (MALCHEREK, 2010). Die räumliche Auflösung erstreckt sich über 0,125° 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.

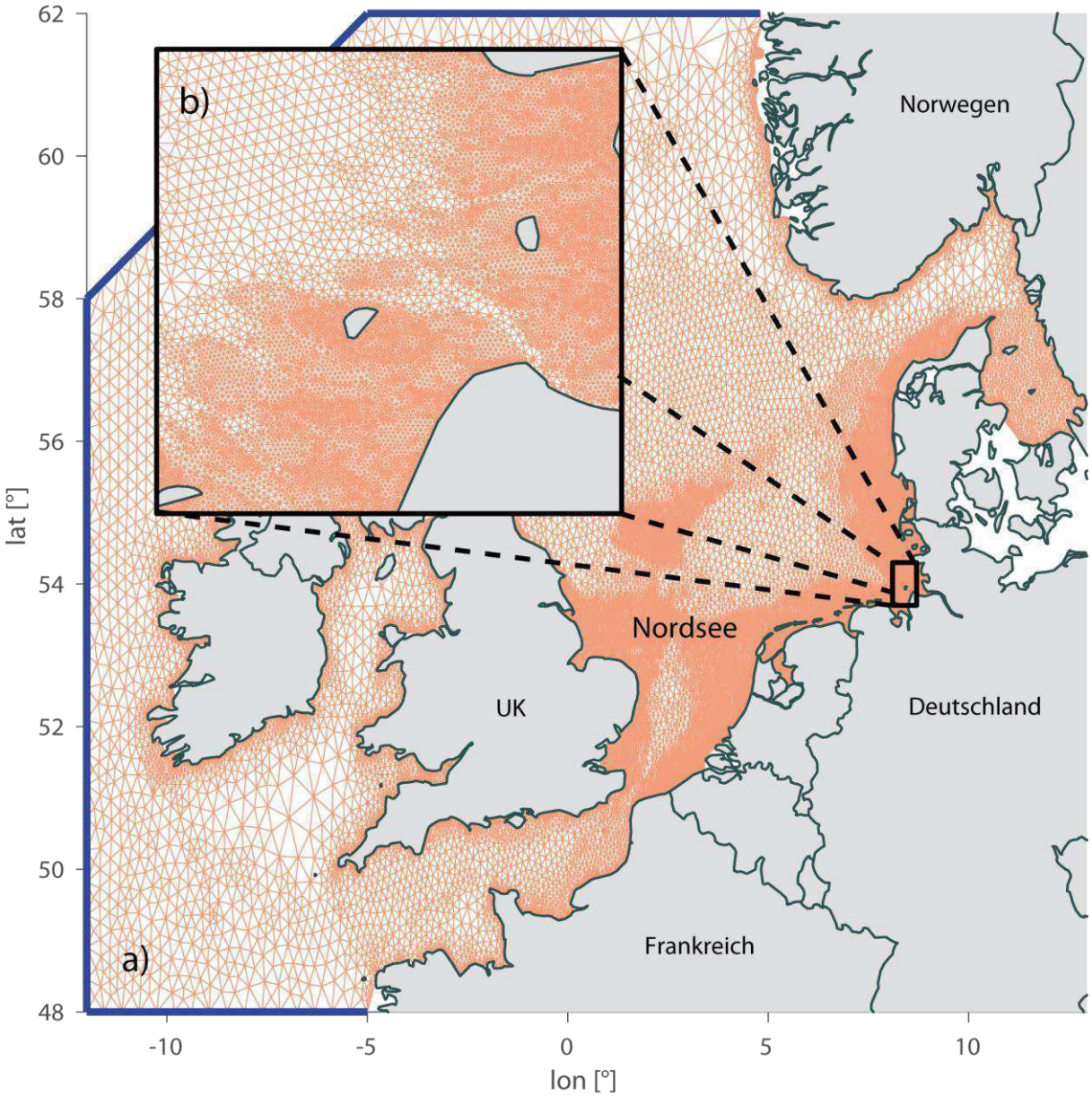


Abbildung 2: a) Modellgebiet und Rechengitter des HNMs. Die Lage der Modellrandbedingungen sind durch die blauen Linien dargestellt. b) Detailausschnitt des Modellgebiets des Elbmündungsgebietes. Es wird die Abhängigkeit zwischen Gitterzellengröße und Bathymetrie verdeutlicht. Im oberen linken Bereich des Details beträgt die Bathymetrie < 20 m und zeigt eine gröbere Auflösung der Gitterzellen als im unteren und rechten Bereich des Ausschnitts im Küstennahfeld. Die Zellgröße wird sukzessive im Flachwasserbereich verfeinert.

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°) 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 Einlaufrandbedingungen zu erwarten.

Für den meteorologischen Antrieb des HNM werden Reanalyse-Daten aus dem CIRES 20th Century Reanalysis V2c Project des Earth System Research Laboratory der US National Oceanic & Atmspheric 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 192x94 Gitterpunkte, woraus sich eine Gitterbreite von 1,875° Richtung der Längengrade und 1,904° Richtung der Breitengrade ergibt. Bei dem verwendeten Datensatz handelt es sich um Vorhersagewerte, die auf Basis einer Reanalyse simuliert wurden und mit einer zeitlichen Auflösung von 3 Stunden zur Verfügung stehen. 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. In Abb. 3 ist bespielhaft ein Wind- und Luftdruckfeld aus dem verwendeten Datensatz dargestellt.

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 & 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. Projektintern erfolgt eine Abstimmung der finalen Bathymetrie mit AP2 (DREIER & FRÖHLE, 2018), damit konsistente Datensätze innerhalb des Projektes verwendet werden. Abb. 4 zeigt die endgültige Bathymetrie des HNMs.

Das unstrukturierte Berechnungsnetz des HNM wird zunächst anhand des Verlaufs der Küstenlinie automatisiert mit der Software MIKE® erstellt. Anschließend werden höher aufgelöste Bereiche definiert. Somit ergeben sich Kantenlängen entlang der Einlaufrandbedingungen von etwa 20-30 km, die sukzessive bis in die Deutsche Bucht auf knapp 0,5-1 km reduziert wurden. Insgesamt werden auf diese Weise etwa 33.000 Gitterzellen generiert.

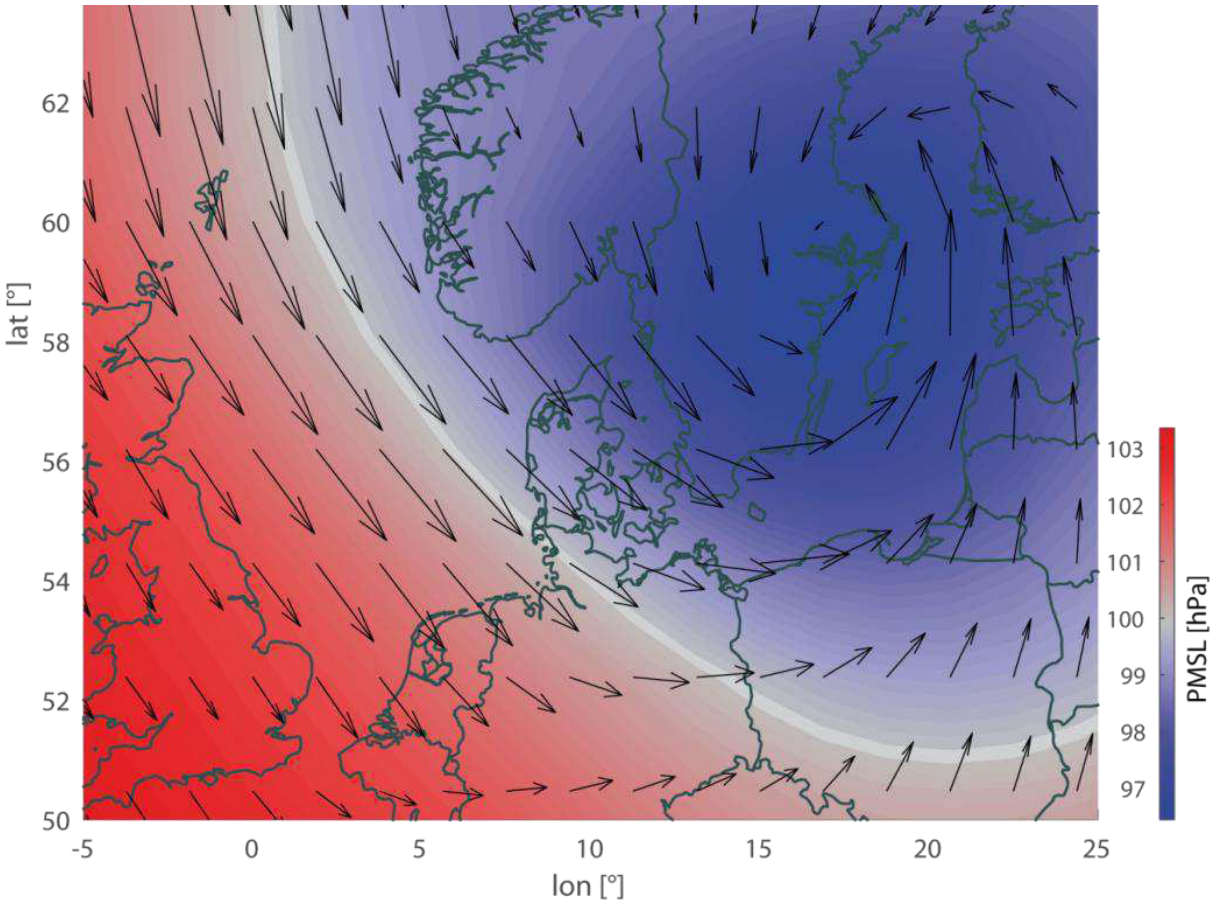


Abbildung 3: Wind- und Luftdruckfeld aus dem 20CRv2c Datensatz vom 06.12.2013 00:00 Uhr über der Nordsee. Jeder der windrichtungsanzeigenden Pfeile entspricht dabei einem Gitterpunkt, für den meteorologische Informationen vorliegen. Entsprechend kann so die räumliche Auflösung der Reanalyse-Daten nachvollzogen werden. Der atmosphärische Druck wurde dagegen räumlich interpoliert, um eine Einschätzung des räumlichen Verlaufs zu erhalten.

Im Zuge der Kalibrierung (siehe unten) müssen darüber hinaus weitere Optimierungen hinsichtlich der Modellperformance mit Fokus auf die Deutsche Bucht vorgenommen werden. Das größte Problem besteht in der Simulation der Niedrigwasser im ursprünglichen Rechengitter, während die Hochwasser bereits mit Hilfe des weitestgehend automatisiert erstellten Gitters gut abgebildet werden konnten. Ein Grund ist die statische Bathymetrie im Modell, die in der Natur jedoch durch komplexe morphodynamische Prozesse bestimmt wird. Zudem stellt sich die Frage, inwiefern die Pegelstationen, die zur Kalibrierung und Validierung des Modells genutzt werden, repräsentativ für das Modellgebiet sind. Große Teile der Deutschen Bucht fallen während der Ebbzeiten trocken, während die Pegelstandorte meist in Häfen oder Fahrrinnen liegen und somit ein Trockenfallen vermeiden.

Aus diesem Grund wird ein adaptiver Algorithmus zur Erstellung des Rechengitters 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 (Abb. 2). Durch den Vergleich von Abb. 2 und Abb. 4 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.

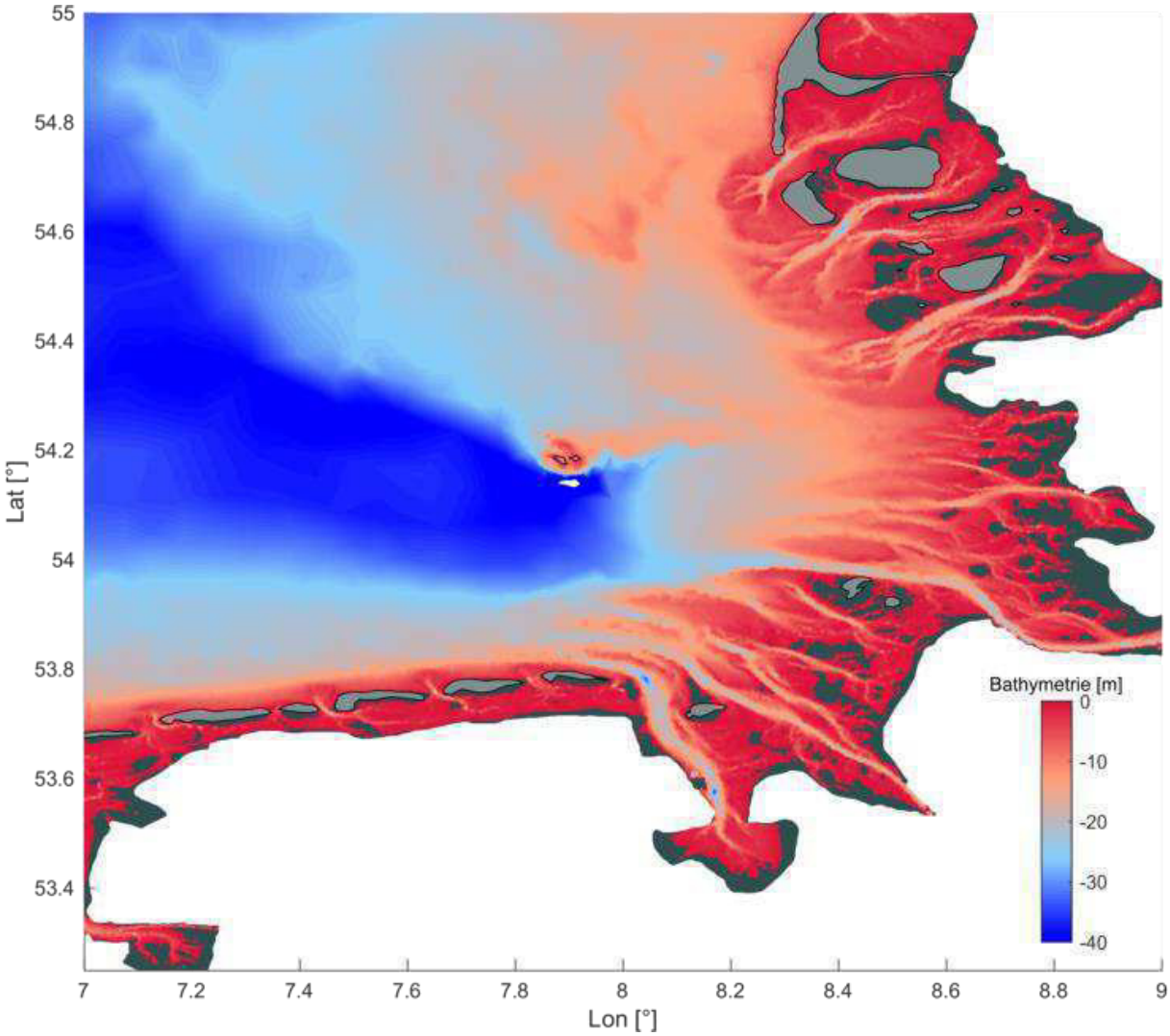


Abbildung 4: Zusammengeführte Höhenwerte der finalen Bathymetrie des HNMs als Konturplot (Ausschnitt). Zur besseren Differenzierung der Höhenwerte wurden alle Werte < -40 m in einer Farbe dargestellt und Werte > 0 m aus dem Datensatz eliminiert. Deutlich erkennbar sind die Flachwasserbereiche in der 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. 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 wurden.

Die Kalibrierung und Validierung des HNMs erfolgt auf Basis von Beobachtungen an Tidepegeln aus unterschiedlichen Quellen. 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 Pegeldaten 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. Es handelt sich dabei überwiegend um die in JENSEN ET AL. (2011) verwendeten Pegelzeitreihen (siehe Abb. 5). Die Datensätze an den 12 verwendeten Pegelstandorten umfassen hochaufgelöste Wasserstandsmessungen (Minutenwerte) und sind für den 15-jährigen Simulationszeitraum von 2000 bis 2014 verfügbar. Alle Zeitreihen werden allerdings auf eine stündliche Auflösung reduziert, was einem Kompromiss zwischen einer ausreichenden Beschreibung des Wasserstandes und der zeitlichen Auflösung der verfügbaren meteorologischen Datensätze entspricht. Zudem werden vier weitere Pegelstandorte (Hooge, Schlüttsiel, Everschop und Büsum) als „Kontrollpegel" zur Validierung der Ergebnisse verwendet.

Zur Beurteilung der Modellgüte (HNM und empirisch-statistische Windstaumodelle) 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:

$$R^2 = \left(\frac{C(x,y)}{\sqrt{C(x,x)\cdot C(y,y)}}\right)^2 \quad (1)$$

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

$$C(x,y) = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \mu_x)\cdot(y_i - \mu_y) \quad (2)$$

Darin beschreibt n die Länge und μ den Mittelwert der Zeitreihen x und y. Daraus folgt, dass R^2 sich zwischen -1 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:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

Trotz der Berücksichtigung möglichst detaillierter modellinterner Randbedingungen und Parameter, verbleibt 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 als Bias bezeichnet und können im vorliegenden Fall überwiegend auf die räumliche und zeitliche Auflösung der verwendeten Datengrundlage (Wind- und Luftdruckfelder der Reanalyse; Bathymetrie) sowie die gewählte Sohlrauheit im Modellgebiet zurückgeführt werden. Insbesondere stark lokale Effekte werden hierdurch im HNM vernachlässigt. Zur Minimierung der Diskrepanz zwischen simulierten und beobachteten Wasserständen können, wie auch in vielen anderen Bereichen der hydrologischen Modellierung, Bias Korrekturen durchgeführt werden.

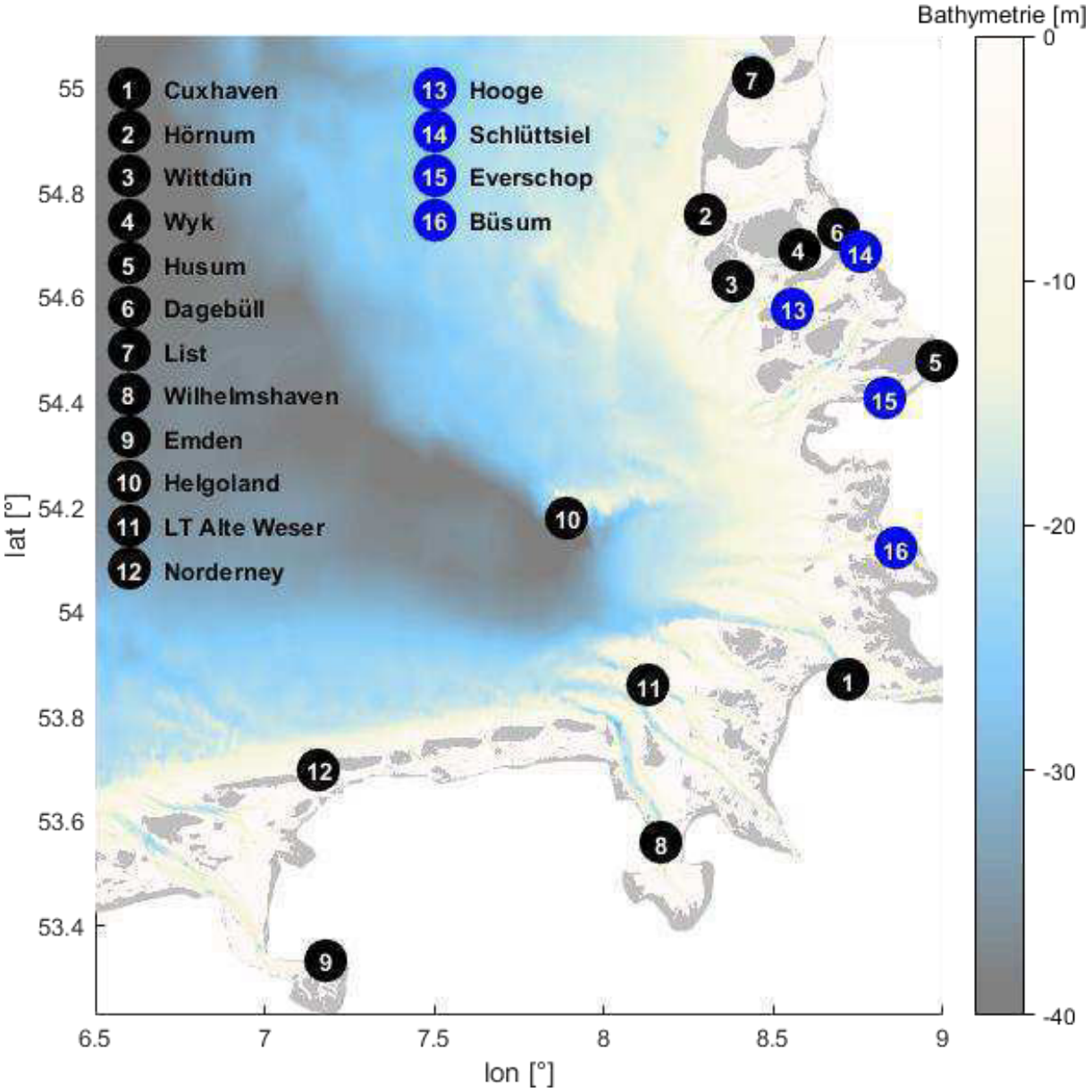


Abbildung 5: Stützstellen (Pegelstandorte) der Kalibrierung, Validierung sowie der Bias-Korrektur. Die schwarzen Punkte zeigen die Pegelstationen aus JENSEN ET AL. (2011), während die blauen Punkte die vier zusätzlich verwendeten Validierungsstandorte darstellen.

Die Bias-Korrektur basiert auf der Ermittlung einer Transferfunktion zwischen den modellierten und den beobachteten Wasserständen an den verfügbaren Pegelständen (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. Die hier verwendete Bias-Korrektur basiert im Wesentlichen auf zwölf Stützstellen (Pegelstandorte) in der Deutschen Bucht (siehe Abb. 5). Die gesamte Vorgehensweise ist im Schaubild in Abb. 6 zusammengefasst und wird im Folgenden Schritt für Schritt erläutert. Anhand der blauen Pegelstandorte („Kontrollpegel“, siehe Abb. 5) wird das Ergebnis der Bias-Korrektur verdeutlicht und die weitere Verwendung der korrigierten Simulationen erläutert.

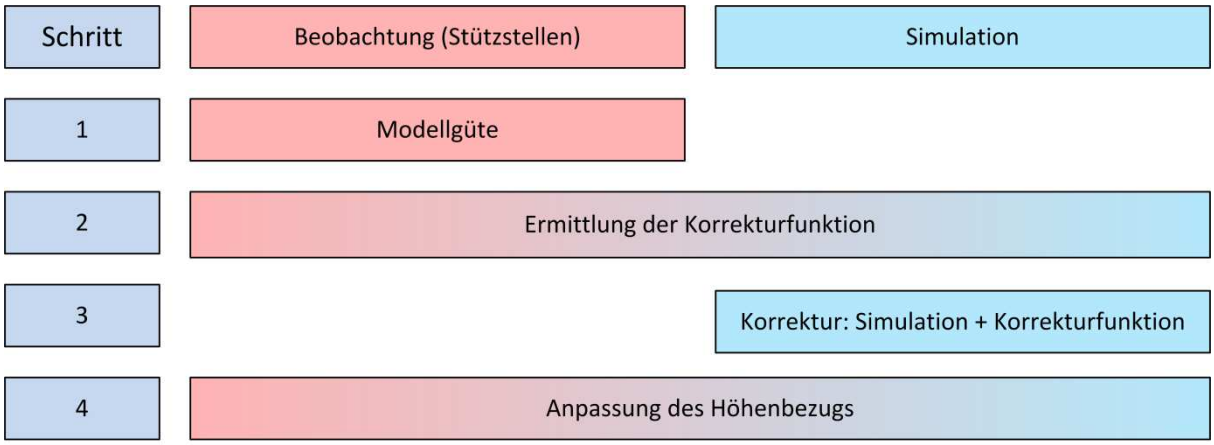


Abbildung 6: Ablaufdiagramm der Bias-Korrektur.

Schritt 1:

Die Modellgüte wird anhand R^2 und RMSE (KRAUSE ET AL., 2005) für alle Pegelstandorte zwischen Beobachtung (Stützstellen) und Simulation bestimmt. Zusätzlich werden Parameter wie ein Zeitversatz oder die Bathymetriehöhe erfasst. Ein Zeitversatz zwischen Beobachtung und Simulation wird berücksichtigt, um modelltechnische Unzulänglichkeiten sowie Verschiebungen der Zeitzone (UTC) zu quantifizieren. Darüber hinaus werden 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.

Schritt 2:

Zur Ermittlung der Korrekturfunktion werden Wichtungsfaktoren abgeleitet, um die ermittelten quantil-basierten Differenzen und Standardabweichungen auf die Simulation zu übertragen. Die Wichtungsfaktoren werden anhand eines funktionalen Zusammenhangs zwischen dem Zeitversatz, der Abhängigkeit der Zeitreihen in Form der linearen Regression, der inversen Distanz, sowie der Bathymetriehöhe ermittelt. Letztere wurde als Kriterium mit aufgenommen, da insbesondere die Abbildungsgüte der Niedrigwasser im Modell stark von der Bathymetriehöhe abhängig ist. Die bestimmten Wichtungsfaktoren werden mit den quantil-basierten Differenzen und Standardabweichungen multipliziert und ergeben, nach einer Addition aller Differenzen und Standardabweichungen, schließlich die Korrekturfunktion.

Schritt 3:

Durch Addition der ermittelten Korrekturfunktion mit der simulierten Zeitreihe wird die simulierte und bias-korrigierte Zeitreihe bestimmt.

Schritt 4:

Im letzten Schritt werden zum einen die trockenfallenden Bereiche der Zeitreihen einheitlich gekennzeichnet. Zum anderen das Bezugsniveau der simulierten und bias-korrigierten Zeitreihe auf das der Beobachtungszeitreihen angepasst. Als Bezugsniveau wird das mittlere Tidehochwasser (MThw) gewählt. Ein Grund für die Wahl des MThw als Bezugsniveau ist, dass bei trockengefallenen Pegeln nicht die komplette Zeitreihe zur Verfügung steht, was bei Verwendung des Mittelwertes zu Verfälschungen führen würde.

Der nächste Punkt in der Methodik widmet sich der Fragestellung, wie der Windstau anhand der simulierten und bias-korrigierten Wasserstandsinformationen 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 & WOODWORTH, 2014). Die harmonischen Verfahren basieren im Wesentlichen auf der Annahme, dass die Frequenzen der einzelnen Partialtiden bekannt sind, woraus sich die Gezeitenkomponente approximieren lässt (GODIN, 1972). Durch die Anpassung harmonischer Schwingungen an den Wasserstand lassen sich Phase und Amplitude der einzelnen Partialtiden ableiten 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 mit 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 Programmodule 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) 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 Programmodule 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 der geeignetere Verfahren darstellt. Ein weiterer und in den bisherigen Vergleichen vernachlässigter Punkt ist,

dass mit der HDdU im Gegensatz zu beispielsweise TTide auch trockengefalle oder unvollständige Zeitreihen analysiert werden können. Dieser Punkt ist insbesondere im Hinblick auf die simulierten und bias-korrigierten 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.

Durch die Anwendung der HDdU ist es möglich, den Windstau aus den simulierten und bias-korrigierten Wasserstandsinformationen 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.

In der vorliegenden Arbeit wird das empirisch-statistische Windstaumodell aus JENSEN ET AL (2013) als Basis herangezogen und auf ausgewählte Pegelstandorte (Abb. 5) sowie die simulierten und bias-korrigierten Wasserstände aus dem HNM angewendet. Der Ablauf ist wie folgt strukturiert: Zuerst wird (i) 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 deutschen Küstenlinie (einschließlich der Inseln und Halligen) benötigt, um in (ii) 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:

$$S(t) = \sum_{j=0}^{n} a_j \, g_j(t) + e(t) \tag{4}$$

S(t) stellt den Windstau zum Zeitpunkt t dar, während a_j bzw. g_j die Regressionskoeffizienten bzw. die Prädikatoren 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 Basisterme verwendet:

$$\mathrm{g_0} = 1 \tag{5}$$

$$\mathrm{g_1} = \mathrm{f}^2 \cos\beta$$

$$\mathrm{g_2} = \mathrm{f}^2 \sin\beta$$

$$\mathrm{g_3} = \mathrm{f}^3 \cos\beta$$

$$\mathrm{g_4} = \mathrm{f}^3 \sin\beta$$

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

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 β. g_5 beschreibt den IBE und erfasst lineare Wasserstandsänderungen des Ozeans durch den atmosphärischen Luftdruck (PONTE, 2006). Im Gegensatz zu MÜLLER-NAVARRA & 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 & ZWIERS, 1999):

$$p = |R|\sqrt{\frac{n-2}{1-R^2}} \tag{6}$$

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 (ANNUTSCH, 1977). Die räumliche Ausdehnung der meteorologischen Daten wird entsprechend auf das Gebiet von etwa -5° bis 30° östlicher Länge und auf etwa 50° bis 70° nördlicher Breite festgelegt (siehe Abb. 13 und Abb. 14). Um den Rechenaufwand zu reduzieren, wird zudem die Auflösung von 1,875° auf 3,75° 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 meteorlogischen Zeitreihen von 60 Gitterpunkten mit jeweils fünf Basistermen (Gl. 5) und unterschiedlichen Zeitversätzen in der Modellentwicklung verwendet. In der Summe resultieren hieraus insgesamt 7200 Prädiktoren pro Standort, die innerhalb der schrittweisen Methodik auf ihren signifikanten Einfluss auf den Windstau getestet werden (siehe Abb. 13 und Abb. 14). 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 Kap. 4.1 verwiesen. Für den Vorhersagemodus werden die Regressionskoeffizienten der empirisch-statistischen Windstaumodelle für die gesamte vorliegende Periode zwischen 2000 und 2014 abgeleitet (Kap. 3.2).

In einem nächsten Schritt (iii) 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 (Abb. 7). Dies bedeutet, dass für definierte Tidewasserstandsklassen individuelle Regressionskoeffizienten für die signifikanten meteorologischen Prädiktoren (siehe Abb. 13 und Abb. 14) 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 Abb. 7 ist das Vorgehen exemplarisch für das Kalenderjahr 2008 und den Pegelstandort Cuxhaven gezeigt. Dargestellt sind die Windstauhäufigkeiten und -intensitäten zu den unterschiedlichen Tidephasen. Hierbei wird der Windstau in vier unterschiedliche Intensitätsklassen eingeteilt und unterschiedlichen Tidephasen (± 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 ≥ 150 cm sechs Stunden vor oder nach dem Thw aufgezeichnet worden. Wenige Stunden vor und nach dem Thw (± 4 Stunden um das Thw) hingegen ist kein Windstauwert ≥ 150 cm in den Aufzeichnungen enthalten. Die physikalische Erklärung liefert primär der geringere sohlnahe Rückstromeffekt bei Tnw, 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 sohlnahen Rückstromeffekt minimieren (ANNUTSCH, 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 Windstaumodelle berücksichtigt.

Im letzten Schritt (iv) werden die empirisch-statistischen Windstaumodelle an jedem Punkt der Küstenlinie im Vorhersagemodus betrieben. Darin werden die Modelle mit meteorologischen Vorhersagen des DWD (Wind- und Luftdruckvorhersagen) aus deren numerischen Wettervorhersagesystemen („ICON-EU“) als Input betrieben. Der prognostizierte Windstau an den jeweiligen Punkten wird anschließend mit der prognostizierten astronomischen Tide am selben Punkt kombiniert, um letztlich den absoluten Wasserstand zu erhalten. Die Verwendung von empirisch-statistischen Modellen ermöglicht darüber hinaus die Quantifizierung der in den Vorhersagen enthaltenen Unsicherheiten in Verbindung mit den Regressionskoeffizienten (z. B. 95%-Konfidenzintervall). Im Idealfall werden für die Ableitung der Regressionskoeffizienten der empirisch-statistischen Windstaumodelle ebenfalls die Vorhersagedaten des DWD verwendet, da diese eine wesentlich höhere räumliche und zeitliche Auflösung aufweisen. Die dafür benötigten Datensätze liegen für das Projekt allerdings nicht vor.

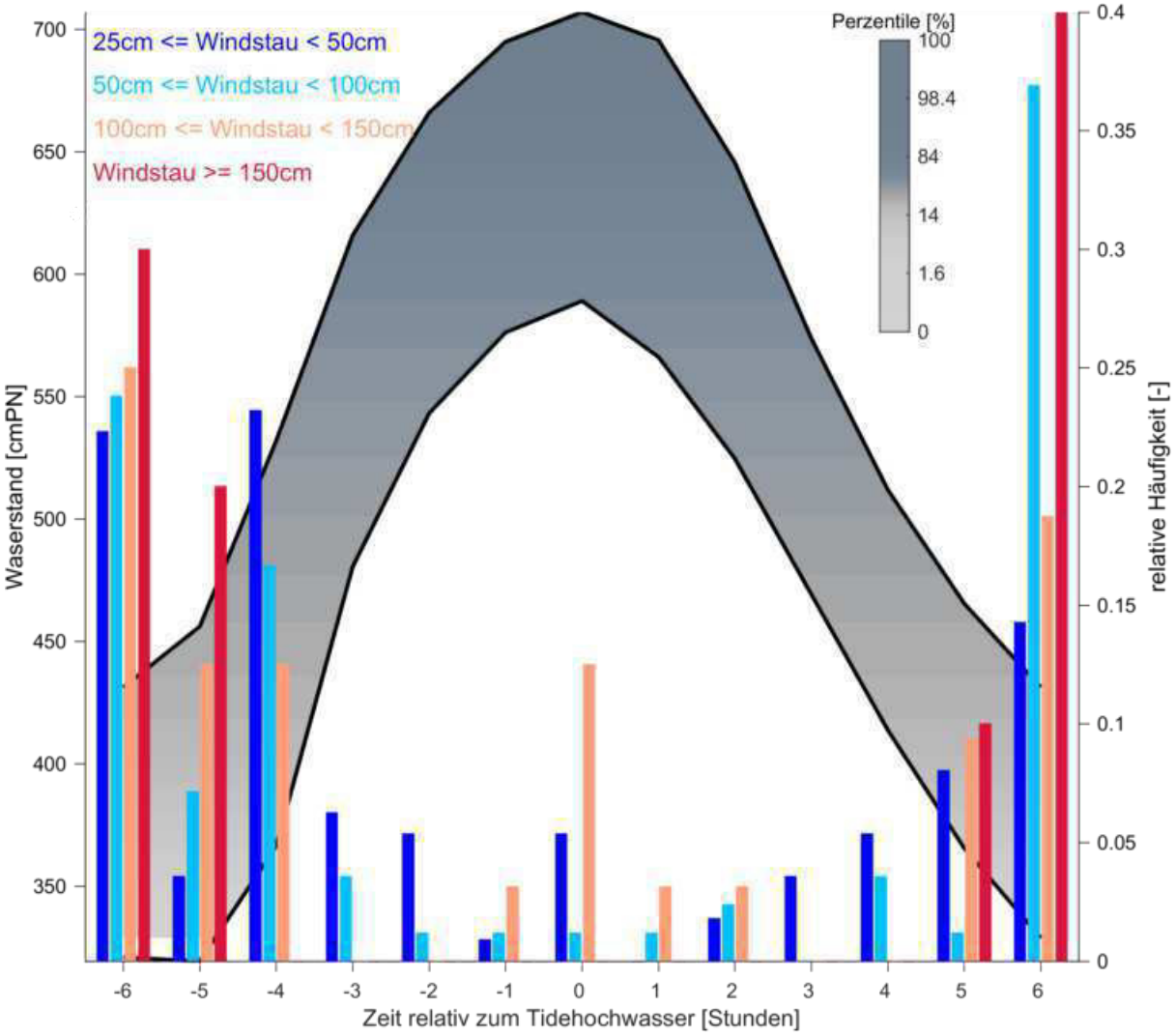


Abbildung 7: Gezeitenanteil und Windstau für das Jahr 2008 am Pegel Cuxhaven. Auf der linken Ordinate ist der mittlere astronomische Wasserstand dargestellt. Die farbliche Abstufung unterteilt die Wasserstände anhand von Perzentilen (logarithmiert), die für die Berücksichtigung der Tide-Windstau Interaktion verwendet werden. Auf der rechten Ordinate ist die relative Häufigkeit des Windstaus zu unterschiedlichen Tidephasen relativ zum Thw abgebildet. Der Windstau wird in vier Intensitätsklassen eingeteilt (25 cm ≤ Windstau < 50 cm; 50 cm ≤ Windstau < 100 cm; 100 cm ≤ Windstau < 150 cm; Windstau ≥ 150 cm).

3 Ergebnisse

3.1 Hydrodynamisch-numerisches Modell

Im Zuge der Modellkalibrierung wird der Einfluss verschiedener Parameter 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 wird im Zuge der Kalibrierung voll automatisiert in einem physikalisch sinnvollen Bereich (40-50 $m^{1/3}/s$; überwiegend Feinsande (HEYER & SCHROTTKE, 2013)) variiert und die Ergebnisse werden mit den Beobachtungswerten verglichen. Die Beobachtungswerte liegen an Pegelstandorten vor, die im ge-

samten Modellgebiet verteilt liegen. 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 $m^{1/3}/s$ 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 Abb. 8 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.

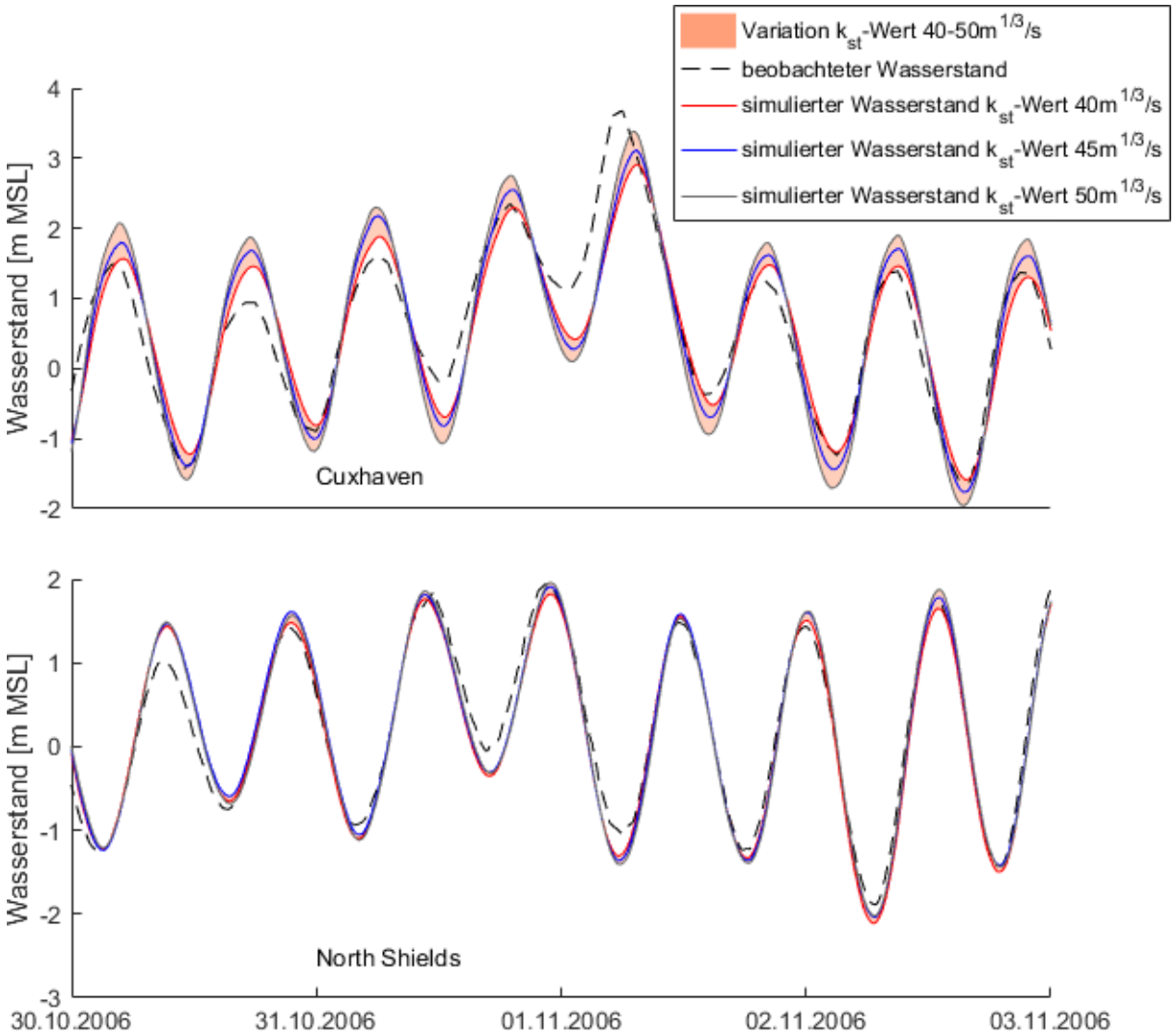


Abbildung 8: Einfluss der Rauheit auf die Wasserstände am Pegel Cuxhaven (oben) und North Shields (unten) zwischen dem 30.10.2006 und dem 03.11.2006 (Allerheiligenflut). Die jeweilige Beobachtung an den Pegelstandorten ist als schwarz-gestrichelte Linie dargestellt. Farblich unterschiedlich als durchgezogene Linie ist die Variation der k_{st}-Werte von 40-50$m^{1/3}/s$ abgebildet. Der Bereich der gesamten Spannweite, resultierend aus der Variation des k_{st}-Werts, ist als rote Schattierung dargestellt.

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 kaum einen signifikanten Einfluss hat. Die Lage aller zur Kalibrierung des HNMs verwendeten Pegelstandorte ist in Abb. 9 dargestellt.

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 (siehe Abb. 9) ist in Tab. 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 Tab. 1 aufgeführt. Im Mittel über alle 33 Pegelstandorte erreicht das HNM eine Performance 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 beobachten 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 Abb. 8). Trotz möglichst detaillierter modellinterner Randbedingungen und Parameter, verbleibt demnach eine Diskrepanz zwischen simulierten und beobachteten Wasserständen. Um diese Abweichungen zu kompensieren, werden die simulierten Wasserstände im Anschluss an die Modellläufe entsprechend der in Kap. 2 erläuterten Vorgehensweise korrigiert.

Tabelle 1: Modellgüte an den Pegelstandorten nach der Kalibrierung: (i) Name des Pegels (vergleiche Abb. 9), (ii) RMSE [m], (iii) R^2 [-], (iv) Zeitversatz [min] und (v) Bathymetrie am Pegelstandort [m MSL]. Die Pegelstandorte innerhalb der Deutschen Bucht sind fett hervorgehoben.

Pegel	**RMSE [m]**	**R^2 [-]**	**Zeitversatz [min]**	**Bathymetrie Modell [m MSL]**
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
Cuxhaven	**0,32**	**0,97**	**10**	**-17,55**
Hörnum	**0,23**	**0,96**	**-10**	**-8,71**
Wittdün	**0,24**	**0,97**	**-10**	**-17,62**
Wyk	**0,25**	**0,97**	**10**	**-7,35**
Husum	**0,46**	**0,96**	**70**	**-3,79**
Dagebüll	**0,28**	**0,97**	**10**	**-2,30**
List	**0,23**	**0,95**	**0**	**-3,50**
Wilhelms-haven	**0,26**	**0,98**	**0**	**-19,07**
Emden	**0,29**	**0,97**	**30**	**-7,16**
Helgoland	**0,24**	**0,97**	**0**	**-4,36**
LT Alte We-ser	**0,26**	**0,98**	**0**	**-13,03**
Norderney	**0,25**	**0,96**	**0**	**-11,57**

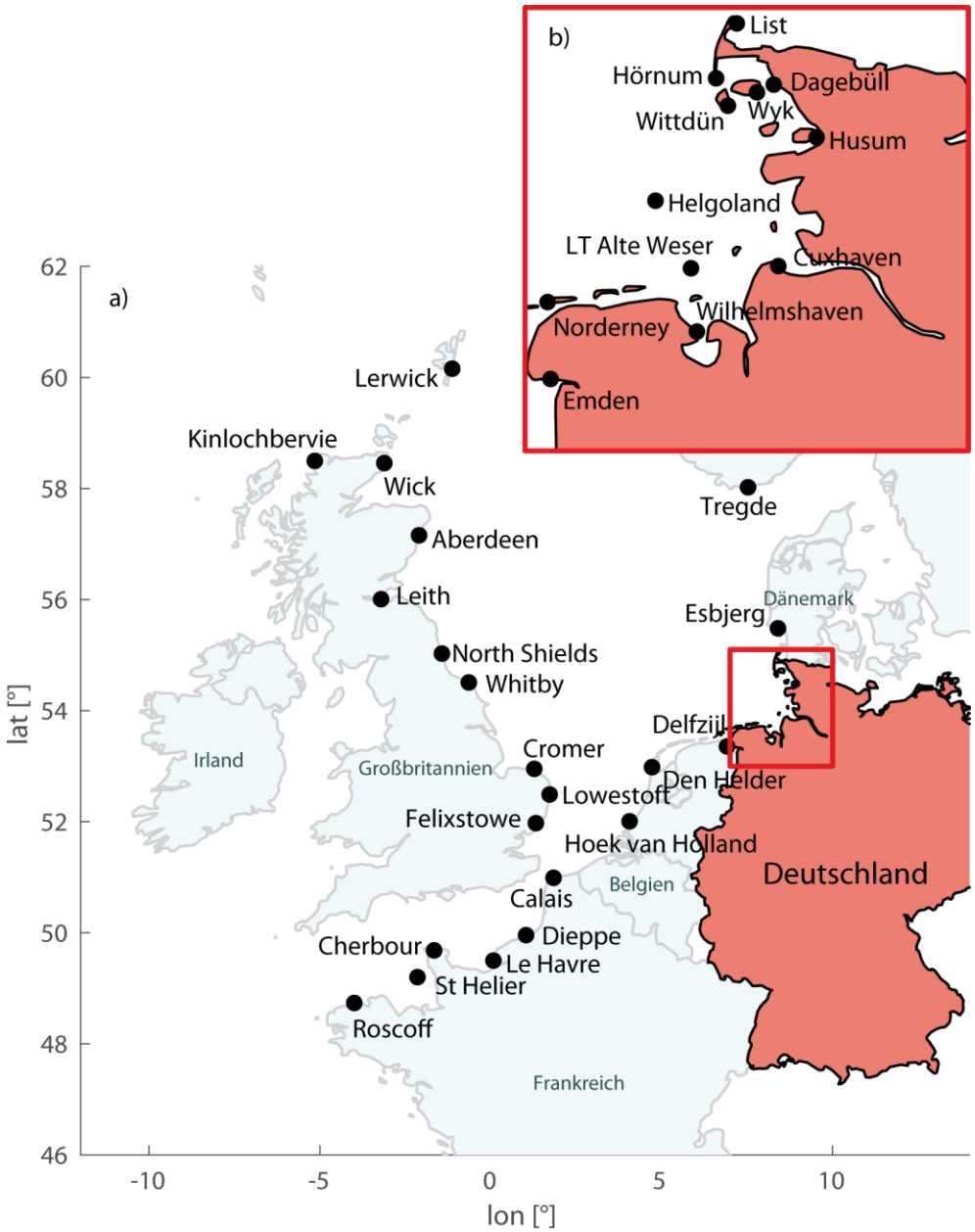


Abbildung 9: Die zur Kalibrierung des HNMs verwendeten Pegelstandorte sind als schwarze Punkte dargestellt. a) Modellbereich außerhalb der Deutschen Bucht. b) Dateilausschnitt der Pegelstandorte innerhalb der Deutschen Bucht.

Am Beispiel vom Pegelstandort Hooge wird in Abb. 10 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 0,09 m einstellt. Das Bestimmtheitsmaß R^2 kann von 0,95 auf 0,99 verbessert werden. Abb. 11 zeigt darüber hinaus, woraus die Abweichungen in den mittleren Wasserständen aus Abb. 10 resultieren. So werden die Ergebnisse des HNM auf die koordinierte Weltzeit UTC+00:00 Stunden ausgegeben, während die Aufzeichnungen an den Pegeln in der Deutschen Bucht in der Regel in UTC+01:00 Stunde vorliegen. Der Zeitversatz von einer Stunde wird im Zuge der Bias-Korrektur eliminiert. Die Unter- respektive Überschätzung der Thw und Tnw kann durch die Anbringung der

Korrektur deutlich reduziert werden (siehe Abb. 10). Durch die zusätzliche Angabe von Konfidenzbereichen (siehe Abb. 11) werden verbleibende Unsicherheiten in den simulierten und bias-korrigierten Wasserständen für den weiteren Prozess berücksichtigt. In Abb. 11 wird zudem deutlich, dass die Konfidenzbereiche in den höheren bzw. niedrigeren Wasserständen deutlich größer werden, als in den mittleren Bereichen der Zeitreihe.

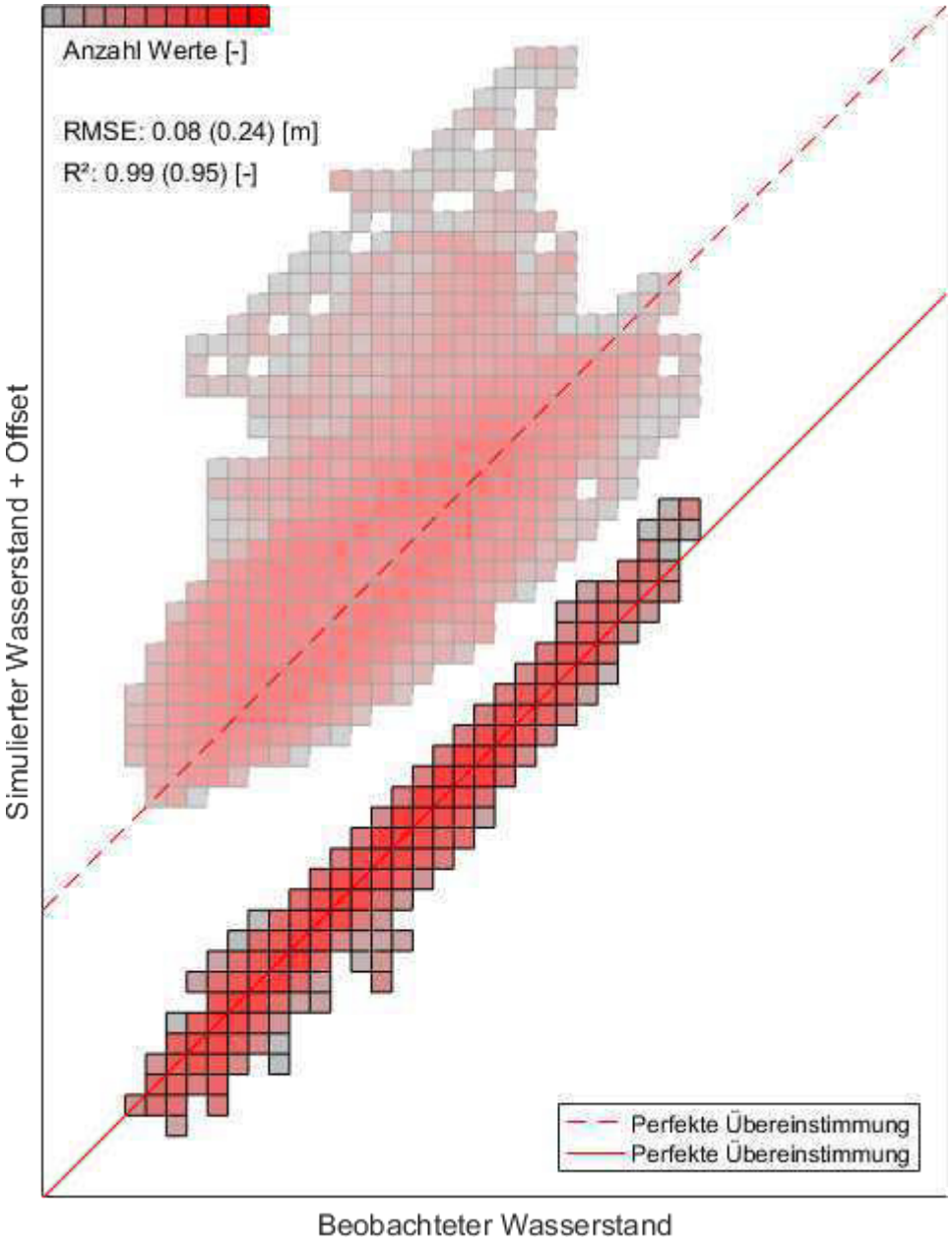


Abbildung 10: „Kontrollpegel“ Hooge vor und nach der Bias-Korrektur. Die Grafik zeigt auf der Abszisse die beobachteten Wasserstände und auf der Ordinate die Simulation vor (mit Offset) und nach der Korrektur. Die Häufigkeit des Auftretens von Wertepaaren ist mit einer Farbskala dargestellt. Mit zunehmender Rotfärbung nimmt die Häufigkeit zu. Die Winkelhalbierende als Maß der absoluten Übereinstimmung ist vor (mit Offset) bzw. nach der Korrektur als rote gestrichelte bzw. als rote durchgezogene Linie dargestellt. Die jeweiligen Verbesserungen durch die Bias-Korrektur anhand des RMSE und des R^2 sind im oberen Bereich aufgeführt. Der Wert in Klammern beschriebt dabei den Wert vor der Korrektur.

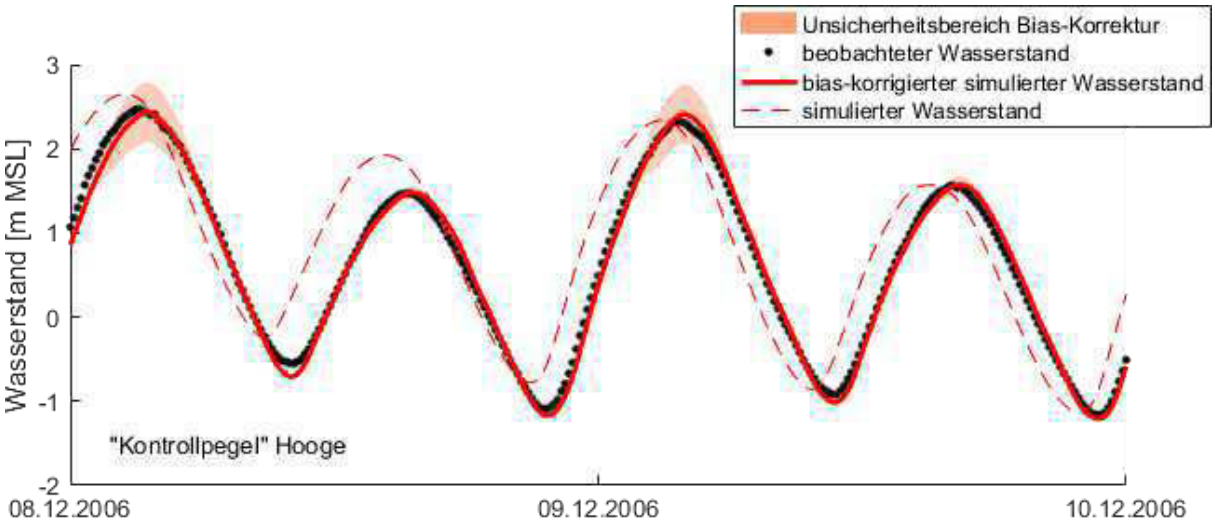


Abbildung 11: „Kontrollpegel“ Hooge vor und nach der Bias-Korrektur zwischen dem 08.12.2006 und dem 10.12.2006. Die simulierte Zeitreihe vor der Korrektur ist als blaue, gestrichelte Linie und die Zeitreihe der Beobachtung als schwarze, gestrichelte Linie abgebildet. Die Zeitreihe nach der Korrektur wird durch eine blaue durchgezogene Linie dargestellt. Die Unsicherheiten aus der Bias-Korrektur sind als rote Schattierung enthalten.

Die Validierung der Bias-Korrektur anhand der verfügbaren „Kontrollpegel“ zeigt die Reduzierung der Diskrepanz zwischen simulierten und beobachteten Wasserständen (Abb. 10 und Abb. 11). 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 1484 Punkte mit einem mittleren Abstand von 1 km entlang der Küstenlinie (einschließlich Inseln und Halligen) exportiert. Diese Punkte beschreiben den Bereich, für den in den folgenden Kapiteln die Wasserstandsvorhersage entwickelt wird. Da der Großteil der Deutschen Bucht während Tnw 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 Tab. 2 zusammengestellt 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.

In Abb. 12 sind die 1484 exportierten Punkte aus dem HNM dargestellt. Jeder Punkt ist farblich anhand seines zugeordneten Flags eingefärbt. 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 HNM zurückzuführen ist. Für die weitere Verwendung und die Ableitung der Windstaumodelle entstehen dadurch allerdings keine Einschränkungen. Für die weitere Vorgehensweise wird angenommen, dass die simulierten und biaskorrigierten Wasserstände qualitativ Naturmessungen entsprechen und dass die nach der Bias-Korrektur verbleibenden Fehler vernachlässigbar klein sind.

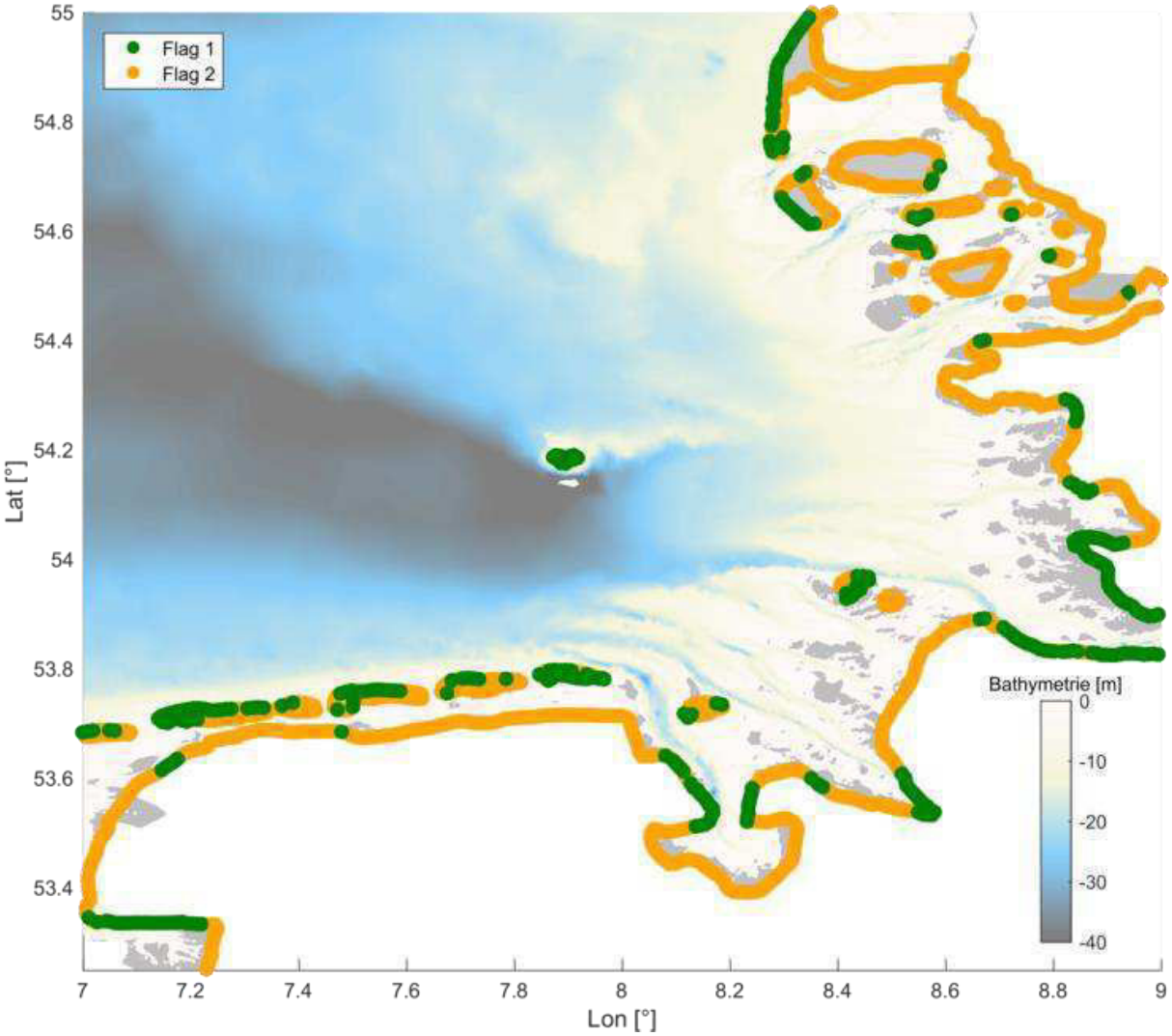


Abbildung 12: Exportierte Küstenlinie aus dem HNM (1484 Punkte im Abstand von etwa 1 km) mit zugeordneten Flags. Die Flags werden durch Punkte dargestellt (Flag 1: grüner Punkt; Flag 2:orangener Punkt). Im Hintergrund ist die Bathymetrie der Deutschen Bucht farblich anhand der Tiefe abgebildet.

3.2 Windstau

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Entwicklung der empirisch-statistischen Windstaumodelle erläutert. Dies beinhaltet zum einen eine Überprüfung der physikalischen Plau-

sibilität der Prädiktorenauswahl und zum anderen eine statistische Bewertung der Modellperformance für ausgewählte Pegelstandorte (Abb. 5) sowie für die 1484 Gitterpunkte entlang der Küstenlinie in der Deutschen Bucht (Abb. 12).

Das Ergebnis der Prädiktorenauswahl mittels der in Kap. 2 beschriebenen schrittweisen multiplen linearen Regression ist für die Pegelstandorte Cuxhaven und List in Abb. 13 bzw. Abb. 14 dargestellt. 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 (Abb. 13 und Abb. 14) jeweils neun von ursprünglich 7200 (vergleiche Kap. 2) 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 (Abb. 13 oben links/rechts). Die statistisch signifikanten Prädiktoren, die auf der atmosphärischen Luftdruckkomponente basieren, befinden sich alle in benachbarten Gitterzellen über dem Skagerrak (Abb. 13 unten links). Darüber wird eine der häufigsten Zugbahnen von Stürmen über der Nordsee beschrieben, die normalerweise vom Nordatlantik über den Skagerrak zur zentralen Ostsee und zu einem erhöhten Windstau führen (JENSEN & MÜLLER-NAVARRA, 2008).

Der Pegelstandort List liegt im Vergleich zu Cuxhaven weiter nördlich in Nordfriesland und weißt 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 (Abb. 14 oben links). Bezogen auf die Windkomponenten werden nur zonal gerichtete Prädiktoren als statistisch signifikant eingeordnet, wobei alle meridionalen Windkomponenten in der schrittweisen Regression rausfallen.

Für die beiden Pegelstandorte Cuxhaven und List finden sich statistisch signifikante Prädiktoren 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.

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 & 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 (Abb. 13 und Abb. 14) 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 Tab. 3 und Tab. 4 für die betrachteten Pegelstandorte Cuxhaven und List aufgelistet.

Die Performance der Windstaumodelle an allen Pegelstandorten aus (Abb. 5) ist in Abb. 15 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 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 ± Standardabweichung)) der Variabilität. Die mittlere quadratische Abweichung erreicht im Mittel über alle Pegelstandorte einen Wert von RMSE = 16 ± 3 cm (Mittelwert ± 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. Der Vergleich des empirisch-statistischen Windstaumodells am Pegel Cuxhaven ($R^2 = 0{,}79$; RMSE = 16 cm) mit JENSEN ET AL. (2013) zeigt nahezu identische Ergebnisse ($R^2 = 0{,}82$; RMSE = 15,9 cm). In JENSEN ET AL. (2013) wurde hingegen bereits die Interaktion zwischen Tide und Windstau berücksichtigt.

Tabelle 3: Signifikante Prädiktoren des empirisch-statistischen Windstaumodells am Pegelstandort Cuxhaven: (i) Nummer des Prädiktors, (ii) Prädiktor, (iii) Regressionskoeffizient und (iv) p-Wert des Prädiktors.

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: (i) Nummer des Prädiktors, (ii) Prädiktor, (iii) Regressionskoeffizient und (iv) p-Wert des Prädiktors.

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 Verteilung der Pegelstandorte in der Deutsche Bucht wird als repräsentativ angenommenen, woraus sich Rückschlüsse auf die generelle Modellgüte für die Deutsche Bucht ableiten lassen (vergleiche Abb. 17). Generell zeigt sich in der beschriebenen Variabilität und der mittleren quadratischen Abweichung zwischen beobachtetem und rekonstruiertem Windstau, dass die maßgeblichen statischen 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 (z. B. nichtlineare Interaktionen, komplexe Bathymetrie mit Prielen und Wattflächen) 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 derartiger nichtlineare Interaktionen, insbesondere der Interaktion zwischen Tide und Windstau, erläutert.

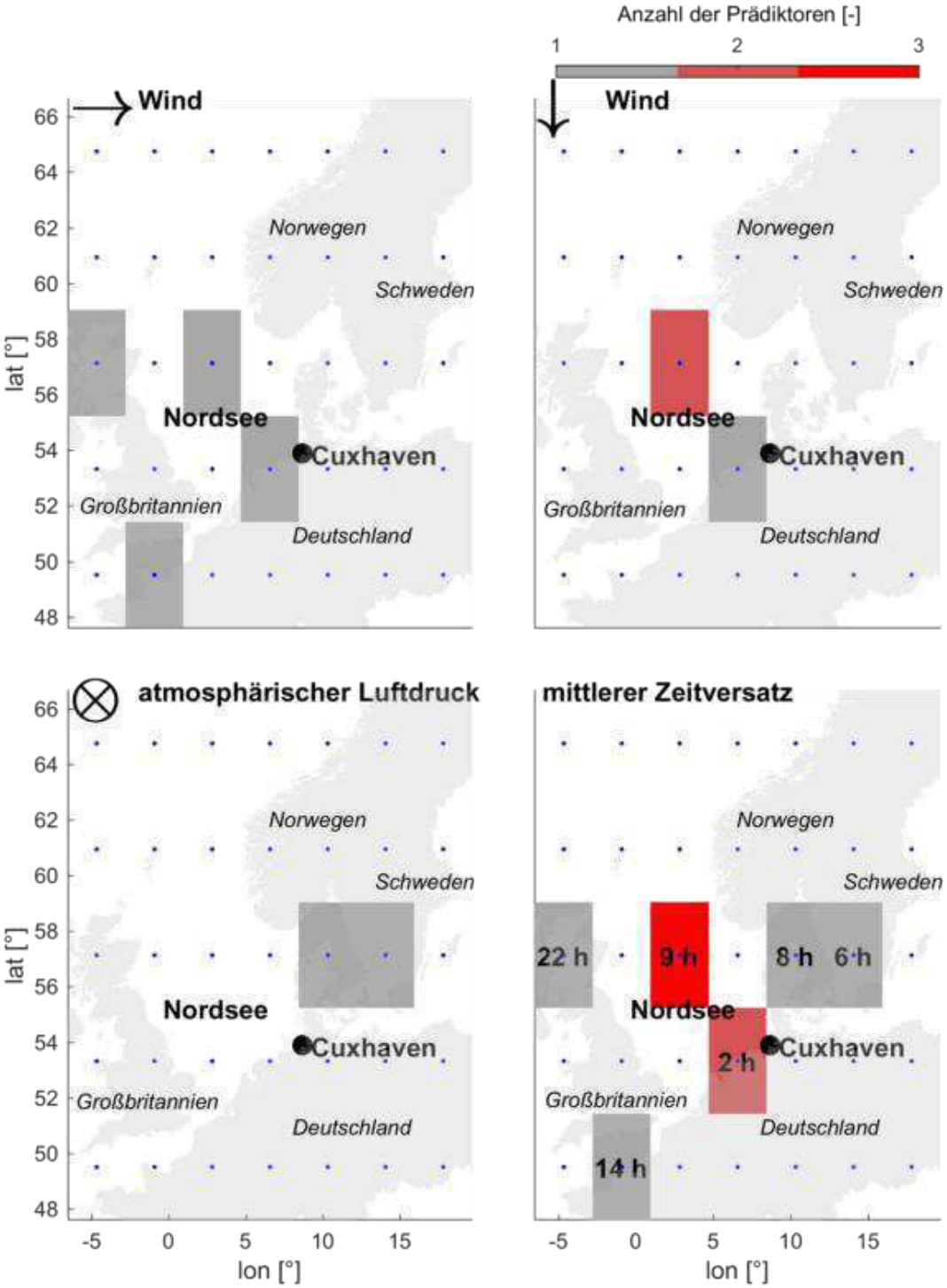


Abbildung 13: Ergebnis der schrittweisen multiplen Regression am Beispiel Cuxhaven (schwarzer Punkt). Es werden die signifikanten Prädiktoren zur Beschreibung des Windstaus dargestellt (vergleiche Tab. 3). Die signifikanten Prädiktoren der zonalen Windkomponente sind oben links, die der meridionalen 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 vorgenommen Trennung in quadratische/kubische Komponenten des Windes möglich). Die blauen Punkte stellen die betrachteten meteorologischen Gitterpunkte aus den verwendeten Reanalyse-Daten dar.

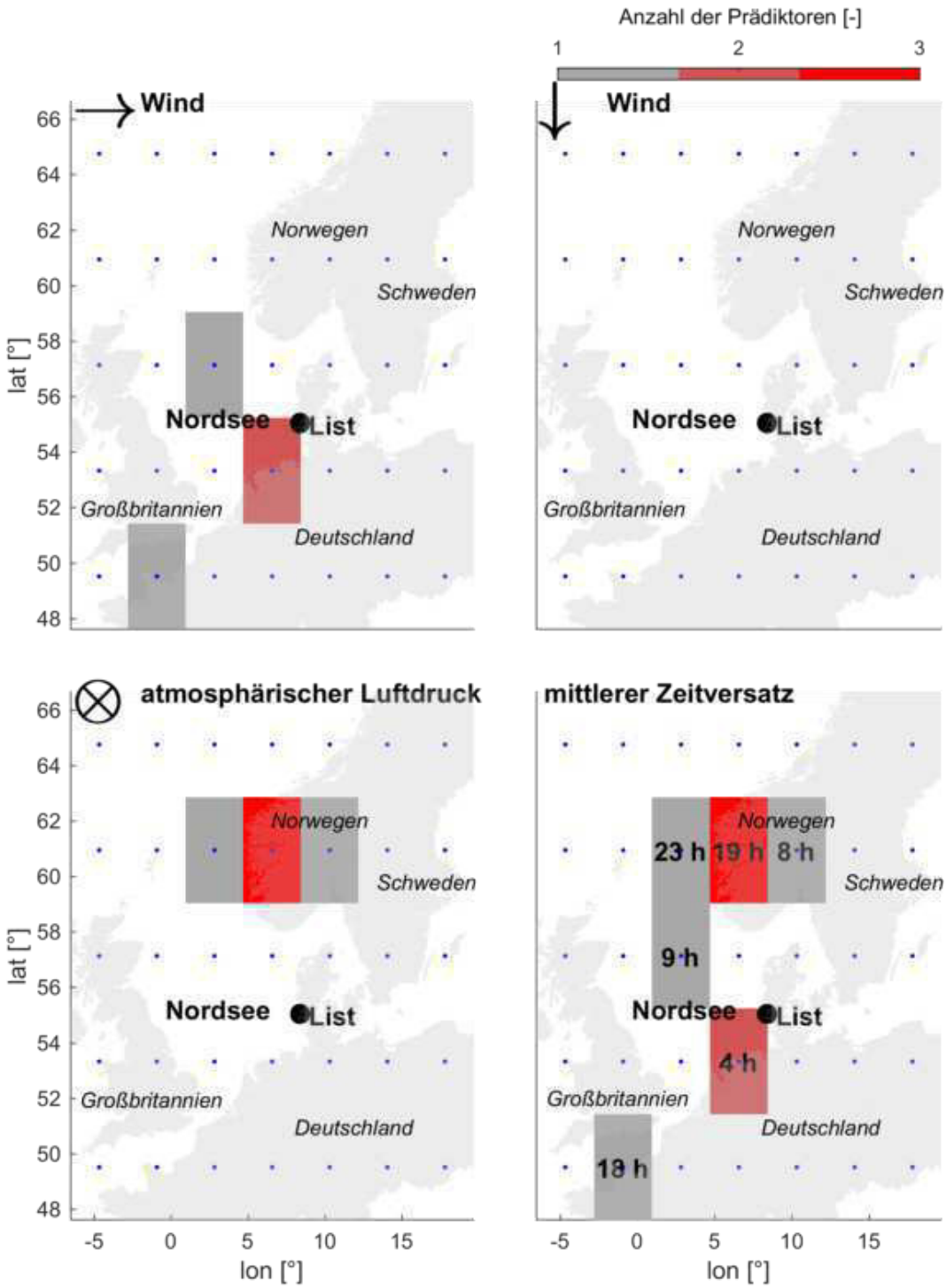


Abbildung 14: Ergebnis der schrittweisen multiplen Regression am Beispiel List (schwarzer Punkt). Es werden die signifikanten Prädiktoren zur Beschreibung des Windstaus dargestellt (vergleiche Tab. 4). Die signifikanten Prädiktoren der zonalen Windkomponente sind oben links, die der meridionalen Windkomponente 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 vorgenommen Trennung in quadratische/kubische Komponenten des Windes möglich). Die blauen Punkte stellen die betrachteten meteorologischen Gitterpunkte aus den verwendeten Reanalyse-Daten dar.

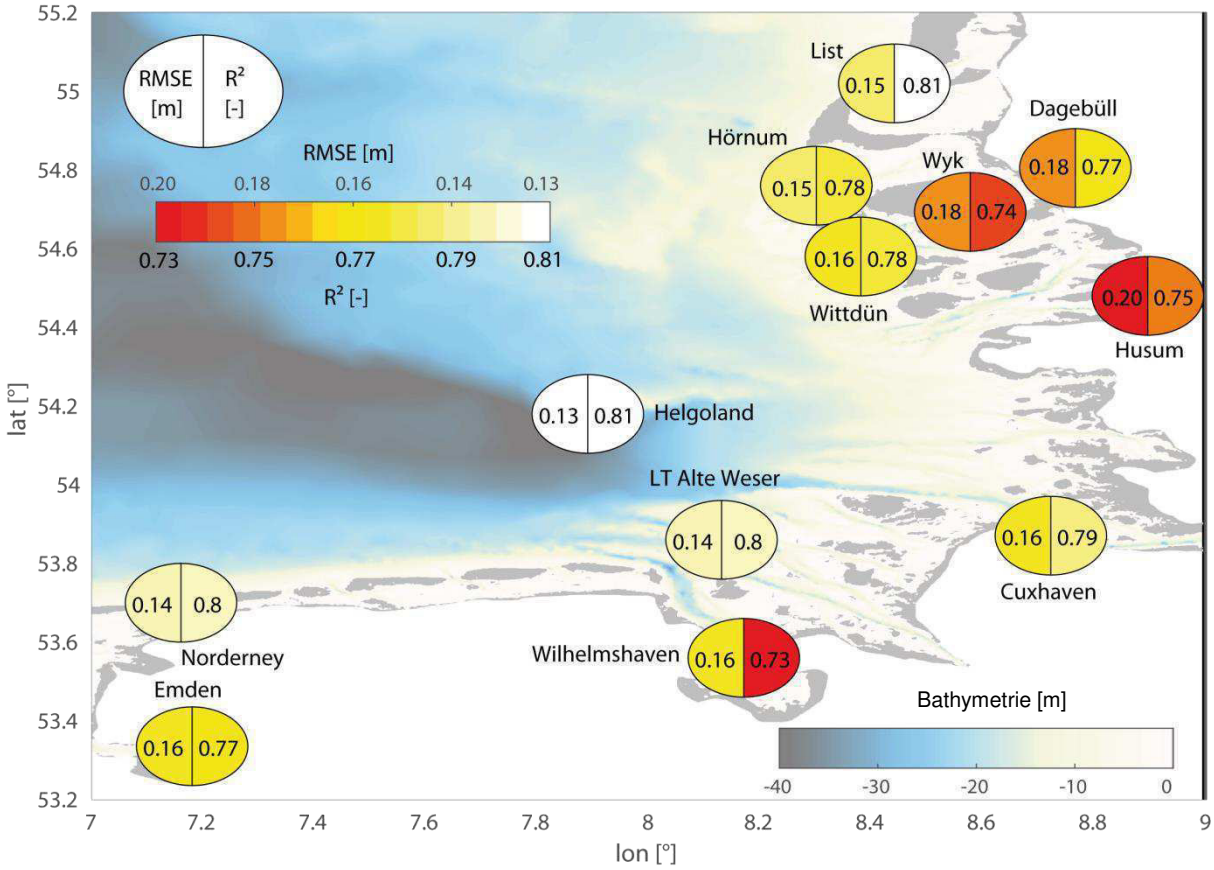


Abbildung 15: Effizienzkriterien der empirisch-statistischen Windstaumodelle (ohne Berücksichtigung der Interaktion zwischen Tide und Windstau) an den Pegelstandorten in der Deutschen Bucht. Die Absolutwerte der Effizienzkriterien sind jeweils in den Ellipsen angegeben (links: RMSE; rechts: R^2) und farblich abgestuft dargestellt. Im Hintergrund ist die Bathymetrie der Deutschen Bucht farblich anhand der Tiefe abgebildet.

Um die erheblichen nichtlinearen Interaktionen zwischen Tide und Windstau in der flachen Deutschen Bucht zu erfassen, werden die empirisch-statistischen Windstaumodelle in Anlehnung an JENSEN ET AL. (2013) in einem nächsten Schritt für verschiedene Tidephasen abgeleitet (vergleiche Kap. 2).

Die Verbesserung der empirisch-statistischen Windstaumodelle durch die Berücksichtigung der Interaktion zwischen Tide und Windstau wird an jedem Pegelstandort durch das Bestimmtheitsmaß R^2 und die mittlere quadratische Abweichung RMSE bewertet. In Abb. 16 ist beispielhaft die Verbesserung anhand des RMSE für alle Pegelstandorte gezeigt. Die Resultate der beschriebenen Variabilität R^2 verhalten sich analog. 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 (Abb. 15). 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 (vergleiche Kap. 2). Auch der Einfluss der Windeinwirkung auf eine geringere Wassersäule wird

bei Tnw verstärkt und erklärt die unterschiedliche Verbesserung im Vergleich zwischen niedrigen und hohen Perzentilen. Insgesamt werden die aus den gezeigten Untersuchungen in Abb. 7 abgeleiteten Erkenntnisse bestätigt. Die Verbesserungen durch die Berücksichtigung der Tide-Windstau Interaktion spiegelt sich maßgeblich in den niedrigen und hohen Perzentilen wider.

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 Abb. 15. Am Pegel Helgoland fallen die perzentilbasierten Verbesserungen im Verhältnis etwas geringer aus, was mit weniger stark ausgeprägten lokalen Effekten (siehe oben) 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.

Zusammenfassend werden die theoretischen Überlegungen und Auswertungen zur Tide-Windstau Interaktion mit den hier vorgestellten Ergebnissen bestätigt. Durch die vorgestellte Erweiterung der empirisch-statistischen Windstaumodelle wird eine Möglichkeit geliefert, diese nichtlineare Abhängigkeit in der Praxis zu berücksichtigen.

Die beschriebene Vorgehensweise kann auf jede beliebige Zeitreihe des HNM-Outputs angewendet werden. Hierfür werden die 1484 Gitterpunkte entlang der Küstenlinie verwendet, wie in Abb. 12 dargestellt. Das Resultat unter Berücksichtigung der Tide-Windstau Interaktion ist in Abb. 17 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 Abb. 15). Die mittlere quadratische Abweichung variiert zwischen RMSE = 8 cm und RMSE = 20 cm und bestätigt ebenfalls die ermittelte Modellperformance an den Pegelstandorten in Abb. 15. Das mittlere Bestimmtheitsmaß erreicht über alle 1484 Punkte entlang der Küstenlinie (einschließlich der Inseln und Halligen) einen Wert von $R^2 = 0{,}81$ (RMSE = 14 cm).

Die Modellperformance variiert innerhalb der Deutschen Bucht und zeigt maßgebliche Unterschiede hinsichtlich der geographischen Lage der 1484 Gitterpunkte. An den Nordküsten der ostfriesischen Inseln wird die höchste Modellperformance anhand des Bestimmheitsmaßes 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 ($R^2 < 0{,}8$).

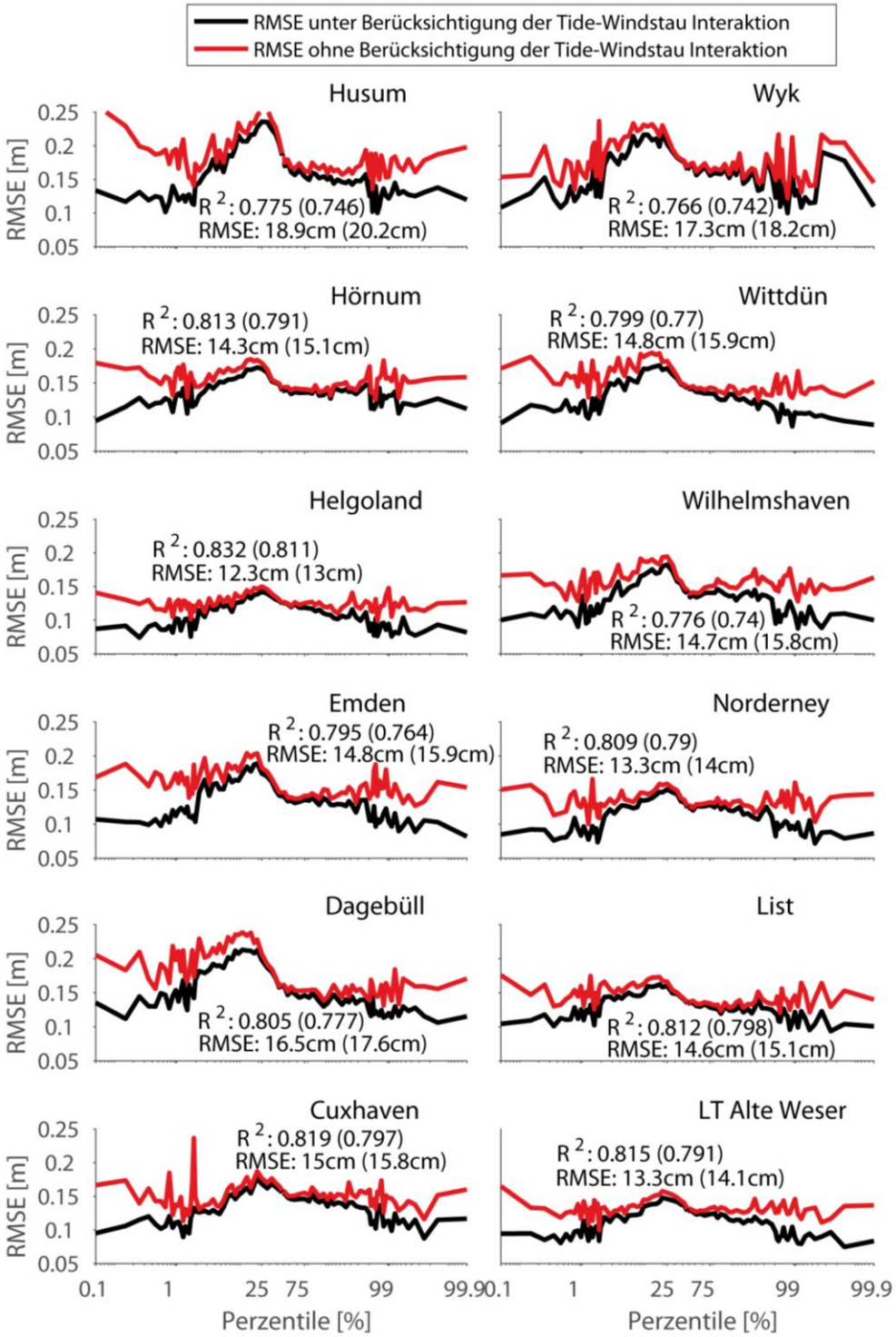


Abbildung 16: Optimierung der Windstaumodelle durch Berücksichtigung der Interaktion zwischen Wasserstand und Windstau an den Pegelstandorten (Abb. 5). Die Perzentile auf der Abszisse sind logarithmiert, um insbesondere die hohen und niedrigen Perzentile analysieren zu können. In rot sind jeweils die mittlere quadratische Abweichungen RMSE der empirisch-statistischen Windstaumodelle für die jeweiligen Perzentile ohne und in schwarz unter Berücksichtigung der Tide-Windstau Interaktion dargestellt. Zusätzlich sind der RMSE und das Bestimmheitsmaß R^2 über die gesamten Zeitreihen angegeben. Die Klammerwerte beschreiben dabei die Effizienzkriterien ohne Berücksichtigung der Tide-Windstau Interaktion.

Zusammenfassend liegt die Modellperformance der empirisch-statistischen Modelle in der gleichen Größenordnung wie an den einzelnen Pegelstandorten. Zudem wird für alle 1484 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. Die Qualität der Modellergebnisse ist in Anbetracht des geplanten Anwendungsfalls hinreichend genau.

Im anschließenden Kap. 4 werden die Methodik aus Kap. 2 sowie die resultierenden Ergebnisse aus Kap. 3 zu einer Wasserstandsvorhersage zusammengeführt. Anhand eines praktischen Beispiels wird ein aufgezeichnetes Sturmflutereignis nachgebildet und darüber hinaus ein operationeller Testbetrieb entwickelt.

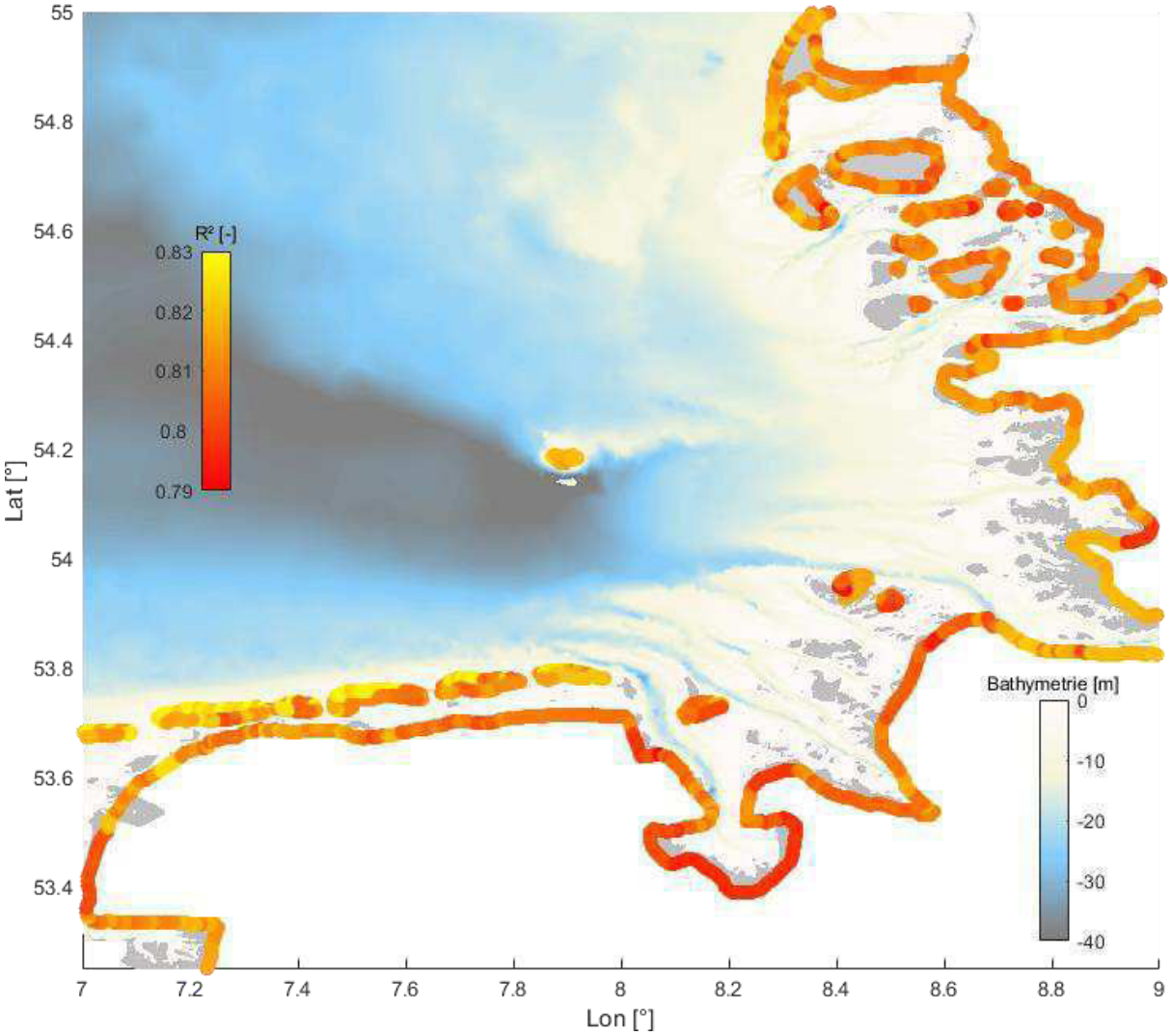


Abbildung 17: Exportierte Küstenlinie aus dem HNM (1484 Punkte im Abstand von etwa 1 km) mit zugeordnetem Bestimmheitsmaß R^2. Die Einfärbung der Punkte zeigt die Modellgüte der empirisch-statistischen Windstaumodelle unter der Berücksichtigung der Tide-Windstau Interaktion. Im Hintergrund ist die Bathymetrie der Deutschen Bucht farblich anhand der Tiefe abgebildet.

4 Wasserstandsvorhersage

4.1 Orkan „Xaver“

In Abstimmung mit AP2 (DREIER & FRÖHLE, 2018) wurde das empirisch-statistische Windstaumodell ebenfalls im Vorhersagemodus für ein Extremereignis getestet. Dafür wurde 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.

Für die Analyse werden sowohl die oben genannten Reanalysefelder als auch die tatsächlichen meteorologischen Vorhersagen verwendet, die vom DWD zur Verfügung gestellt wurden. 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° Richtung der Längengrade und 0,05° Richtung der Breitengrade. Mit dieser erweiterten Datenbasis kann der Einfluss des meteorologischen Antriebs der empirisch-statistischen Windstaumodelle auf die Ergebnisse der Rekonstruktion und der Vorhersage des Windstaus dargestellt und diskutiert werden.

Im Folgenden wird die Vorhersagegüte der Windstaumodelle exemplarisch für den Pegelstandort Cuxhaven erläutert. Dafür werden die Regressionskoeffizienten 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 Bestimmheitsmaß von $R^2 = 0{,}82$ (unter Berücksichtigung der Tide-Windstau Interaktion) und eine mittlere quadratische Abweichung von RMSE = 16 cm (unter Berücksichtigung der Tide-Windstau Interaktion). Diese Werte sind nahezu identisch zu den Werten, die sich über den gesamten Zeitraum von 2000-2014 (siehe Kap. 3.2) bzw. die Trainingsperiode 2000-2012 ergeben.

Weiterhin wurden für die Rekonstruktion des Windstaus auch die realen Vorhersagedaten des DWD als Prädiktoren im empirisch-statistischen Windstaumodell verwendet. Hierbei ist es eingehend wichtig zu erwähnen, dass ein operationeller Betrieb und ein Vergleich zu den Modellen auf Basis der Reanalyse-Daten eigentlich auch die Ableitung eines separaten, auf Basis von Vorhersagedaten abgeleiteten, empirisch-statistischen Windstaumodelles erfordert. Dies ist darin begründet, dass das DWD-Modell eine wesentlich höhere zeitliche und räumliche Auflösung als die Reanalyse-Daten besitzt und sich somit leicht unterschiedliche Prädiktoren ergeben können. Für das Projekt liegen allerdings keine langzeitlichen Vorhersagen des DWD aus der Vergangenheit vor, weshalb hier vereinfachend die ereignisbasierten Vorhersagen des DWD zu „Xaver“ auf das bestehende Modell angewendet werden.

In Abb. 18 sind die Ergebnisse des Vergleichs der Rekonstruktion vom Orkan „Xaver“ am Pegel Cuxhaven mit Reanalyse-Daten und DWD-Vorhersagen 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 Bestimmheitsmaß 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, allerdings stellt sich hier die Frage, ob das Sturmflutereignis in der meteorologischen Reanalyse detailliert genug abgebildet ist.

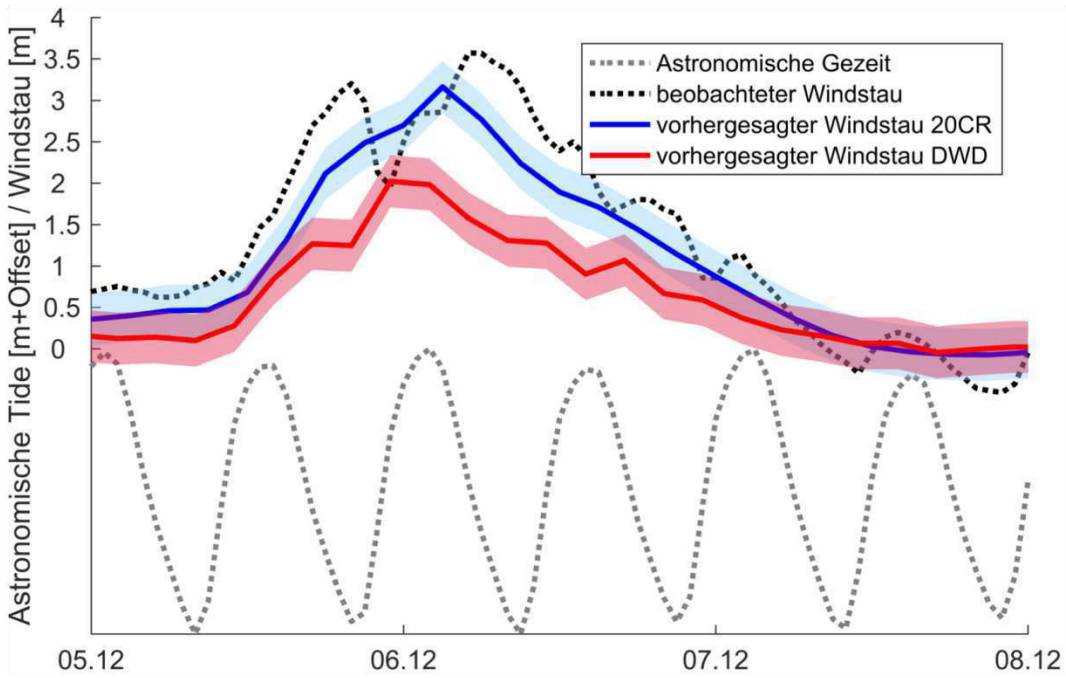


Abbildung 18: Vergleich der Rekonstruktion von Orkan „Xaver“ am Pegel Cuxhaven mit Reanalyse-Daten und DWD-Vorhersagen In schwarz gepunktet ist die beobachtete Windstaukurve abgebildet. Die graue gestrichelte Linie zeigt die astronomische Komponente. Der rekonstruierte bzw. vorhergesagte Windstau ist als rote Linie (Reanalyse-Daten) 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.

Im Gegensatz dazu, resultiert aus der Verwendung der DWD-Vorhersage als Antrieb eine deutliche Unterschätzung des maximalen Windstaus bzw. des gesamten Sturmflutereignisses. Das Bestimmheitsmaß ist hier $R^2 = 0{,}85$ und somit etwas geringer als mit den Reanalyse-Daten. 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. In Abb. 19 sind die meteorologischen Felder aus den Reanalyse-Daten und den DWD-Vorhersagen gegenübergestellt. Durch eine räumliche Interpolation werden die unterschiedlichen Auflösungen beider Datensätze

eliminiert, indem sie auf ein einheitliches Gitter transformiert werden. Die Abweichungen im Luftdruck bewegen sich in einer Größenordnung von ± 1 hPa im Maximum. Die hieraus resultierenden Differenzen sind daher nicht verantwortlich für die Abweichungen in der Windstau-Vorhersage. Werden die effektiven Windrichtungen in Abb. 19 verglichen, fällt auf, dass die Westwinde in den Reanalyse-Daten stärker ausgeprägt sind. Diese Abweichungen können bereits für die Unterschätzung des Windstaus verantwortlich sein. Wie jedoch oben bereits angedeutet, können die beobachteten Differenzen allerdings auch der Tatsache geschuldet sein, dass die Regressionskoeffizienten in beiden Experimenten auf Basis der Reanalyse-Daten und nicht auf Basis der DWD-Daten selbst abgeleitet wurden. Dies sollte für einen operationellen Testbetrieb 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.

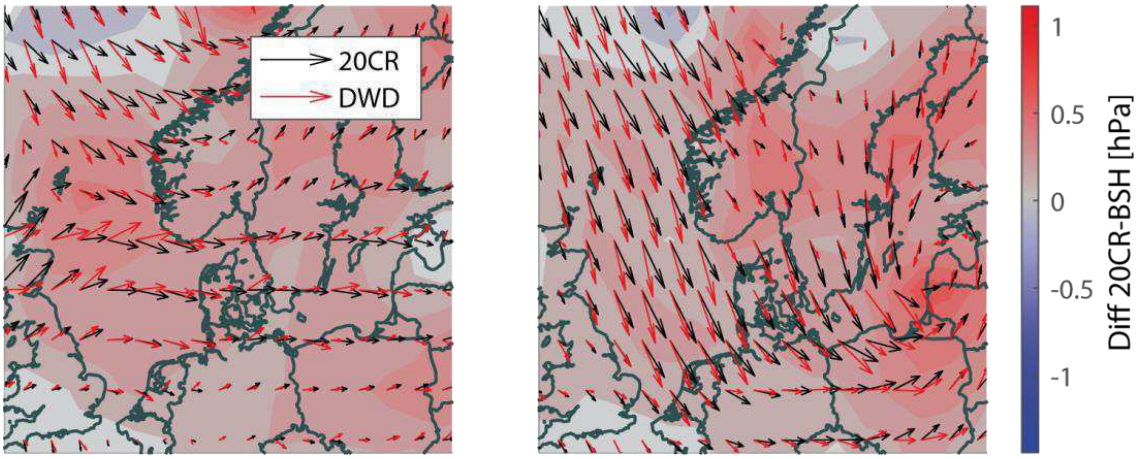


Abbildung 19: Vergleich der atmosphärischen Felder aus Reanalyse-Daten und DWD-Vorhersagen. Die windrichtungsanzeigenden Pfeile (rot: DWD-Vorhersage; schwarz: Reanalyse-Daten) entsprechen jeweils einem Gitterpunkt, für den meteorlogische Informationen vorliegen. Anhand der Länge und Richtung der Pfeile können die Unterschiede der meteorologischen Datensätze nachvollzogen werden. Die Differenzen im atmosphärischen Luftdruck sind als Konturplot im Hintergrund farblich abgestuft. Die linke Grafik zeigt den 05.12.2013 00:00 Uhr. Die rechte Grafik zeigt den 06.12.2013 12:00 Uhr.

4.2 Operationeller Testbetrieb

Die Überführung der empirisch-statistischen Windstaumodelle in den operationellen Testbetrieb erfolgt auf einem zeitgesteuertem Server am Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu). In einem halbstündigen Zyklus werden die erforderlichen Daten vom Server des DWD (opendata.dwd.de) auf Aktualität überprüft und heruntergeladen. Es erfolgen automatisiert 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 Kap. 4.1) zu minimieren.

Auf Basis der Meteorologie wird anschließend die Windstaukomponente anhand der erstellten empirisch-statistischen Windstaumodelle an jedem der 1484 Gitterpunkte bestimmt. Darüber hinaus wird die astronomische Komponente für den zugrundeliegenden Vorhersagezeitraum anhand der HDdU (MÜLLER-NAVARRA, 2013) abgeschätzt. Die Absolutwasserstände an jedem Gitterpunkt werden aus der Kombination aus Windstau und Astronomie errechnet. Zusätzlich erfolgt die Ermittlung der statistischen Unsicherheit aus den Regressionsmodellen.

Im Folgenden ist in Abb. 20 ein Beispiel der Wasserstandsvorhersage entlang der Küstenlinie mit allen ermittelten Komponenten dargestellt. 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) ausgegeben. Darunter ist in gleicher Farbgebung der gesamte Vorhersagehorizont als Übersicht gezeigt. Im verbleibenden Teil der Abb. 20 sind die Küstenlinie der Deutschen Bucht sowie die 1484 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). 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 Küstenschütz bzw. Dünen etc. in die Darstellung adäquat mit einzubeziehen. Diese Darstellung fasst den Mehrwert dieses Projektes (Erweiterung der Wasserstandvorhersage von punktueller Betrachtung auf die gesamte Küstenlinie (einschließlich Inseln und Halligen)) zusammen. Es kann gezeigt werden, dass die Methodik und die Kombination aus HNM und empirisch-statistischer Regressionsansätze für den vorliegenden Anwendungsfall geeignet sind.

In Zusammenarbeit mit dem Geodätischen Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme (gia) und der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) konnte erfolgreich eine automatische Übertragung der generierten Vorhersage-Datensätze in das aktuelle 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 an AP2 zur Vorhersage des Seegangs bereitgestellt (siehe DREIER & FRÖHLE, 2018).

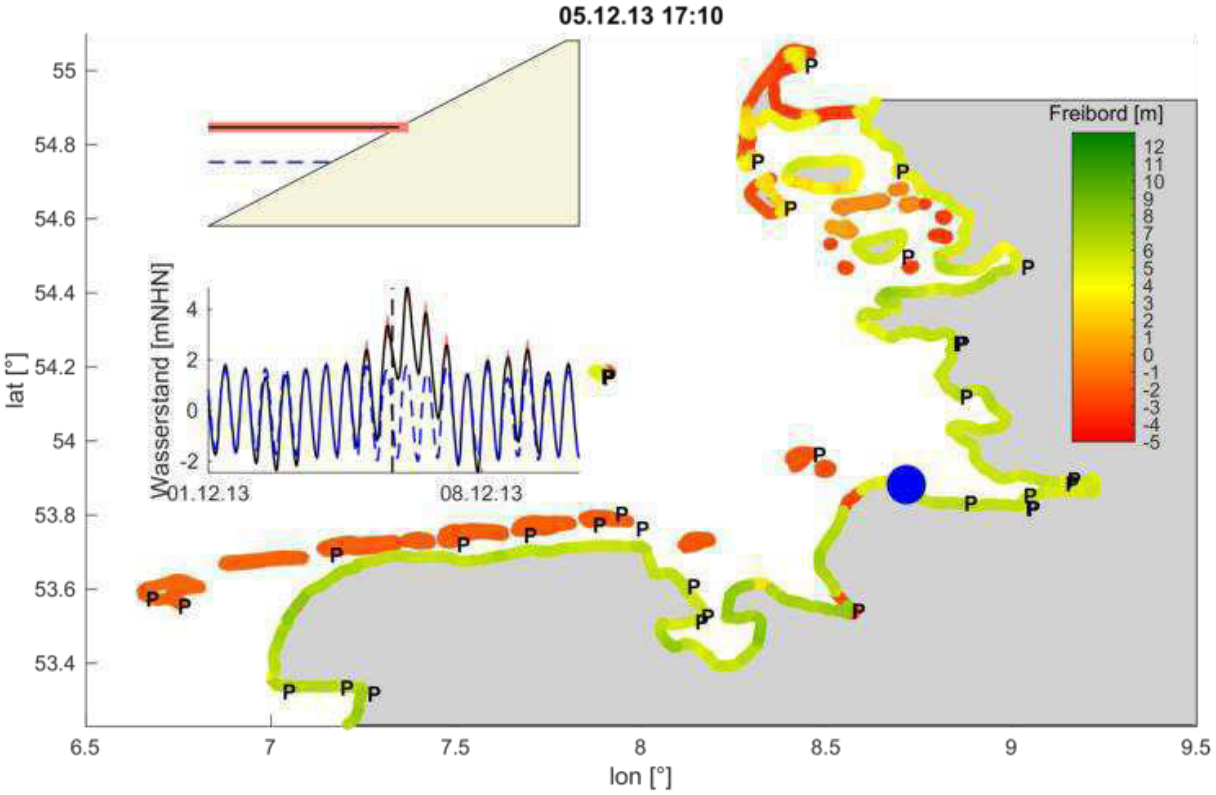


Abbildung 20: Beispielhafte Darstellung eines Zeitschritts der Wasserstandsvorhersage entlang der gesamten deutschen Küstenlinie (einschließlich der Inseln und Halligen).

5 Fazit und weiterer Forschungsbedarf

Das übergeordnete Ziel von Arbeitspaket 1 („Sturmflutmonitoring und Sturmflutsimulator“) des Projektes Early Dike war die Erweiterung der existierenden operationellen Wasserstandsvorhersage in Deutschland von einer punktuellen Betrachtung (spezifische Pegelstandorte) auf die gesamte deutsche Küstenlinie (einschließlich Inseln und Halligen). Es konnte erfolgreich eine Methodik entwickelt werden, die auf der Kombination eines hydrodynamisch-numerischen Modells mit empirisch-statistischen Regressionsansätzen basiert. Damit wurde zum ersten Mal eine Modellkette erzeugt, die räumlich als auch zeitlich hochaufgelöste Wasserstandsvorhersagen (Punkabstand ~1 km, Stundenwerte) für die Deutsche Bucht liefert. Es konnte weiterhin nachgewiesen werden, dass die Modellgüte der Vorhersage auch in unbepegelten Gebieten in einer ähnlichen Größenordnung 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 Informationen über die Gezeiten existieren. Um diesen Missstand zu beheben, wurde zunächst 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, dass 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 stellten 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. Empirisch-statistische Windstaumodelle 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 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 (Gezeitensynthese 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 & 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, die anhand der gesammelten Erfahrungen während der bisherigen Bearbeitung deutlich wurden. Die wichtigsten Punkte des weiteren Forschungsbedarfs aus Sicht der Bearbeiter werden an dieser zusammengefasst:

Für eine robuste Vorhersage des Windstaus in der Deutschen Bucht mit empirisch-statistischen Regressionsansätzen ist es zwingend erforderlich, die Regressionskoeffizienten der Prädiktoren anhand der Datengrundlage abzuleiten, die schließlich auch im Vor-

hersagemodus verwendet wird. Innerhalb des Projektes stand die dafür benötigte Datengrundlage jedoch nicht zur Verfügung. 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 (Reanalyse-Daten) 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, Tideanalyse/-synthese, empirisch-statistische Windstaumodelle). Aktuell werden lediglich die statistischen Unsicherheiten aus den empirisch-statistischen Windstaumodellen (95%-Konfidenzintervall) in die Methodik einbezogen. Die gesonderten Unsicherheiten der weiteren Arbeitsschritte liegen zwar vor, müssen allerdings auf Abhängigkeiten geprüft werden, um eine Verknüpfung sowie Fortpflanzung der Abweichungen statistisch und physikalisch korrekt realisieren zu können. Darüber hinaus sollten die Unsicherheiten 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 Schriftenverzeichnis

ANNUTSCH, R.: Wasserstandsvorhersage und Sturmflutwarnung. Seewart, 38, H.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; doi: 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, H. 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. doi: 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.

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. doi: 10.1007/s00382-016-3001-2, 2016.

BRUSS, G., GÖNNERT, G., MAYERLE, R.: Extreme Scenarios At The German North Sea Coast A Numerical Model Study. Coastal Engineering Proceedings, [S.l.], n. 32, p. currents.26, feb. 2011. ISSN 2156-1028. Stand 22.07.2018: https://icce-ojs-tamu.tdl.org/icce/index.php/icce/article/view/1428. doi: 10.9753/icce.v32.currents.26, 2010.

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. J. Geophys. Res., 116, C11001, doi: 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., MAUGERI, 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. 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. doi: 10.1002/2014JC009901, 2014a.

DANGENDORF, S., MARCOS, M., WÖPPELMANN, G., CONRAD, C.P., FREDERIKSE, T., RIVA, R.: Reassessment 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. doi: 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. doi: 10.1007/s10236-013-0598-0, 2013.

DANGENDORF, S., MÜLLER-NAVARRA, S., JENSEN, J., SCHENK, F., WAHL, T., WEISSE, R.: North Sea storminess from a novel storm surge record since AD 1843. Journal of Climate, 27, 3582-3595, http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI-D-13-00427.1, 2014b.

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. doi: 10.3390/w4010170, 2012.

DICK, S., MÜLLER- NAVARRA, S.H., KLEINE, E.: Das operationelle Modellsystem des BSH - Gegenwärtiger Stand und zukünftige Entwicklung. Mitteilung Deutscher Meteorologischen Gesellschaft, 3, 6-13, 1993.

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

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

ELSAESSER, B., BELL, A., SHANNON, N., ROBINSON, C.: Storm surge hind-and forecasting using Mike21FM -Simulation of surges around the Irish Coast. DHI International User Conference, Copenhagen, 2010.

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

GÖNNERT, G.: Sturmfluten und Windstau in der Deutschen Bucht. Die Küste, 67, 2003.

GÖNNERT, G., GERKENSMEIER, 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. Climate Research 64, 15–23, doi: 10.3354/cr01309, 2015.

HAIGH, I.D., NICHOLLS, R.J.: Coastal Flooding. MCCIP Science Review 2017, doi: 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., SCHROTTKE, K.: AufMod (03KIS082-03KIS088) Gemeinsamer Abschlussbericht für das Gesamtprojekt mit Beiträgen aus allen 7 Teilprojekten. doi: 10.2314/GBV:780783271, 2013.

HORN, W.: Some Recent Approaches to Tidal Problems, 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, J. Geophys. Res., 112 C08003, 2007.

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, doi: 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. Die Küste, 74, 92-124, 2008.

JENSEN, J., ARNS, A., WAHL, T.: Yet another 100yr storm surge event: the role of individual storm surges on design water levels J Mar. Sci. Technol. 23 882–7, 2015.

JENSEN, J., FRANK, T., WAHL, T.: Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste (AMSeL). Die Küste, 78, 2011.

JENSEN, J., MUDERSBACH, C., MÜLLER-NAVARRA, S.H., BORK, I., KOZIAR, C., RENNER, V.: Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der Deutschen Nordseeküste. Die Küste, 71, 2006.

KRAUSE, P., BOYLE, D.P., BÄSE, F.: Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. Advances in Geosciences, 5, 89–97, 2005.

LENTZ, H.: Fluth und Ebbe des Meeres. 93 S. Hamburg: L. Friedrichsen & Co, 1873.

LENTZ, H.: Fluth und Ebbe und die Wirkung des Windes auf den Meeresspiegel. 230 S. Hamburg: Otto Meissner, 1879.

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

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

MALCHEREK, A.: Gezeiten und Wellen. Die Hydromechanik der Küstengewässer, Vieweg+Teubner, doi: 10.1007/978-3-8348-9764-0, 2010.

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. Mitteillungen der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft (DMG), 03, 2-7, 2010.

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. Die Küste, 76, 193-204, 2009.

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., GIESE, H.: Improvements of an Empirical Model to Forecast Wind Surge in the German Bight. Dtsch. Hydrogr. Z. 51, 385 – 405, Hamburg, 1999.

MÜLLER-NAVARRA, S.H., KNÜPFFER, 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., LANGE, W., DICK, S., SOETJE, K.C.: Über die Verfahren der Wasserstands- und Sturmflutvorhersage: Hydrodynamisch-numerische Modelle der Nord- und Ostsee und empirisch-statistisches Verfahren für die Deutsche Bucht. Promet, 29, 117-124, 2003.

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.

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

ORTT, F.L.: The effect of wind and atmospheric pressure on the tides. Nature, 56, 80-84, London, 1897.

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, doi: 10.1002/2014JC010510, 2015.

PAWLOWICZ, R., BEARDSLEY B., LENTZ, S.: Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. 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. Journal of Hydrology, 395 (3-4), 199-215, 2010.

PLÜß, A.: Das Nordseemodell der BAW zur Simulation der Tide in der Deutschen Bucht. Die Küste, 67, 84-127, 2003.

PONTE, R.M.: Low-frequency sea level variability and the inverted barometer effect. J. Atmos. Ocean. Technol., 23, 619–629, doi: 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. Climatic Change, 124, 317-332, doi: 10.1007/s10584-014-1080-9, 2014.

SOETJE, K.C., BROCKMANN, C.: An operational numerical model of the North Sea and the German Bight. In: North Sea dynamics, J. Sunderman and W. Lens, editors, Springer, Berlin, 95-107, 1983.

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. Rev. Geophys., 52, 243–282, doi: 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. J. Phys. Oceanogr. 26, 2700–2711, 1996.

TIMMERMAN, H.: On the Importance of Atmospheric Pressure Gradients for the Generation of External Surges in the North Sea. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, 28(2), 62-71, 1975.

VERLAAN, M., ZIJDERVELD, A., DE VRIES, H., KROOS, J.: Operational storm surge forecasting in the Netherlands: developments in the last decade. Philos Trans A Math Phys Eng Sci. 2005 Jun 15;363(1831):1441-53, doi: 10.1098/rsta.2005.1578, 2005.

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. Earth-Science Reviews 124, 51–67, doi: 10.1016/j.earscirev.2013.05.003, 2013.

WAHL, T., JENSEN, J., FRANK, T., HAIGH, I.D.: Improved estimates of mean sea level changes in the German Bight over the last 166 years. In: Ocean Dynamics (61/5), 701–715, doi: 10.1007/s10236-011-0383-x, 2011.

WOODWORTH, P.L., HUNTER, J.R., MARCOS, M., CALDWELL, P., MENÉNDEZ, M., HAIGH, I.: Towards a global higher-frequency sea level dataset. Geosci. Data J., 3: 50–59, doi:10.1002/gdj3.42, 2016.

ZIJL, F., VERLAAN, M., GERRITSEN, H.: Improved water-level forecasting for the Northwest European Shelf and North Sea through direct modelling of tide, surge and nonlinear interaction, In: Ocean Dynamics (63), 823–847, doi 10.1007/s10236-013-0624-2, 2013.

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

Norman Dreier und Peter Fröhle

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, als auch die Widerstandsfähigkeit der Küstenschutzbauwerke (Seedeiche, Ufermauern etc.) werden in der Regel nicht berücksichtigt. Daher wurde ein Prototyp für ein operationelles Echtzeit- und Vorhersagesystem für Seegang und seegangsinduzierte Belastungen auf 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. EURTOP (2016), 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 Sturmfluten der letzten zehn Jahre (z.B. XAVER, 5.-6.12.2013) demonstriert und die Vorhersagequalität auf Basis vorhandener Naturmessungen bewertet. Die mittlere Abweichung (RMSE) der vorhergesagten, absoluten Wellenauflaufhöhen am Deich im Vergleich zu Messungen beträgt zwischen 3-7 % (bzw. 0,16-0,34 m) und liegt damit in etwa in der gleichen Größenordnung wie die aus Seegangsmessdaten im Deichvorfeld sowie am Deich berechneten, absoluten 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, an operational now- and 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. "XAVER", 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 absolute wave run-up heights on the dike ranges between 3-7 % (0,16-0,34 m) and corresponds to the uncertainty of the calculated absolute 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

Inhalt (wird automatisch erzeugt)

1 Einleitung 2
2 Modellkette 3
2.1 Prä-operationelle Seegangsvorhersage (SWAN) 5
2.1.1 Modellbeschreibung SWAN 6
2.1.2 Modellaufbau (Set-up) 6
2.1.3 Einbindung in das Gesamtkonzept (GeoPortal) 9
2.2 Messkette Hydrodynamik 10
2.3 Prä-operationelle Vorhersage seegangsinduzierter Belastungen 12
2.4 Phasenaufgelöste Seegangsmodellierung 14
2.4.1 Modellaufbau 14
2.4.2 Ergebnisse 15
3 Bewertung der Vorhersagequalität/-unsicherheit (Langzeitvorhersage) 16
3.1 Simulationsübersicht 16
3.2 Ergebnisse (Orkantief XAVER, 5.-7.12.2013) 17
3.3 Zusammenfassende Bewertung 20
3.3.1 Bewertung hoher Wellenauflaufereignisse 21
3.3.2 Bewertung sämtlicher gemessener Wellenauflaufereignisse 21
4 Ausblick 24
5 Dank 24
6 Schriftenverzeichnis 24

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. der Reform des DWD-Gesetzes als auch das Open-Data-Gesetz ist es möglich beispielsweise Wetter- und Klimainformationen frei verfügbar zu beziehen (z.B.

über den Geoserver des DWD www.dwd.de/opendata) um offizielle Warnungen vor Naturgefahren sowie lokale Behörden des Bevölkerungs- und Katastrophenschutzes zu unterstützen.

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

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

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

Im BMBF-Verbundvorhaben EarlyDike (2015-2018) wurde daher ein Prototyp für ein sensor- und risiko-basiertes 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 bereit gestellt werden. Sämtliche relevanten 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).

2 Modellkette

Der grundlegende methodische Ansatz (vgl. Abb. 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 Kap. 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+72h) und Kurzzeit-Vorhersagemodus (T+24h), 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 See-

gangsmessungen 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 Wellenauflaufmessungen 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 zur Vorhersage stündlicher Seegangsbelastungen in den nächsten 72 Stunden (Aktualisierung alle 12 Stunden)

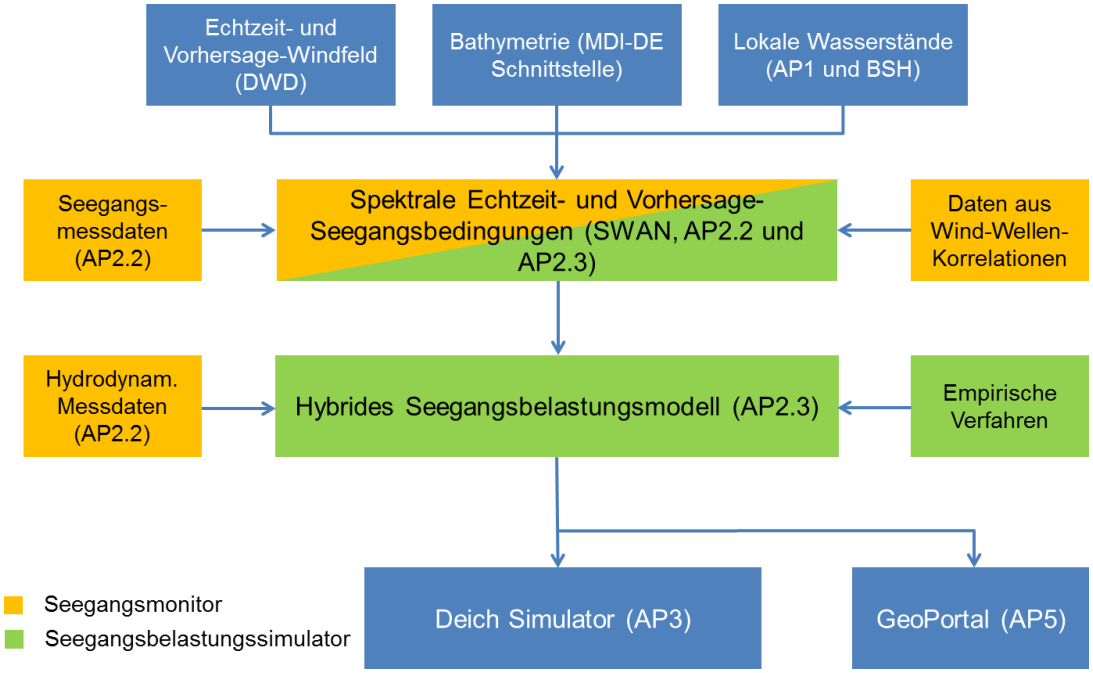


Abbildung 1: Methodischer Ansatz zur Vorhersage des Seegangs und seegangsinduzierter Belastungen von Seedeichen; AP=Arbeitspaket siehe Einleitungskapitel

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 Modelansatz 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 Ermittlung der Seegangsparameter in der Deutschen Bucht wird das Seegangsmodell SWAN (BOOIJ et al. 1999) in der Version 41.10 eingesetzt. In dieser Version werden im Vergleich zu früheren Versionen (z.B. 40.51, 2006) angepasste Parametrisierungen des Bodenreibungs- sowie Windschubkoeffizienten standardmäßig im Programm verwendet, die zu einer besseren Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Seegangsparametern während Sturmereignissen bzw. unter Bemessungssituationen führen (ZIJLEMA et al. 2012, VAN DER WESTHUYSEN et al. 2012). Eine Übersicht der Modifizierungen des SWAN-Programmcodes wird auf der SWAN-Homepage[1] gegeben.

In einer Reihe von nationalen (DREIER und FRÖHLE 2016, HERMAN et al. 2007, MAI 2002, NIEMEYER 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 Seegangsparametern 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, FRÖHLE et al. 2009a, FRÖHLE et al. 2009b) als auch im Wattbereich der ostfriesischen Inseln (DREIER et al. 2010, DREIER und FRÖHLE 2015) eingesetzt.

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

[1] http://swanmodel.sourceforge.net/modifications/modifications.htm (zuletzt abgerufen am 23.11.16)

2.1.1 Modellbeschreibung SWAN

SWAN gehört zur Gruppe der spektralen Seegangsmodelle 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):

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

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

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

Der erste Term der Gleichung 1 beschreibt die zeitliche Änderung und die beiden darauf folgenden Terme die räumliche Fortpflanzung der Wellenaktion. Die beiden letzten Terme auf der linken Seite der Gleichung beschreiben die Fortpflanzung im spektralen Raum. Durch die Bathymetrie und Strömung wird in diesen Termen eine Frequenzverschiebung und Refraktion berücksichtigt. Der rechte Teil der Gleichung besteht aus dem Quellen-und-Senken-Term (S_{tot}), welcher die 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 energieerzeugende Effekt in Gleichung 3 ist der Windenergieeintrag (S_{in}) im ersten Term. Die beiden darauf folgenden Terme beschreiben die nichtlinearen Welleninteraktionen (3 Wellen / Triads, bzw. 4 Wellen / Quadruplets). Danach folgen die Terme der Energiedissipation durch Whitecapping ($S_{ds,w}$), Bodenreibung ($S_{ds,b}$) und das wassertiefenabhängige Wellenbrechen ($S_{ds,br}$).

2.1.2 Modellaufbau (Set-up)

Bathymetrie

Für einen räumlich übergeordneten Bereich (Modellname: **N**orth **S**ea **S**tate **M**odel, Akronym: **NSSM**), der die komplette Nordsee umfasst (ca. 1000 km x 1000 km), werden die Seegangsbedingungen mit einer räumlichen Auflösung von $\Delta\lambda$=0,1° bzw. $\Delta\varphi$=0,05° (ca. 6 km x 6 km) simuliert. Die Ausdehnung und Bathymetrie des übergeordneten Modellgebiets ist in Abb. 2 dargestellt.

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

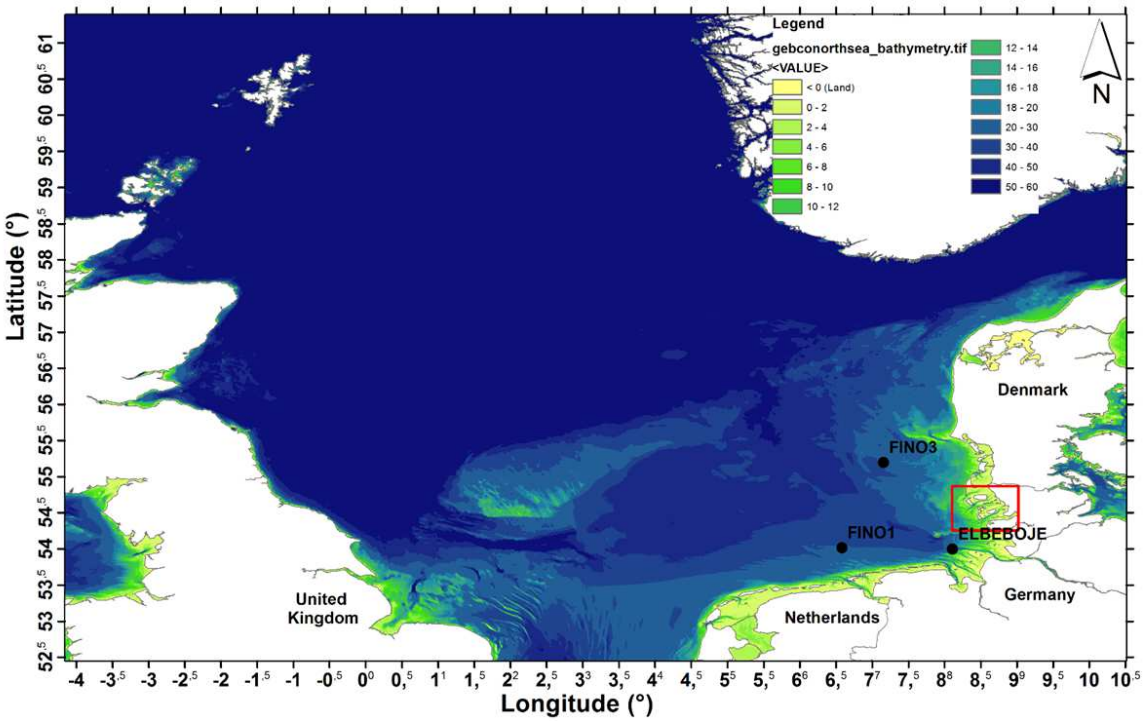


Abbildung 2: Modellgebiet und Bathymetrie (NSSM), verfügbare Seegangsmessungen im Tiefwasser (schwarze Punkte) sowie Lage des Detailgebietes (rotes Polygon)

wird, übernommen. Der Rasterdatensatz GEBCO 2014 Grid, mit einer räumlichen Auflösung von jeweils 30 Bogensekunden (ca. 1 km x 1 km), wurde anschließend auf die räumliche Auflösung des rechteckigen Berechnungsgitters reduziert um die Simulationen zu beschleunigen. Die Tiefenangaben der GEBCO-Bathymetrie beziehen sich auf einen mittleren Wasserstand (MSL ± 0 m).

Darauf aufbauend wurde für das prä-operationelle Vorhersagesystem exemplarisch ein weiteres Detailmodell (Modellname: **P**ell**w**orm Sea **S**tate **M**odel, Akronym: **PWSM**) mittels Modell-Schachtelung/-Nesting erstellt, in dem auf Grundlage einer frei verfügbaren, höher aufgelösten Bathymetrie die räumliche Auflösung auf $\Delta\lambda = 0{,}0006°$ bzw. $\Delta\varphi = 0{,}0006°$ (ca. 50 m) erhöht wurde. Die Ausdehnung und Bathymetrie des Detailmodells ist in Abb. 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 ± 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 γ=0,73 (Battjes und Janssen 1978)

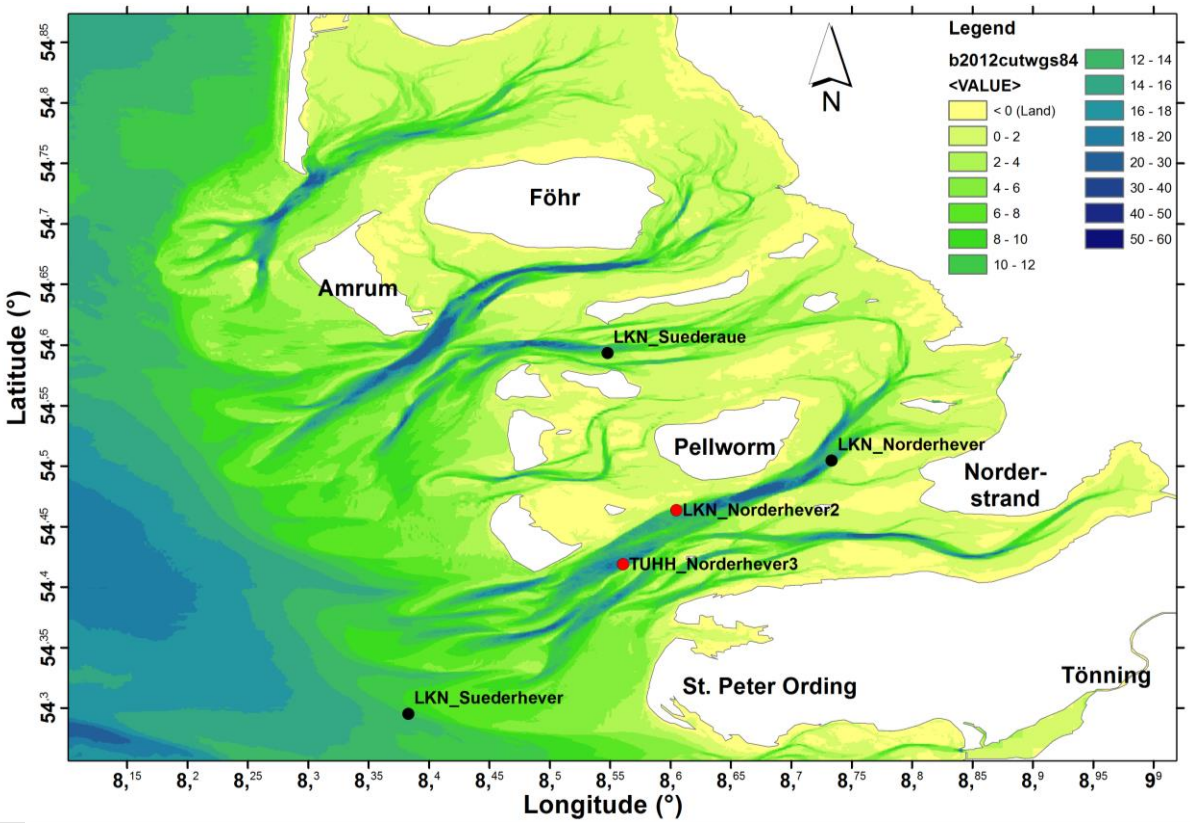


Abbildung 3: Modellgebiet und Bathymetrie (PWSM), verfügbare Seegangsmessungen im Übergangsbereich (schwarze Punkte) sowie Lage der Seegangsmessbojen Norderhever2 und -3

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

Die Wahl der grundlegenden Modellparameter des Modells erfolgte auf Grundlage von Erfahrungen aus vorangegangenen Untersuchungen zur Ermittlung der Seegansverhältnisse an der Nordseeküste (FRÖHLE et al. 2009a). Die von SWAN berechneten Seegangsspektren wurden mit 144 Richtungen (2,5°) 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).

Aufgrund der relativ langen Dauer von instationären Seegangssimulationen ist als weiterer wesentlicher Modellparameter die Anzahl der Iterationen bei der numerischen Lösung zu begrenzen. 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 Seegangsparameter 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-Ostseemodells BSHcmod NO mit einer räumlichen Auflösung von ca. 6 km x 6 km verwendet.

In einer Sensitivitätsanalyse (DREIER und FRÖHLE 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 Seegangsparameter im Deichvorfeld 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 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 jedoch nur Simulationen für die Hauptlaufvorhersagen um 00 UTC bzw. 12 UTC durchgeführt.

2.1.3 Einbindung in das Gesamtkonzept (GeoPortal)

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

2.2 Messkette Hydrodynamik

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

Die lokalen Seegangsbedingungen im Deichvorfeld werden dabei beginnend vom einlaufenden Seegang aus dem Tiefwasser bis direkt an den Deich erfasst. Die Messkette besteht aus den nachfolgend aufgeführten Bestandteilen:

- **Messkette Offshore**: Erfassung der lokalen Seegangsbedingungen im Norderhever-Strom mittels zweier Directional Wave Rider Bojen an den Messpositionen „Norderhever2“ und „Norderhever3“, dargestellt in Abb. 4 bzw. Abb. 3

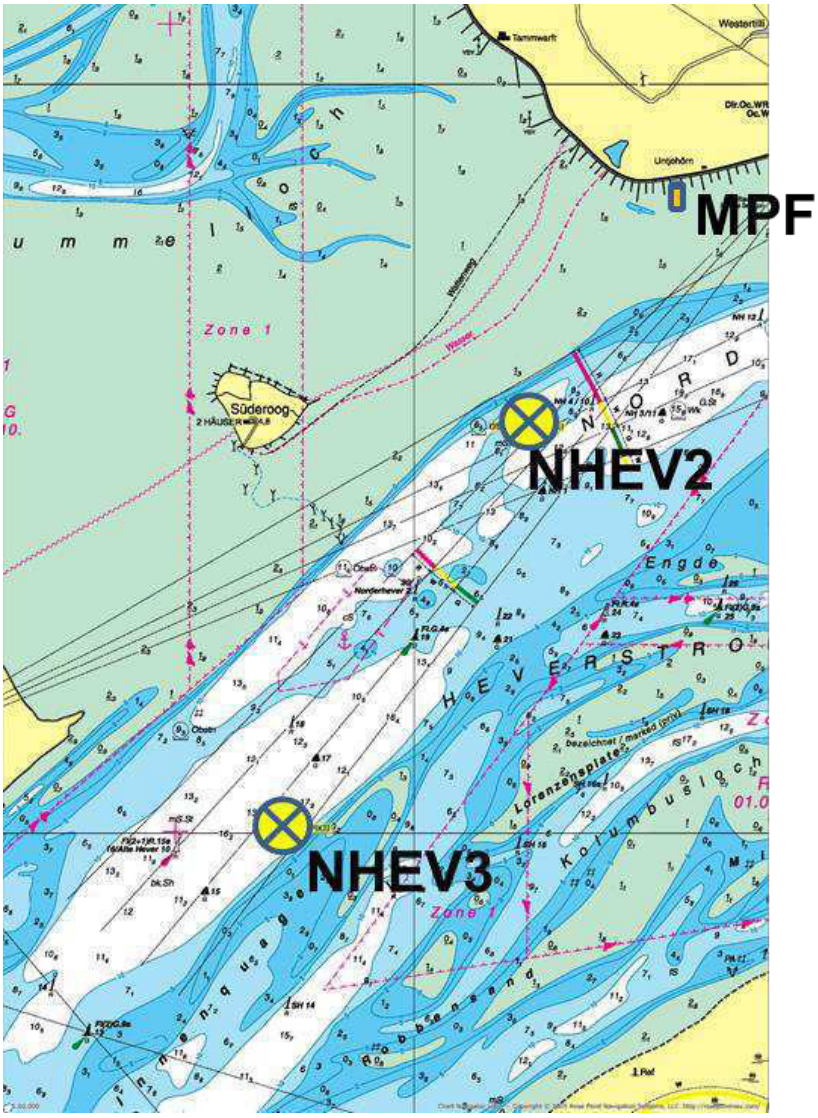


Abbildung 4: Lage der Seegangsmessbojen „Norderhever2“ bzw. „Norderherver3“ (NHV2 bzw. NHEV3) sowie des Messpfahls Untjehörn (MPF) vom LKN-SH, (Quelle: Chart Navigator Light).

- **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 10Hz-Druckmesssonden zur wasserstandsabhängigen Steuerung der ADCPs, sowie am Messpfahl Untjehörn des LKN-SH, dargestellt in Abb. 5

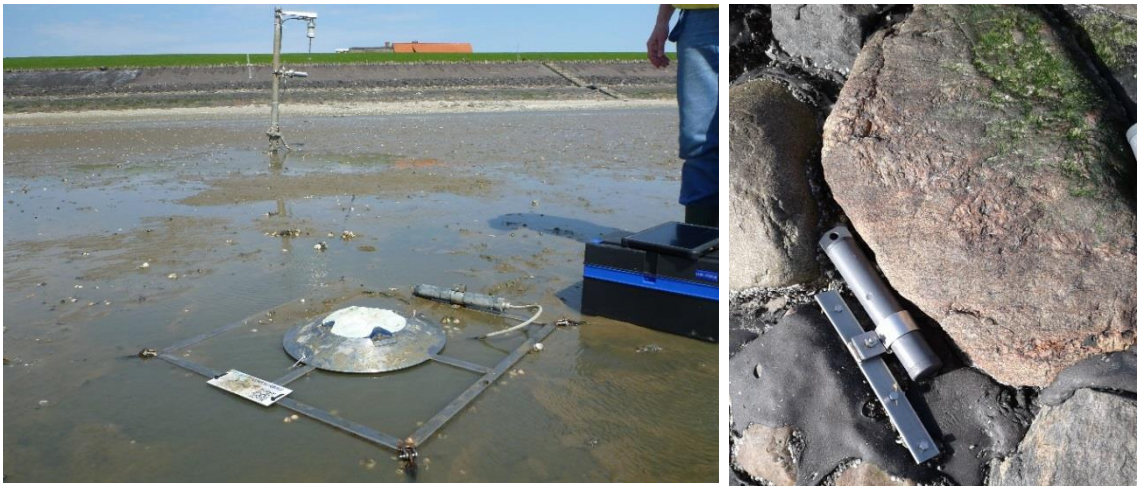


Abbildung 5: links: ADCP1 (Workhorse Sentinel 1200) und Messpfahl sowie WAP Untjehörn (im Hintergrund), rechts: mobile 10Hz-Druckmesssonde am Deichfuß Untjehörn.

- **Messkette Deich**: Erfassung des Seegangs am Deichfuß mit einer mobilen (vgl. Abb. 5) bzw. fest-installierten 10Hz-Druckmesssonde sowie des Wellenauflaufes mittels eines Stufenpegels des LKN-SH basierend auf Graphitelektroden am Deich Untjehörn (JENSEN und SCHEIDER 2006), dargestellt in Abb. 6.

Abbildung 6: links: Wellenauflaufpegel Untjehörn des LKN-SH, rechts: fest-installierte 10Hz-Druckmesssonde am Deichfuß Untjehörn.

2.3 Prä-operationelle Vorhersage seegangsinduzierter Belastungen

Die prä-operationelle Vorhersage von Belastungen des Deiches durch z.B. Wellenauflauf erfolgt anhand eines Hybridmodells, welches die numerischen bzw. empirischen oder aus Messungen am Deichfuß (im Nahezu-Echtzeit-Modus) abgeleiteten Vorhersagedaten des Seegangs mit empirischen Verfahren zur Ermittlung des Wellenauflaufes am Deich kombiniert.

Um die Genauigkeit und Unsicherheit der Wellenauflaufvorhersage einschätzen zu können wurden Methoden zur Auswertung historischer Wellenauflaufmessungen am Wellenauflaufpegel Untjehörn entwickelt und angewendet (vgl. Kap. 3).

Die Ermittlung der mittleren Wellenauflaufhöhen ($R_{u2\%}$) erfolgt nach dem Mittelwertansatz (mean value approach) des EUROTOP (2016), welcher für die Vorhersage des Wellenauflaufes bzw. den Vergleich mit Messungen geeignet ist:

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

mit einem Maximum von:

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

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

und der Brecherkennzahl:

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

und der Wellenlänge im Tiefwasser:

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

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

Bei der Ermittlung der Wellenauflaufhöhen nach dem Ansatz nach EUROTOP (2016) 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 Gleichung 4 nur für einfache Böschungen mit Neigungen von 1:8 oder steiler gilt und eine Berme erst ab einer Neigung von 1:15 oder flacher nach EUROTOP (2016) definiert ist.

Abbildung 7: Deichprofil Untjehörn (SEEMANN 2018)

Weiterhin wurde für die Berechnung des Wellenauflaufes das Deichprofil in Abschnitte mit unterschiedlicher Oberflächenrauheit eingeteilt (vgl. Abb. 7 sowie Tab. 1).

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

Abschnitt	Steigung 1 : m	Oberfläche	Rauheitsbeiwert
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 Wellenauflaufmessungen und den in der Langzeitvorhersage ermittelten Wellenauflaufhöhen (vgl. Kap. 3) ist, dass die Berücksichtigung des Rauheitsstreifens anhand des gewählten Reduktionsfaktors γ_f (vgl. Tab. 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 Wellenauflaufmessungen ebenfalls mit Unsicherheiten behaftet sind, die derzeit noch nicht quantifiziert werden können.

2.4 Phasenaufgelöste Seegangsmodellierung

Ein weiteres Ziel des Projektes 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[2] 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.

2.4.1 Modellaufbau

Auf Basis von OpenFOAM® wurde ein zweidimensionales numerisches Modell für den Seedeich Untjehörn im Naturmaßstab aufgebaut. Die Abmessungen der Modells betragen 107m in x-, 9m in y- und 1m in z-Richtung (vgl. Ausschnitt des Deichmodells in Abb. 8). Das Deichmodell wurde mit einer räumlichen Auflösung von 4cm in x- und z-Richtung und 100cm in y-Richtung diskretisiert.

[2] https://openfoamwiki.net/index.php/Contrib/olaFlow

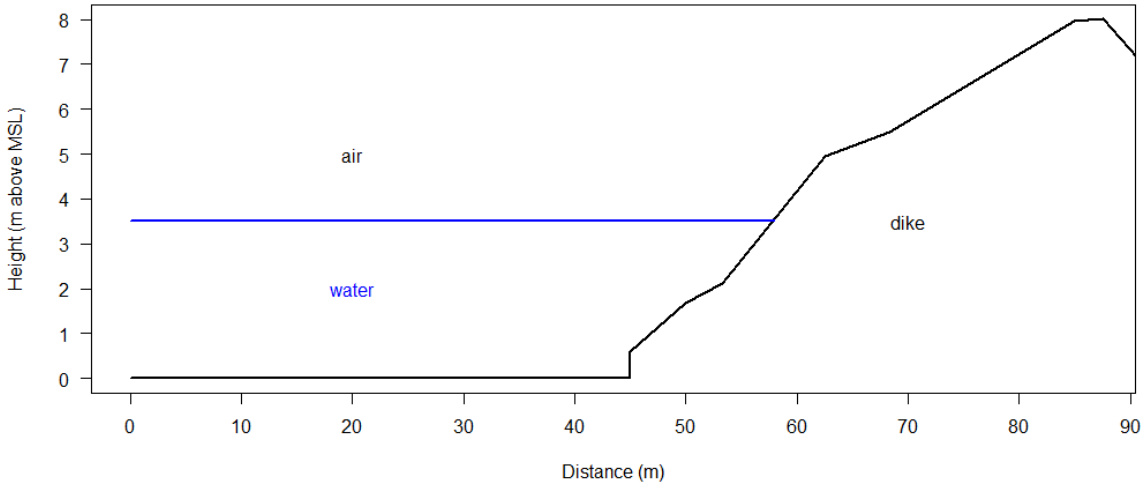


Abbildung 8 Schematische Darstellung des OLAFOAM Deichmodells (Hinweis: die Höhe ist überhöht dargestellt)

2.4.2 Ergebnisse

Zur Ermittlung des Wellenauflaufes an dem Seedeich von Untjehörn wurden numerischer Simulationen mit regelmäßigen Wellen durchgeführt. Als Seegangsrandbedingung wurde Wellen mit einer Wellenhöhe von H=1,92m und einer Periode von T=3,75s über eine Simulationsdauer von 30 Sekunden (entspricht ca. 8 Wellen pro Simulation) eingesteuert. Der Wasserstand wurde mit 3,5m angenommen. Sämtliche Seegangsparameter 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 dt=0,05s.

Der zeitliche Verlauf des berechneten Wellenauflaufes am Deich (mit Höhenbezug NHN) ist beispielhaft in Abb. 9 dargestellt. Abb. 10 zeigt beispielhaft eine Momentaufnahme der freien Oberfläche des Wellenauflaufprofils für den Berechnungszeitschritt t=16,57s (dargestellt in Abb. 9 mit roter Linie).

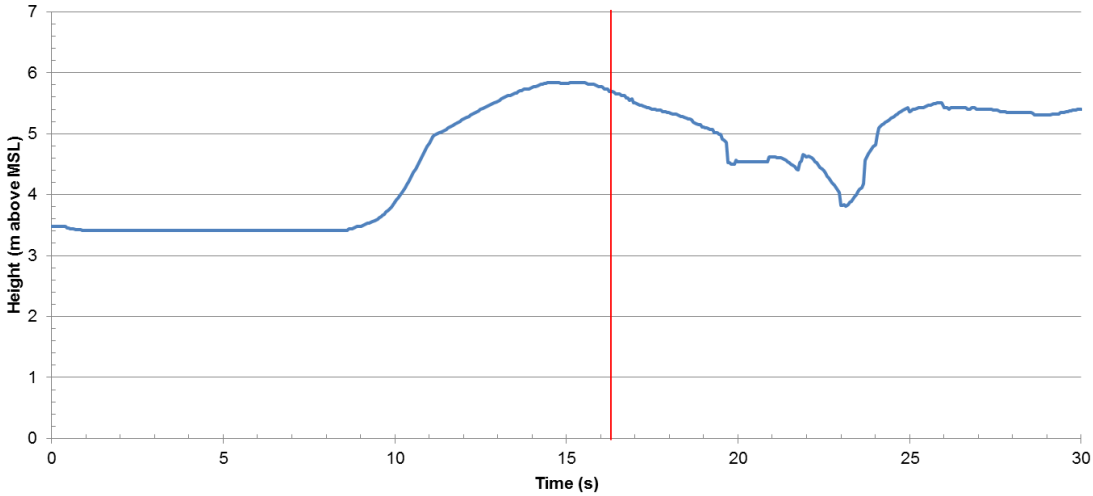


Abbildung 9 Absolute Wellenauflaufhöhe in Simulation mit regelmäßigen Wellen

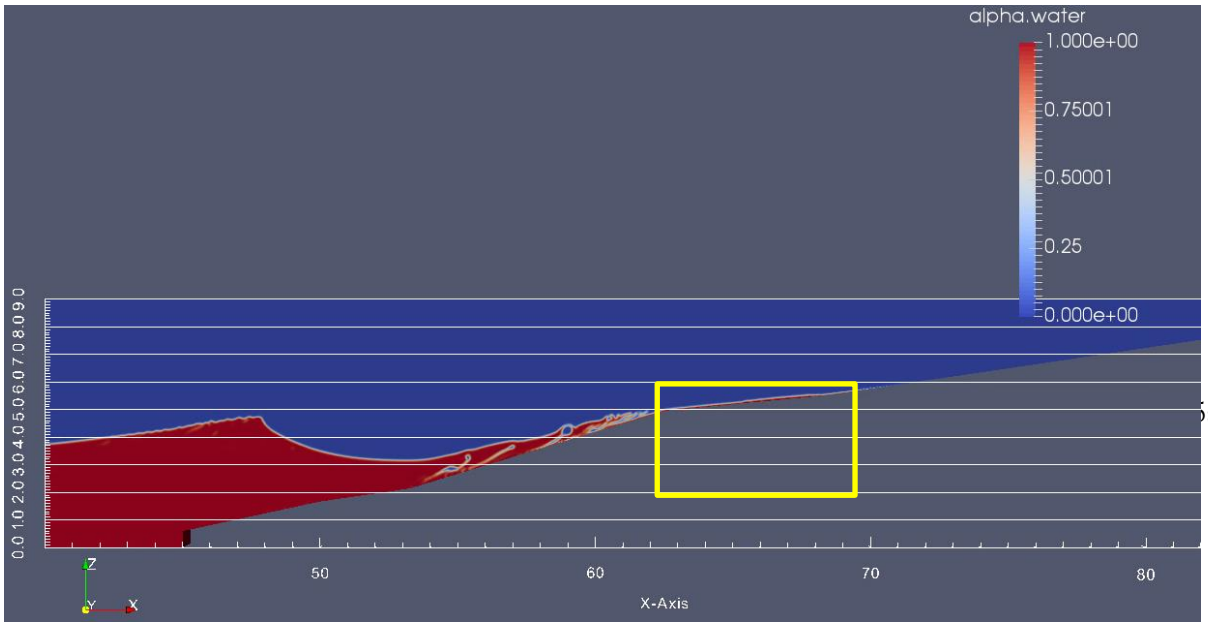


Abbildung 10 Wellenauflaufsimulation mit regulären Wellen zum Zeitpunkt t=16,75s.

Die absolute Wellenauflaufhöhe wurde für diesen Zeitschritt und einen alpha-Wert von >0,9 mit 5,58m ü. NHN berechnet. Wie in Abb. 10 dargestellt, wird der tatsächliche Wellenauflauf überschätzt, da zu dem dargestellten Zeitpunkt noch Wasserzellen des Wellenablaufes auf der flach geneigten Außenböschung (siehe gelbes Rechteck in Abb. 10) vorhanden sind, welche die Bestimmung des höchsten Punktes entlang der Deichaußenböschung mit einem alpha-Wert von >0,9 beeinflussen. Die Auswertung der Wellenauflaufhöhen sollte daher nicht ausschließlich auf den alpha-Werten der Simulationen basieren.

3 Bewertung der Vorhersagequalität/-unsicherheit (Langzeitvorhersage)

Zur Validierung des entwickelten prä-operationellen Vorhersagesystems sowie der Bewertung der Unsicherheit der Langzeitvorhersage erfolgten umfangreiche numerische Simulationen für ausgewählte Sturmflutereignisse der letzten 10 Jahre in der Nordsee. 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.

3.1 Simulationsübersicht

Auf Basis vorhandener Wellenauflaufmessungen am Deich von 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. Kap. 2.1.2).

3.2 Ergebnisse (Orkantief 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.-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 (DEUTSCHLÄNDER et al. 2013).

Die lange Dauer anhaltend hoher Windgeschwindigkeiten in Kombination mit langen Fetchlängen bei nordwestlichen Windrichtungen ergaben in der deutschen Bucht in der Nähe der Station FINO3, hohe signifikante Wellenhöhen bis zu H_s~9,6 m am 5.12. (DREIER und FRÖHLE 2016).

Die räumliche Verteilung der signifikanten Wellenhöhen sowie der mittleren Wellenanlaufrichtungen in der deutschen Bucht bzw. im Gebiet um Pellworm in der Vorhersage mit SWAN sind beispielhaft in Abb. 12 oben bzw. unten 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 Abb. 13. Die Messwerte sind dabei jeweils in Schwarz und die Simulationsergebnisse auf Basis der Wasserstandsvorhersage des BSH in Blau bzw. des FWU in Rot dargestellt.

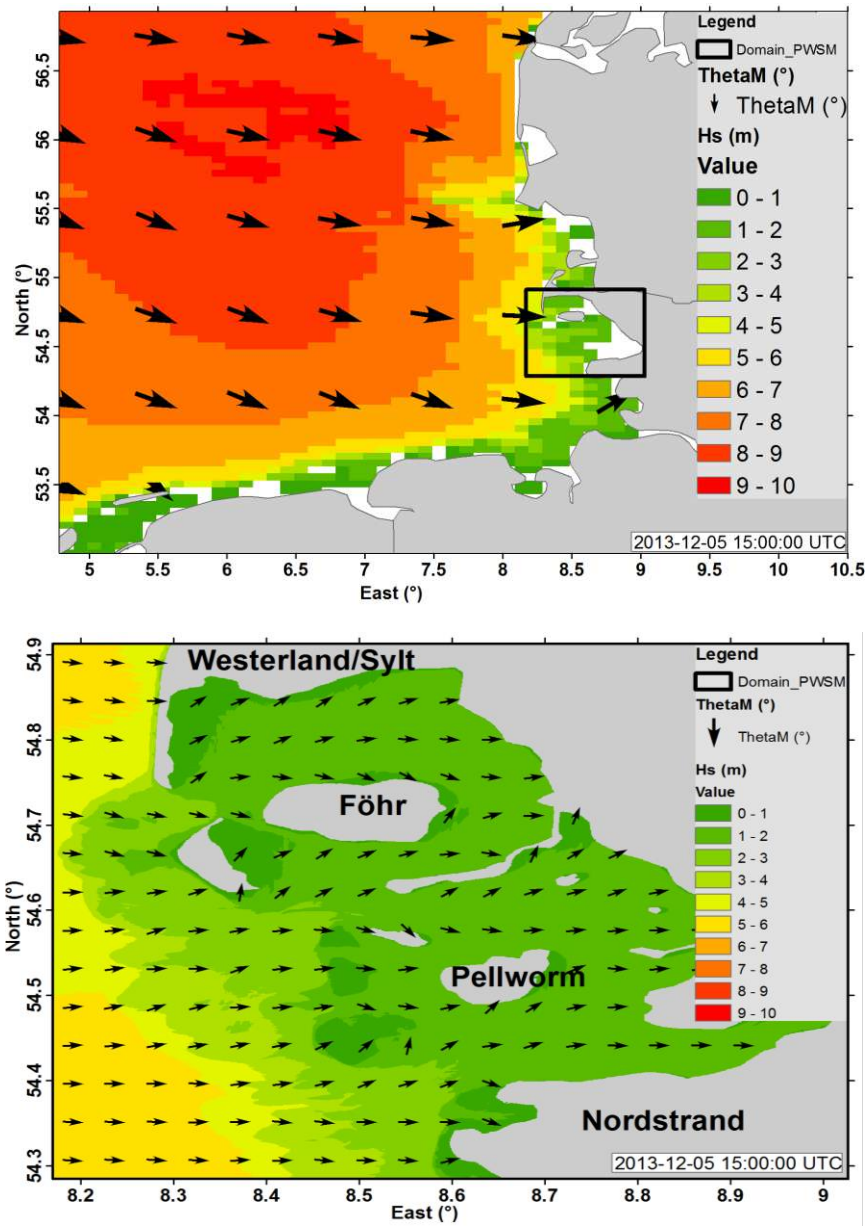


Abbildung 12: Signifikante Wellenhöhe am 5.12.2013 16 MEZ (UTC+1).

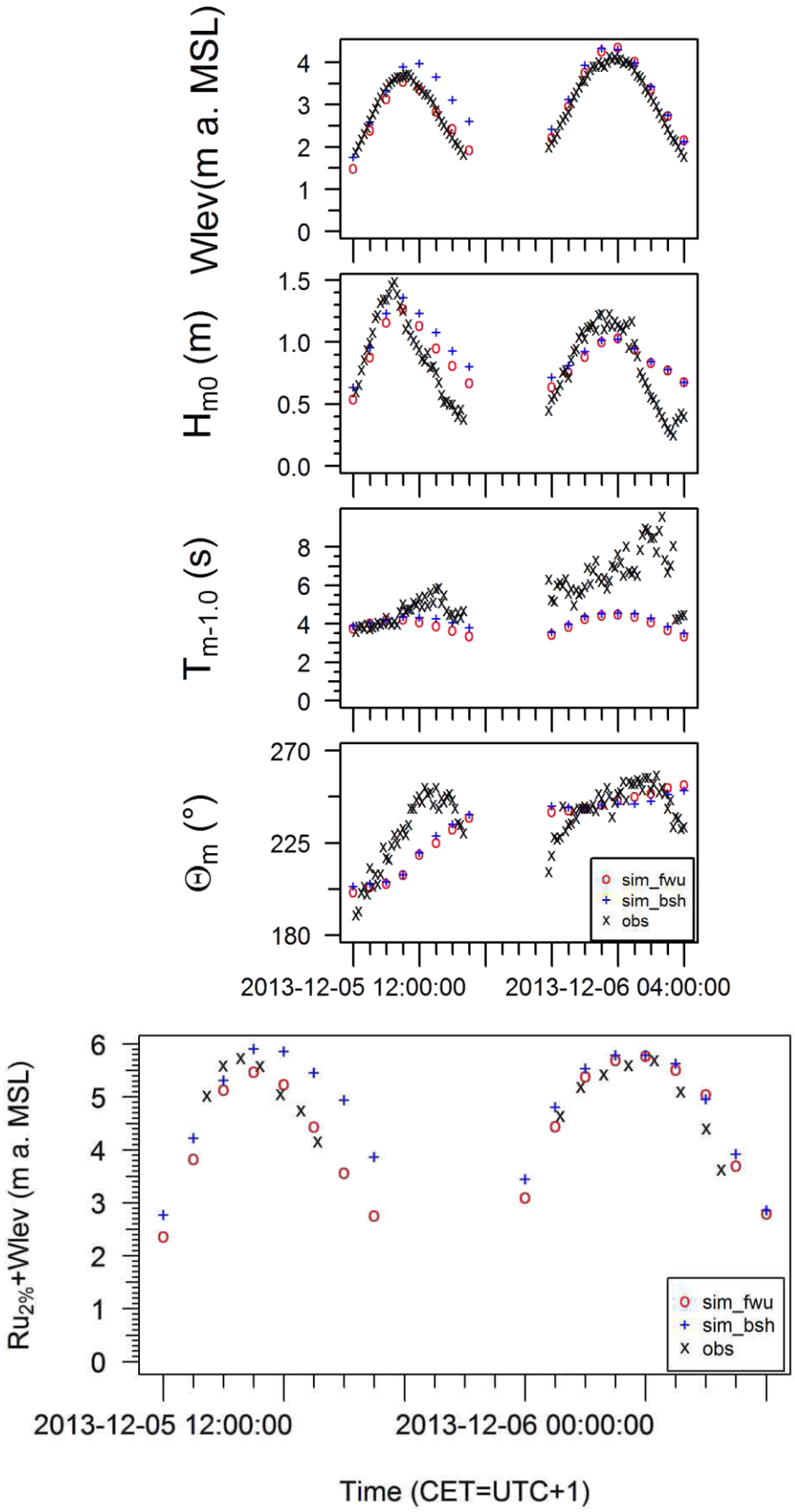


Abbildung 13 Hydrodynamische Parameter ca. 50 m vor dem Deich Untjehörn.

Die mittleren absoluten Abweichungen (root mean square error bzw. RMSE) sind insbesondere in einem Bereich um den Sturmflut-Scheitelwasserstand interessant, da hier der Wellenauflauf am Deich am größten ist.

Die nachfolgend aufgeführten 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 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 spektrale Wellenperiode $T_{m-1,0}$: 1,71 s (BSH) bzw. 1,81 s (FWU)
- die mittlere Wellenauflaufhöhe $R_{u2\%}$: 0,20 m (BSH) bzw. 0,19 m (FWU)
- die absolute Wellenauflaufhöhe $R_{u2\%}$+Wasserstand: 0,50 m (BSH) bzw. 0,20 m ü. NHN (FWU).

Wie Abb. 13 verdeutlicht, wird der lokale Wasserstand, die lokalen Seegangsparameter (bis auf die spektrale Wellenperiode) als auch der Wellenauflauf teilweise über als auch unterschätzt. Größere (systematische) Abweichungen existieren für die von SWAN berechneten spektralen Wellenperioden aufgrund fehlender Seegangsenergie im langperiodischen Bereich des berechneten Seegangsspektrums.

Die mittleren absoluten Abweichungen (RMSE) 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 Unsicherheit der Wellenauflaufvorhersage auf Basis des empirischen Verfahrens nach EUROTOP (2016) und der Langzeitvorhersage des Seegangs (SWAN) liegt etwa in der gleichen Größenordnung wie die Unsicherheit der Wellenauflaufvorhersage auf Basis von gemessenen Seegangsparametern im Vergleich zu gemessenen Wellenauflaufereignissen (RMSE $R_{u2\%,MPF}$~0,4 m; vgl. Tab. 2).

3.3 Zusammenfassende Bewertung

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 Kap. 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 (vgl. Kap. 3.2). 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.

3.3.1 Bewertung hoher Wellenauflaufereignisse

Die berechneten mittleren absoluten bwz. relativen Abweichungen über sämtliche betrachteten Sturmflutereignisse sowie Parameter sind in Tab. 2 zusammengefasst.

Es wurde festgestellt, dass bis auf die Wellenperioden sämtliche Vorhersageparameter teilweise über- als auch unterschätzt werden (vgl. Tab. 2, Mittelwerte der mittleren Abweichungen in den letzten beiden Spalten). Die Mittelwerte der mittleren Abweichungen verdeutlichen, dass die Unsicherheit der Vorhersage der spektrale Wellenperiode $T_{m-1,0}$ 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 eine Unsicherheit in der Vorhersage der Wellenauflaufhöhe am Deich von bis zu bis zu 12 % bzw. 0,19 m.

Zu Vergleichszwecken wurde die Unsicherheit der Vorhersage der Wellenauflaufhöhe bei Verwendung von Seegangsmessdaten am LKN-Messpfahl ca. 50 m vor dem Deich (vgl. Tab. 2, Spalte 2, Kürzel „MPF“) bzw. direkt am Deichfuß (vgl. Tab. 2, Spalte 2, Kürzel „DFS“) als Eingangsdaten für den Ansatz nach EUROTOP (2016) berechnet. Dies ermöglicht, die Unsicherheit bestehend aus der Messungenauigkeit sowie der des empirischen Verfahrens nach EUROTOP (2016) zu bewerten. Hierbei zeigte sich erwartungsgemäß, dass die Unsicherheit der Vorhersage der Wellenauflaufhöhe bei Verwendung der am Deichfuß gemessenen Seegangsparameter nur etwa halb so groß ist (bis zu 11 % bzw. 0,17 m) als bei Verwendung der am Messpfahl gemessenen Seegangsparameter (bis zu 21 % bzw. 0,34 m). Es ist jedoch zu erwähnen, dass die am Deichfuß gemessenen Seegangsparameter nur für ein Sturmflutereignis (BARBARA 2016) zur Verfügung standen und daher nur einen Einzelfall repräsentieren.

3.3.2 Bewertung sämtlicher gemessener Wellenauflaufereignisse

Um ein robustere Bewertung der Qualität der Langzeitvorhersage zu ermöglichen, welche neben hohen Wellenauflaufereignissen auch mittlere Ereignisse berücksichtigt, wurden die mittleren Abweichungen (RMSE) zwischen der Vorhersage des Wasserstands, des Seegangs sowie des Wellenauflaufes zusätzlich über die gesamte Dauer der Messungen bestimmt. Die Vorhersageergebnisse auf Grundlage der Wasserstandsvorhersage des BSH bzw. FWU sind für ausgewählte Parameter in Abb. 10 den Messdaten gegenübergestellt.
Die größte Unsicherheit besteht demnach für die Vorhersage der spektralen Wellenperioden T_{m-10} (RMSE~2,5 bzw. 3s). Für die Vorhersage der restlichen Seegangsparameter, sowie der Wasserstände und des Wellenauflaufes sind die Unsicherheiten relativ gering.

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass auch sämtliche Messungen von Seegang und Wellenauflauf durch Messunsicherheiten behaftet sind und eine größere Anzahl von Sturmfluten einschließlich Wellenauflaufmessungen 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 hierzu sehr gute Voraussetzungen zur Fortführung und Vertiefung der Untersuchungen.

Tabelle 2: Mittlere Abweichung (RMSE) von Wasserstand, Seegang und Wellenauflauf am Deich Untjehörn. Überschätzung bzw. Unterschätzung im Vergleich zu Messungen in Rot bzw. Blau, bei unklarem Vorzeichen in Weiß, DFS=Messung am Deichfuß, MPF=Messung am Messpfahl Untjehörn.

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
$R_{u2\%}$ (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
$R_{u2\%}$ + 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

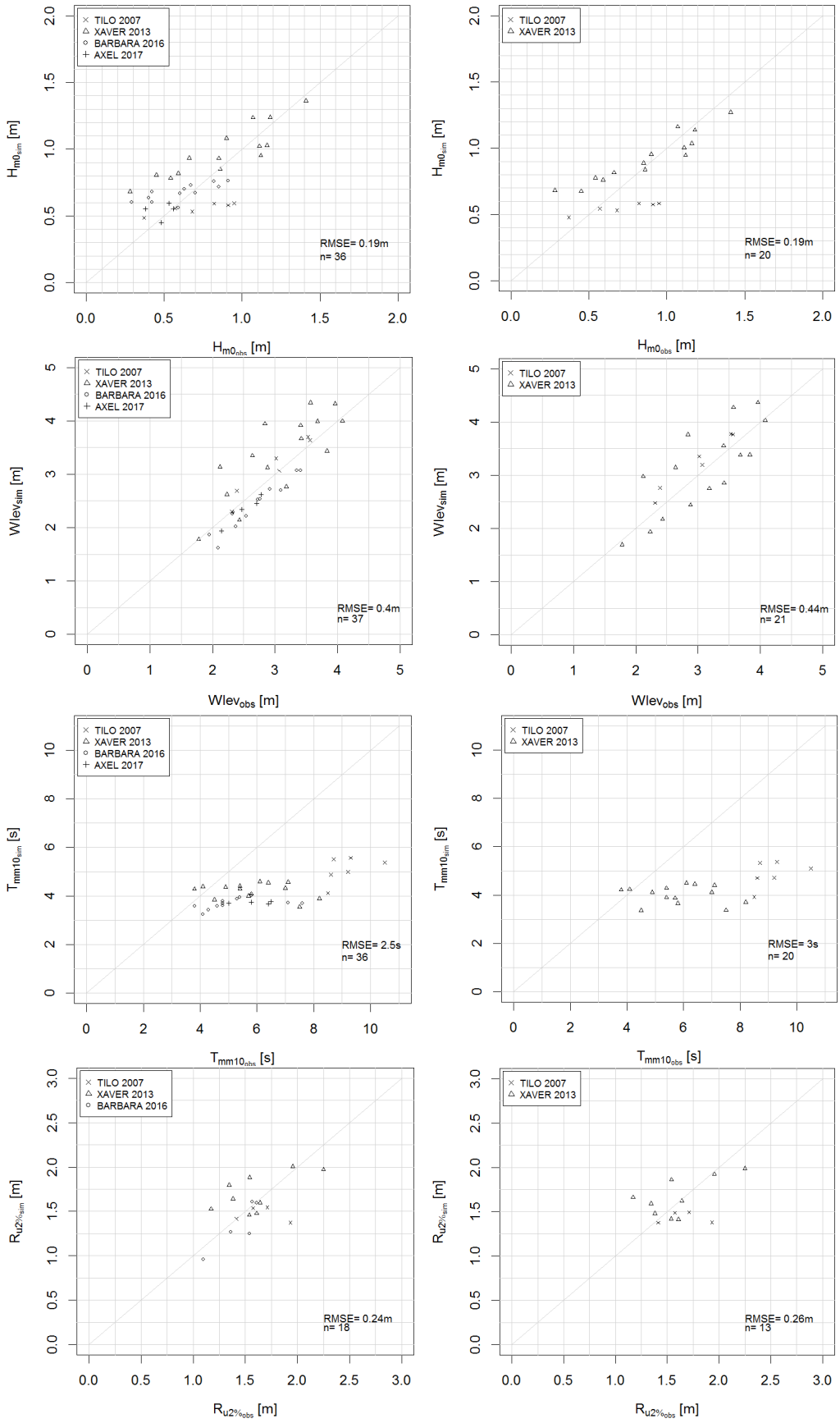


Abbildung 14 Vergleich der Langzeitvorhersage von Seegang und Wasserstand ca. 50m vor dem Deich sowie Wellenauflauf am Deich Untjehörn für die Wasserstandsvorhersage des BSH (links) bzw. des FWU (rechts)

4 Ausblick

Zur Optimierung der prä-operationellen Vorhersage des lokalen Seegangs im Deichvorfeld 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. Kap. 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 (2016) 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, der Bewertung und dem Betrieb des prä-operationellen Vorhersagesystems und die gute Zusammenarbeit bedanken. Weiterer Dank gilt dem Projektträger Jülich sowie dem BMBF für die Förderung und Unterstützung der Forschung.

6 Schriftenverzeichnis

BECKER, R.; HERLE, S.; LEHFELDT, R.; FRÖHLE, P.; JENSEN, J.; QUADFLIEG, T.; SCHÜTTRUMPF, H. und BLANKENBACH, J.: Distributed and Sensor Based Spatial Data Infrastructure for Dike Monitoring. In: FIG Working Week 2016, Christchurch, New Zealand, 2-6 May 2016. 16 S. 2016.

BOOIJ, N.; RIS, R. C. und HOLTHUIJSEN, L. H.: A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. In: Journal of Geophysical Research: Oceans, Jg. 104, C4, 7649-7666. doi: 10.1029/98JC02622, 1999.

BRÜNING, T.; JANSSEN, F.; KLEINE, E.; KOMO, H.; MAßMANN, S.; MENZENHAUER-SCHUMACHER, I.; JANDT, S. und DICK, S.: Operational Ocean Forecasting for German Coastal Waters. In: Die Küste. Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee. Karlsruhe, 273-290. 2014.

CAMARENA CALDERON, A.; GAUTIER, C. und 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. The Hague, the Netherlands, 2015.

DEUTSCHLÄNDER, T.; FRIEDRICH, K.; HAESELER, S. und LEFEBVRE, C.: Severe storm XAVER across northern Europe from 5 to 7 December 2013. Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 2013.

DREIER, N.: Seegangsbelastung der Deckwerke am Nord- und Weststrand der Insel Wangerooge. Diplomarbeit. Universität Rostock, Fachgebiet Küstenwasserbau, Institut für Umweltingenieurwesen, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, 114 S., 2009.

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

DREIER, N. und FRÖHLE, P.: 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 Institut für Wasserbau, Technische Unversität Hamburg, Hamburg, (unveröffentlicht), 2016.

DREIER, N.; SCHLAMKOW, C.; FRÖHLE, P. und VOGEL, M.: Ermittlung der Seegangsverhältnisse an der wattseitigen Deichlinie der Ostfriesischen Inseln. Abschlussbericht Institut für Umweltingenieurwesen, Fachgebiet Küstenwasserbau, Universität Rostock, Rostock, 2010.

EURTOP: 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., N.W.H. Allsop, T. Bruce, J. de Rouck, A. Kortenhaus, T. Pullen, H. Schüttrumpf, P. Troch, Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P.Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P.Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. und B. Zanuttigh, 2016.

FRAZA, L.A.J.: Testing the non-stationary option of the SWAN wave model. Master Thesis. TU Delft, Delft, Dep. Hydraulic Engineering, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, 1988.

FRÖHLE, P.; SCHLAMKOW, C. und DREIER, N.: Ermittlung der Seegangsverhältnisse an der Außenküste von Wangerooge. Abschlussbericht Institut für Umweltingenieurwesen, Fachgebiet Küstenwasserbau, Universität Rostock, Rostock, 2009a.

FRÖHLE, P.; SCHLAMKOW, C.; DREIER, N. und VOGEL, M.: Bemessungsseegang für die Seeseite der Insel Wangerooge - Numerische Untersuchungen mit dem Modell SWAN. Abschlussbericht Institut für Umweltingenieurwesen, Fachgebiet Küstenwasserbau, Universität Rostock, Rostock, 47 S., 2009b.

GAUTIER, C. und 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. The Hague, the Netherlands, 2015.

GAUTIER, C.; CAMARENA CALDERON, A. und VAN NIEUWKOOP, J.: SWAN hindcasts Wadden Sea, December 2013. Tidal inlet of Ameland and eastern Wadden Sea Deltares (WL), 2014.

HERLE, S.; BECKER, R.; BLANKENBACH, J.; MULCKAU, A. und LEHFELDT, R.: EarlyDike: Sensor- & Geodateninfrastruktur für ein sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem für Seedeiche. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben EarlyDike – Teil 6, Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme der RWTH Aachen University & Bundesanstalt für Wasserbau, 2018.

HERMAN, A.; KAISER, R. und NIEMEYER, H. D.: KFKI-Projekt MOSES. Schlussbericht NLWKN, Forschungsstelle Küste, 2007.

HIGUERA, P.; LARA, J. L. und LOSADA, I. J.: Realistic wave generation and active wave absorption for Navier–Stokes models. In: Coastal Engineering, Jg. 71, 102-118. doi: 10.1016/j.coastaleng.2012.07.002, 2013.

JENSEN, F. und SCHEIDER, D.: Die Welle kommt. Systemsteuerung und Datenspeicherung im Küsten-Monitoring In: Verfahrenstechnik, 05, 42-43. 2006.

KREBS, V.; QUADFLIEG, T.; GRIMM, C.; SCHWAB, M. und SCHÜTTRUMPF, H.: Development of a sensor-based dike monitoring system for coastal dikes. In: Coastal Engineering Proceedings, Jg. 1, 35, 35. doi: 10.9753/icce.v35.structures.35, 2017.

MAI, S.: Seegangsausbreitung in Hever und Heverstrom. Hannover, (Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, 87), 98-141 S., 2002.

NIEHÜSER, S.; DANGENDORF, S.; ARNS, A. und JENSEN, J.: Entwicklung einer Methodik zur Wasserstandsvorhersage entlang der gesamten deutschen Nordseeküste. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben EarlyDike – Teil 2, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Universität Siegen, 2018.

NIEMEYER, H. D. und KAISER, R.: Ermittlung des Bemessungsseegangs für Küstenschutzwerke und Randdünen mit mathematischer Modellierung. Schlußbericht zum KFKI-Forschungsvorhaben "Bemessungsseegang" KIS004 Nds. Landesamt für Ökologie, Forschungsstelle Küste, 69 S., 2003.

SEEMANN, A.: Analyse und Bewertung des Wellenauflaufs an einem Seedeich während Sturmfluten auf Grundlage von Vorhersagen der Windverhältnisse sowie des lokalen Wasserstands. Masterarbeit. Technische Universität Hamburg, Institut für Wasserbau, 2018.

THE SWAN TEAM: SWAN. Scientific and Technical Documentation Delft University of Technology, Delft, 2017.

VAN DER WESTHUYSEN, A. J.: Modeling of depth-induced wave breaking under finite depth wave growth conditions. In: Journal of Geophysical Research: Oceans, Jg. 115, C1, 224. doi: 10.1029/2009JC005433, 2010.

VAN DER WESTHUYSEN, A. J.; VAN DONGEREN, A. R.; GROENEWEG, J.; VAN VLEDDER, G. P.; PETERS, H.; GAUTIER, C. und VAN NIEUWKOOP, J. C. C.: Improvements in spectral wave modeling in tidal inlet seas. In: Journal of Geophysical Research: Oceans, Jg. 117, C11, doi: 10.1029/2011JC007837, 2012.

VAN DER WESTHUYSEN, A.: Nonstationary SWAN simulation in the Wadden Sea. Deltares (WL) (Hydraulic Engineering Reports), 2008.

ZIJLEMA, M.; VAN VLEDDER, G.P. und HOLTHUIJSEN, L. H.: Bottom friction and wind drag for wave models. In: Coastal Engineering, Jg. 65, 19-26. doi: 10.1016/j.coastaleng.2012.03.002, 2012.

ZIMMERMANN, C.; MAI, S. und DAEMRICH, K.-F.: Ermittlung der Seegangsbedingungen am Hauptdeich der Insel Wangerooge. Franzius Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, (Bericht, 680), 2004.

Entwicklung eines sensorbasierten Deichmonitorings

Verena Krebs und Holger Schüttrumpf

Zusammenfassung

See- und Ästuardeiche zählen zu den wichtigsten Küstenschutzanlagen in Deutschland und ein Versagen der 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 lediglich die Vorhersage von Wasserständen, während der Zustand der Hochwasserschutzanlagen selber nicht einfließt. 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 von Arbeitspaket 3 (*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 werden am *Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University (ITA)* garnbasierte Sensoren in ein Geotextil integriert. Diese neuartigen, intelligenten Geotextilien werden 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 werden in eine Sensor- und Geodateninfrastruktur übermittelt und automatisiert ausgewertet. Über einen webbasierten Deichmonitor sind die Daten sowie deren Auswertung online abrufbar, wodurch eine Echtzeitüberwachung des Modelldeichs in der Versuchshalle des *IWW* möglich wird.

Schlagwörter

Sensorbasiertes Deichmonitoring, Frühwarnsystem für Seedeiche, Intelligente Geotextilien, textile Sensorik, Modelldeich

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 the 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 the RWTH Aachen University (IWW). There, in cooperation with the 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 test 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 the IWW.

Keywords

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

Inhalt

1 Einleitung ... 3
2 Grundlagen zur Entwicklung des Deichmonitors ... 5
2.1 Typischer Seedeichaufbau ... 5
2.2 Versagensmechanismen von Seedeichen ... 6
2.3 Deichmonitoring ... 9
2.4 Forschungsbedarf ... 12
3 Konzept des entwickelten Deichmonitorings ... 13
4 Material und Methoden ... 17
4.1 Kleinmaßstäbliche Untersuchungen ... 19
4.1.1 Aufbau des Modelldeichs ... 19
4.1.2 Versuchsdurchführung ... 20
4.1.3 Referenzmessung ... 20
4.1.4 Messvlies I ... 20
4.1.5 Messvlies II ... 21
4.2 Großmaßstäbliche Untersuchungen ... 22
4.2.1 Aufbau des Modelldeichs ... 22
4.2.2 Konventionelle Messtechnik ... 26
4.2.3 Einbau der Sensorvliese ... 26
4.2.4 Versuchsprogramm ... 27
5 Ergebnisse ... 29
5.1 Kleinmaßstäbliche Versuche ... 29
5.1.1 Referenzfall ohne Sensoren ... 29
5.1.2 Messvlies I ... 30
5.1.3 Messvlies II ... 32
5.2 Zwischenfazit ... 35

5.3 Großmaßstäbliche Versuche 36
5.3.1 Messvlies III 36
5.3.2 Messvlies IV 36
5.3.3 Entwicklung einer automatischen Auswerte-Methodik 38
5.3.4 Entwicklung des Echtzeit-Deichmonitors 43
6 Fazit und Ausblick 45
7 Danksagung 46
8 Schriftenverzeichnis 47

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, 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 (MELUR SCHLESWIG-HOLSTEIN 2013, NLWKN 2007). Die neuesten 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 über den inneren Zustand der Küstenschutzanlagen selber, 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. 2018).

Der folgende Teilbericht im Rahmen von *EarlyDike* beschäftigt sich mit der Entwicklung und Umsetzung eines 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 zwischen dem *Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW)*, dem *Institut für Textiltechnik (ITA)* sowie dem *Geodätischen Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme* (*gia*) *der RWTH Aachen University* (HERLE ET AL. 2018, SCHWAB ET AL. 2018).

Die Entwicklung des sensorbasierten Deichmonitorings erfolgt in mehreren Arbeitsschritten (vgl. Abbildung 1). Es fanden Literaturstudien zu den Themen Deichaufbau und -bemessung, Deichversagensmechanismen sowie Deichmonitoringverfahren statt, aus denen relevante Informationen für die weitere Arbeit identifiziert werden. Die Quintessenz dieser Literaturstudien findet sich in Kap. 2.

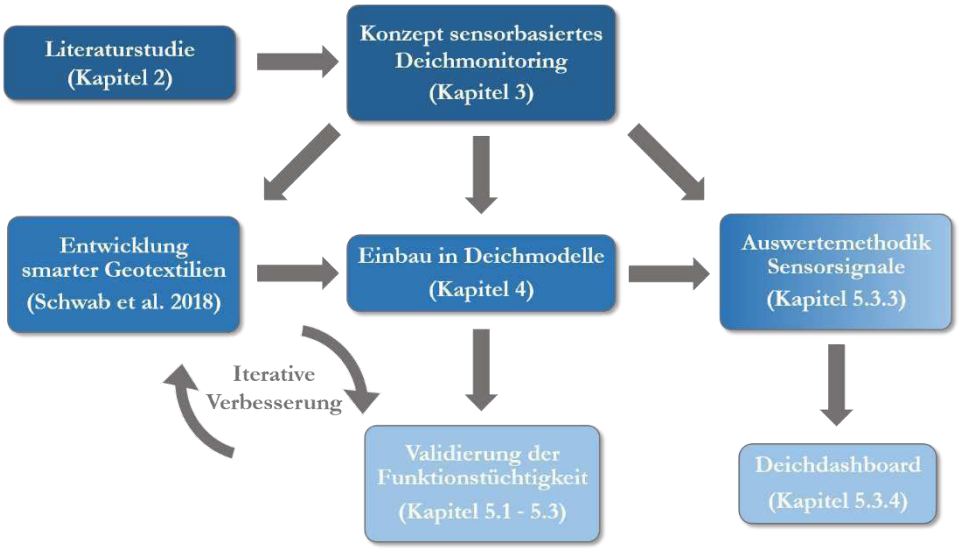


Abbildung 1: Vorgehensweise bei der Entwicklung des sensorbasierten Deichmonitorings

Nachdem auf Grundlage von Literaturrecherchen die Anforderungen an ein umfangreiches Monitoring für Seedeiche ermittelt wurden, konnte hieraus ein Konzept für die Verwendung der intelligenten Geotextilien abgeleitet werden (Kap. 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 Kap. 4.1, deren Auswertung und Ergebnisse in Kap. 5.1 beschrieben.

Im Anschluss erfolgte der Aufbau eines großmaßstäblichen Modelldeichs und die Untersuchung der entwickelten Sensorvliese in ebendiesem. Die Beschreibung des Versuchsstandes, der eingesetzten konventionellen Messtechnik sowie der eingesetzten Sensorvliese ist in Kap. 4.2 zusammengestellt. Hierbei flossen wichtige Erfahrungen aus den kleinmaßstäblichen Untersuchungen in die Entwicklung der großmaßstäblichen Sensorvliese ein (Kap. 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 Auswertemethodik analysiert (Kap. 5.3).

Die aufgenommenen Daten der Versuche in der Versuchshalle des IWW werden bereits so analysiert und verarbeitet, dass sie in die Geo- und Sensordateninfrastruktur eingespeist werden 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 werden und von der entwickelten Auswertemethodik „abonniert“ werden können. Eine Beschreibung des zugrundeliegenden Konzepts und des entwickelten Deichdashboards, welches schon jetzt ein Echtzeitmonitoring des Modelldeichs erlaubt, findet sich in Kap. 5.3.4.

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 vor allem 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 – 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.

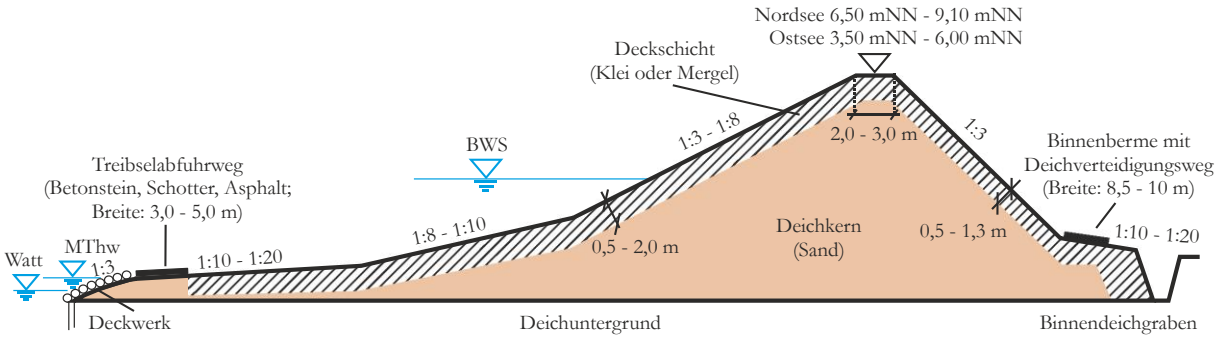


Abbildung 2: Querschnitt durch ein heute typisches Regelprofil eines scharliegenden Seedeichs [nach SCHÜTTRUMPF 2008 und EAK 2002].

2.2 Versagensmechanismen von Seedeichen

Für die Entwicklung eines sensorbasierten Deichmonitorings sind Kenntnisse über die während eines Deichversagens stattfindenden Prozesse unerlässlich, weshalb im Folgenden ein kurzer Überblick über die wesentlichen Kenntnisse auf dem Gebiet 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 Alterungserscheinungen 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 sehr abstrakten 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 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 Sturmfluten 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 schließlich - 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. Eine Auswahl zeigt Abbildung 3.

Hydrodynamische Versagensmechanismen sind dabei als diejenigen Versagensmechanismen definiert, „die direkt aus dem Wasserstand vor dem Deich oder den Seegangsparametern 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 Überströmrate 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 gegeben. 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.

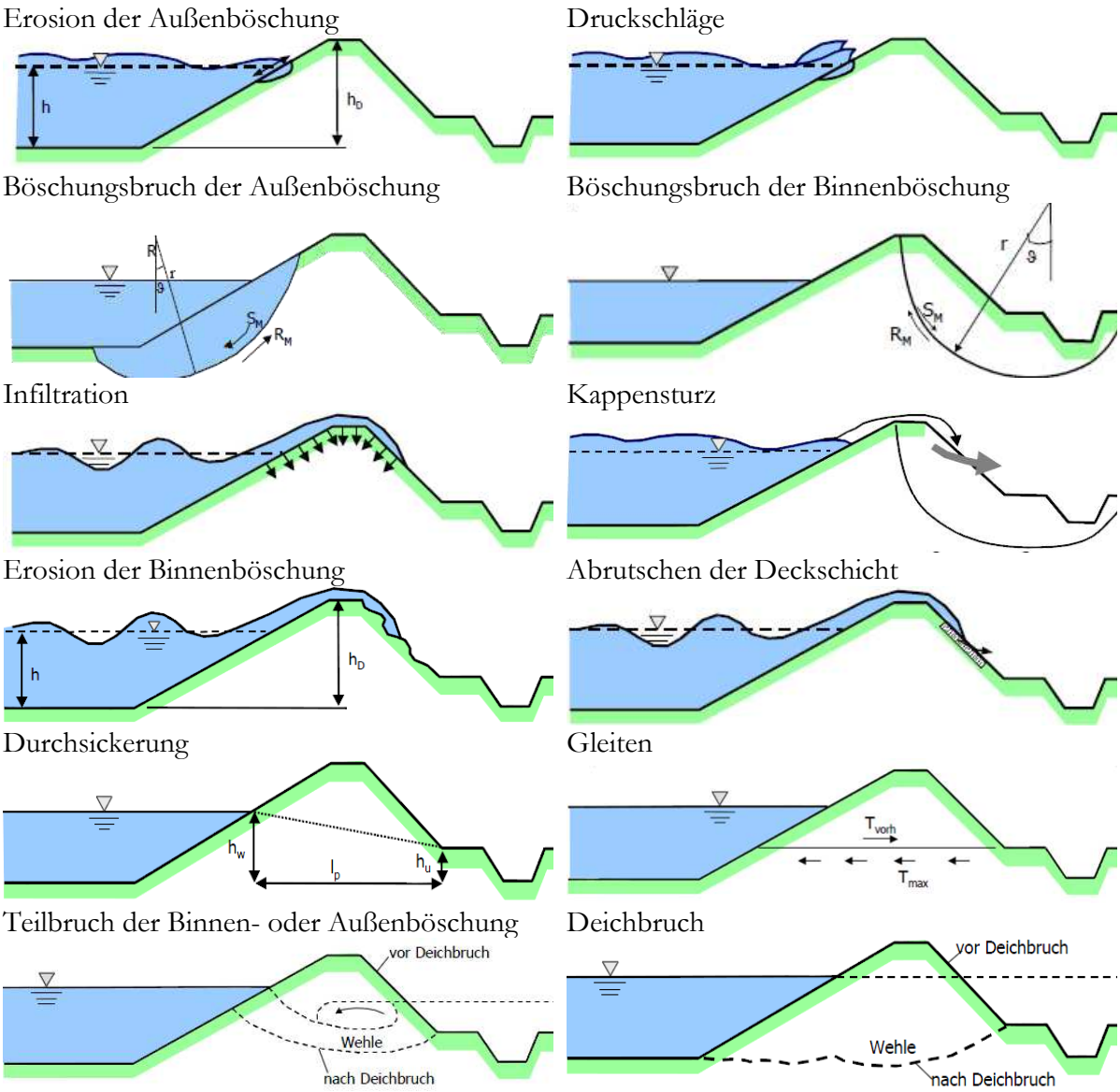


Abbildung 3: Ausgewählte Versagensmechanismen für Seedeiche [nach KORTENHAUS UND OUMERACI 2002].

Bereits an den nun beschriebenen Beispielen des Überströmens und der Durchströmung wird deutlich, wie verschiedene, meist unbekannte 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. Abbildung 4 zeigt die mögliche Entwicklung eines Seedeichbruchs angefangen mit der Deckschichterosion auf der Außen- (links) bzw. Binnenseite eines Deichs (rechts).

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 und SCHÜTTRUMPF UND OUMERACI 2004).

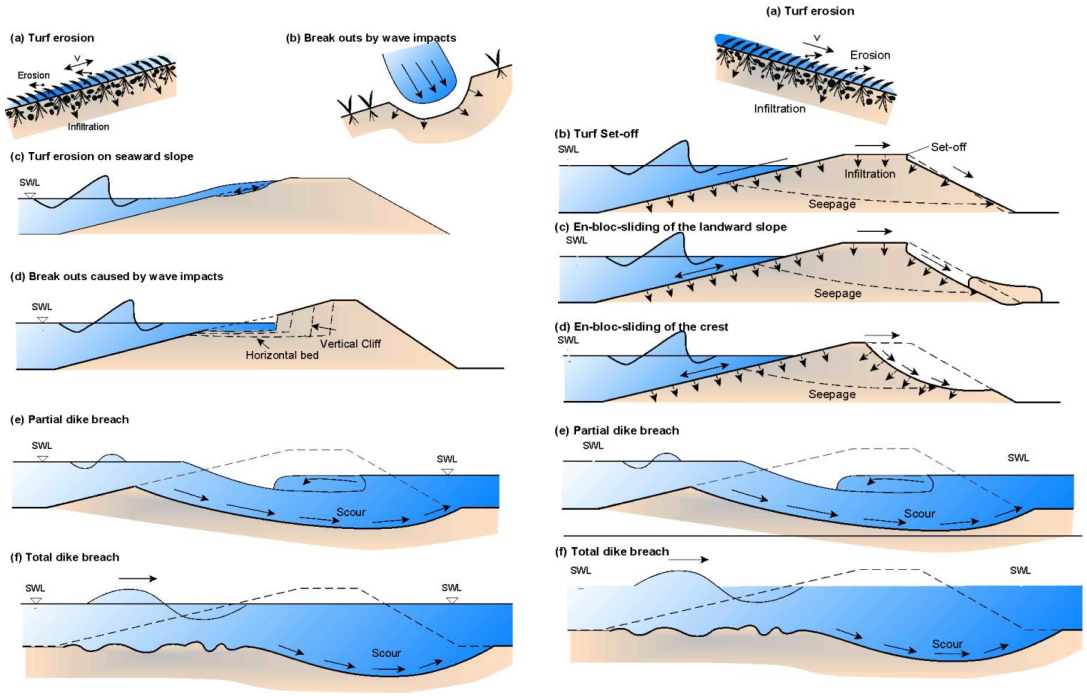


Abbildung 4: Entwicklung eines Deichbruchs ausgehend von der seeseitigen (links) bzw. der landseitigen Böschung (rechts) (SCHÜTTRUMPF UND OUMERACI 2004).

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 (MELUR 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 festgelegt (DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E. V. DEZEMBER 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 Interwall der Sicherheitsstatus aller Deiche zu überprüfen ist (MELUR 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. Zur Bewertung der Deichstabilität werden nun weitere Indikatoren empfohlen, die visuell aufzunehmen sind: Hierzu zählen Freibord, Erosionsschäden, Eisstau und Böschungsrutschungen auf der wasserseitigen Böschung sowie ein erhöhter Sickerwasseranfall, Bodenhebungen, Trichterbildung und große Bodenrisse auf der Binnenseite (DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E. V. DEZEMBER 2011).

Die Deichschau durch geschultes Personal stellt folglich nach wie vor das Hauptwerkzeug bei der Sicherheitsbewertung 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 noch nicht möglich, wird jedoch beispielsweise in DWA M 507-1 zumindest als Sicherheitsverbesserungsmaßnahme für Deiche mit hoher Sicherheitsklassifikation oder besonderen Sicherheitsbestimmungen empfohlen (DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E. V. Dezember 2011).

Da der Schutz vor Überflutungen und die Verbesserung der Hochwasserschutzanlagen ein globales Thema sind und die sensorgestützte Überwachung in allen Lebensbereichen stark zunimmt, lassen sich jüngst weltweit Arbeiten zur Entwicklung neuartiger, sensorgestützter Deichmonitoring-Verfahren finden. Als Ergänzung zur klassischen Deichschau kann der Einsatz sensorgestützter Verfahren ein kontinuierliches und dadurch zuverlässigeres 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, Droh-

nen 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 können der Ist-Zustand der Deiche und äußerlich sichtbare Indikatoren 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 und 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 und 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 Sensorknotenpunkten (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 jedoch 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 Tonschicht 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 und VRIES ET AL. 2014).

2.4 Forschungsbedarf

Da sich der tatsächliche Widerstand eines Seedeiches und damit auch die Versagenswahrscheinlichkeit des Deiches schwer berechnen lässt, kann ein sensorgestütztes Frühwarnsystem helfen, eine Deichverschlechterung oder Deichschaden frühzeitig zu erkennen. Bislang verfügen nur FOS-basierte Systeme über das Potential 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 jedoch als zusätzlicher Bestandteil in das Bauwerk eingebaut werden, ferner findet ihr Einbau linienhaft und nicht über die gesamte Deichböschung statt. Es lassen sich jedoch weitere Untersuchungen finden, in denen Glasfaserkabel direkt in im Wasserbau übliche Filtervliese integriert werden, und damit zum einen ein flächenhaftes Monitoring erlauben und zum anderen einen zusätzlichen Sensoreinbau obsolet machen (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 jedoch zufriedenstellende Ergebnisse erlangen, in denen die Ausbildung einer Bruchmuschel durch das System detektiert wurde.

Weitere erfolgreiche Praxistests zur Integration von Sensoren auf Geotextilien fanden erneut im Rahmen des *IjkDijk*-Projekts in den Niederlanden statt. In einem Testdeich sind vier mit Sensoren bestickte Geotextilstreifen von je 100 m Länge an Deichkrone, mittig des Deichkörpers, am Deichfuß und vor dem landseitigen Deichfuß installiert worden. Die genutzten Fasern messen laut Herstellerangaben Temperatur und Belastung mit hoher Präzision über eine Ausdehnung 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 erzeugen und als nützliches 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 all 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 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 wäh-

rend einer Sturmflut können die Sensoren dazu beitragen, besonders gefährdete Deichabschnitte zu identifizieren und im schlimmsten Fall Warnungen für einen drohenden Deichbruch zu generieren und entsprechende Notfallmaßnahmen einzuleiten (vgl. Abbildung 5).

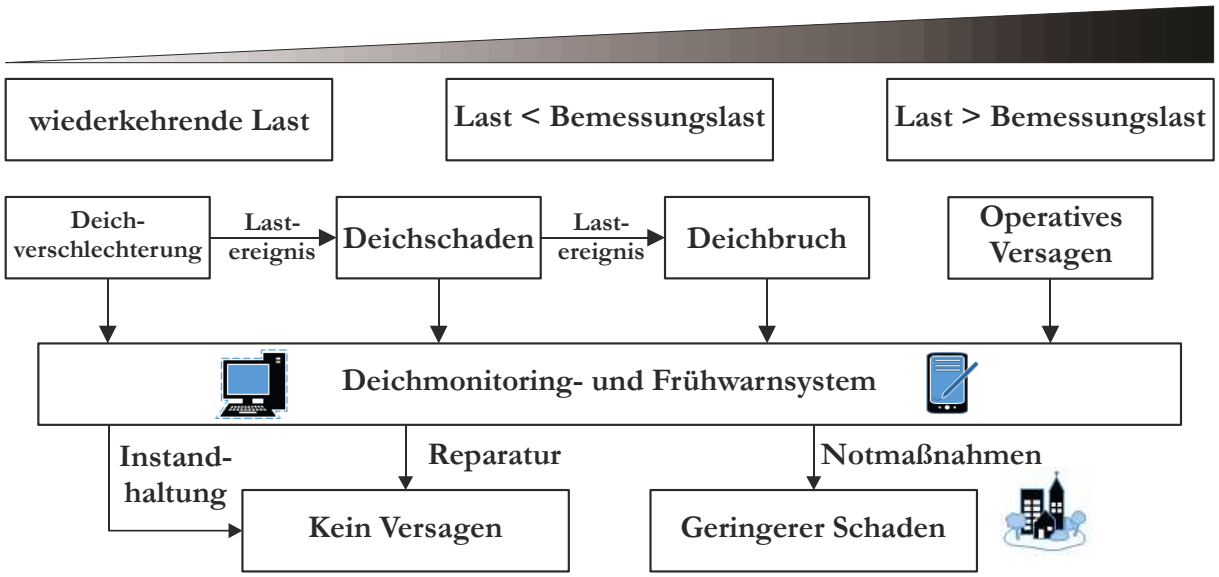


Abbildung 5: Möglichkeit eines Frühwarnsystems, den Prozess, der zur Entwicklung eines Deichbruchs führt, zu unterbrechen.

Das entwickelte Monitoringsystem basiert daher primär auf der Messung eines veränderten Wassergehalts innerhalb der Deichstruktur, darüber hinaus wurde 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 kurz 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. 2018 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 6). 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 (Carbonfaserrovings) werden mit einem Abstand von wenigen Zentimetern auf ein wasserdurchlässiges Trägermaterial (Geotextil) aufgebracht. Zwischen den beiden Faserbündeln wird ein geringes elektrisches Potential angelegt und anschließend der Potentialabbau zwischen den beiden Sensoren gemessen. Die Carbonfasern selber 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 Potential 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 Potentialunterschied am Faserpaar messen lässt. Je feuchter die Umgebung der Fasern wird, desto höher ist die Leitfähigkeit und desto geringer ist der gemessene Potentialunterschied. Abbildung 7 skizziert das Messprinzip für die Feuchtigkeitsdetektion.

Abbildung 6: Aufsticken der Sensoren (Carbonfasern) auf Wasserbauvlies unter Einsatz einer achtköpfigen Stickmaschine (Foto: Schwab, 2018).

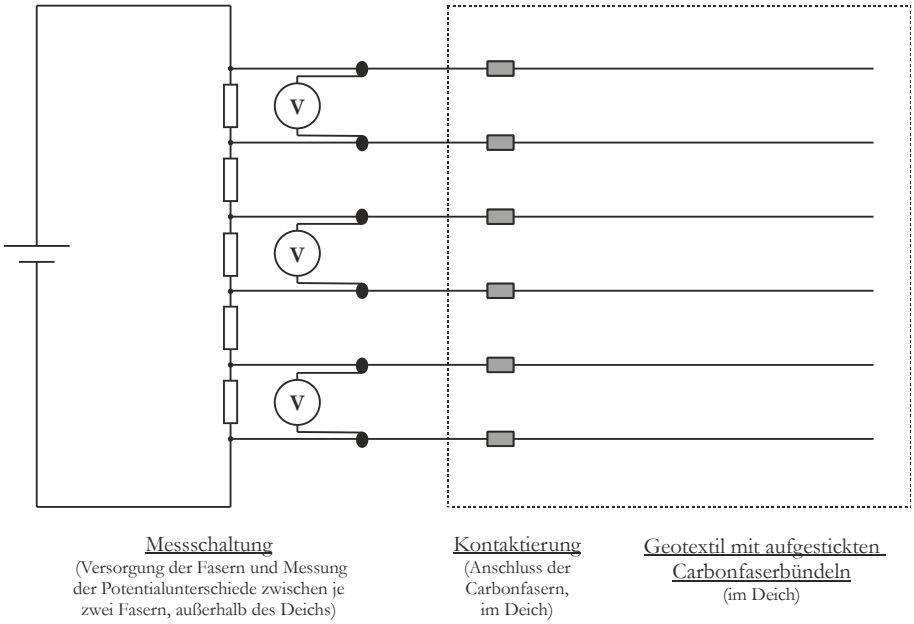


Abbildung 7: Vereinfachte Skizze zum Funktionsprinzip der entwickelten Feuchtesensoren (hier für drei Feuchtesensoren dargestellt).

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. 2018). Das im folgenden beschriebene Monitoringsystem fußt folglich rein auf der Detektion von Wassergehaltsänderungen im Deichkörper, während die Detektion von Dehnungsänderungen (die das System weiter verbessern kann) zunächst außer Acht gelassen wird.

Abbildung 8 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 in dieser Art 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 Wellenauflauf 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 (SCHÜTTRUMPF 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 haben und schließlich zu Hangrutschungen und Rasenverlegung der landseitigen Böschung führen (SCHÜTTRUMPF 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 der Sandkern zu erodieren beginnt, wird der Deich schnell zerstört. Daher ist es unter Sturmflutbedingungen notwendig, eine kontinuierliche Überwachung der Sensoren und eine automatische Datenanalyse zu gewährleisten, so dass 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 rechtzeitig in Stand gesetzt werden. Für ein zuverlässiges Monitoring der seeseitigen Außendichtung ist hierfür allerdings zusätzlich der Einbau des Textils unterhalb der kompletten Kleischicht empfehlenswert.

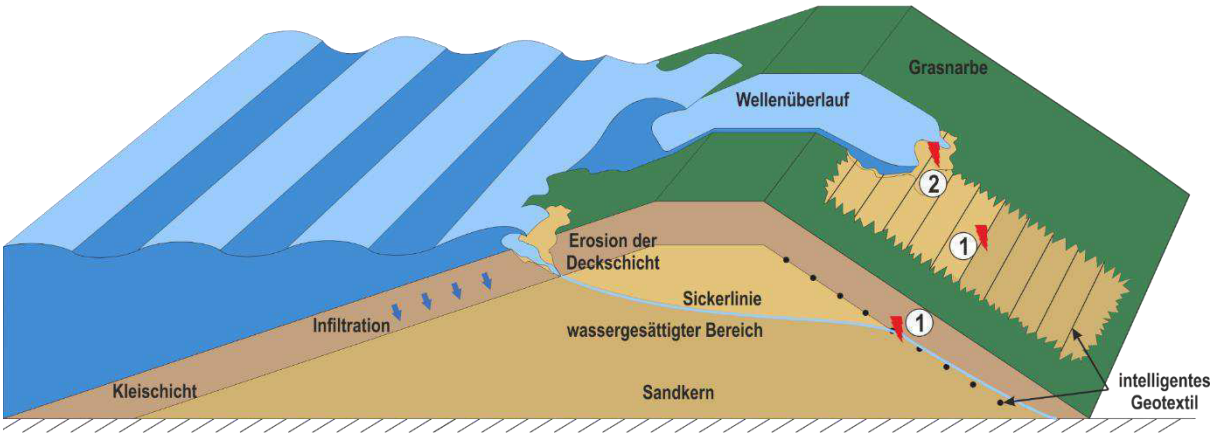


Abbildung 8: Monitoringkonzept unter Verwendung der geotextilen Sensoren: Bei Einbau des Sensortextils zwischen Kleischicht und Deichkern auf der Binnenböschung lassen sich Schäden an der Außenböschung des Deiches durch einen Anstieg der wassergesättigten Zone indirekt erkennen (1), während Schäden auf der Binnenböschung des Deiches direkt identifizierbar sind (2).

Während die Prozesse im Sturmflutfall sehr schnell von statten gehen 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

Die Entwicklung des in Kap. 3 beschriebenen sensorbasierten Deichmonitorings ist eng mit der Entwicklung der intelligenten Geotextilien bzw. Sensorvliese verbunden. Die technische Entwicklung und Herstellung der Sensortextilien erfolgt am *ITA*. Die Prüfung der Funktionsfähigkeit der Sensoren, die Entwicklung einer Auswerteroutine zur Interpretation der Messsignale und schließlich die Beurteilung, ob sich das eingesetzte Messprinzip zum Deichmonitoring eignet, kann 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

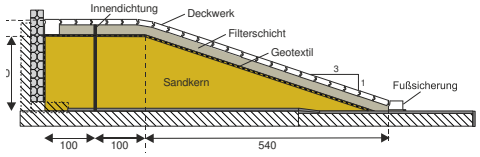
Aus den genannten Aspekten, die bei der Planung eines geeigneten Versuchsstands zu beachten sind, resultieren wiederum konkrete Anforderungen an

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

Unter Beachtung all dieser Aspekte ist in der Versuchshalle des IWW ein großmaßstäblicher Modelldeich errichtet worden, 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 angeschlossene Deichkrone von 2 m Breite aufgebaut wird. Eine Beschreibung des Versuchsstands, des Modellaufbaus sowie der durchgeführten Versuche findet sich in Kap. 4.2.

Doch bevor die neu entwickelten, mit Sensorfasern ausgestatteten Geotextilien in einem großmaßstäblichen Modelldeich getestet und validiert worden sind, erfolgte der Einbau von Prototypsensoren in einen überhöhten, kleinmaßstäblichen Modelldeich (Kap. 4.1). Ziel war es hier, in ersten Vorversuchen die generelle Funktionalität des entwickelten Sensorkonzepts zu testen, während an den untersuchten Prototypen Optimierungen im Sensordesign vorgenommen werden konnten, 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**
		
Dimensionen	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 l/s
Baustoffe	Homogener Deichkörper aus Quarzsand	Zwei-Zonen-Deich mit Innendichtung; Deckwerksaufbau aus Geotextil, Filterschicht und Betonformsteinen; wasserseitige Böschung nicht abgebildet
Messtechnik	1 Ultraschallsonde Kamera	6 Ultraschallsonden 10 Druckmessdosen (im Deckwerk) 10 Druckmesspunkte (auf Sohle) Induktiver Durchflussmesser Kameras (Photogrammetrie)
Belastung	Durchsickerung	Durchsickerung, Überströmung
Zeitraum je Versuch	ca. 1 h, maximal 1 - 2 Tage	mehrere Stunden, bis zu 8 Monate
Eingesetzte Sensorvliese	Messvlies I, Messvlies II	Messvlies III, Messvlies IV
Ziel der Untersuchung	Bestätigung des Funktionsprinzips; Test verschiedener Designs und Materialien für großes Textil	Test und Validierung der Sensoren unter realitätsnahen Bedingungen

	Kleinmaßstäbliches Deichmodell	Großmaßstäbliches Deichmodell
Vorteile	Schneller Auf- und Umbau; flexibler Einsatz mehrerer Textilien; Textil direkt zugänglich; Optische Beobachtung aller Vorgänge möglich	Robustheitstest der Sensoren möglich; Abmessungen und Abstände der Sensoren realitätsnah; Rand- und Modelleffekte vernachlässigbar
Nachteile	Viele Rand- und Modelleffekte	Aufwendiger Auf- und Umbau; Textil unter Deckwerk nicht direkt zugänglich; Einsatz vielfältiger Messtechnik zur Validierung erforderlich

4.1 Kleinmaßstäbliche Untersuchungen

4.1.1 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, indem das zu untersuchende Deichmodell eingestaut werden kann. Ein in der Höhe verstellbares Winkelrohr am Einlauf des Modells begrenzt den maximalen Wasserstand.

Der Deich selbst besteht – mit Ausnahme eines später beschriebenen Referenzfalls - aus einem homogenen Sandkörper (Quarzsand, d_s = 0,5 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. Um einen gleichmäßigen sowie reproduzierbaren Aufbau des Deiches zu gewährleisten, wird der Deich 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 9 zeigt einen Längsschnitt durch den Versuchsstand.

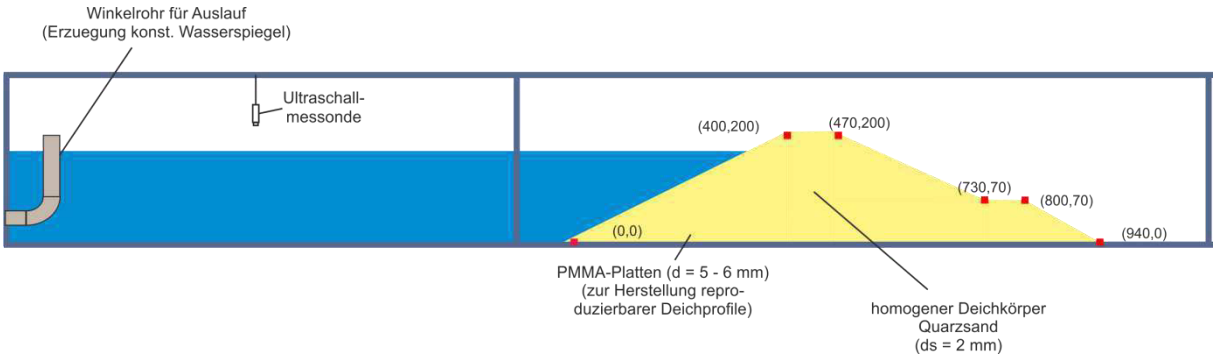


Abbildung 9: Versuchsaufbau in kleiner Kipprinne des IWW, alle Angaben in mm.

4.1.2 Versuchsdurchführung

Nach Aufbau des Deiches und Einbau der intelligenten Geotextilien (s. Kap. 4.1.4 und 4.1.5) 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

4.1.3 Referenzmessung

Die ersten Referenzmessungen fanden ohne Sensoreinbau an einem Modell eines Zweizonendeiches bestehend aus einem homogenem Sandkörper und Kiesfilter statt. Ziel dieser Untersuchungen war es, optimale Verhältnisse für die optische Auswertung der Sickerlinie einzustellen. Ferner erwies es sich als hilfreich, 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.

4.1.4 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 10 zeigt den fertig aufgebauten Modelldeich mit Sensoren.

Abbildung 10: Aufgebauter Modelldeich mit Sensoren in der kleinen Kipprinne.

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 aufgestickt sind (vgl. Abbildung 11). Jeweils zwei Faserbündel sind über Referenzwiderstände (3,9 kΩ) 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 12 zeigt die Lage der einzelnen Sensorkanäle im fertig eingebauten Deich sowie deren Bezeichnung.

Abbildung 11: Einbau von Messvlies I im kleinmaßstäblichen Deichmodell.

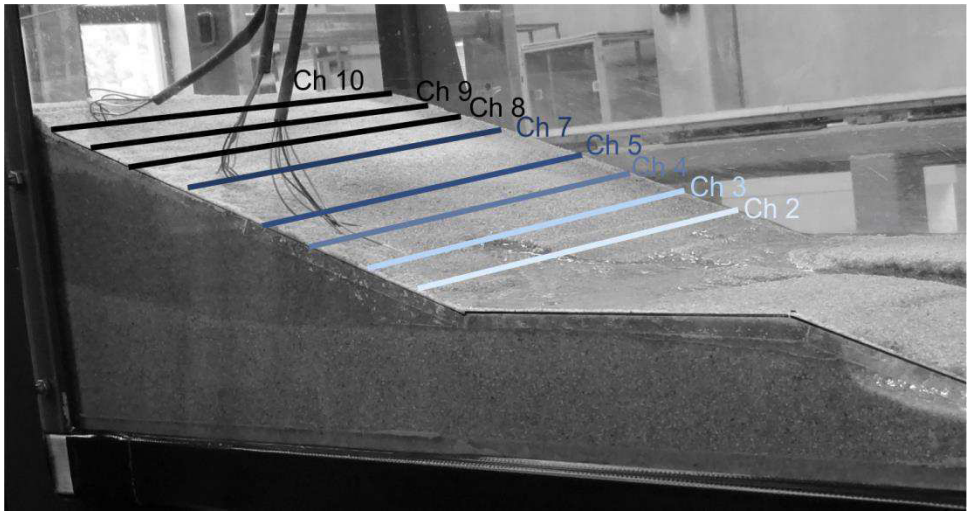


Abbildung 12: Bezeichnung der Sensorkanäle von Messvlies I.

4.1.5 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 aufgestickt 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 13). 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. In Abbildung 13 sind Lage und Bezeichnung der gemessenen Sensoren sowie ein schematisches Schaltbild des Steckbretts für Messvlies II skizziert.

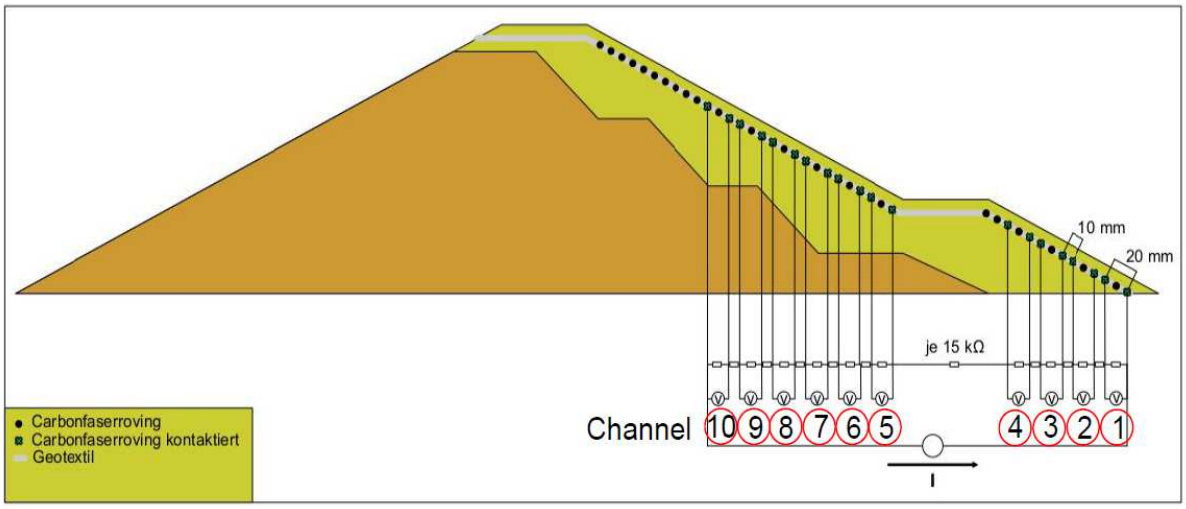


Abbildung 13: Skizzierter Einbau von Messvlies II inklusive des geplanten Schaltbildes.

4.2 Großmaßstäbliche Untersuchungen

4.2.1 Aufbau des Modelldeichs

Der Versuchsstand für den großmaßstäblichen Modelldeich (vgl. Abbildung 14) 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.

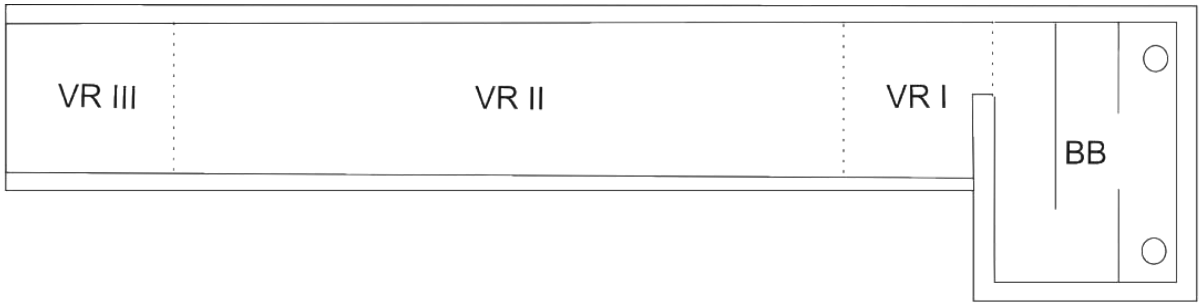


Abbildung 14: Konzeptioneller Aufbau des Versuchsstandes (Ansicht von oben).

Der Zufluss erfolgt durch ein Kunststoffrohr in das vorgesetzte 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 15 zeigt eine Skizze des gesamten Versuchsstands.

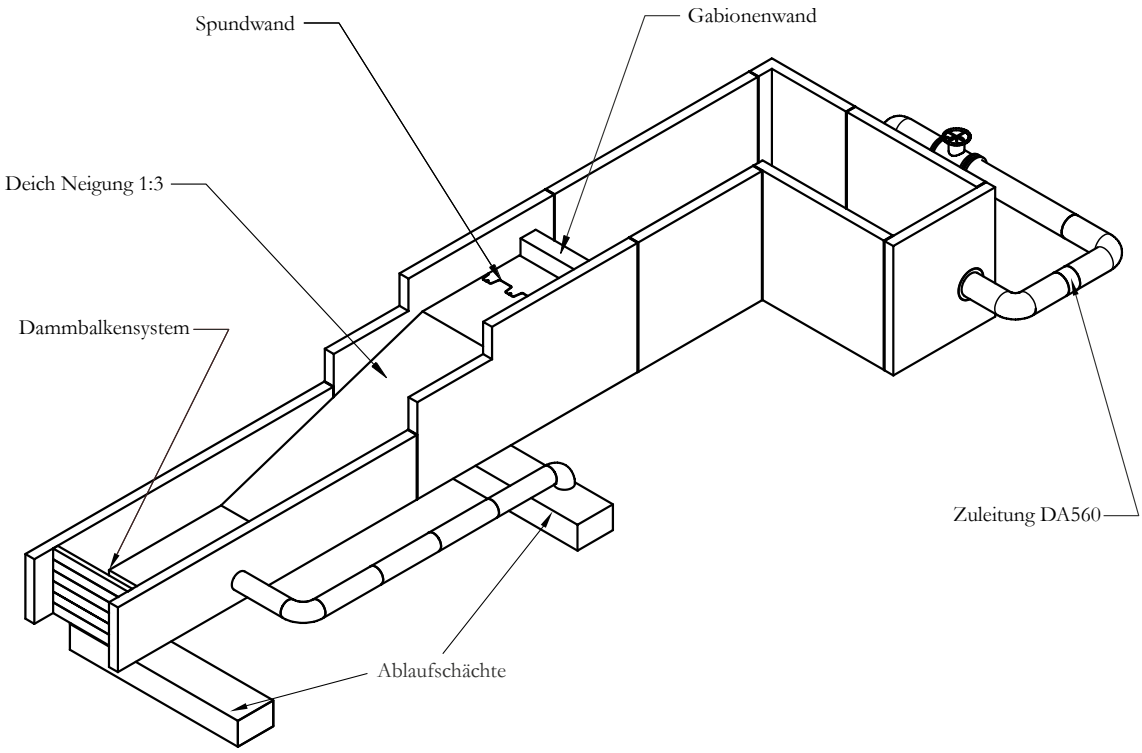


Abbildung 15: 3D-Ansicht des Versuchsstandes mit großmaßstäblichem Modelldeich (oben).

Der aufgebaute Modelldeich dient der Validierung und Weiterentwicklung der intelligenten Geotextilien. Hierzu werden sowohl Messungen im Referenzfall (intakter Deich) als auch Untersuchungen an einem beschädigten Deich durchgeführt. 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 16).

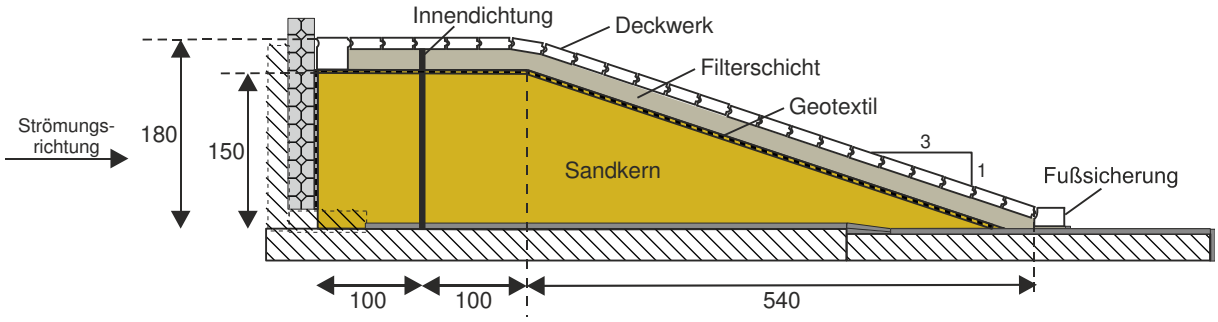


Abbildung 16: Schematischer Aufbau des Modelldeichs.

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 des anstehenden Wassers gewährleistet werden. Hierzu werden an ein L-Profil aus Beton über einbetonierte Flexanker Vorsatznetze angebracht. Diese werden mit Vulkanstein gefüllt, 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.

Die EAK 2002 geben ausführliche Informationen zu den geeigneten Baumaterialien und den an sie gestellten Anforderungen. 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 ≤ 5 % Schluffkorn (…) als Baustoff (…) optimal geeignet*." (EAK 2002). Es wurde ein gewaschener Mittelsand (0/2 mm) mit einem Schluffanteil von 0,8 % gewählt. Aufbau und Verdichtung des Deichkörpers erfolgen stufenweise. Der Sand wird per Hand (Stampfen) und mit Rüttelplatten verdichtet.

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. In den durchgeführten Referenzversuchen wurde die Kunststoffspundwand DuoLock® DL610/7,2 2 der Firma G² mit und ohne Schlossdichtung verwendet, sodass eine unterschiedlich starke Durchströmung des Deichkörpers erzeugt werden konnte.

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 17 zeigt einen fertig aufgebauten Modelldeich in der Draufsicht.

Abbildung 17: Der aufgebaute Modelldeich in der Draufsicht (Messtechnik eingeklappt).

4.2.2 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 wurde ein System zur Erfassung der Wasserdrücke entlang des gesamten Deichquerschnitts entwickelt. Für die Erfassung der Überströmereignisse sind Ultraschallsonden zur Ermittlung der Schichtdicken sowie Druckmessdosen erforderlich, die die Druckhöhen in der Filterschicht und auf der Deckwerksoberseite erfassen. Einen Überblick über alle im Deichmodell verwendeten Messverfahren liefert Tabelle 2. Abbildung 18 zeigt den Modelldeich im Längsschnitt mit den Positionen aller Messpunkte, eine ausführliche Beschreibung der verwendeten Messtechnik findet sich in KREBS und SCHÜTTRUMPF 2017.

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 (**V**oid **F**racture **M**easurement **S**ystem)
Druck auf Deckwerk und in Filterschicht	Druckmessdosen (S1-S5, F1-F5)
Verschiebung der Deichböschung	Optische Verfahren (Photogrammetrie)
Bodenfeuchte und -temperatur	Bodensensoren (*gia1 – gia4, giaT*)
Hydraulische Prozesse und Deichschäden	Webcam und Kameraaufnahmen

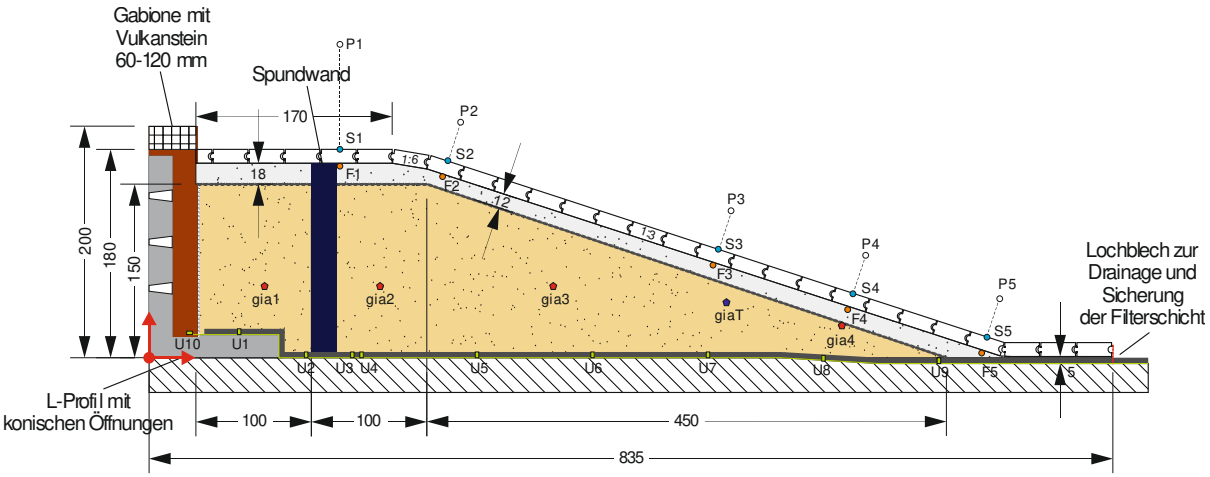


Abbildung 18: Längsschnitt durch den Modelldeich inklusive eingebauter Messtechnik (alle Angaben in cm).

4.2.3 Einbau der Sensorvliese

Auf der Böschung wird unterhalb der Deckschicht das Sensorvlies eingebaut. Bei dem verwendeten Geotextil handelt sich um einen mechanisch verfestigten Spinnfaservliesstoff aus vollsynthetischen Kunststofffasern. Als Sensoren werden Polyacrylnitril basierte, beschichtete Carbonfasern aufgebracht, die Anschlüsse der Carbonfasern werden erneut durch eine

Silikonschicht isoliert. Alle weiteren Details zur Wahl der Sensoren sowie zu Herstellung und Verwendung der intelligenten Geotextilien können SCHWAB ET AL. (2018) entnommen werden.

Insgesamt wurden zwei großmaßstäbliche Messvliese in das Deichmodell am IWW eingebaut und untersucht. Abbildung 19 zeigt die beiden Messvliese. Nach Einbau von Messvlies IV wurde der Deckwerksaufbau bestehend aus einer Filterschicht und den verzahnten Deckwerksteinen fortgesetzt.

Abbildung 19: Im großen Modelldeich eingebaute Messvliese (links: Messvlies III, Einbau im August 2017; rechts: Messvlies IV, Einbau im November 2017).

4.2.4 Versuchsprogramm

Wie im kleinmaßstäblichen Modell fanden auch im großmaßstäblichen Modell Referenzuntersuchungen ohne Einbau der intelligenten Geotextile statt, um eine Funktionalität der herkömmlichen Messmethodik sowie eine Reproduzierbarkeit der Belastungen zeigen zu können. Erst danach erfolgten Versuche mit den entwickelten Sensorvliesen. Insgesamt wurden drei Arten von Versuchen durchgeführt:

- „Gießkannentests“
- Durchsickerungsversuche
- Überströmversuche bzw. Langzeitversuche

Die sogenannten „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. Um die Wasserspiegelhöhe über so lange Zeiträume konstant zu halten, wurde eine automatische Füllstandsregelung realisiert, die es ermöglicht, den Wasserstand im Modell für eine beliebig lange Versuchsdauer auf +/- 2,5 mm genau konstant zu halten. Abbildung 20 und Abbildung 21 zeigen Eindrücke der Versuche.

Abbildung 20: Einstau des Modelldeichs für Durchsickerungsversuche.

Abbildung 21: Erster Sickerwasseraustritt am Deichfuß.

Für die Überströmversuche (Abbildung 22) konnten durch stufenweise Öffnung der Absperrklappe im Modellzulauf Überströmhöhen zwischen 2 und 40 cm generiert werden.

Hierzu wird das Deckwerk jeweils für eine definierte Versuchsdauer belastet und die Belastung schrittweise gesteigert. Für die Validierung der Feuchtesensoren sind Dauer und Höhe der Überströmung irrelevant, interessant für die Validierung der Sensoren ist jedoch deren Langzeitverhalten. Dies konnte während eines Einbaus des Messvlies IV über acht Monate hinweg untersucht werden. Während dieses Zeitraums wurde das Deichmodell immer wieder für längere Zeit überströmt, während dazwischen Zeiträume von ein bis zwei Wochen ohne Belastung lagen, in der der Deich entwässern und trocknen konnte.

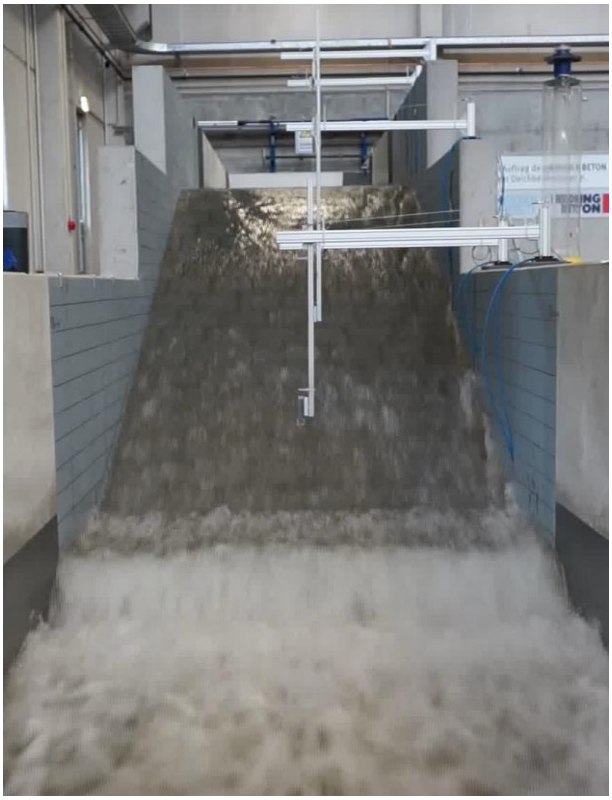


Abbildung 22: Modelldeich während Überströmversuch.

5 Ergebnisse

5.1 Kleinmaßstäbliche Versuche

5.1.1 Referenzfall ohne Sensoren

Die ersten Versuche am kleinmaßstäblichen Modelldeich fanden ohne den Einbau von Sensoren statt. Mit steigendem Wasserstand ließ sich die fortschreitende Durchsickerung des Deichkörpers beobachten. Abbildung 23 zeigt die Deichdurchsickerung zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Der Wasserspiegel vor dem Deich stieg über die Zeit linear an.

Der Deich in Abbildung 23 stellt einen Zweizonendeich bestehend aus einem homogenem Sandkörper und Kiesfilter dar. Außerdem wurden zwei verschiedene Sande verwendet, die sich jedoch nur hinsichtlich ihrer Farbe und nicht ihrer Durchlässigkeit unterscheiden. Aus Gründen des besseren Kontrasts zwischen Sickerlinie und trockenem Deich wurde für spätere Versuche nur noch 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, wurde im weiteren Versuchssetting auf den Kiesfilter verzichtet.

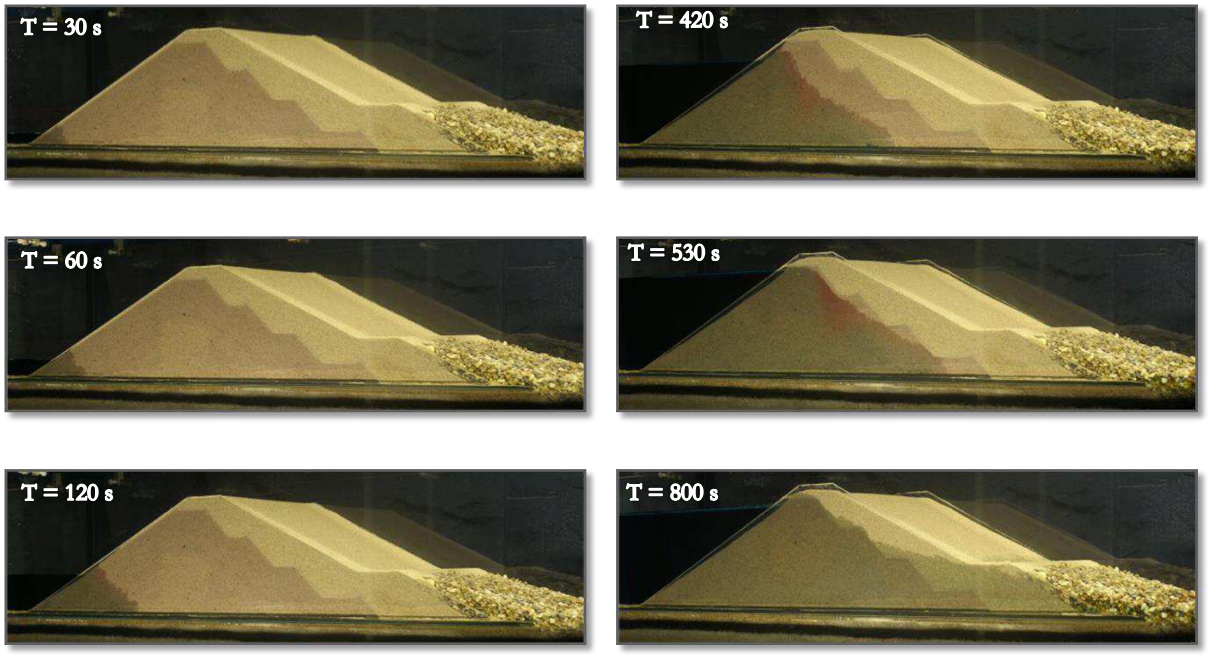


Abbildung 23: Lage der Sickerlinie des Deiches zu unterschiedlichen Zeitpunkten.

5.1.2 Messvlies I

Abbildung 24 zeigt den gemessenen Spannungsverlauf für die auf der Binnenseite eingebauten Sensoren für Messvlies I infolge eines linearen Anstiegs des Wasserspiegels auf der Außenseite. Die Bezeichnung der Sensoren geht aus Abbildung 12 hervor. Die Stromstärke beträgt in diesem Versuch 0,2 mA. Channel 1 und Channel 6 lieferten ein fehlerhaftes Signal und sind deshalb nicht dargestellt.
Zu Beginn ist der komplette Deich trocken und an allen Channels 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 Channel 2. Kurz darauf passiert dies auch an Channel 3, Channel 4 und Channel 5. Channel 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 Channels statt, weshalb der Spannungsabfall geringer ausfällt. Channel 8, 9 und 10 bleiben während des gesamten Versuchs trocken und die gemessene Spannung konstant.

Abbildung 25 zeigt Aufnahmen der Binnenseite des Modelldeichs nach etwa 15 Minuten (links) und 20 Minuten (rechts). Trotz Freispülung der Channel 2, 3 und 4 in der Deichmitte lässt sich für diese Channels 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.

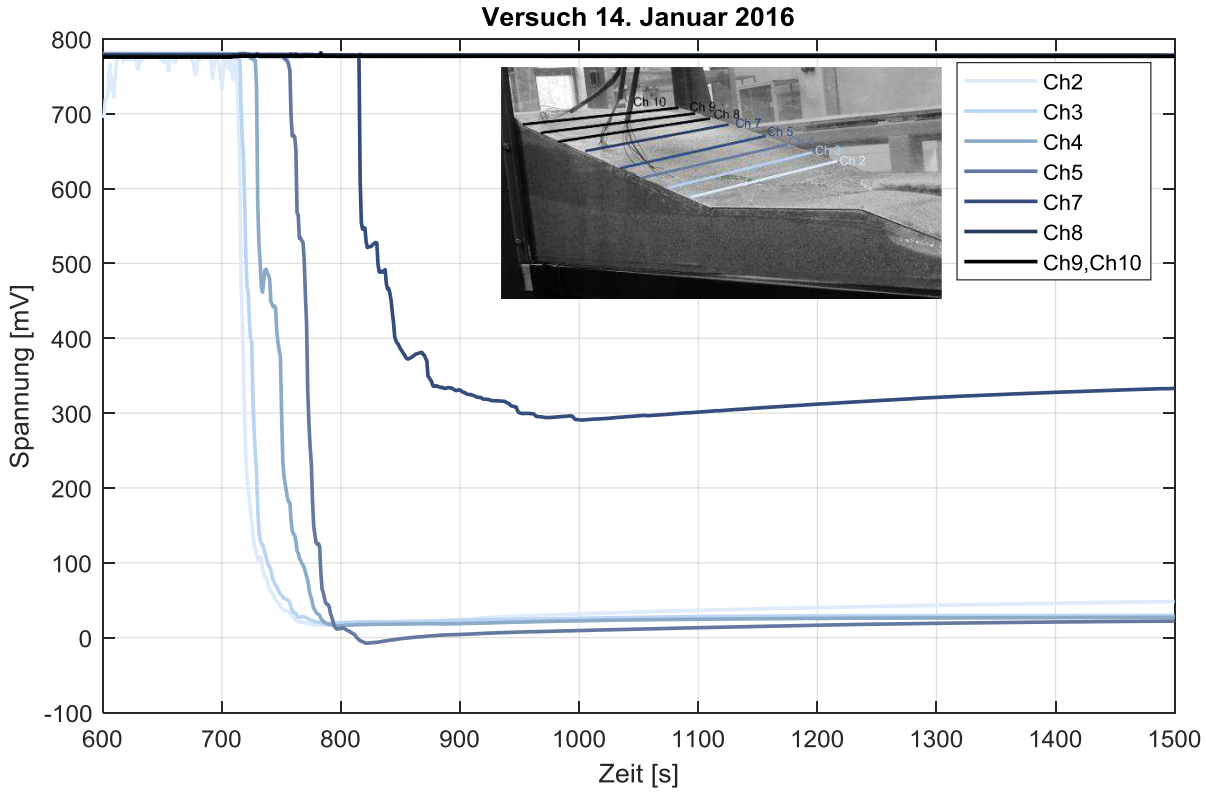


Abbildung 24: Gemessene Spannungen im Messvlies I während einer Deichdurchsickerung infolge eines linearen Anstiegs des Wasserspiegels vor dem Deich bis zum Volleinstau.

Abbildung 25: Rückschreitende 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

Aufgrund der Erfahrungen mit Messvlies I wurden die Anschlüsse in Messvlies II 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 konnten schließlich die in Abbildung 27 beschrifteten Sensoren.

Die Analyse der Spannungsverläufe in den durchgeführten Experimenten liefern für alle durchgeführten Versuche plausible Ergebnisse: Der Zeitpunkt eines deutlichen Spannungsabfalls stimmt für jeden Sensor mit der optisch beobachteten Durchsickerung überein. Abbildung 26 und Abbildung 28 zeigen hierzu beispielhaft den gemessenen Spannungsverlauf während eines Durchsickerungsversuchs im Januar 2016. Abbildung 27 und Abbildung 29 zeigen zwei Aufnahmen des Deichquerschnitts zu den Zeitpunkten T = 340 s und T = 350 s, zu denen die Channels ai0, ai1 und ai5 einen Spannungsabfall gemessen und damit Wasser an der Deichbinnenböschung detektiert haben. Hier zeigen sich Grenzen der optischen Auswertung: ai7 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, noch nicht durchfeuchtet und die Spannung in ai7 fällt erst 10 Sekunden später ab.

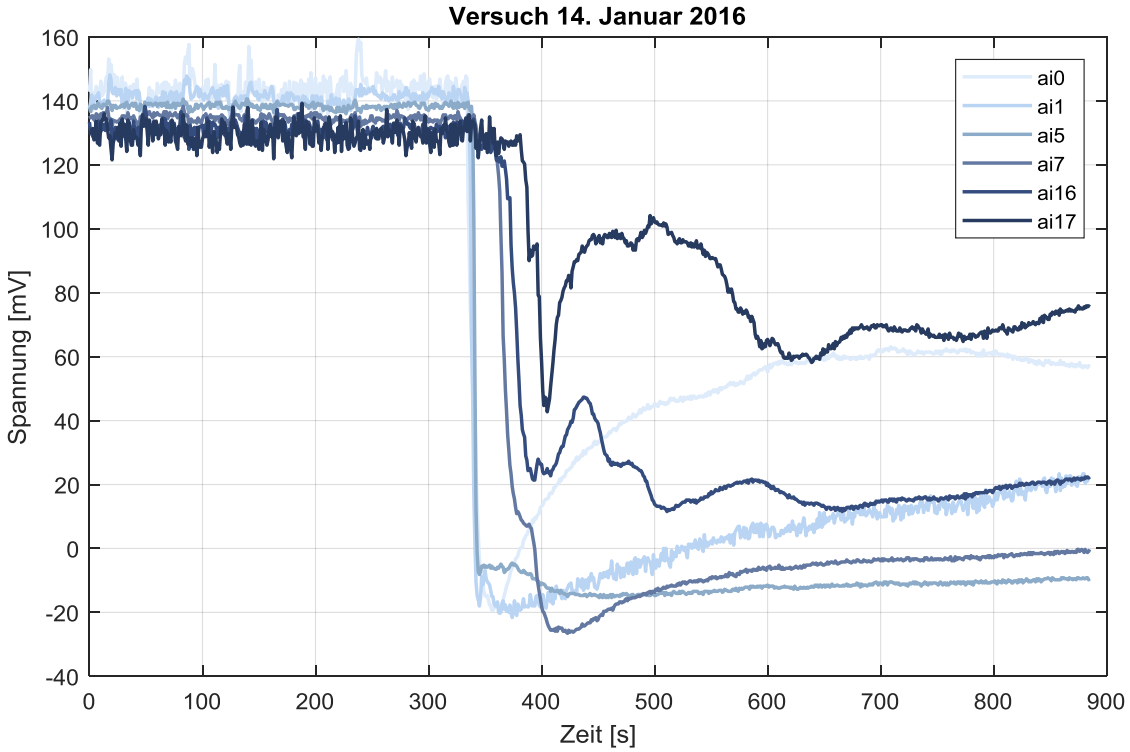


Abbildung 26: Gemessene Spannung während eines Durchsickerungsversuchs mit Messvlies II.

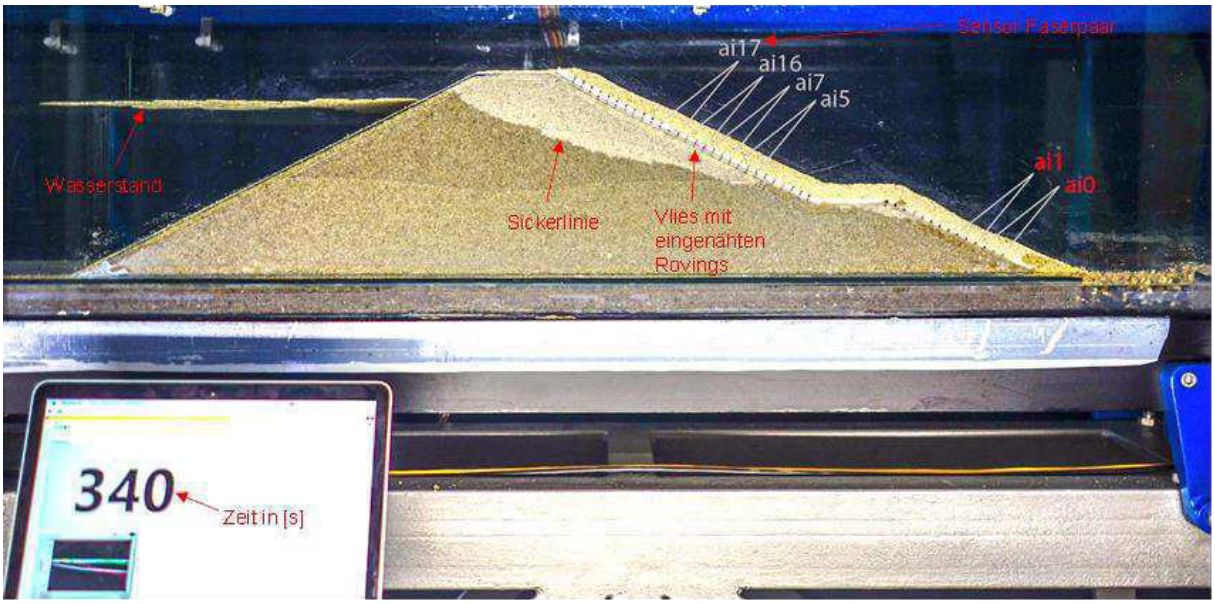


Abbildung 27: Versuch mit Messvlies II zum Zeitpunkt T = 340 s. Die im Bild rot markierten Sensoren verzeichnen bereits einen Spannungsabfall.

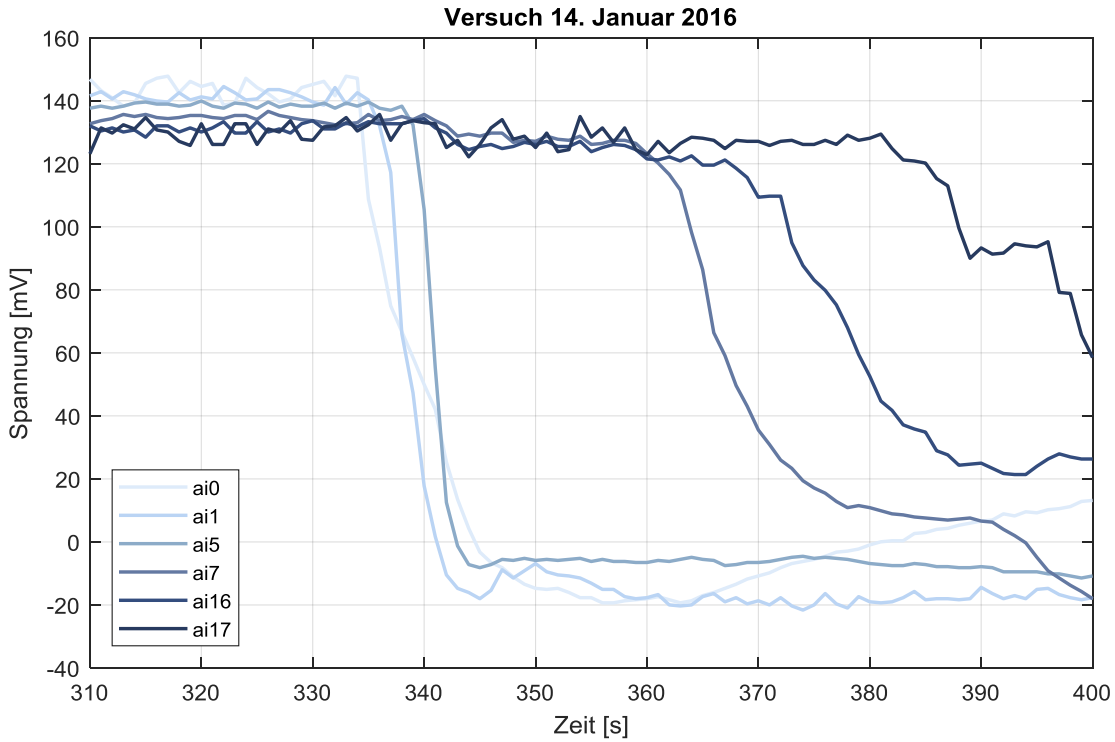


Abbildung 28: Gemessene Spannung während eines Durchsickerungsversuch mit Messvlies II (Ausschnitt).

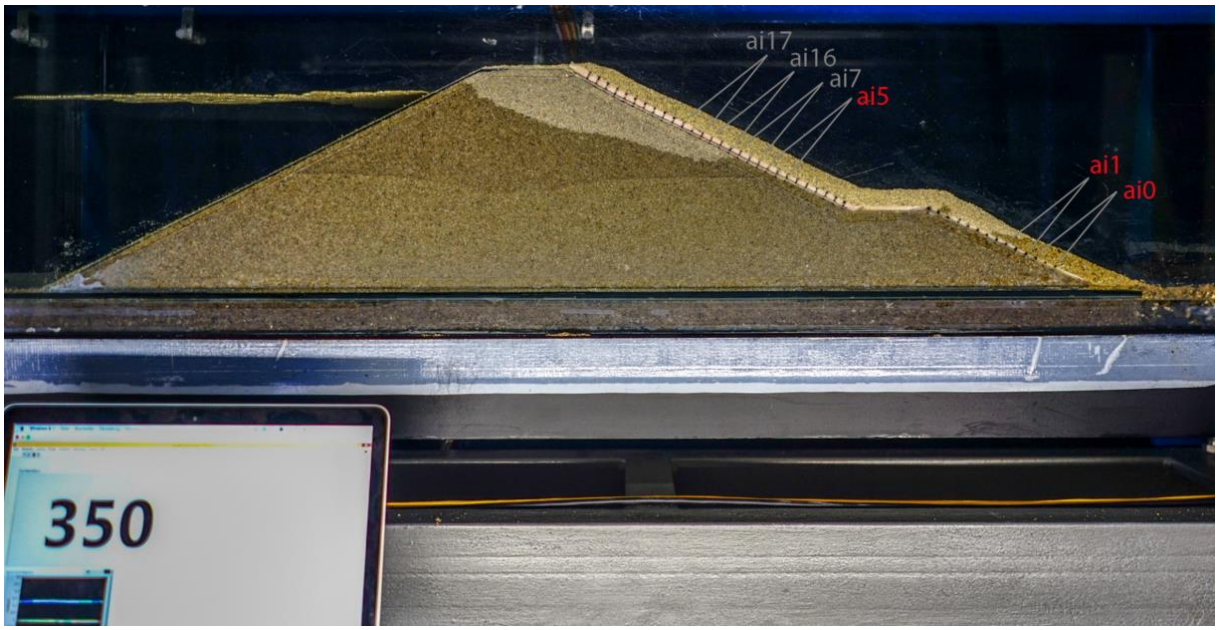


Abbildung 29: Versuch mit Messvlies II zum Zeitpunkt T = 350 s. Die im Bild rot markierten Sensoren verzeichnen einen Spannungsabfall.

Bei der mehrmaligen Wiederholung der Versuche im trockenen sowie erdfeuchten Sand zeigt sich jedoch auch, dass die Spannungsmessungen in ihrer absoluten Höhe und der Höhe des Spannungsabfalls deutlichen Schwankungen unterliegen und in dieser Hinsicht keine reproduzierbaren Ergebnisse erlauben. Hierbei spielen vor allem die Entstehung von Fehlströmen eine Rolle, die zu Wechselwirkungen zwischen den Sensoren führen, was dem geringen Abstand der Faserpaare untereinander zuzuschreiben ist (s. Abbildung 30). Auch kommt es bei einigen Versuchen zu stark verrauschten Spannungsmessungen, die auf die Überlagerung mit Fremdeinflüssen infolge der mangelnden Abschirmung der Messeinheit zurückzuführen sind.

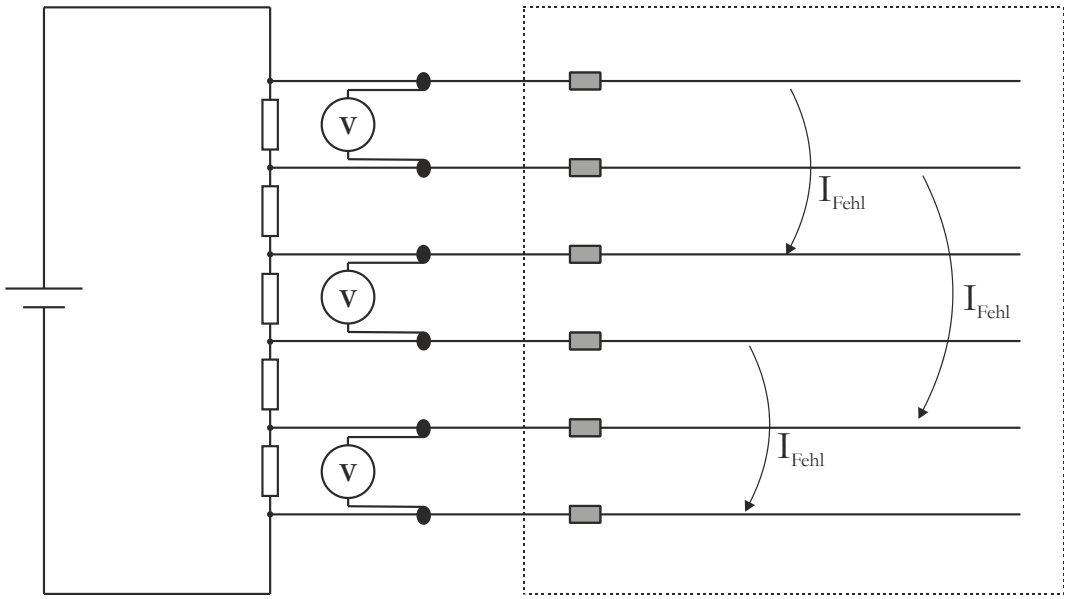


Abbildung 30: Entstehung von Fehlströmen während der Messung infolge des geringen Abstandes der Sensorpaare untereinander (skizzenhafte Darstellung).

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 hier geringer ausfallen. Die Carbonfasern selber und auch ihre Fixierung mittels Sticktechnik auf dem Geotextil erweisen sich als ausreichend robust und für einen Einbau im Deichkörper geeignet.

Dennoch gab es Schwachstellen, deren Identifikation zu einer iterativen Verbesserung der eingesetzten Sensorvliese führen sollte. Es zeigte sich, dass ein größeres Augenmerk auf die Kontaktierung der Fasern und die Verschaltung der Sensoren zu legen ist. Nach den Erfahrungen mit Messvlies I wurde die Notwendigkeit einer Isolation der Anschlüsse deutlich. Hier konnte durch das Umhüllen der Anschlüsse mit Silikon eine zufriedenstellende Lösung gefunden werden. Ebenfalls erwies es sich als sinnvoll, einen Großteil der Verkabelung und Anschlüsse außerhalb des Deiches anzuordnen und nur die eigentlichen Sensorfasern im Deich zu verbauen. Ferner war die bis dato umgesetzte Anordnung der gesamten Schaltung auf einem kleinen Klemmbrett fehleranfällig. Einerseits, da die Schaltungen per Hand gebaut und gelötet wurden und zweitens da ausreichender Schutz und geeignete Abschirmung gegen äußere Umwelteinflüsse fehlten.

In enger Abstimmung mit dem ITA, wurden 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 lag 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
- gute 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 führten zu Veränderungen in der Herstellung der eingesetzten Messvliese und zu Überarbeitungen an der entwickelten Messschaltung. Für die technischen Details sei auf SCHWAB ET AL. 2018 verwiesen. Mit dem auf Basis der gesammelten Erfahrungen entwickelten Messvlies wurden 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“) zeigten, dass das erste großmaßstäbliche Sensorvlies (Messvlies III) keine plausiblen Ergebnisse lieferte. Im Vergleich zu Messvlies II wurden 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 konnten Kurzschlüsse im Textil infolge feiner Carbonfasersplitter identifiziert werden. Ferner erwiesen sich die Ausführung der Anschlusskabel und der Anschluss an die Messeinheit trotz Verbesserungen als nicht ausreichend robust für den Einbau im großen Modelldeich (vgl. Abbildung 31). Das Messvlies III wurde infolgedessen nicht weiter untersucht und das ITA konzentrierte sich auf die Herstellung eines neuen Messvlieses und eine Überarbeitung der Messeinheit, welche schließlich im November 2017 in den Modelldeich eingebaut werden konnten.

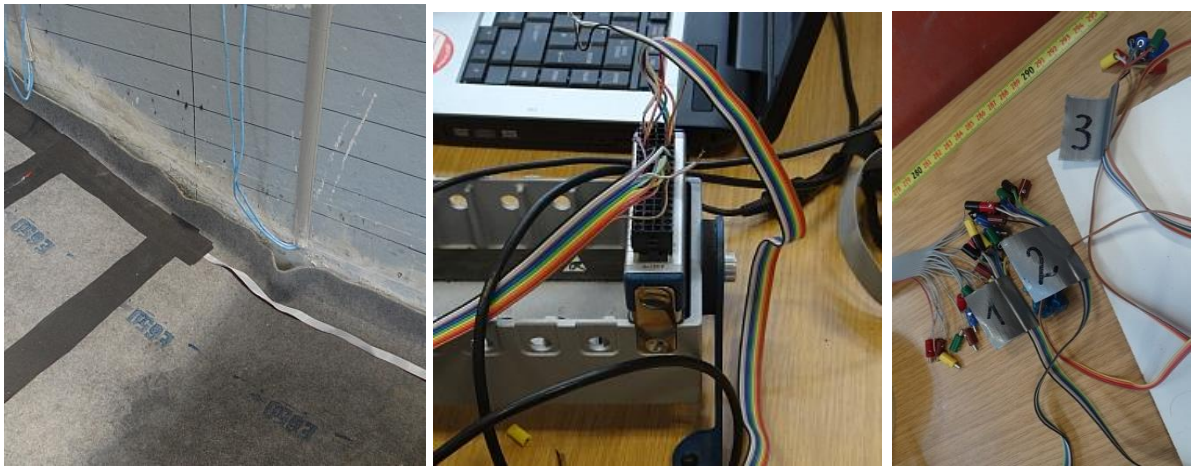


Abbildung 31: Kaschierung der Sensoren, Verbindungskabel zwischen Sensoren und Messeinheit als Flachbandkabel (links) sowie der Anschluss an die Messeinheit für Sensorvlies III (Mitte und rechts).

5.3.2 Messvlies IV

Für Messvlies IV wurde das Anschlusskabel durch Verwendung von XLR-Kabeln deutlich robuster ausgeführt. Ferner wurde die Verschaltung der Messeinheit durch Benutzung von XLR-Steckern verbessert, die Messschaltungen selber befinden sich in spritzwasserdichten Kunststoffboxen (vgl. Abbildung 32). Zusätzlich besteht eine einfache Anschlussmöglichkeit an die Messwerterfassung durch das *gia* (s. HERLE ET AL. 2018). Um bei Messvlies IV die Entstehung von Kurzschlüssen infolge feiner Carbonfasersplitter zu vermeiden, wurden die Carbonfaserrovings vor dem Aufbringen auf das Textil beschichtet (s. SCHWAB ET AL. 2018).

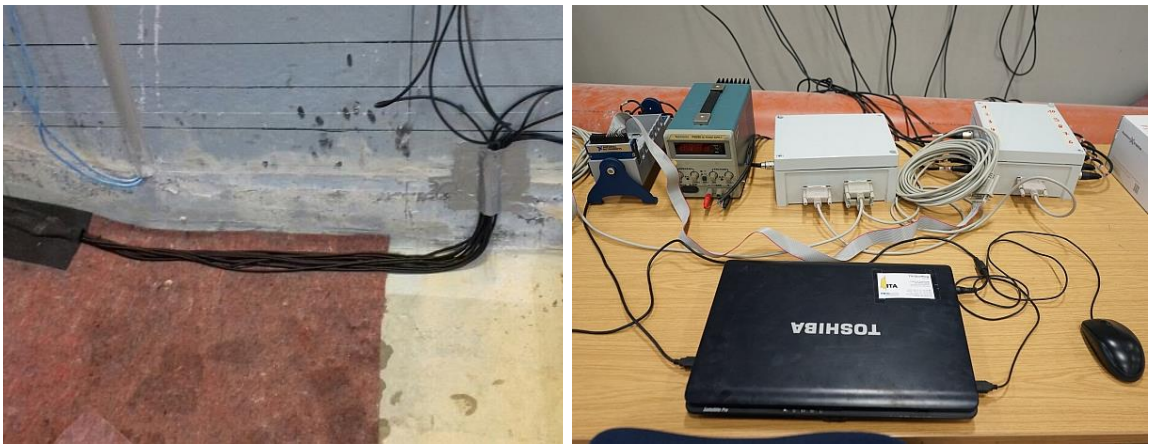


Abbildung 32: Verbindungskabel zwischen Sensoren und Messeinheit (links) sowie der Anschluss an die Messeinheit für Sensorvlies IV (rechts).

Erste Funktionstests („Gießkannentests“) des Sensorvlies IV ohne eingebautes Deckwerk erzielen gute Ergebnisse: Es besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Bewässerung einzelner Sensorfasern und der gemessenen Spannungen. 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 konnte fortgesetzt werden und das Sensorvlies wurde mit einem Filtermaterial und einem Deckwerk aus Betonformsteinen überbaut (Abbildung 33).

Abbildung 33: Detail Ausführung der Verbindungskabel bei Einbau des Filtermaterials (links oben) sowie nach Einbau des Deckwerks (links unten), rechts: Aufbau des kompletten Deckwerks abgeschlossen.

Anschließend wurde Messvlies IV in Durchsickerungs- sowie Überströmversuchen für mehrere Monate belastet und die Messungen der Spannungen permanent aufgezeichnet. Hierbei erfolgte die Messung und Datenerfassung über eine am *gia* entwickelte Messeinheit und die Daten wurden über MQTT-Protokolle in die Sensordateninfrastruktur eingespeist

(vgl. HERLE ET AL. 2018). Die erfassten Daten konnten am *IWW* entweder aus einer Datenbank heruntergeladen oder über MQTT-Protokolle bereits in Echtzeit abonniert werden.

Auf Grundlage der nun gewonnenen Daten wird eine automatische Auswertemethodik entwickelt, mithilfe der aus dem gemessenen Spannungsverlauf an einem Sensorpaar automatisch auf den Zustand des Sensorpaars (trocken oder nass) geschlossen werden kann (Kapitel 5.3.3). Daten aus der konventionellen Messtechnik am Modelldeich erlauben dabei eine Validierung dieser Auswertemethodik sowie der Funktion des Sensorvlieses. In Kombination mit Daten zum Wasserstand vor dem Deich und einer infolgedessen errechneten Sickerlinie kann dann auf den Zustand des Deiches geschlossen werden, der wiederum an den Echtzeit-Deichmonitor übermittelt wird. Die Entwicklung des Echtzeit-Deichmonitors beschreibt Kapitel 5.3.4.

5.3.3 Entwicklung einer automatischen Auswerte-Methodik

Die im Rahmen der Versuche am großmaßstäblichen Modelldeich gewonnen Messdaten aus dem Sensorvlies sowie des am Boden der Versuchsrinne installierten Druckmesssystems werden in einem ersten Schritt in Grafiken geplottet. Eine erste Validierung der spannungsinduzierten Durchfeuchtungsmessung durch die geotextilen Sensoren ist hiermit – ähnlich zur Auswertung in den kleinmaßstäblichen Versuchen – bereits rein optisch möglich.

Über eine automatische Auswerteroutine wird im folgenden Schritt der exakte Zeitpunkt der Wasserdetektion am Messvlies bestimmt. Dieser kann dann mit dem erwarteten Zeitpunkt der Durchsickerung jedes Sensors (bestimmt aus dem Schnittpunkt zwischen der aus den Druckmessungen errechneten Sickerlinie und dem Textil) verglichen werden. Bei einer korrekten Funktion des Sensorvlieses sowie der Auswertemethodik sollten diese beiden Zeitpunkte möglichst genau übereinstimmen. Zusätzlich wird in einer kleinen Videoanimation die im Deich gemessene Sickerlinie gemeinsam mit den Detektionszeitpunkten der Sensoren auf dem Textil aufbereitet, sodass erneut eine einfache optische Validierung der Detektionen am Textil ermöglicht wird. Das Fließdiagramm in Abbildung 34 skizziert den soeben beschriebenen Ablauf zur Validierung des Sensortextils.

Abbildung 35 zeigt den Verlauf der Druckmessung am Boden des Modelldeichs (U1 - U10) und die gemessenen Spannungen an den Kanälen des Sensortextils (Ch1 - Ch6) 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 18). Die Kanäle am Textil sind vom Deichfuß zur Deichkrone von 1 bis 6 durchnummeriert. Ch1 entspricht folglich dem am Deichfuß liegenden Kanal und Ch6 dem in der Mitte der Deichböschung liegenden Kanal.

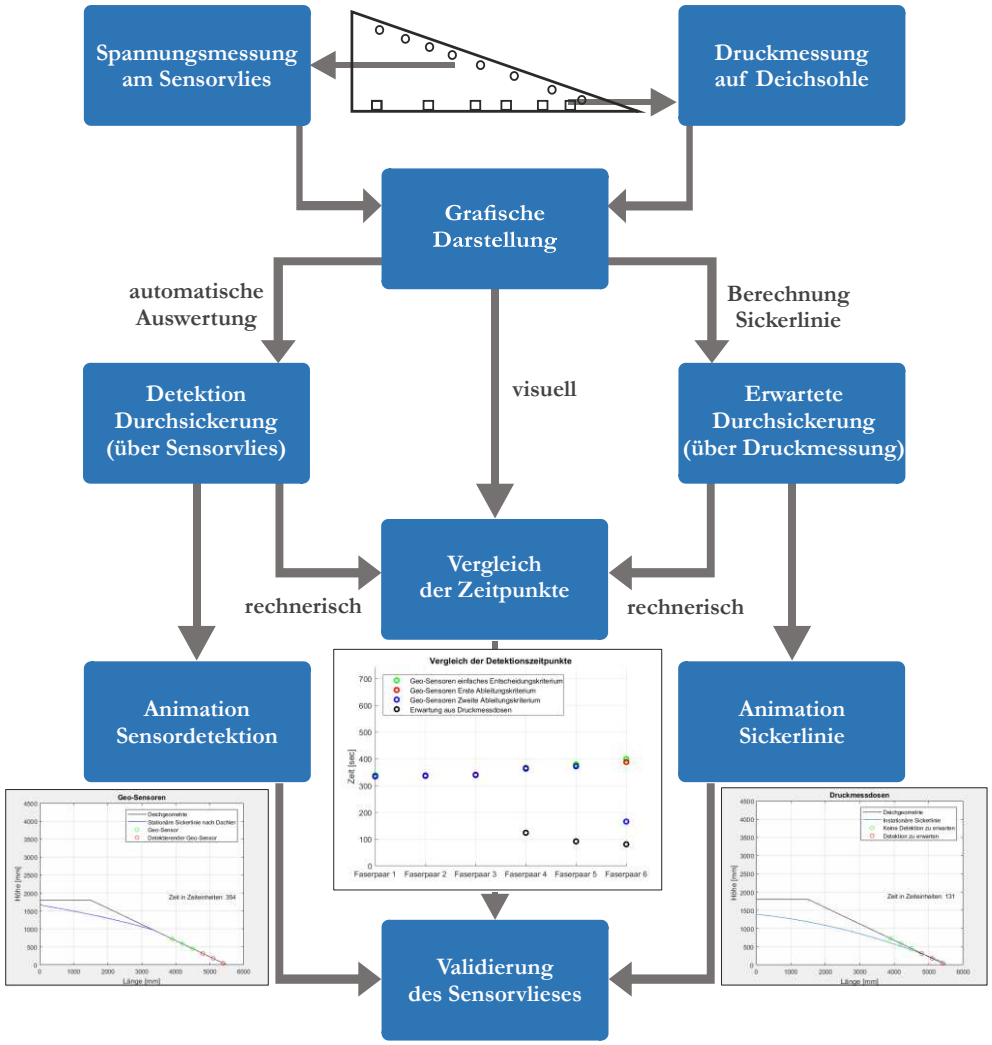


Abbildung 34: Schema zur Validierung des Sensorvlieses mithilfe der gewonnenen Daten.

Das erste 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 hohen, jedoch konstanten Niveaus.
- 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 starker Anstieg der Spannungen erkennen, wobei die auf der Deichböschung weiter obenliegenden Sensoren zuerst ansteigen.
- Im weiteren Verlauf steigt die Spannung weiter - jedoch weniger stark - an, obwohl 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.

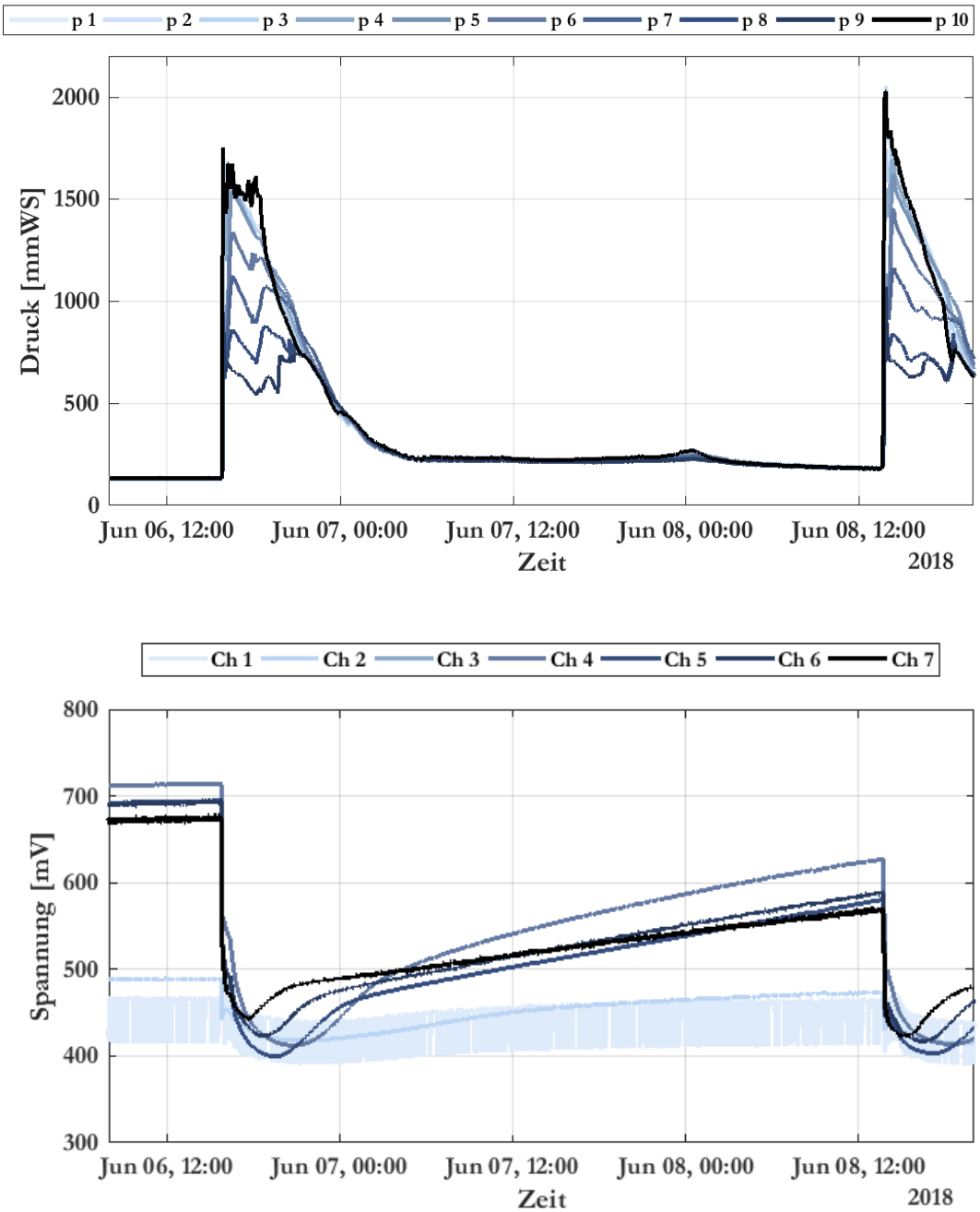


Abbildung 35: Darstellung der gemessenen Wasserspiegelhöhe im Modelldeich (oben) und der Spannungen an den Sensoren des Messvlies IV (unten) für zwei Überströmereignisse am Modelldeich im Juni 2018.

Die beschriebenen und in den Grafiken dargestellten Spannungsverläufe entsprechen den charakteristischen Sensorreaktionen, die sich für alle durchgeführten Versuche beobachten lassen. In einem weiteren Schritt wird nun eine automatische Auswertung der Spannungsverläufe vorgenommen, mithilfe derer die Zeitpunkte der Wasserdetektionen an einem

Sensor bestimmt werden können und dann mit dem durch die Druckmessung am Boden bestimmten Verlauf der Sickerlinie verglichen werden können. Später soll die gleiche Auswerteroutine zur Ermittlung des Sensorzustands in Echtzeit genutzt werden.

Bei Betrachtung der für die zwei Ereignisse im Juni dargestellten Spannungsverläufe wurde 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 Wassereintritt detektieren zu können. Anfängliche Versuche, alle Sensoren auf einen trockenen Zustand zu referenzieren und nur relative Spannungsabfälle zu betrachten, erweisen sich daher als ungeeignet. Es war schließlich zielführender mit einem gleitenden Mittelwert zu arbeiten und dabei einen definierten Zeitraum der vorangegangenen Messungen zu betrachten und mit jeweils drei „neuen" Messungen zu vergleichen. Hierbei gilt jeweils für den Zeitpunkt t:

$$\left[\sum_{i=t}^{t+2} U(i)\right]/3 \; < \; \left[\sum_{i=t-100}^{t-1} U(i)\right]/100 - 2 \cdot s \; \rightarrow \; Sensor\ nass$$

$$\left[\sum_{i=t}^{t+2} U(i)\right]/3 \; \geq \; \left[\sum_{i=t-100}^{t-1} U(i)\right]/100 - 2 \cdot s \; \rightarrow \; Sensor\ trocken$$

Mit:

$U(t)$	gemessene Spannung zum Zeitpunkt t
s	Standardabweichung der Messwerte im Zeitraum t-100 bis t-1

Durch Einbeziehung der Standardabweichung konnte dabei ein „Grundrauschen" der Daten berücksichtigt werden, ohne dass ein aufwändigeres Preprocessing in Form einer Verwendung von Glättungsfiltern erforderlich ist. Vorteil dieser relativ schlanken Rechnung ist vor allem die schnelle und einfache Umsetzung für die angestrebte automatische Auswertung in Echtzeit. Über den Test dieses relativ simplen Kriteriums war eine erfolgreiche Detektion aller bislang im Modell beobachteten Ereignisse möglich, ohne dass es zu Fehlalarmen kommt.

Abbildung 36 zeigt die Anwendung des Kriteriums für Sensor 1 und 2 sowie Sensor 5 und 6 beispielhaft für ein Ereignis im April 2018, wobei ein Sensorzustand von 1 jeweils für einen detektierten Wassereintritt am Sensor steht. Hierbei wird deutlich, dass das Kriterium für alle Sensoren funktioniert, obwohl sich sowohl die Höhe der Spannungsabfälle als auch das Rauschen der Messwerte für die vier gezeigten Sensoren deutlich voneinander unterscheiden.

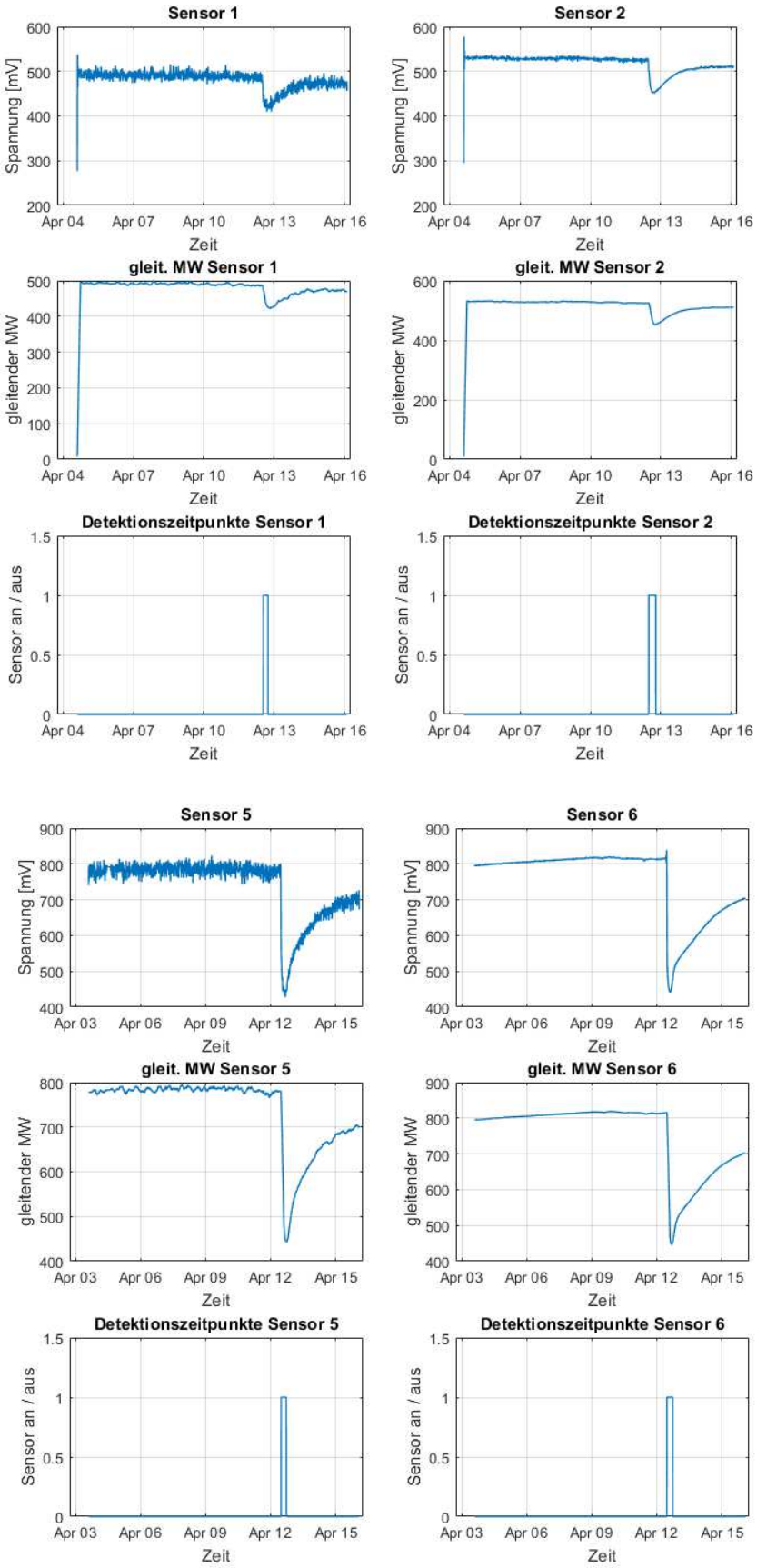


Abbildung 36: Vergleich der Spannungsverläufe, des gleitenden Mittelwerts und des daraus ermittelten Detektionszeitpunktes für Sensor 1 und 2 bzw. 5 und 6 infolge der automatischen Auswertemethodik für ein Überströmereignis im April 2018.

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. 2018). Ein am *IWW* erstelltes Programm („*Broker*“) abonniert für die in Abschnitt 5.3.3 beschriebene Auswerteroutine die Sensorsignale (topic: „*sensor 1*“ – „*sensor 8*“). Die Auswerteroutine erhält nun in Echtzeit mit jeder Messung für jeden Sensor einen gemessenen Spannungswert. Für jeden neu eingehenden Messwert wird die Auswerteroutine durchlaufen, die als Ergebnis schließlich einen Sensorzustand „trocken“ („*good*“) oder „nass“ („*bad*“) ausgibt. 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 Sickerlinie kann bei bekannten Bodenkennwerten und homogenem Aufbau über analytische Ansätze z. B. nach Cozeny-Casagrande berechnet werden (CASAGRANDE 1934). Entspricht diese dem von den Sensoren detektierten Wasseraustritt, ist der Deichzustand in Ordnung (topic: „*dike state*“ = „*good*“). Wird durch die Sensoren ein infolge des Wasserstands vor dem Deich nicht zu erwartender Wasseraustritt detektiert, so ist der Deichzustand kritisch (topic: „*dike state*“ = „*critical*“) und es wird eine automatische Warnung generiert.

Das Deich Dashboard abonniert schließlich alle unter den Topics „*sensor state*“, „*dike state*“ und „*water level*“ veröffentlichten Daten und kann damit dem 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 generierten Daten, sodass Daten der Vergangenheit ebenfalls über das Deich Dashboard visualisierbar sind. Abbildung 37 stellt die oben beschriebenen Zusammenhänge und Datenströme bis zum Deich Dashboard grafisch dar, Abbildung 38 zeigt einen Screenshot des umgesetzten Deich Dashboards kurz nach einem Überströmereignis am Modelldeich. Der Sensorzustand ist hier bereits für alle Sensoren auf „*good*“ gesprungen, da mit der Auswertemethodik der Zeitpunkt des Wassereintritts detektiert wird, was für das aufgezeichnete Ereignis an den Ausschlägen im Verlauf des Sensorzustands (unten links) sichtbar ist. Der Deichzustand ist für den gezeigten Modelldeich trotz des gemessenen Wassereintritts an allen Sensoren *„good“,* da der durch die Sensoren gemessene Wassereintritt dem erwarteten Wassereintritt bei einem Überströmereignis über ein durchlässiges Deckwerk entspricht und für den umgesetzten Deichaufbau keine Gefahr bedeutet.

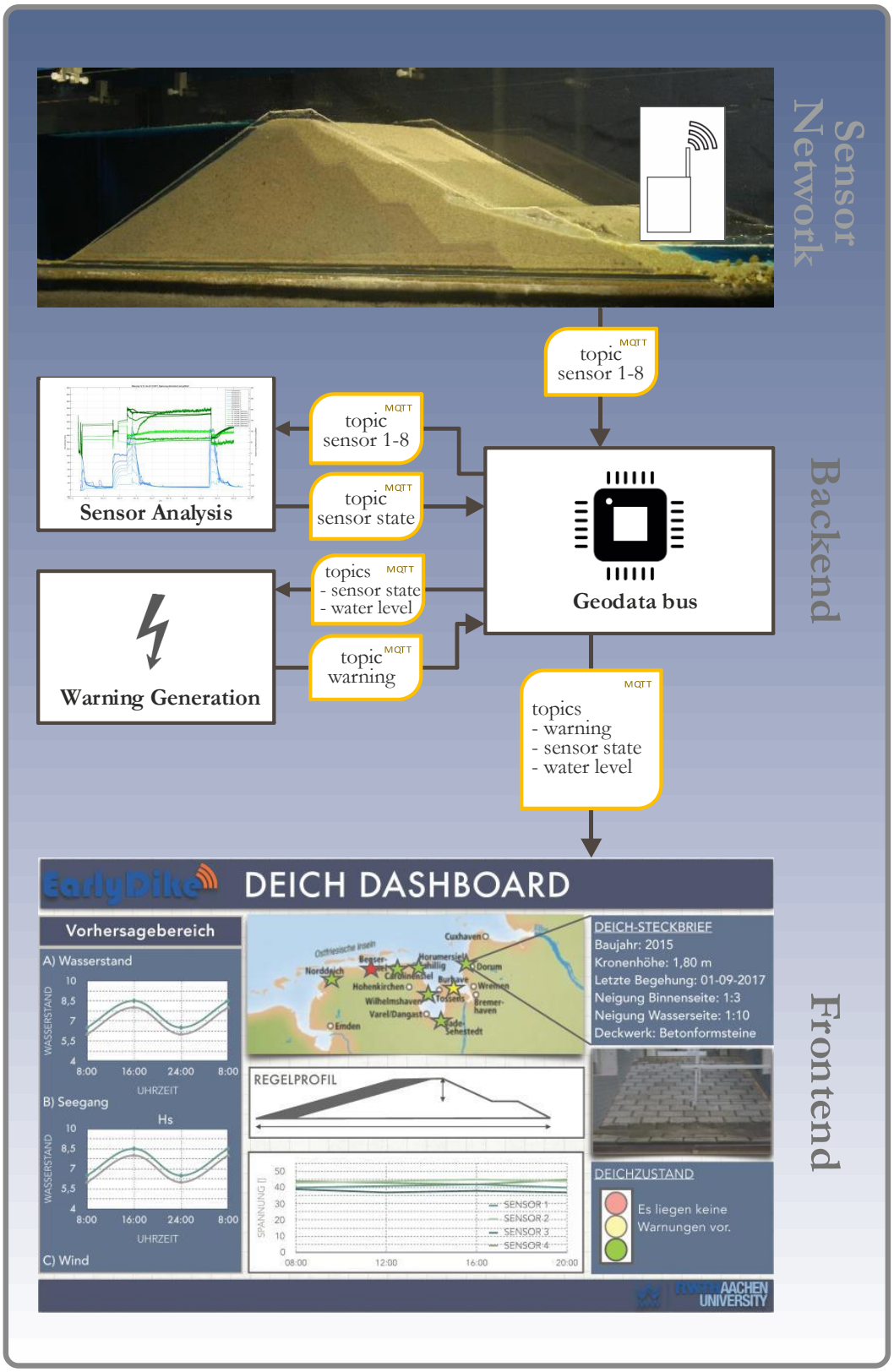


Abbildung 37: Informationsfluss zum Echtzeit-Deichmonitor.

Abbildung 38: Screenshot des Deich-Dashboards, kurz nach erfolgtem Überströmereignis.

6 Fazit und Ausblick

Im Rahmen von 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 bei einem Einbau in der Deichböschung in der Lage sind, einen Anstieg der Sickerlinie innerhalb des Deichkörpers sowie eine Infiltration durch die Deckschicht des Deiches zuverlässig zu erkennen. Dabei wurden die entwickelten Sensortextilien in klein- und großmaßstäblichen Modellversuchen untersucht und das Design der Sensoren sowie das Messkonzept in enger Zusammenarbeit mit dem *ITA* optimiert. In über mehrere Monate stattfindenden Langzeittests im großmaßstäblichen Modelldeich 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 für den Einsatz zum Deichmonitoring geeignet.

Es wurde ein Verfahren entwickelt, um die Messsignale der textilen Sensoren automatisch auszuwerten, sie in eine Sensor- und Geodateninfrastruktur zu übermitteln und sie 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 werden und das Verhalten während Regenereignissen 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 Einbau in einer Testdeichstrecke. Hierbei ist das Augenmerk auf die Robustheit der Sensoren bei der Verwendung schweren Geräts zu legen. Ferner sollte in folgenden Arbeiten geprüft werden, inwieweit die entwickelte Auswertemethodik zur Interpretation der Messsignale unter Verwendung von Machine Learning Ansätzen optimiert werden könnte.

Weitere aufgeworfene Fragen beziehen sich auf den Einsatz der Sensoren unter schlechten Wetterbedingungen: Wie können die Sensoren vor einem Blitzeinschlag in den Deich geschützt werden? Auch ein Ausfall der Sensoren im Sturmflutfall aufgrund nicht funktionierender Telekommunikation und Stromversorgung wäre fatal, weshalb eine autarke Stromversorgung sicherzustellen ist und die Verbindung zur Dateninfrastruktur auch unter Sturmflutbedingungen gewährleistet sein muss.

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 Schriftenverzeichnis

ABDOUN, T.; BENNETT, V.; DANISCH, L.; SHANTZ, T. und JANG, D.: Field installation details of a wireless shape-acceleration array system for geotechnical applications. In: TOMIZUKA, M., YUN, C.-B. und GIURGIUTIU, V. (Hrsg.): San Diego, California, 65293O. doi: 10.1117/12.714413, 2007.

ALLSOP, W.; KORTENHAUS, A. und 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. und 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. und RODRÍGUEZ-TRELLES, M. D. A. (Hrsg.): 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. und 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, 2018.

BERDING BETON GMBH2012 : Europäische Technische Zulassung - Verkalit-Betonelemente zur Verwendung in Deckwerken.. Angemeldet durch Deutsches Institut für Bautechnik. Veröffentlichungsnr: ETA-12/0245.

BERSAN, S.; KOELEWIJN, A. R. und SIMONINI, P.: Application of distributed temperature sensors in piping-prone dikes. In: DIGHT, P. (Hrsg.): 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. und SIMM, J.: Comprehensive Real-Time Field Monitoring at Active Embankment subjected to Tidal Loading. In: MEEHAN, C. L., PRADEL, D., PANDO, M. A. und LABUZ, J. F. (Hrsg.): GeoCongress 2013. San Diego, California, United States, 1549-1558. doi: 10.1061/9780784412787.155, 2013.

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 (Hrsg.): 38. Dresdner Wasserbaukolloquium. Dresden, 2015.

EAK: Empfehlungen für Küstenschutzwerke. Korrigierte Ausgabe 2007 In: Die Küste, Jg. 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 & Bundesanstalt für Wasserbau, 2018.

KORTENHAUS, A. und OUMERACI, H.: Probabilistische Bemessung für Seedeiche (ProDeich). Leichtweiss-Institut für Wasserbau, Braunschweig, (877), 403 S., 2002.

KREBS, V. und 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.

KRZHIZHANOVSKAYA, 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. und MEIJER, R. J.: Flood early warning system: design, implementation and computational modules. In: Procedia Computer Science, Jg. 4, 106-115. doi: 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, Jg. 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, Jg. 10, 1, 55-80. 1962.

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.

Merkblatt DWA M 507-1: Deiche an Fließgewässern Teil 1: Planung, Bau und Betrieb. Dezember 2011.

NAUMANN, M.; BILL, R.; NIEMEYER, F. und NITSCHKE, E.: Deformation Analysis of Dikes Using Unmanned Aerial Systems (UAS). In: SAATHOFF, F. und CANTRÉ, S. (Hrsg.): 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. und ZIMMERMANN, C.: Deichüberwachung unter Einsatz der Fernerkundung. In: Franzius-Mitteilungen, Jg. 92, 92, 2006.

PEI, H.-F.; TENG, J.; YIN, J.-H. und CHEN, R.: A review of previous studies on the applications of optical fiber sensors in geotechnical health monitoring. In: Measurement, Jg. 58, 207-214. doi: 10.1016/j.measurement.2014.08.013, 2014.

PETERS, E. T. und 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. und BACHMANN, D.: Real-time monitoring and forecasting of dike strength. In: International Journal of Safety and Security Engineering, Jg. 6, 2, 122-131. doi: 10.2495/SAFE-V6-N2-122-131, 2016.

PYAYT, A. L.; KOZIONOV, A. P.; MOKHOV, I. I.; LANG, B.; KRZHIZHANOVSKAYA, V. V. und SLOOT, P. M.A.: An Approach for Real-time Levee Health Monitoring Using Signal Processing Methods. In: Procedia Computer Science, Jg. 18, 2357-2366. doi: 10.1016/j.procs.2013.05.407, 2013.

RICHWIEN, W.: Kritische Beanspruchungen von Deichböden – Versagensformen und Nach- weiskonzepte. In: HANSA, Zentralorgan für Schiffahrt, Schiffbau, Hafen, Jg. 133, 5, 56-58. 1996.

ROYET, P.; PALMA-LOPES, S.; FAUCHARD, CYRILLE, MÉRIAUX, PATRICE und ARIAU, 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. und OUMERACI, H.: Learning from Seadike Failures. In: PIANC Bulletin, Jg. 117, 47-60. 2004.

SCHÜTTRUMPF, H.: Sea Dikes in Germany. In: Die Küste, Jg. 74, 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. (2018): 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.

SIMM, J.; WALLIS, M.; SMITH, P.; TOURMENT, R.; VEYLON, G.; DENIAUD, Y.; DURAND, E.; MCVICKER, J. und 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. (Hrsg.): 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, doi: 10.1201/b13715-43, 2013.

THIELE, E.; GLÖTZL, R.; WERTH, K.; KREBBER, K. und 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. und HOPMAN, V.: IJkdijk Full Scale Underseepage Erosion (Piping) Test: Evaluation of Innovative Sensor Technology. In: BURNS, S., BHATIA, S. und AVILA, C. (Hrsg.): Scour and Erosion. San Francisco, California, United States, 649-657. doi: 10.1061/41147(392)63, 2014.

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

WAAL, J. P. und VAN DER MEER, J.: WAVE RUNUP AND OVERTOPPING ON COASTAL STRUCTURES. In: Coastal Engineering Proceedings, Jg. 23, 1992.

ZEGHAL, M.; ABDOUN, T.; EXTON, M.; MERCADO, V.; LV, X.; BENNETT, V.; YAZICI, B. und 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. und LABUZ, J. F. (Hrsg.): GeoCongress 2013. San Diego, California, United States, 1605-1614. doi: 10.1061/9780784412787.161, 2013.

Intelligente Geotextilien für das Echtzeit-Deichmonitoring

Max Schwab, Till Quadflieg und Thomas Gries

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 Fügetechnologien 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, dass die textilbasierte Sensorik sowie die konzipierte Messschaltung Feuchtigkeitsereignisse detektieren zu können.

Schlagwörter

Geotextil, Smart Textiles, Stickverfahren, Fügetechnologien, Carbonfasern

Summary

As part of work package 3 "Dike Monitoring and Simulator" of the project EarlyDike, smart geotextiles for real-time humidity measurement with the dike were developed and validated by the Institut für Textiltechnik at the RWTH Aachen University (ITA). Different conductive fibre materials were investigated and electrical 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 electrical 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

Inhalt

1 Einleitung 2
2 Stand der Technik 4
2.1 Textile Sensorfasern 4
2.1.1 Carbonfasern 4
2.1.2 Edelstahlgarne 5
2.2 Faserbasierte Strukturüberwachung (Structural Health Monitoring) 5
2.3 Ausgewählte Textilherstellungsverfahren für intelligente Geotextilien 6
3 Grundlagen der Feuchtigkeitsmessung im Deich 6
3.1 Messprinzip 7
3.2 Prototyp des Geotextils 8
3.3 Validierung am kleinmaßstäblichen Modelldeich 9
4 Entwicklung eines intelligenten Geotextils 11
4.1 Textile Fügeverfahren für die Herstellung von Sensortextilien 12
4.1.1 Schweißen 12
4.1.2 Kleben 13
4.1.3 Textiles Fügen durch das Stickverfahren 13
4.2 Herstellung eines Sensor-Geotextils 15
4.2.1 Beschichtung der Carbonfasern 15
4.2.2 Aufbringen der Sensorfasern 17
5 Aufbau der Messkette für das Sensor-Geotextil am Modelldeich 19
5.1 Entwicklung der Sensorschaltung 20
5.1.1 Gleichstrommessung 20
5.1.2 Gleichspannungsmessung 22
5.2 Assemblierung der Messkette 22
5.2.1 Verarbeitungsbox 23
5.2.2 Schalterbox 23
5.2.3 Messschaltungsbox 23
6 Auswertung der Messergebnisse 24
6.1 Analyse des Spannungsabfalls am Sensor 25
7 Fazit und Ausblick 27
8 Danksagung 30
9 Schriftenverzeichnis 31

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“ (PEN-

GEL 2013) eingesetzt. In beiden Projekten wurde der Forschungsschwerpunkt auf Deiche im Binnenbereich und den damit verbundenen hydrodynamischen Prozessen (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 Wasserwirtschaft (IWW) der RWTH Aachen University* und dem *Geodätischen Institut (gia) der RWTH Aachen University* (HERLE et al. und KREBS et al.).

Zunächst werden im Stand der Technik (Kap. 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 Kap. 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 Kap. 4 beschrieben. Dabei werden zunächst textile Fügeverfahren vorgestellt um die Feuchtigkeitssensoren in das Geotextil zu integrieren. 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 et al. beschrieben. Die Auswerteeinheit zur Messung der Feuchtigkeit am intelligenten Geotextil ist in Kap. 5 beschrieben, vor allem die Weiterentwicklung der Messelektronik und die gesamte Messkette. Dabei steht vor allem die Datenübergabe zum GeoPortal im Vordergrund, dass vom *gia* im Projekt entwickelt wurde. Eine Simulation eines Feuchtigkeitsereignisses ist in Kap. 6 beschrieben. 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 wird der Stand der Technik für beide Materialien dargestellt, sowie ausgewählte Textilverfahren zur Herstellung von intelligenten Geotextilien.

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 ermöglicht ihre Steifigkeit und Handhabbarkeit eine Verarbeitung mit Textilmaschinen. Die Sensorfunktion ist abhängig vom elektrischen Widerstand, welcher wiederum vom eingesetzten Werkstoff und dem 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.

Fasertype	Herstellerbezeichnung	Garnfeinheit [tex]	El. Widerstand [Ω/m]	Zugfestigkeit [MPa]	Preis [€/kg]
AISI 316L Edelstahlgarn	ZF 12/275/2	530	28 Ω/m	500	1
AISI 316L Edelstahlgarn	ZF 12/1000/2	1730	13 Ω/m	500	1
24K Carbonfaser	SIGRAFIL C40 T024 EPY	1600	17 Ω/m	5000	30
50K Carbonfaser	SIGRAFIL C30 T050 EPY	3300	8 Ω/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 µm und 7 µm. Die Einzelfilamente werden zu einem Roving zusammengefasst. Dessen Bezeichnung richtet sich üblicherweise nach der Anzahl der Filamente, die zu 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 links, Edelstahlgarn rechts (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 syn-

thetischen 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 Austauschens 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).

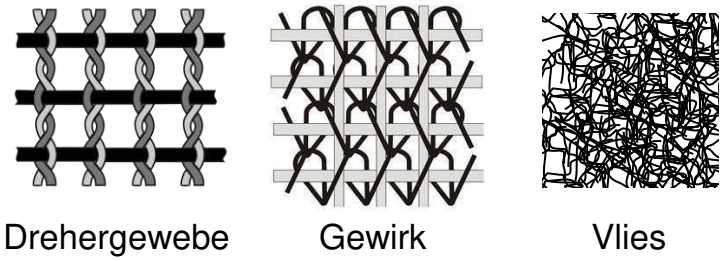


Abbildung 2: Typische Textilstrukturen (QUADFLIEG 2017).

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 Umgebungsfeuchte 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.

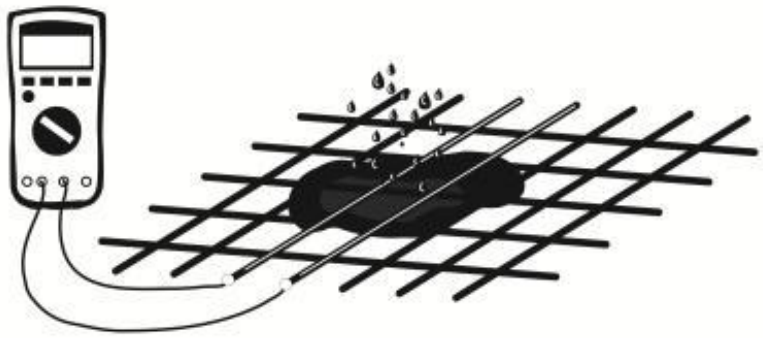


Abbildung 3: Messprinzip für die faserbasierte Feuchtigkeitsmessung im Deich.

3.1 Messprinzip

Ein einzelner Kanal besteht aus einem Referenzwiderstand R_{Ref} und zwei Carbon-Rovings, 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 Carbon-Rovings. Das Ersatzschaltbild eines solchen Kanals im feuchten Zustand ist in Abbildung 4, rechts dargestellt.

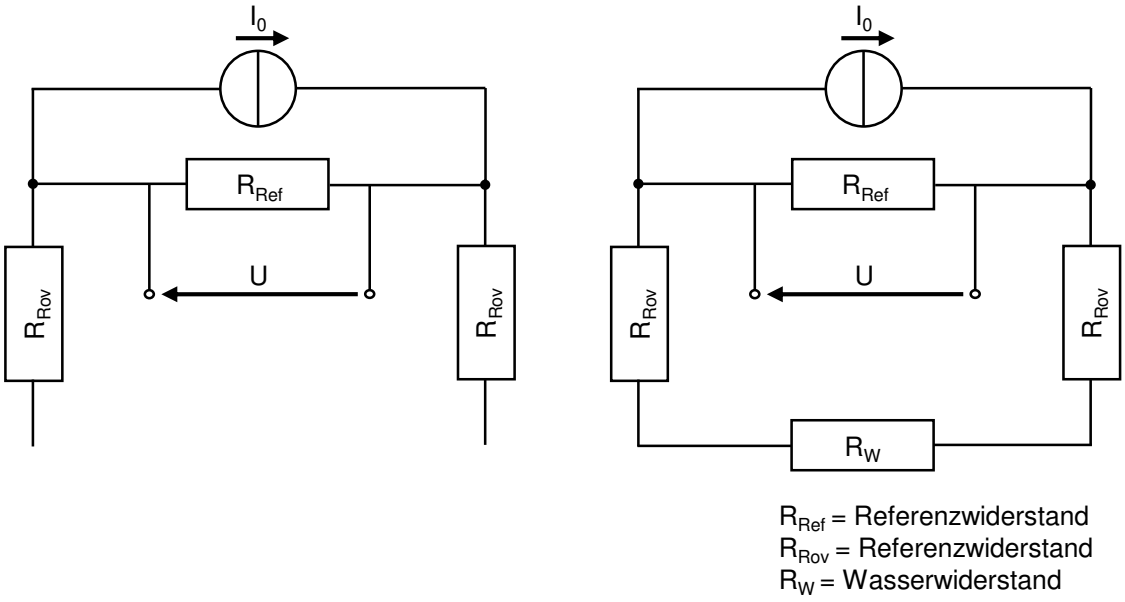


Abbildung 4: Ersatzschaltbild eines Sensorkanals in der Messschaltung mit Gleichstromquelle im trockenen Zustand (links) und bei Wasserkontakt (rechts).

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.

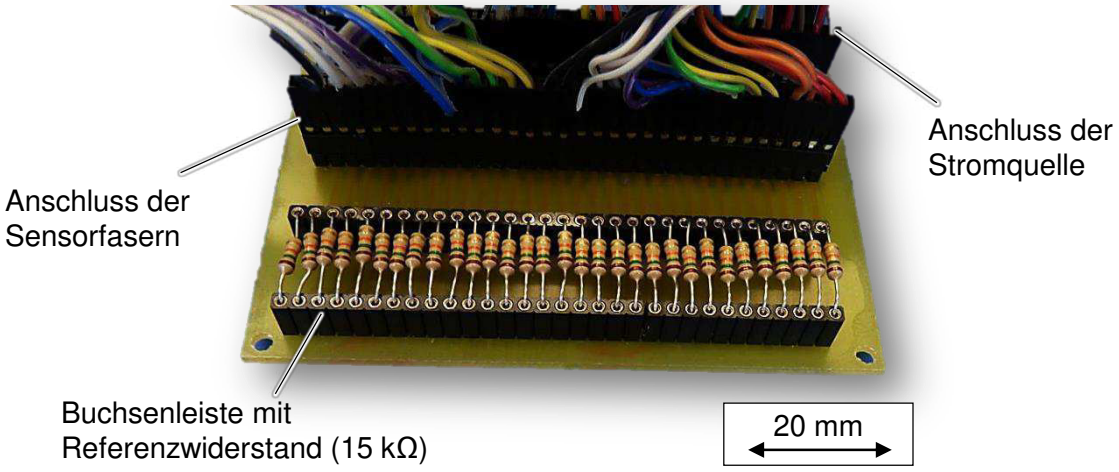


Abbildung 5: erster Prototyp der Messschaltung für die Feuchtigkeitsmessung im Geotextil.

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/m² der Fa. Naue GmbH&Co.KG, Espelkamp-Fiestel genutzt. Carbonfasern der Fa. 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 Kap. 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 Kap. 3.1 geführt. Die Validierung von Messvlies I ist im folgenden Kapitel beschrieben.

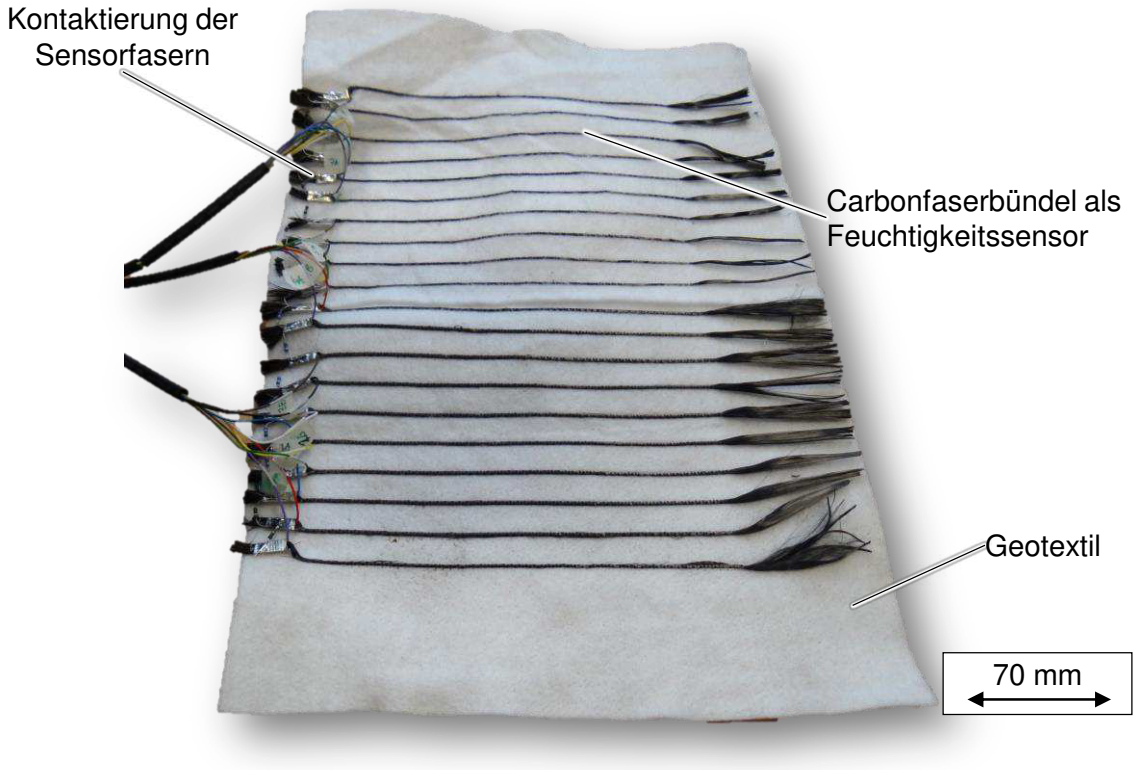


Abbildung 6: Erster Prototyp eines intelligenten Geotextils zur Feuchtigkeitsmessung mit angestickten Carbonfaserrovings (Messvlies I).

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 et al. entnommen werden.

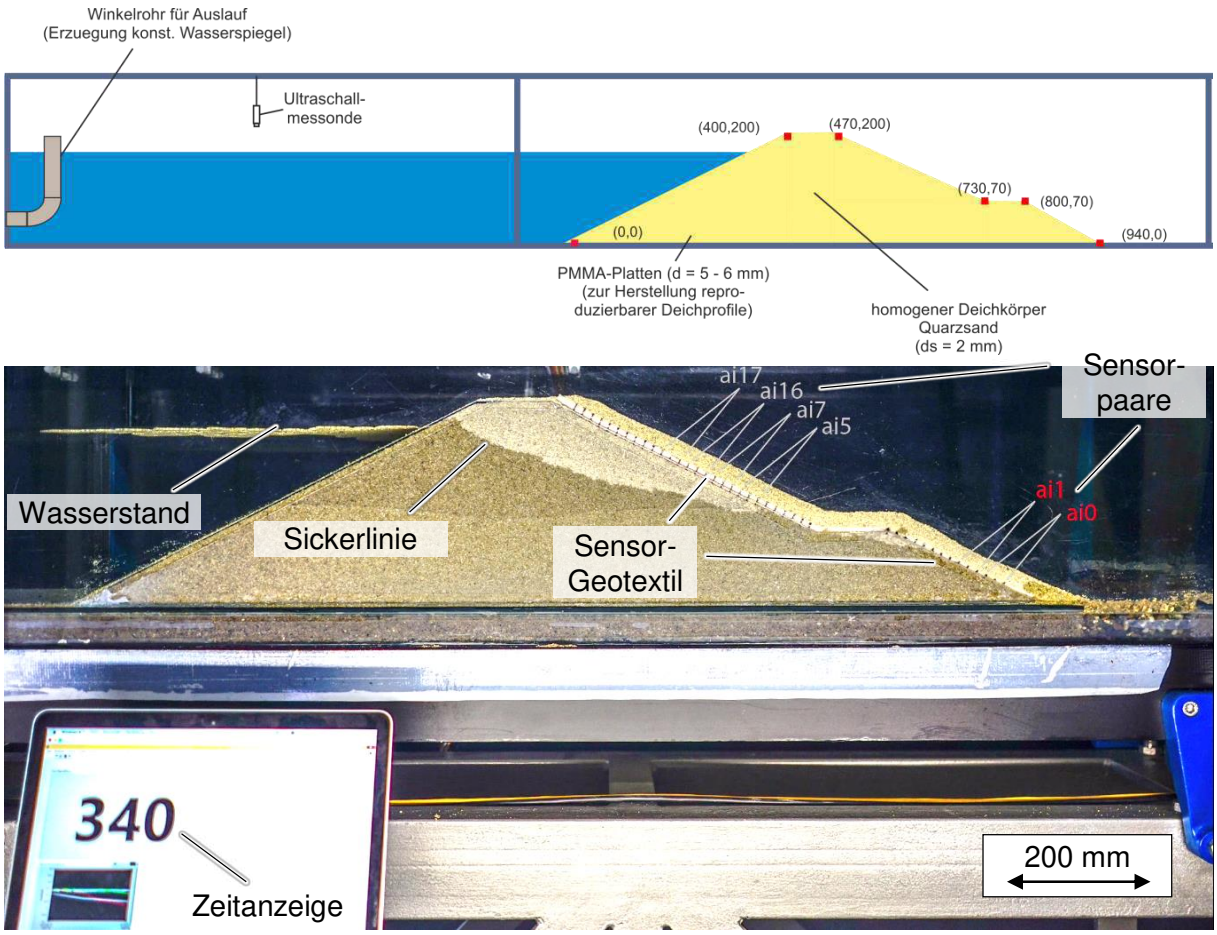


Abbildung 7: Prinzipskizze (oben) und realer Versuchsaufbau (unten) des kleinen Modelldeichs mit eingebautem Sensor-Geotextil; alle Angaben in mm.

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 zeitglich 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.

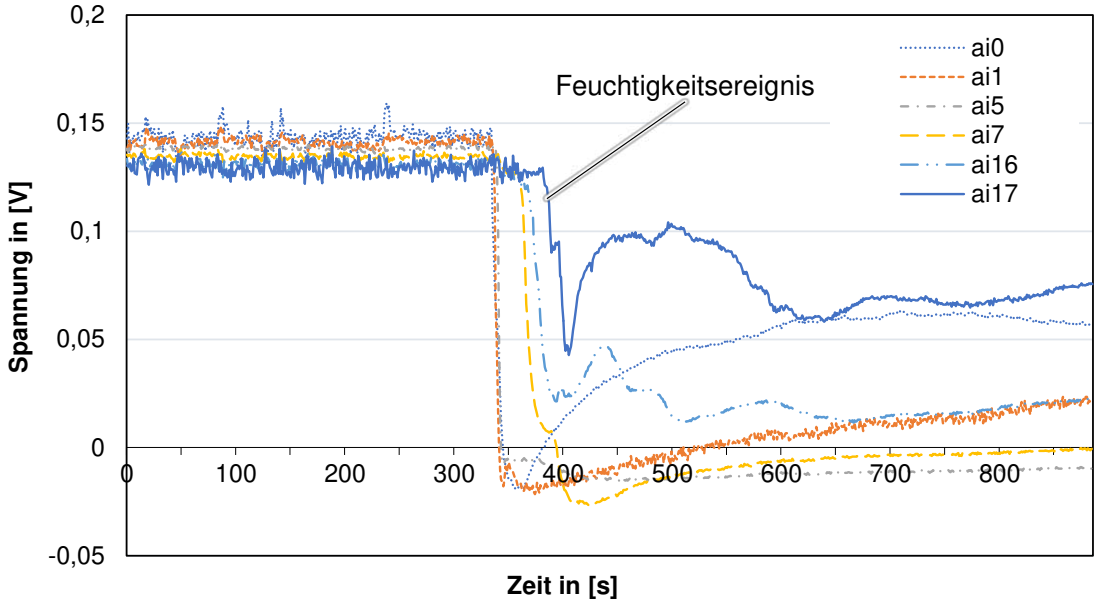


Abbildung 8: Zeitlicher Spannungsverlauf an den Sensorpaaren im kleinmaßstäblichen Modelldeich bei ansteigendem Wasserstand

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 waagerecht 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 Kontaktoberfläche 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 Abbindung pro laufenden Meter) maßgeblich eine Rolle. Je geringer dieser gewählt wird, desto mehr

ist die Sensorfaser durch den zusätzlichen Faden geschützt. Weiterhin können dünnaufgetragene, 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."

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 Fügetechniken 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 Fügeteile in den schmelzflüssigen Zustand überführt und gefügt. Durch die Verknäuelung der Molekülketten der thermoplastischen Fügeteile 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 Tape-Schweißen 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 Fügeteile 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 Fügeteiloberfläche haben mit weniger als 1 nm eine nur äußerst geringe Reichweite. Deshalb ist eine gute Benetzung der Fügeteile durch den noch nicht verfestigten, also flüssigen Klebstoff, eine notwendige Voraussetzung für die Herstellung einer qualitativ hochwertigen Klebung. Mit zunehmender Verfestigung des Klebstoffs 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 Weiterverarbeitungen 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)

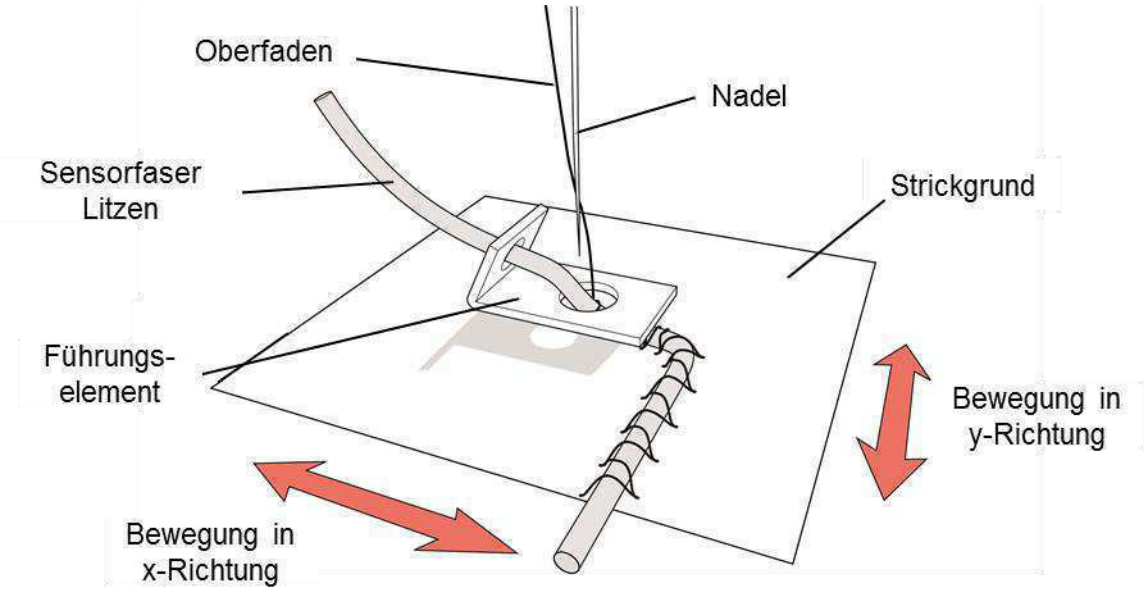


Abbildung 10: Prinzip des TFP-Stickverfahrens zum Ablegen von Sensorfasern nach (CHERIF 2011).

Beim TFP-Verfahren gibt es unterschiedliche Typen von Stickmustern, die als Zick-Zack-Doppelsteppstich 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 und höhere Produktivität auf und wird daher hier nicht weiter betrachtet.

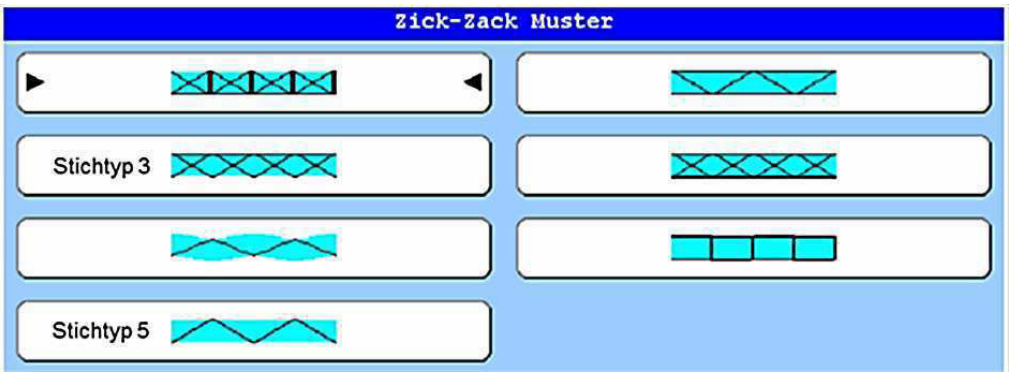


Abbildung 11: Auszug der verfügbaren Stichtypen der Stichparameter.

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

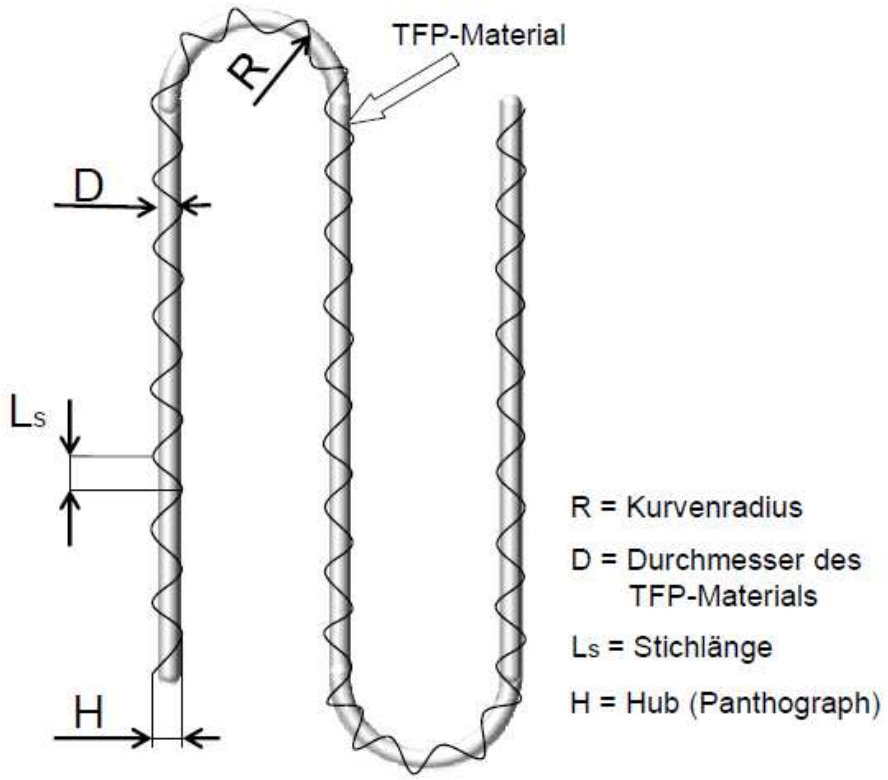


Abbildung 12: Wichtigste Parameter bei der TFP-Sticktechnologie.

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 sollte so gering wie möglich sein. Dabei muss er eine Mindest-Ablegebreite 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 400-600 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 kommen.

4.2.1 Beschichtung der Carbonfasern

Grundlage für das intelligente Geotextil ist Vliesstoff aus Polyester/Polypropylen mit 4,5 mm Dicke und 650 g/m² Flächengewicht, welches auch für den Aufbau des Modelldeiches am *IWW* verwendet wird. Für das Messvlies III wurden unbeschichtete verwirkte Biaxialgelege mit Carbon- und Glasfasern hergestellt und aufgebracht. Diese werden hier als Carbon-Glasfaser-Gewirke be-

zeichnet. Aufgrund der im Verarbeitungsprozess auftretenden 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 μΩm. 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 dabei zur Stabilität, 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 zehnprozentige 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 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 °C. Daraus ergibt sich eine Zuggeschwindigkeit von 0,1 m/min.

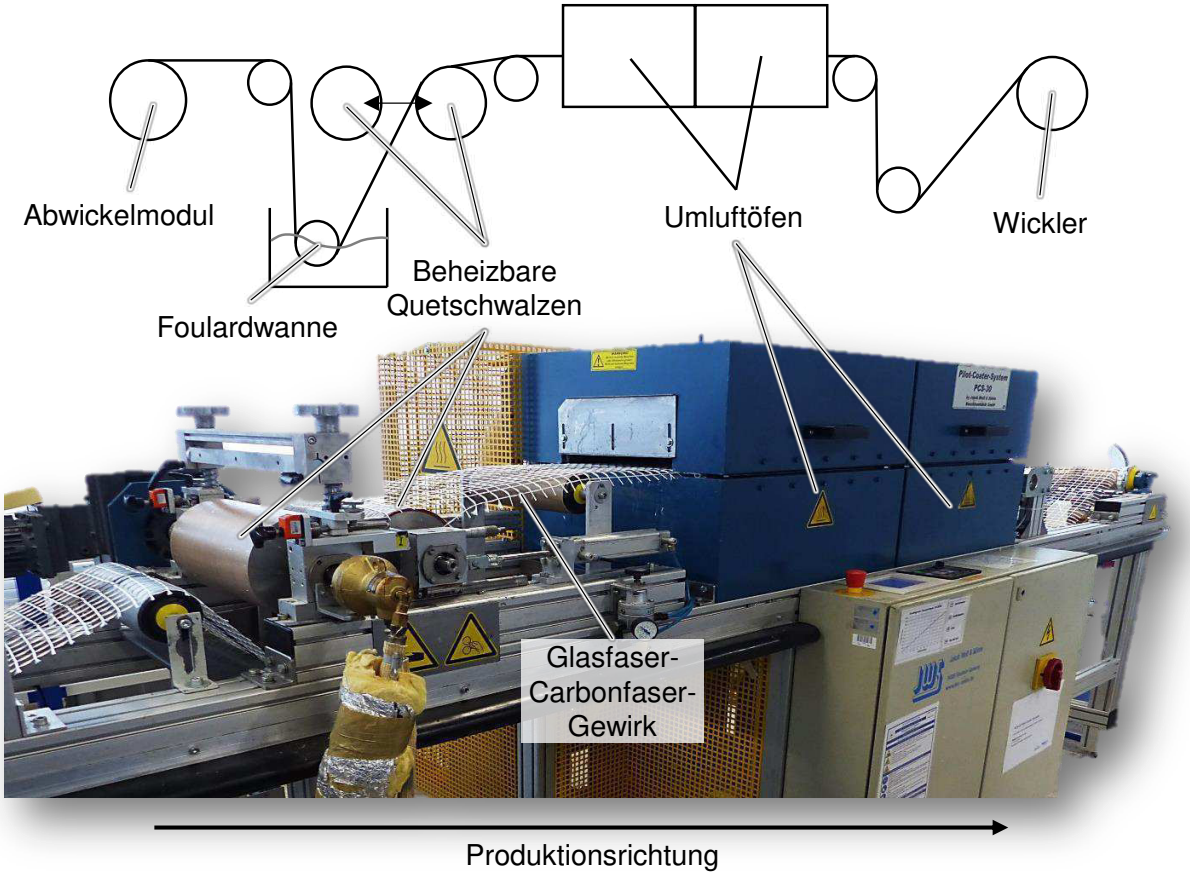


Abbildung 13: Kontinuierliche Tauchbeschichtungsanlage mit Konvektionsofen am *ITA*.

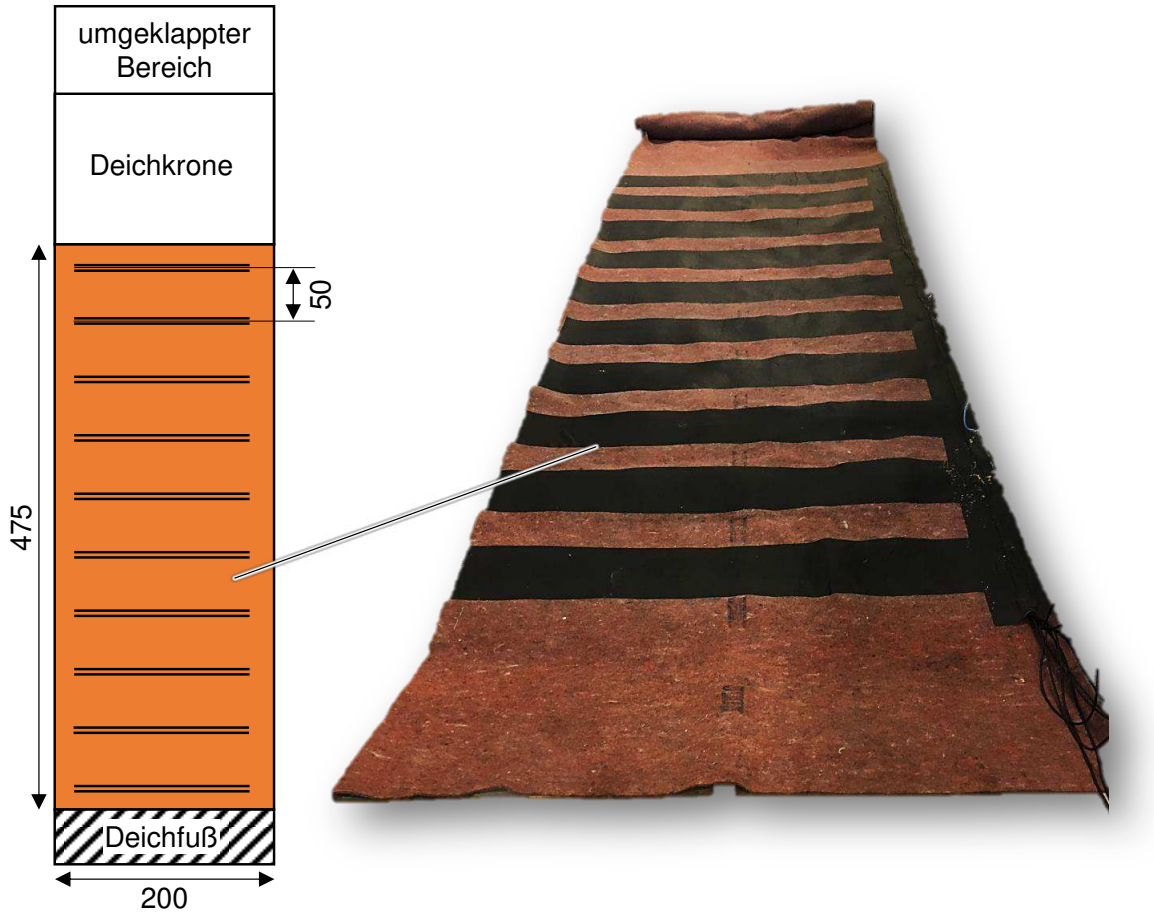


Abbildung 14: Schematischer Aufbau für die Sensorablage (links) im Sensor-Geotextil für die Versuche im Modelldeich, sowie verkabeltes Sensor-Geotextil (rechts).

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 Hitzeeinwirkung 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).

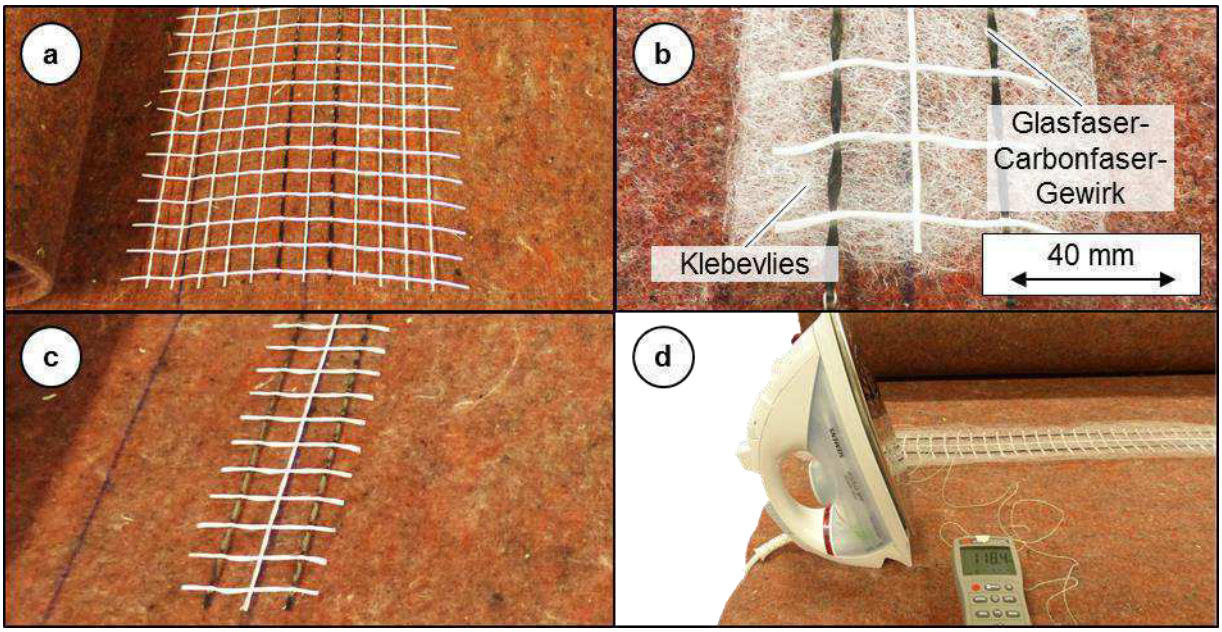


Abbildung 15: Verarbeitungsschritte zum Aufbringen der Gewirkstruktur.

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 additionsvernetzendes Silikon umgesetzt. Aufgrund der geringen Verarbeitungsviskosität von η = 8-10 Pas wurden Silikonplatten als Fließbarrieren während der Verarbeitung eingesetzt.

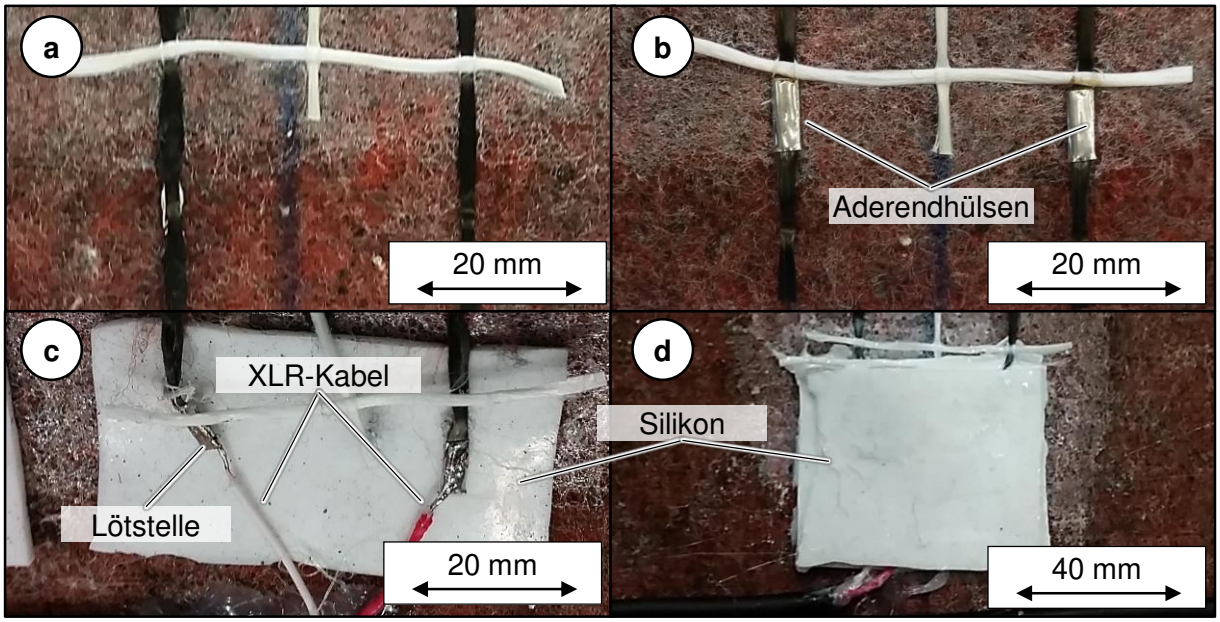


Abbildung 16: Kontaktierung der Carbonfaserbündel (a) durch Aufbringen von Aderendhülsen (b), Anlöten des XLR-Kabels (c) und Isolierung durch Einbettung in Silikon (d).

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

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 Fa. 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 Modelldeich eingesetzt und nicht validiert.

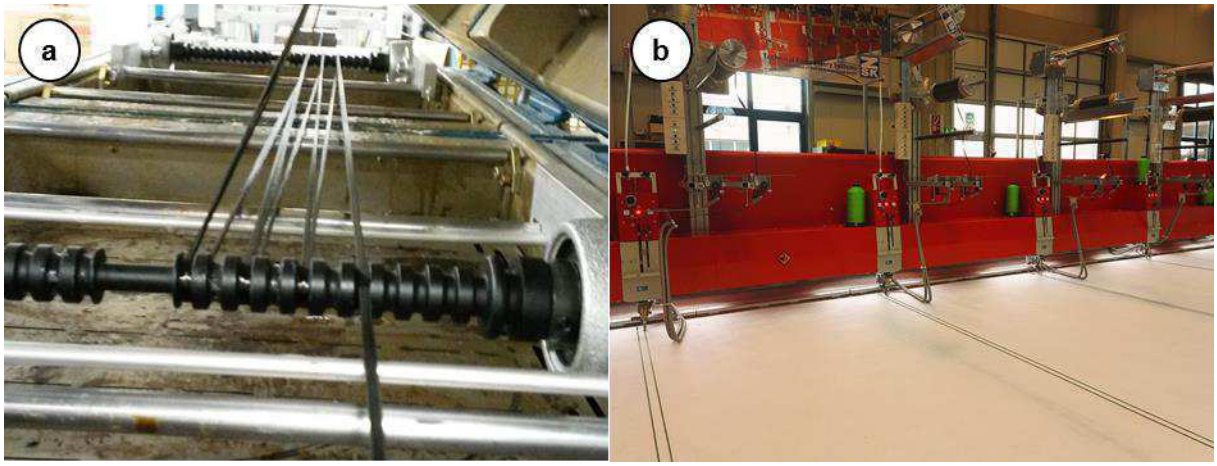


Abbildung 17: Umlenkung der Carbonfaserbündel im Ofen nach der Beschichtung (a) und TFP-Sticken der Sensorfaser auf 8-Kopfstickmaschine (b) bei *ZSK Stickmaschinen GmbH, Krefeld.*

5 Aufbau der Messkette für das Sensor-Geotextil am Modelldeich

Die Feuchtigkeitsversuche wurden am großmaßstäblichen Modelldeich des *IWW* durchgeführt. Dabei wurde das Geotextil in den Modelldeich 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 HERLE et al. 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.

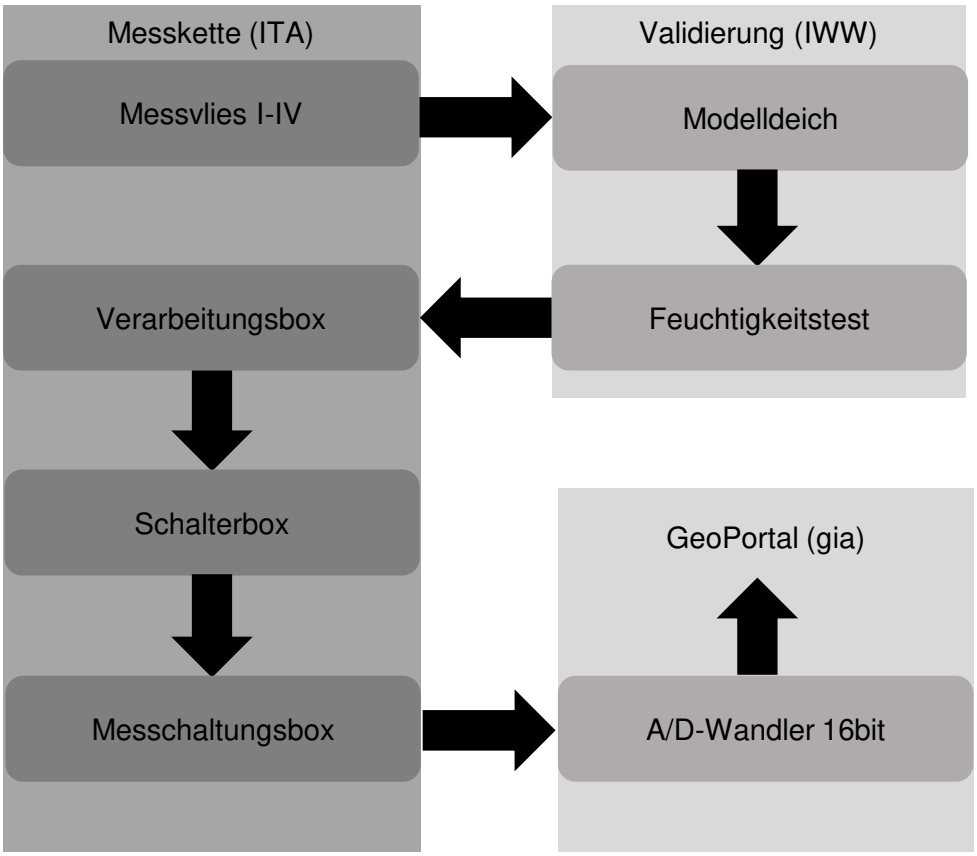


Abbildung 18: Messkette zur Versuchsreihe am Modelldeich

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 µA wird dazu genutzt eine Spannung über dem Referenzwiderstand zu erzeugen. Der Referenzwiderstand R_{Ref} hat einen Widerstand von 15 kΩ. 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 die resultierende Spannung über dem Referenzwiderstand $U = I \cdot R$ und damit $U = 10\ \mu A \cdot 15\ k\Omega = 150\ mV$. Diese Spannung wird dann mittels eines Sensors aufgenommen und ausgewertet.

Ohne Wasserkontakt fließt dabei durch die Carbon-Rovings 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:

$$R_{gesamt} = \frac{R_{Ref} \cdot R_W}{R_{Ref} + R_W} \quad (1)$$

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.

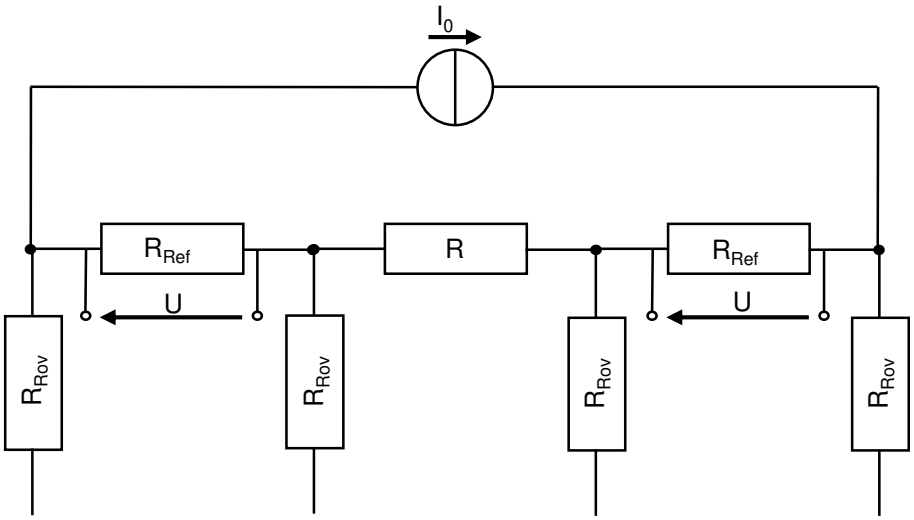


Abbildung 19: Ersatzschaltbild zweier getrennter Kanäle in der Messschaltung mit Gleichstromquelle

Die Messung des Wasserstands ist mit der gegebenen Schaltung nicht möglich. Die Elektrolyse zwischen den Carbon-Rovings 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 Carbon-Rovings 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 Ausbilden 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 wird, 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 ($R_W \ll R_{Ref} = R_{Last}$).

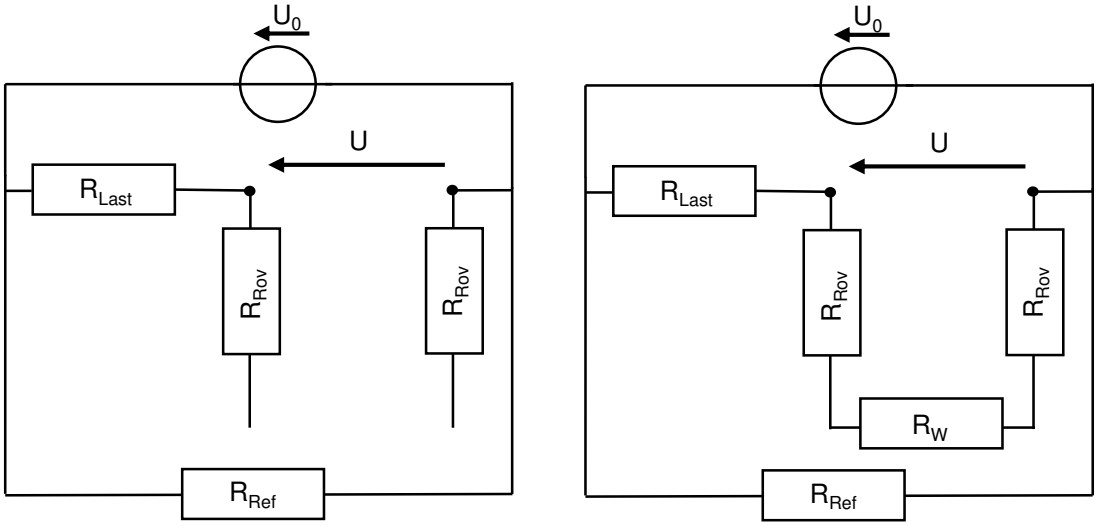


Abbildung 20: Ersatzschaltbild eines Kanals in der Messschaltung mit Gleichspannungsquelle (links trocken und rechts im nassen Zustand)

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.

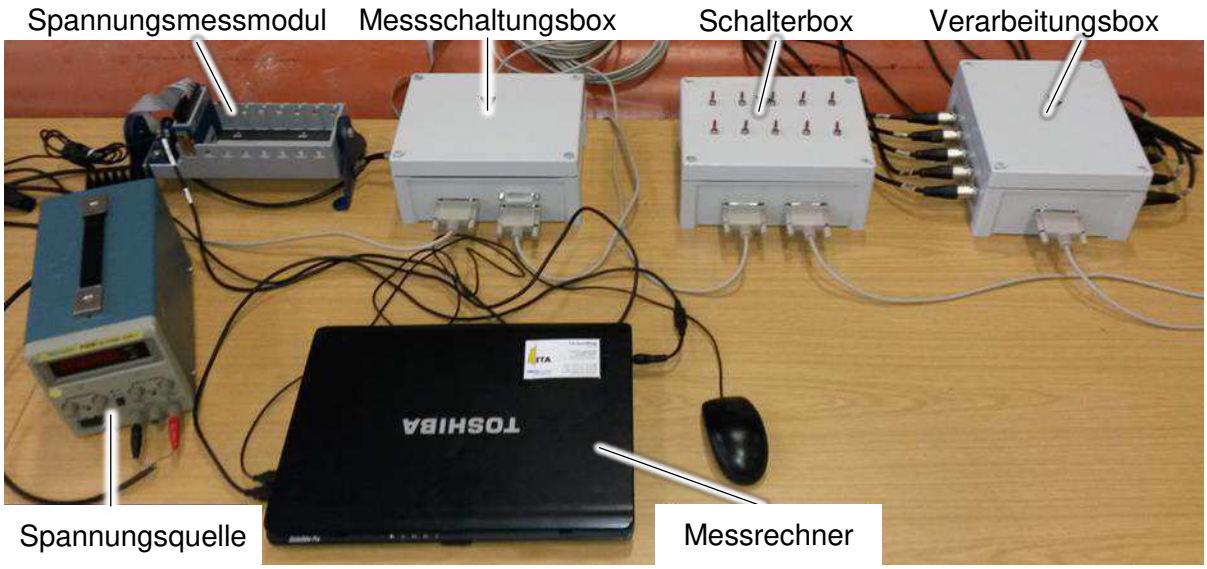


Abbildung 21: Messaufbau zur Feuchtigkeitsmessung mit LabView-Modul der Fa. National Instruments und Messrechner zur Spannungsmessung zwischen den Sensorbahnen.

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 bestimme 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 (s. 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 Abstandshaltern 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 kΩ. Der Wasserwiderstand R_W kann innerhalb der Messung mit Hilfe des spezifischen elektrischen Widerstandes von Leitungswasser $\varrho = 2\ 10^7\ \Omega\ mm^2/m$ und dem physikalischen Zusammenhang zwischen dem Widerstand und seinen Geometrieparametern

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{3}$$

zu $R_W = 225\ \Omega$ abgeschätzt werden. Die Carbonfaserrovingwiderstände sowie die Kabelwiderstände sind durch einen Widerstand $R_{Rov} = 100\ \Omega$ hinreichend gut abgeschätzt, sodass 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 gemessenen. 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 mV und 100 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.

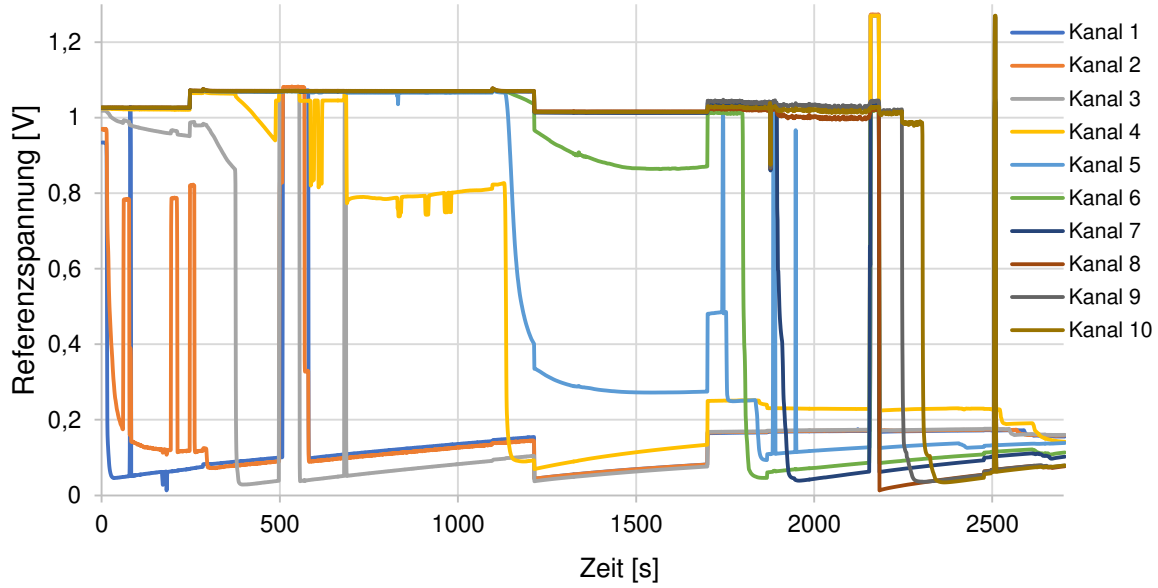


Abbildung 22: Spannungs-Zeitverlauf als Versuchsauswertung zum Nassversuch vom 28.11.17, durchgeführt am *IWW*.

Auf der Ordinate des Diagrammes befindet sich der Quotient aus der am jeweiligen Kanal gemessenen Spannung zur Referenzspannung, welche über die Spannungsquelle auf das Geotextil über-

tragen 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 Messplatine, 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 Ausgangniveau 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 Ersatzschatzschaltbildes dargestellt ist, ist durch eine Sprungstelle beschrieben. Die Simulationen wurden mit Matlab durchgeführt.

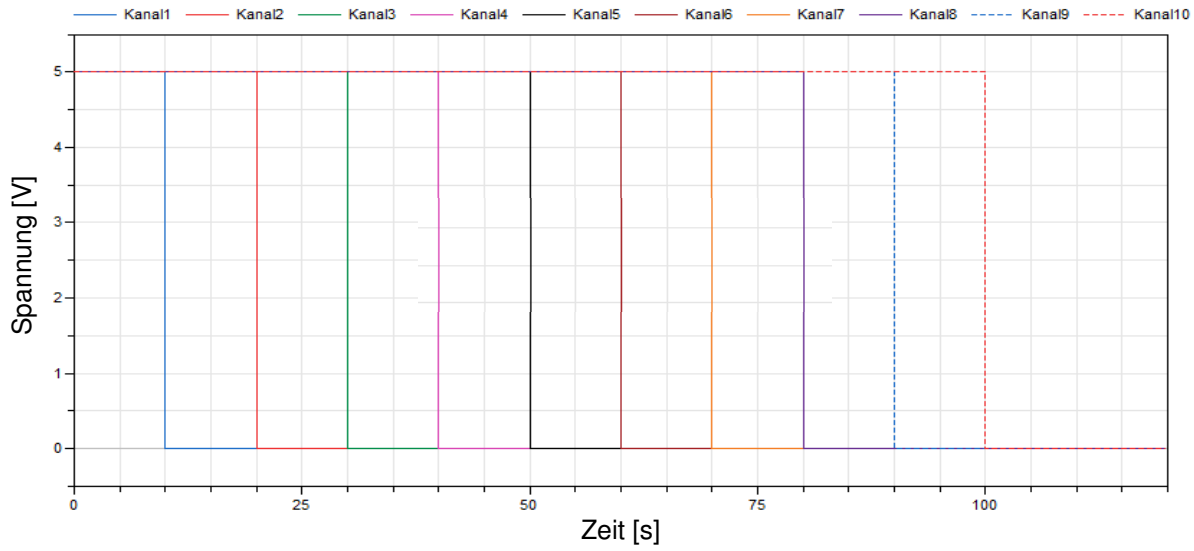


Abbildung 23: Simulation der idealen Messschaltung.

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.

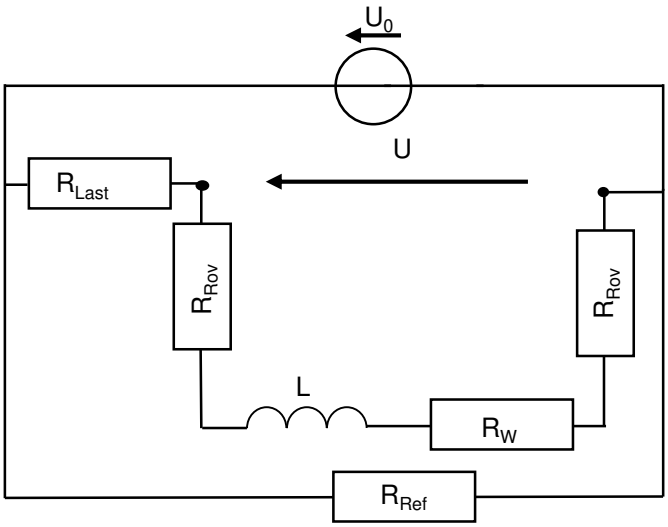


Abbildung 24: Ersatzschaltbild für die Simulation des Spannungsabfalls

Es gelten die Bauteilgleichungen

$$U_R = RI \tag{4}$$

$$U_L = L\frac{dI}{dt} \tag{5}$$

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

$$IR_{ges} + L\frac{dI}{dt} - U_Q \tag{6}$$

besitzt die eindeutige Lösung

$$I(t) = \frac{U_Q}{R_{ges}}\left[1 - e^{\left(-\frac{R_{ges}(t-t_0)}{L}\right)}\right]. \tag{7}$$

Die gemessene Spannung wird in diesem Fall durch die Gleichung

$$U(t)_{Mess} = U(t_0)\left(1 - \left(1 - \frac{R_W}{R_{ges}}\right)\left(1 - e^{\left(-\frac{R_{ges}}{L}t\right)}\right)\right) \tag{8}$$

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 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

$$\mathrm{U_{rel}} = \frac{\mathrm{U(t_{rel})_{Mess}}}{U(t=t_0)} \tag{9}$$

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 24 und 25 dargestellt. Dabei wird erkenntlich, dass die Näherungskurven sich in Bezug auf den Wasserwiderstand R_W lediglich um 5 % unterscheidet. 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.

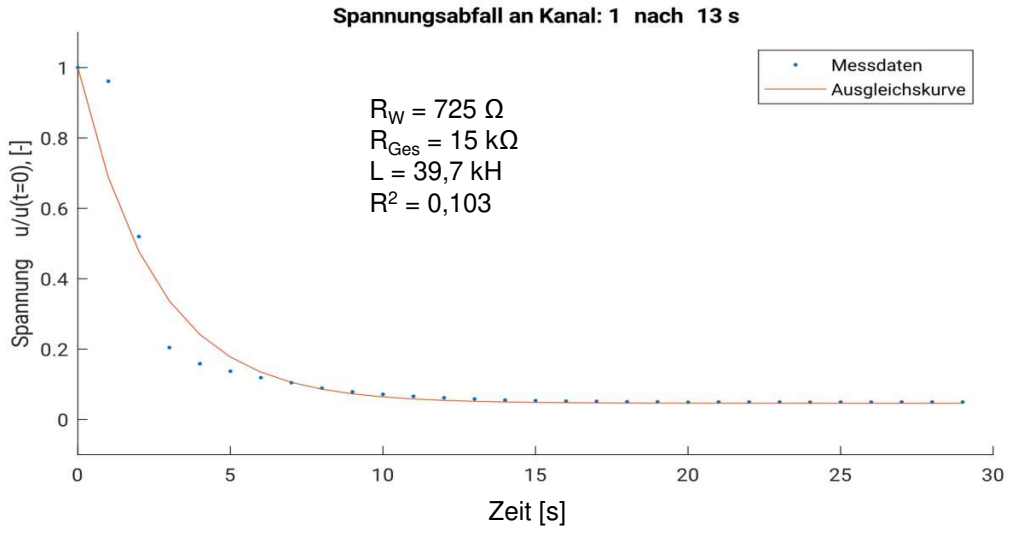


Abbildung 24: Simulation des Spannungsabfalls am Sensorpaar 1 (oben) und Sensorpaar 3 (unten) zu verschiedenen Zeitpunkten

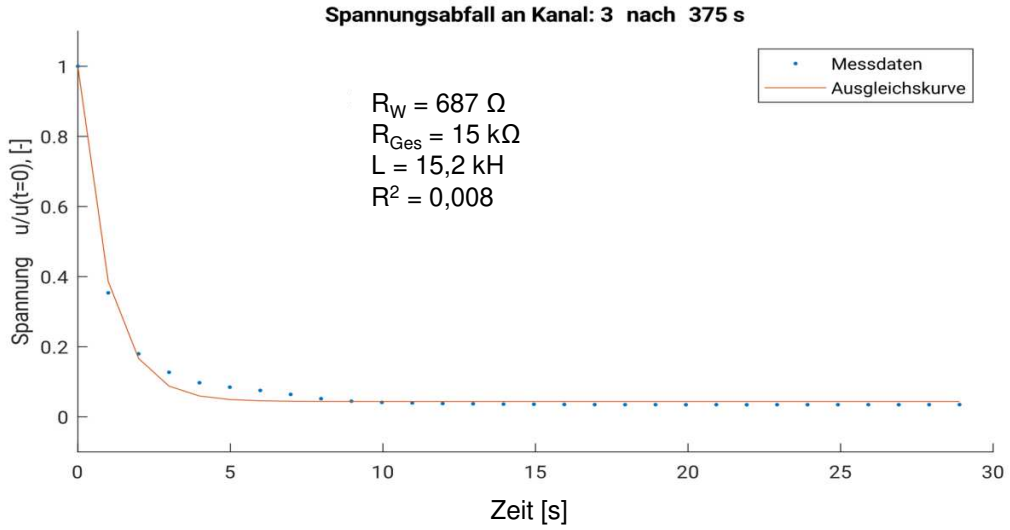


Abbildung 25: Simulation des Spannungsabfalls am Sensorpaar 1 (oben) und Sensorpaar 3 (unten) zu verschiedenen Zeitpunkten

7 Fazit und Ausblick

In 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 Modelldeich durchgeführt, in den das intelligente Geotextil auf der Böschungsseite 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 Modelldeichen am *IWW* statt. Dazu wurden Tests durchgeführt, um die Feuchtigkeitsmessung mittels textilintegrierten 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 Carbonfasergewirken als auch bei den aufgestickten Carbonfasern auf. Eine Abhilfe schafft das Beschichten der Carbonfaserrovings bzw. der Carbonfasergewirken. 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^2) 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 schädigen. 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 Fuechtigkeitsereignis spricht dafür, dass es dennoch Querströme innerhalb des intelligenten Geotexils gibt. Diese können von den Car-

bonfaserrovings selbst ausgehen (z. B. zwischen Sensorpaar 1 und 2 oder innerhalb der Kontaktierung). Um dies genauer zu untersuchen, wären umfangreiche Feuchtigkeitsmessungen notwendig, um den Einfluss zu quantifizieren.

Die entwickelte Messelektronik als Teil der Messkette wurde für Feuchtigkeitsversuche im klein- und großmaßstäblichen Modelldeich getestet. Dabei wurden die Sensoren durch Gleichspannung versorgt. Es konnten somit Feuchtigkeitsereignisse 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 Feuchtigkeitsmessung 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 an dem 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 weiteregegeben 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* 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.

9 Schriftenverzeichnis

CHERIF, C. (Hrsg.): 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 Journal of Composite Materials, Band 47 (2013), 2, S. 155–167.

ELSNER, H.; ULBRICHT, J.; GELBRICH, S.; KROLL, L.: Anwendung neuartiger Textilsensorensysteme zur Online-Überwachung von Tragstrukturen im Anlagenbau und im Bauwesen; 12. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, Innovationen mit textilen Strukturen, Förderverein Cetex Chemnitzer Textilmaschinenentwicklung, TU Chemnitz, Verband der Nord-Ostdt. Textil- und Bekleidungsindustrie, STFI Chemnitz, Chemnitz, DE, 30. Sep-1. Okt, 2009.

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

GRIES, THOMAS; VEIT, DIETER; WULFHORST, BURKHARD: Textile technology. An introduction. 2nd edition. ISBN 978-1-56990-565-4.

HERLE, S., BECKER, R., BLANKENBACH, J., MULCKAU, A., LEHFELDT, R. (2018): 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.

HOROSCHENKOFF, A.; MUELLER, T.; KROELL, A.: On the characterization of the piezoresistivity of embedded carbon fibres ICCM 17th (2009).

HOROSCHENKOFF, A.; MUELLER, T.; STROSSNER, C.: 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. (2018): 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.

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. IAHS Red Book N 357, Floods: From Risk to Opportunity. A. Chavoshian and K. Takeuchi (Eds), pp. 445-453, ISBN 978-1-907161-35-3, 2013.

QUADFLIEG, T.: Gewirkte Verstärkungstextilien mit kohlenstofffaserbasierte Sensorik im Verbundwerkstoff mit mineralischer Matrix. Diss. RWTH Aachen University, Aachen

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,

UDDIN, A J: Novel technical textile yarns. Editor(s): R. Alagirusamy, A. Das. In: In Woodhead Publishing Series in Textiles, Technical Textile Yarns, Woodhead Publishing, 2010, S. 259-297, ISBN 9781845695491.

WIPFLER, M.; GRIES, T.; GIANNIKOPOULOS, T.: Smart Rope : smartes Prüfen Technische Textilien, Band 53 (2010) ,4, S. 144–145.

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

Stefan Herle, Ralf Becker, Jörg Blankenbach, Alexander Mulckau, Rainer Lehfeldt

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 notwenigen 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 is 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

Inhalt

1 Einleitung 4
2 Sensorschicht 6
2.1 Anforderungen an das Geosensornetzwerk 6
2.2 Anbindung des Geotextils an den Sensorknoten 8
3 Integrationsschicht - Datenfusion 10
3.1 Mechanismus zum Austausch von Geodaten in Echtzeit 11
3.1.1 Message Queuing and Telemetry (MQTT) 11
3.1.2 GeoMQTT 13
3.2 Sensor Web 15
3.3 Anbindung der Simulatoren 16
4 Präsentationsschicht 18
4.1 Konzept 18
4.2 Benutzeroberfläche 18
4.3 Externe Daten 19
4.3.1 Kartenservices 19
4.3.2 Semantische Informationen 22
4.4 Sensordaten und Ergebnisse der Simulatoren 24
4.5 Zugriffssicherung 26
5 Nutzung der Marinen Dateninfrastruktur Deutschland zur Kommunikation 26
5.1 Informationsplattformen MDI-DE und NOKIS 26
5.2 Infrastrukturknoten der MDI-DE 27
5.3 Metadaten 29
5.3.1 Schlüsselwörter 30
5.3.2 Räumlicher Bezug 31
5.3.3 Datenqualität 31
5.4 Qualitätssicherung von Metadaten 32
5.5 Zielsysteme von Metadaten 32
5.6 Themeneinstieg EarlyDike im MDI-DE Fachportal 33
6 Fazit 34
7 Danksagung 34
8 Schriftenverzeichnis 35

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 Lenkungsgremium 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 Meeresumweltschutz 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 Sensornetzwerke 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(Abb. 1). In der Sensorschicht (Sensor Layer) werden Daten an über den Deich verteilten Sensoren räumlich-zeitlich erfasst und über drahtlose Geosensornetzwerke 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).

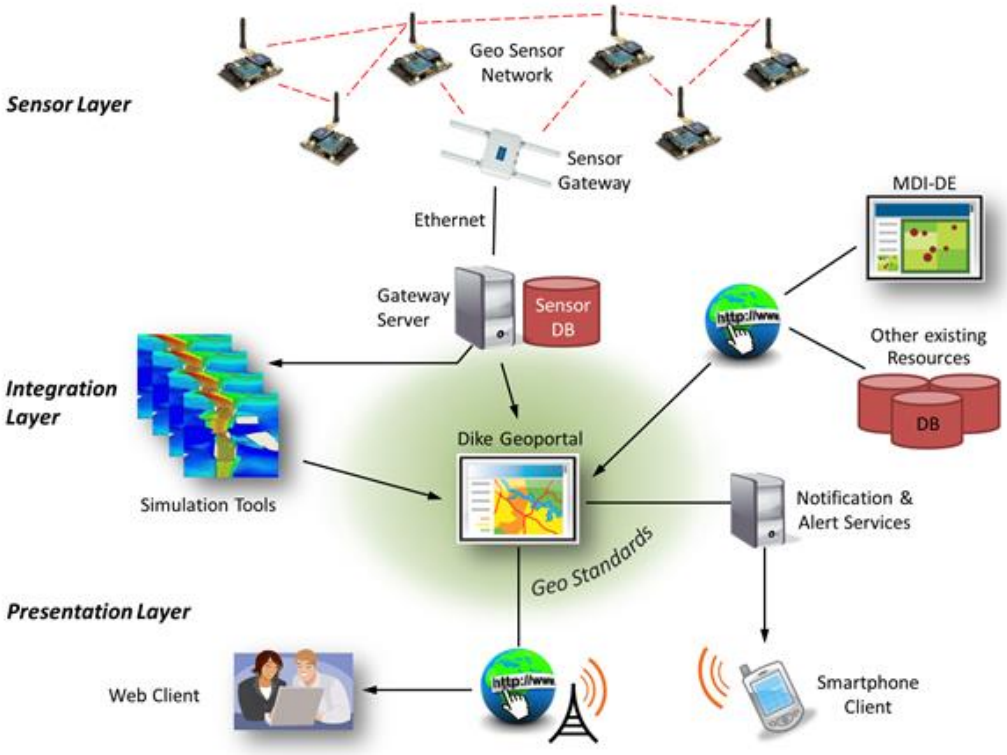


Abbildung 1: Sensor- und räumliche Dateninfrastruktur für das Deich-Monitoring.

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 flächendeckende 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 „Waspmote Plug and Sense“ vom spanischen Unternehmen Libelium (LIBELIUM, 2018) gewählt. Die Basiskomponente ist der sogenannte Waspmote, 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 Waspmote 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 Waspmote-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 „Waspmote 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 "Waspmote Plug and Sense - Smart Agriculture" & „Smart Ambient“ gewählt, das eine Integration der gerade für den Zweck des Projektes benötigten Sensoren bietet. Die Sensoren, die bei dem EarlyDike Projekt von Interesse sind, sind die Folgenden:

- Lufttemperatur- und Luftfeuchtesensoren
- Luftdrucksensor
- Bodentemperatursensor in verschiedenen Tiefen
- Bodenfeuchtesensor in verschiedenen Tiefen
- Zusätzlich kann eine Wetterstation angeschlossen werden, die Windrichtung, Windgeschwindigkeit 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 Solarpaneel 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 eine sogenannte „Gateway“ bereit, die 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 der 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 der Gateway ein ZigBee Wireless Personal Area Network (WPAN) aufgebaut werden. Teilnehmer in einem solchen WPAN können als Endgerät, Router oder Koordinator konfiguriert werden. Die 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 die 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 die 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 (Abb. 2), das mittels der Sensorknoten ausgelesen wird, 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 aufgebrachten Referenzspannung bzw. eines Referenzwiderstandes gemessen, was gegenüber der absoluten Spannungs- bzw. Widerstandmessung mit einem geringeren technischen Aufwand verbunden ist.

Abbildung 2: Prototyp des Messvlies im kleinmaßstäblichen Deichmodel (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 und 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 Waspmote ausgelesen werden kann. Der Betrieb am Sensorknoten (Waspmote) bietet dabei erhebliche Vorteile, da keine Synchronisierung und zusätzliche Stromversorgung notwendig ist. 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 (Abb. 3). Er besitzt vier Einzel-Analogeingänge mit 16 Bit Auflösung oder zwei differentielle Eingänge. Je nach gewähltem Messbereich variiert die Spannungsauflösung

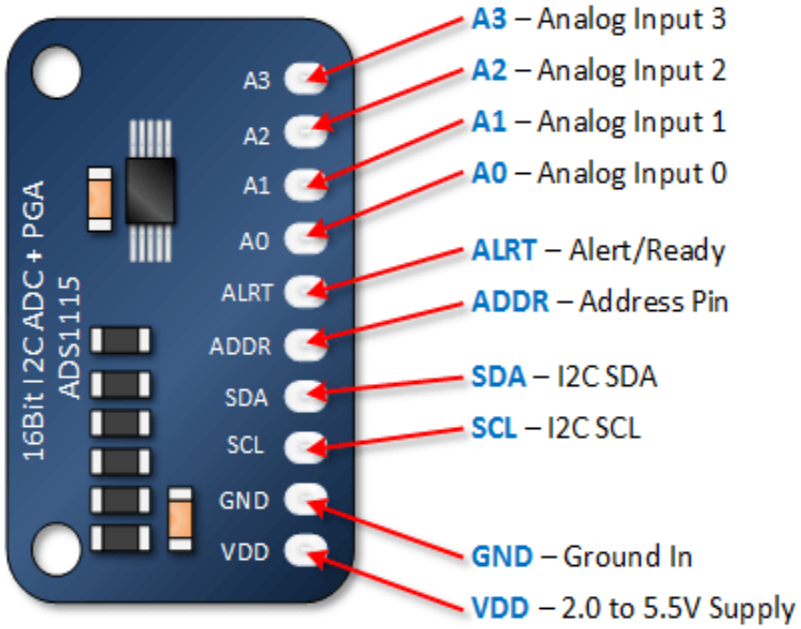


Abbildung 3: Arduino ADS1115 Modul (HENRY'S BENCH O.J.)

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

Die Vorteile dieser Lösung bestehen insbesondere darin, dass kein zusätzliches Mikrokontroller-Board erforderlich ist und das Geotextil als weiterer Sensor am Waspmote 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 Modelldeich 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: Waspmote mit angeschlossener A/D-Wandler Box

3 Integrationsschicht - Datenfusion

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

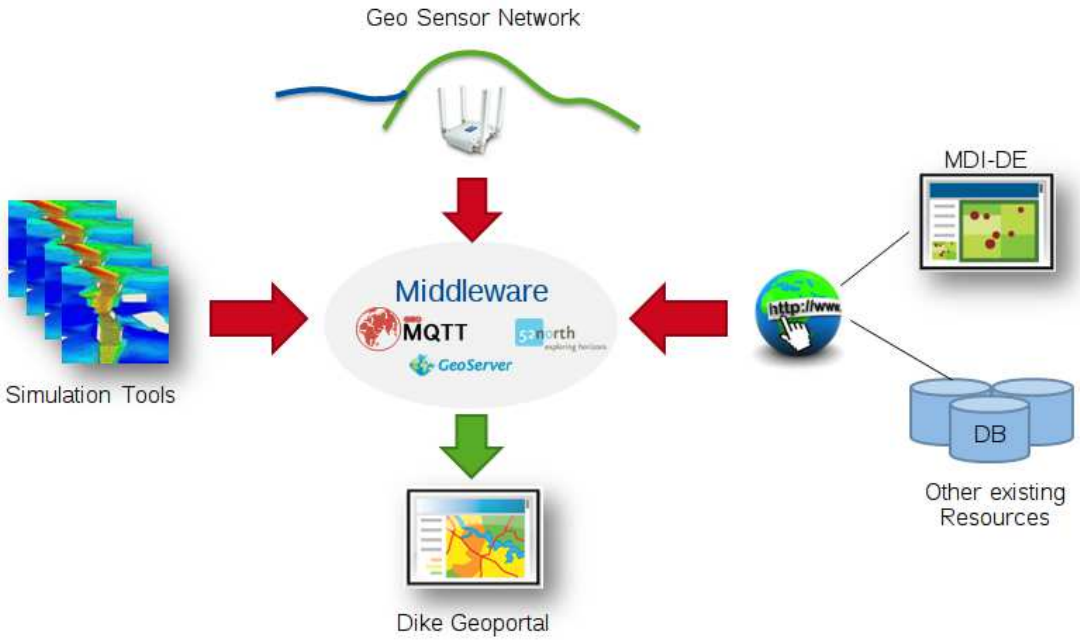


Abbildung 5: Datenfusion in einer Zwischenschicht.

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. Abb.6 zeigt das MQTT Publish/Subscribe System.

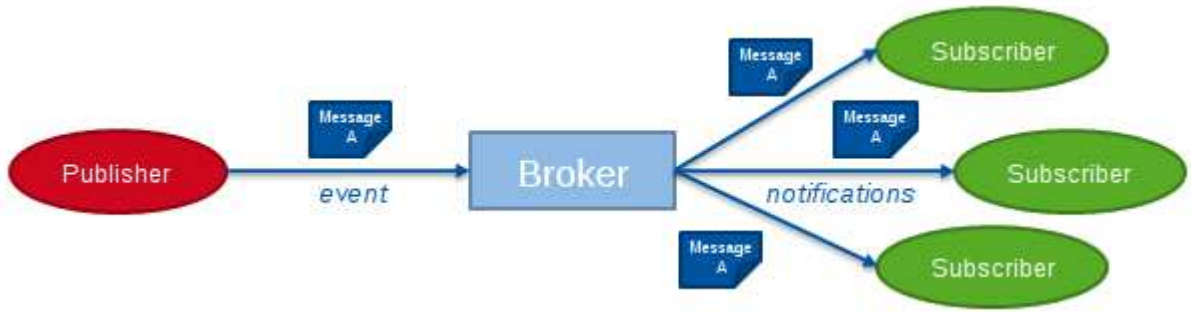


Abbildung 6: Das Publish/Subscribe Modell von MQTT.

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. Abb. 7 zeigt dieses Beispiel mittels zwei Clients, die unterschiedliche Topic-Filter gesetzt haben.

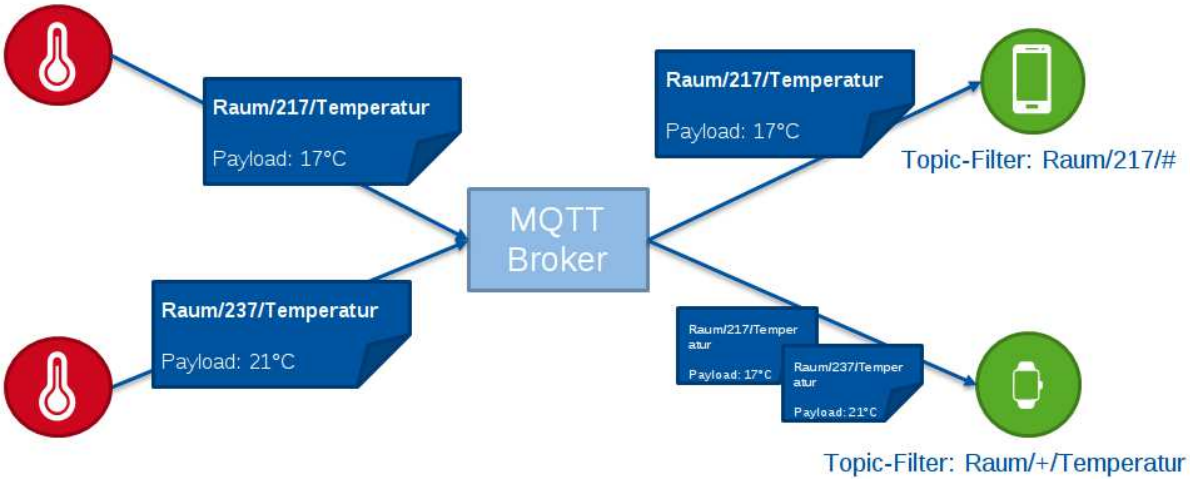


Abbildung 7: MQTT Ereignisse und Benachrichtigungen.

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 kann 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 hinzugefügten Metainformationen zu einer Nachricht, 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 weiter an den interessierten Client, 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 Vorwärtsschrägstrichs als Trennzeichen. Die zeitliche Relation wird mit Allens Intervalalgebra 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 (Abb.8).

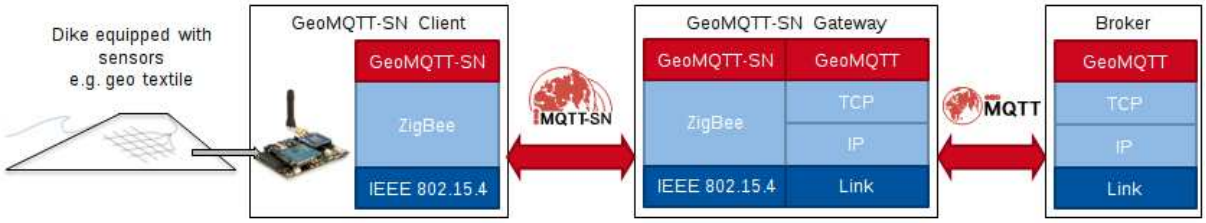


Abbildung 8: Anbindung von Sensorknoten an einen GeoMQTT-Broker.

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 Waspmotes umgesetzt. Der Übersetzer in der GeoMQTT-SN Erweiterung ist in C++ implementiert und läuft auf der Gateway in den Sensornetzwerken.

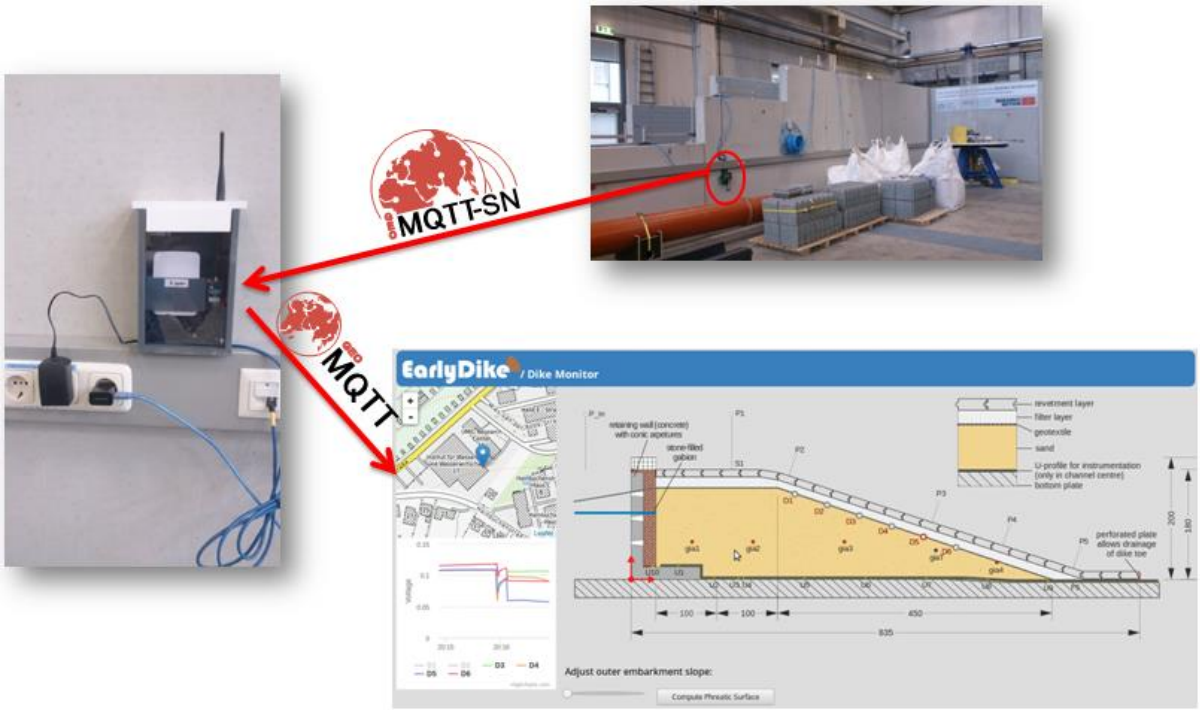


Abbildung 9: Deichüberwachung des Modeldeiches

Abb. 9 zeigt den Aufbau der verschiedenen Komponenten am Modelldeich in der Halle des IWW. Der Sensorknoten (Waspmote, oben rechts) misst punktuell die Bodenfeuchte, die Bodentemperatur im Deich, sowie die Lufttemperatur und den Luftdruck. Die gemessenen Daten werden mittels GeoMQTT-SN an die Gateway (Raspberry Pi, links) weitergeleitet. Diese 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).

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 Abb. 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.

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 (Waspmote Plug and Play) wurden MQTT-SN-Clients entwickelt, sodass diese leicht an den Sensor Bus angeschlossen werden können. Die Gateway dient als Übersetzer zwischen MQTT und MQTT-SN. Wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben wurden die Clients und die Gateway ebenfalls durch die GeoMQTT-Funktionalitäten erweitert, sodass eine Nachricht neben dem Thema auch einen Zeitstempel bzw. ein Zeitintervall sowie eine Geometrie besitzt.

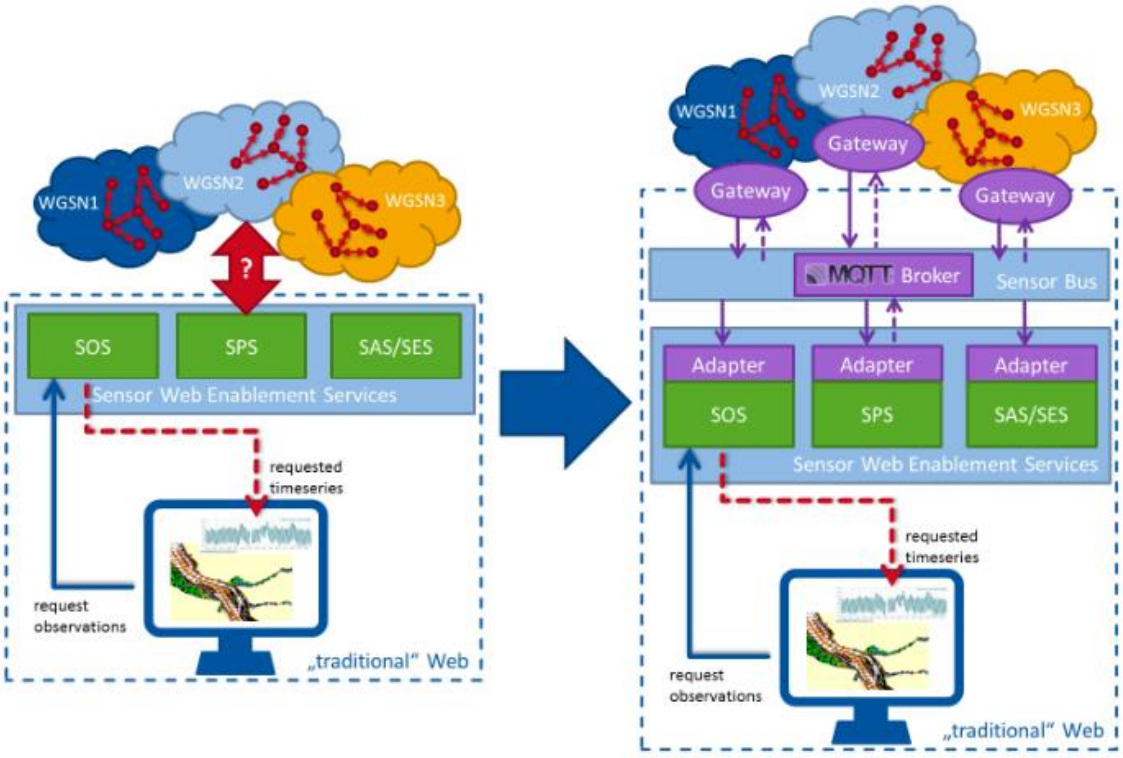


Abbildung 10: Interoperabilitätslücke.

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 (Abb. 11). Prozessierungsdienste registrieren sich bei dem 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 postprozessiert werden, um bspw. fehlerhafte Messwerte (Outlier) direkt herauszufiltern. Zum anderen können die Simulatoren der Projektpartner unmittelbar die aktuellsten Messwerte oder Simulationsergebnisse erhalten.

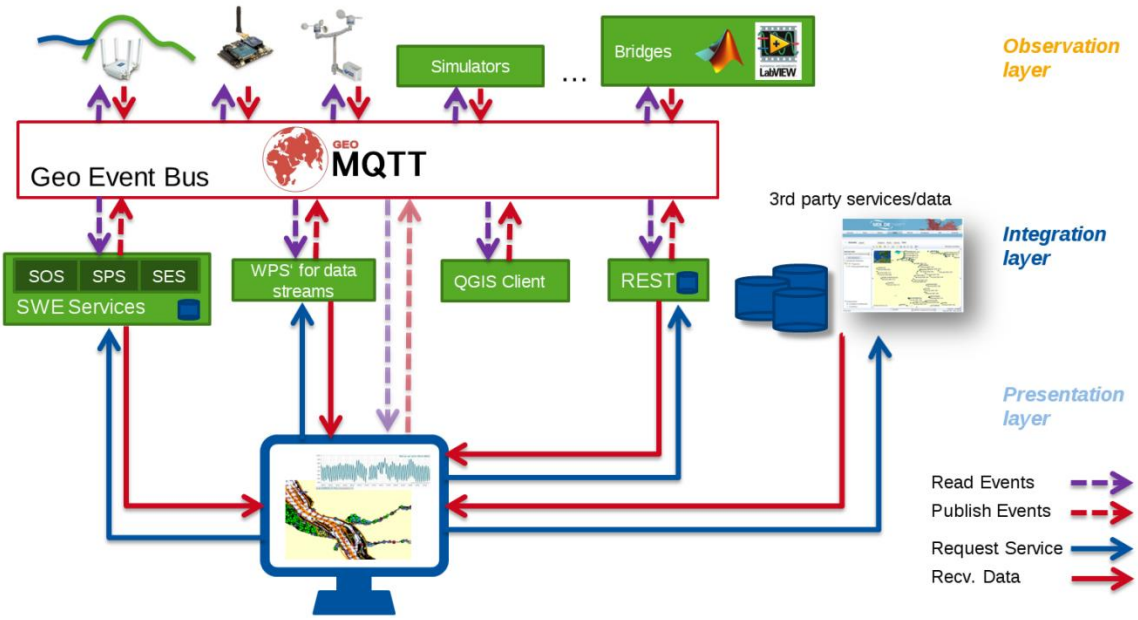


Abbildung 11: GeoEvent Bus in der EarlyDike-Architektur (angelehnt an HERLE et al., 2016).

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

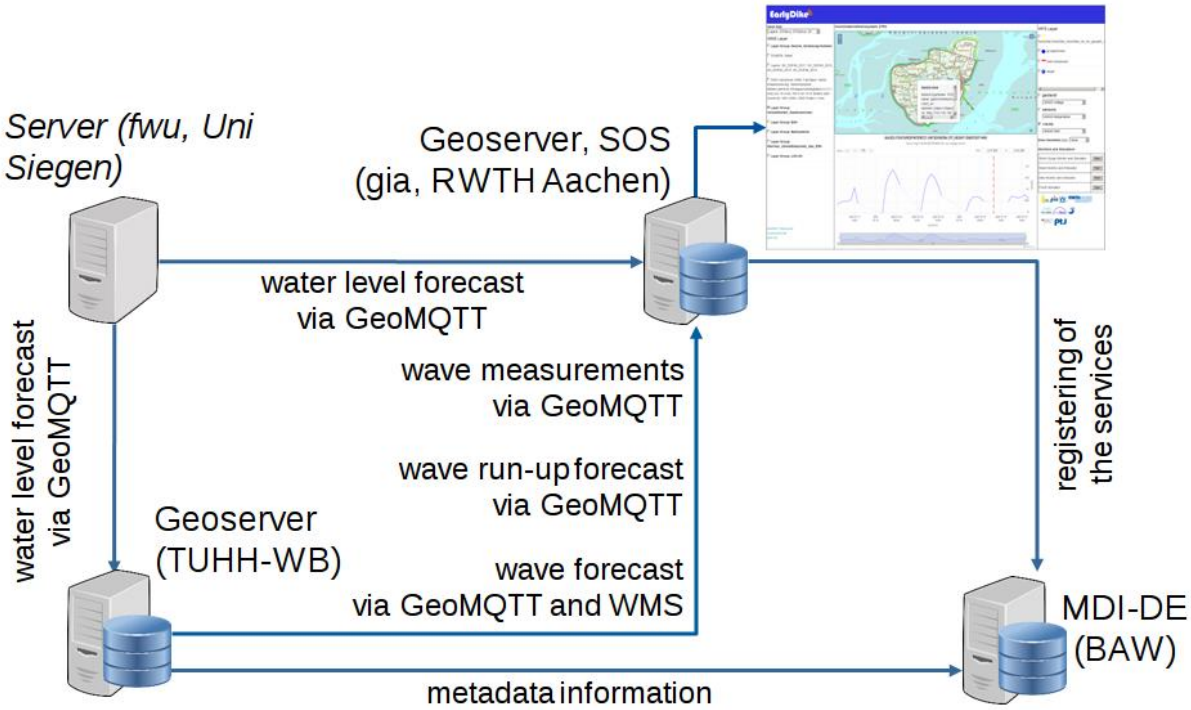


Abbildung 12: Anbindung von Simulatoren und Umsetzung von Prozessketten

Die simulierten 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 simulierten Seegangs- und Wellenauflaufvorhersagen werden ebenfalls wieder in

den GeoEvent Bus publiziert, sodass diese im SOS abgespeichert und als Dienst angeboten werden können.

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 potentiellen 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 und 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. weitergehender 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 Forma „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 potentielle 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

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

Daten	Daten führende Institution	Format / Webdienst
Geobasisdaten (Landtopographie, Orthophotos, Geländemodelle, Grenzen) in Schleswig Holstein	Landesamt für Vermessung und Geoinformation Schleswig-Holstein (LVermGeo 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
MeteorologischeDaten (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

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 Ideal fallüber 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. gewünschten Feature leicht ergänzt werden. So sind beispielsweise Orthophotos Schleswig-Holsteins, die Bathymetrie (Abb. 13) und Daten des marinen Umweltnetzes der BSH sowie die gewidmeten Deiche und Schutzdünen aus den Umweltkarten Niedersachsens integriert.

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 konnte, 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, großflächigerer Bereich der Benutzeroberfläche bereit.

Über den GetFeatureInfo-Request des WMS bzw. den GetFeature-Request des WFS können semantische Informationen zu den angebundenen WMS (Abb. 14, GetFeatureInfo-Request Deich Niedersachsen) bzw. WFS (Abb. 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.

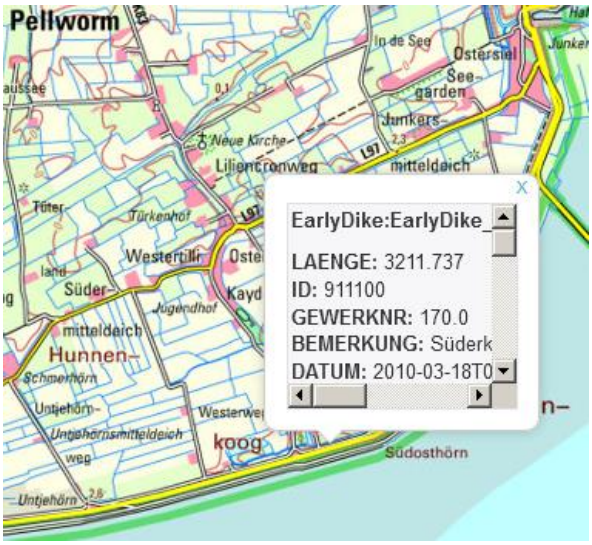


Abbildung. 15: GetFeature-Request für die Deichlinie in Schleswig-Holstein

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 (Abb. 16). Im Fall der Pegeldaten des Landes Schleswig-Holstein werden die Daten automatisch als CSV-Daten abgerufen und in eine Zeitreihendarstellung überführt.

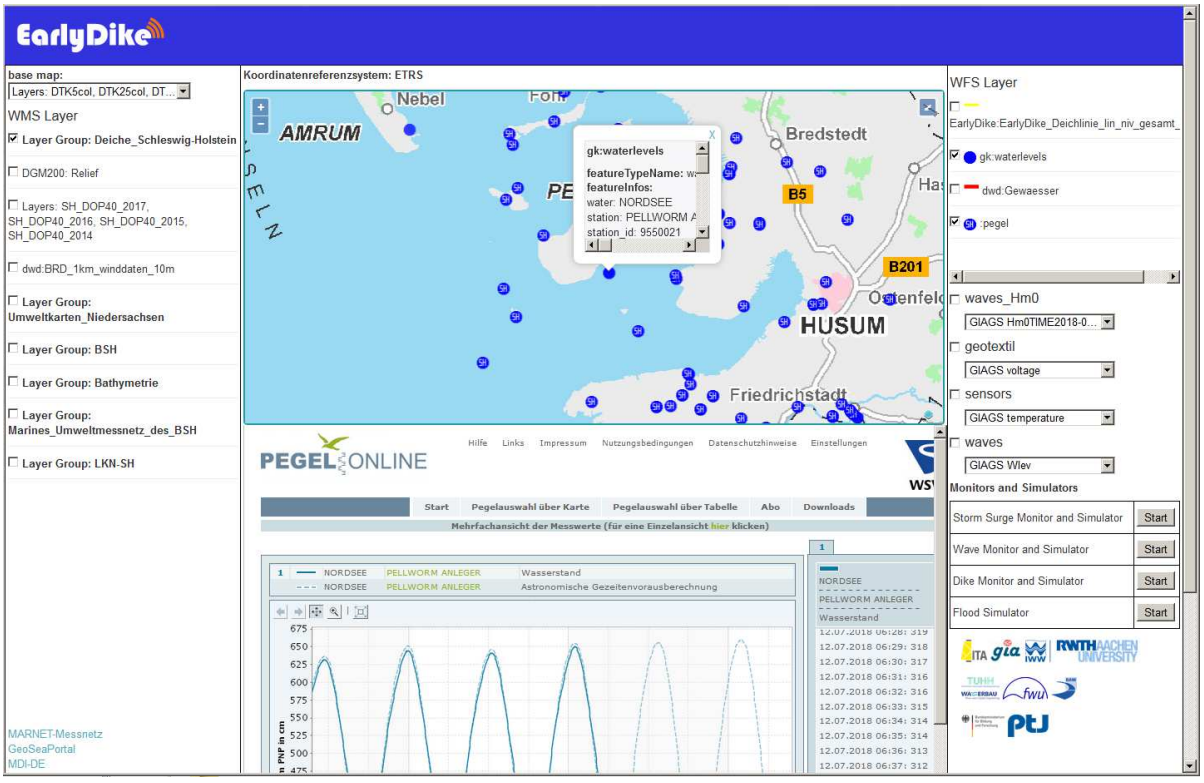


Abbildung 16: WFS der Pegeldaten der WSV und der Umweltverwaltung Schleswig-Holstein mit REST-Schnittstelle des Gewässerkundlichen Informationssystems der WSV (Pegelonline).

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 Geoportal 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). Abb. 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.

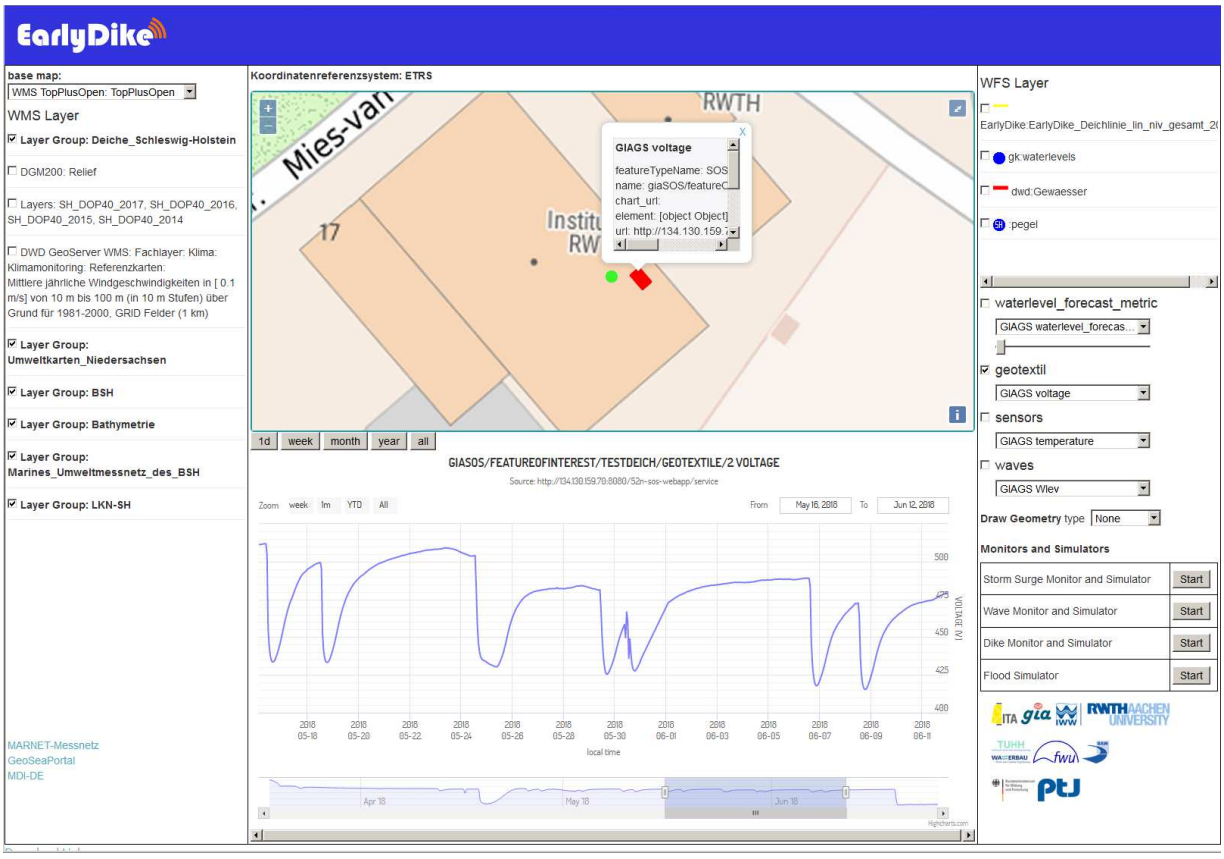


Abbildung 17: Geoportal – Spannungsmesswerte eines Geotextils.

Die Vorhersagen von Wasserständen an den Küsten sind mit einem Zeitstempel bezüglich der Prognoseerstellung versehen. Einzelne Prognoseerstellungszeitpunkte sind über eine Pull-Down-Liste abrufbar. In Abb. 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.

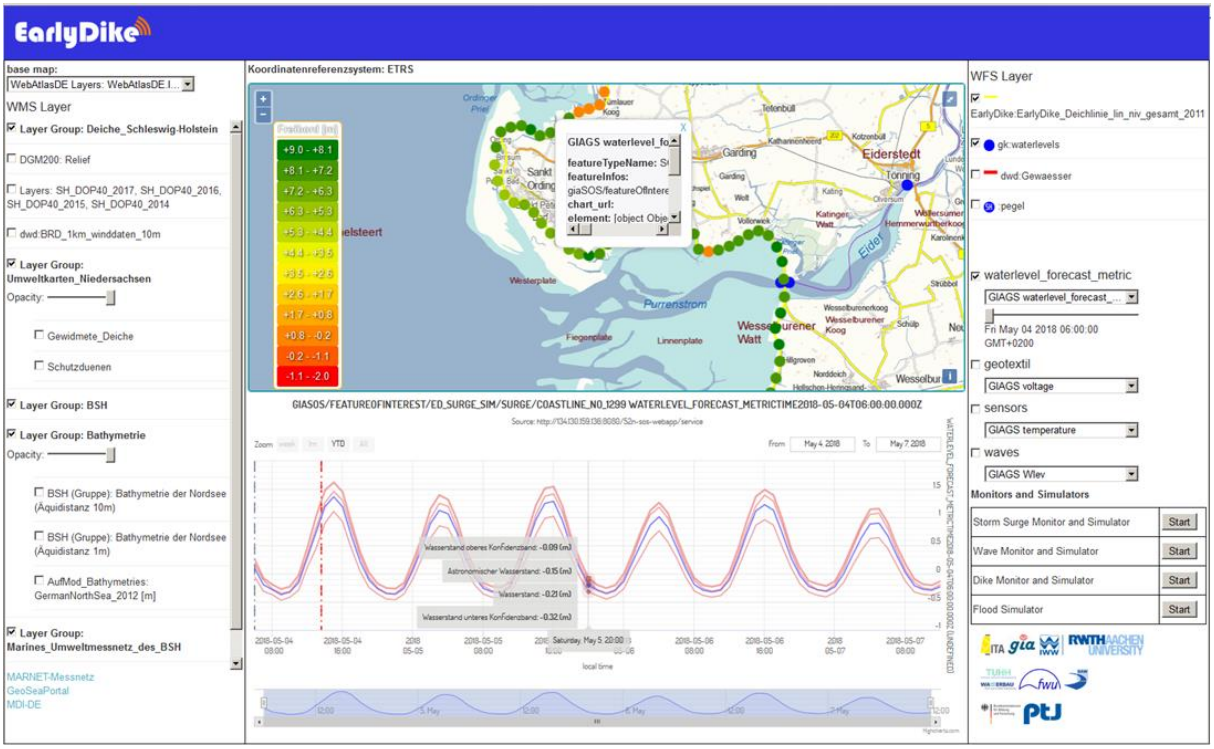


Abbildung 18: Geoportal - Wasserstandsvorhersage 2018-05-04 06UTC der FWU.

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 Wellenauflaufsimulation 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. Abb. 19 zeigt dies beispielhaft für den Parameter „signifikanten 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 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.

In dem 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 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 werden zu können.

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-Informations-System (NOKIS) wurde dazu seit 2001 ein Metadaten-Informations-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 Ergebnisdaten umfassend und strukturiert mit Metadaten dokumentiert. Über CSW Katalogschnittstellen können Geoinformationssysteme diese Informationen abrufen (LEHFELDT und MULCKAU, 2017) und in ihren Rechercheoptionen verwenden.

5.2 Infrastrukturknoten der MDI-DE

Zur Präsentation der Projektergebnisse und deren Auffindbarkeit wird der Inhalt des EarlyDike-Geoportals in das Geoportal der Marinen Dateninfrastruktur Deutschlands (MDI-DE) integriert. Dazu werden Geodatendienste über einen Mapserver (Geoserver) und die

Beschreibung von Daten und Diensten in einem Metadaten-Informations-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 Abb. 20 skizziert.

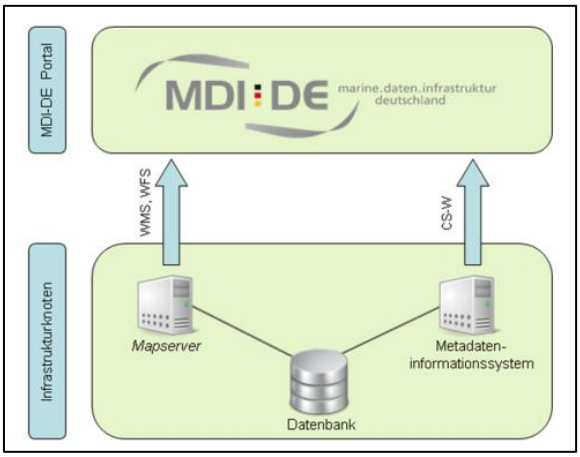


Abbildung 20: Anbindung eines MDI-DE Infrastrukturknotens, vergl. LEHFELDT und MULCKAU (2017)

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.

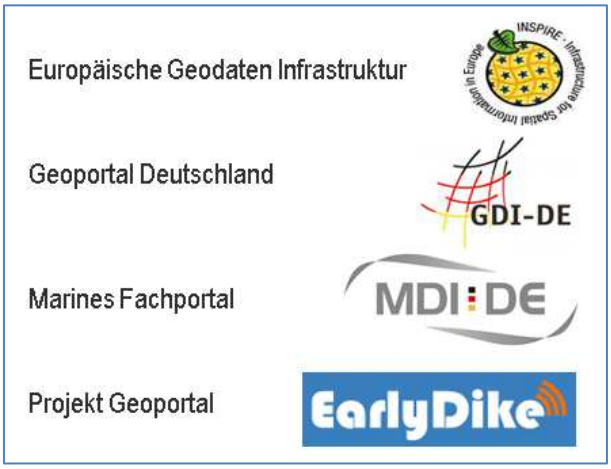


Abbildung 21: Geodaten Infrastrukturen

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-Indexen 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. Abb. 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.

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.

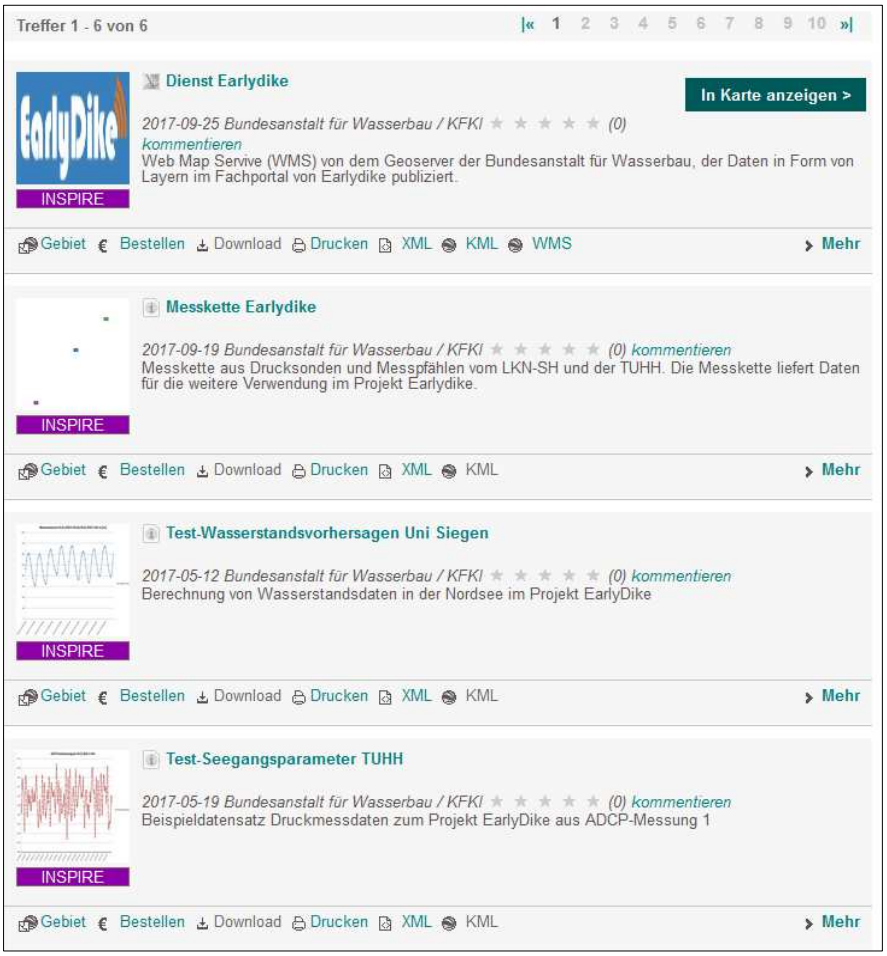


Abbildung 22: Sichtbarkeit der EarlyDike-Metadaten im Geoportal der GDI-DE (http://www.geoportal.de)

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 (deskriptiveKeywords) mit Quellenangabe, und die Angabe einer Thematik (topicCategory) zur thematischen Einordnung des Datenbestand vor. Die in Klammern stehenden Begriffe sind die englischen Namen der betreffenden Metadatenelemente 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 Metadatensatz 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-Informations-Systemen auch zur Steuerung der Durchgängigkeit von Informationen in hierarchischen Systemen wie die in Abb.21.

Die in Abb. 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 Abb. 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 BoundingBoxen bzw. BoundingPolygonen zugeordnet. Im Metadatenelement 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 Abb. 23 zeigt die Bounding Box der Deutschen Bucht im Kartenviewer des INSPIRE Geoportals für eine EarlyDike Ressource.

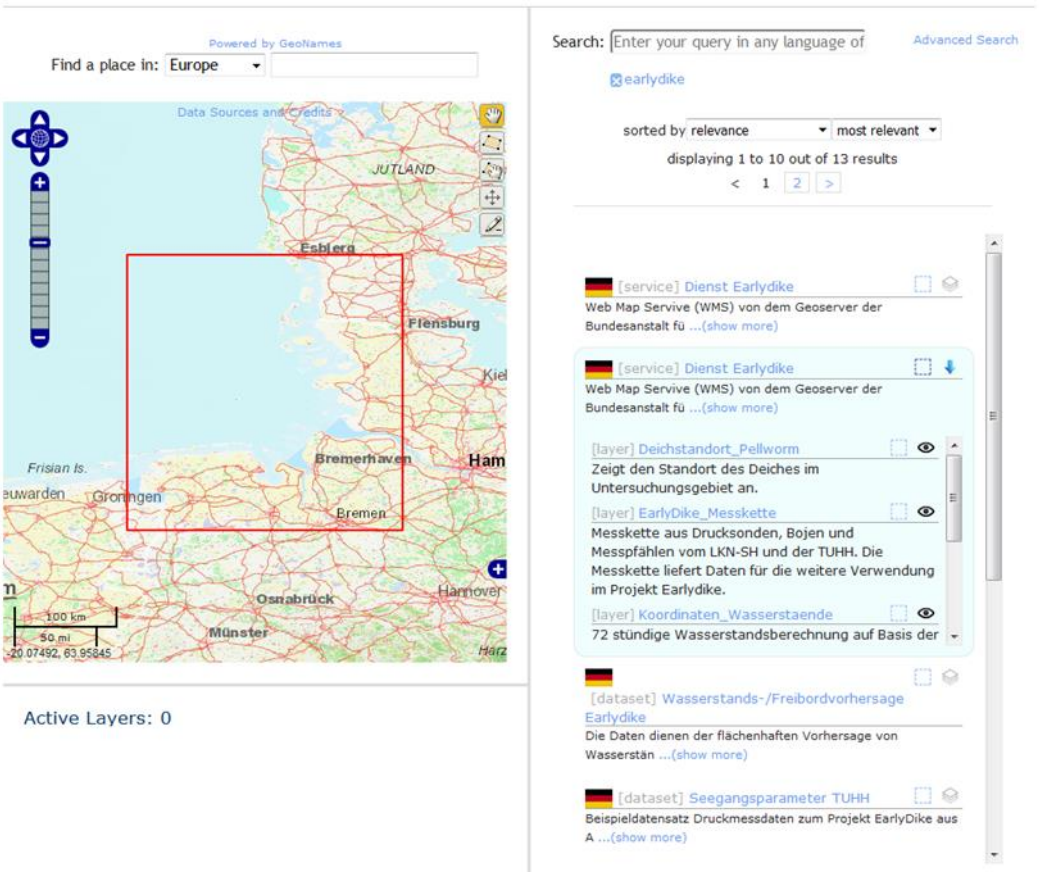


Abbildung 23: Sichtbarkeit der EarlyDike-Metadaten im INSPIRE Geoportal (http://inspire-geoportal.ec.europa.eu)

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. Abb. 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-Metadatensätze 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 Metadatensätze als XML Dateien einladen oder über eine GetRecordsByID-Abfrage direkt auf das verwendete Metadaten-Informations-System 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 Abb. 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 Abb. 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 Metadatensätzen 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.

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.

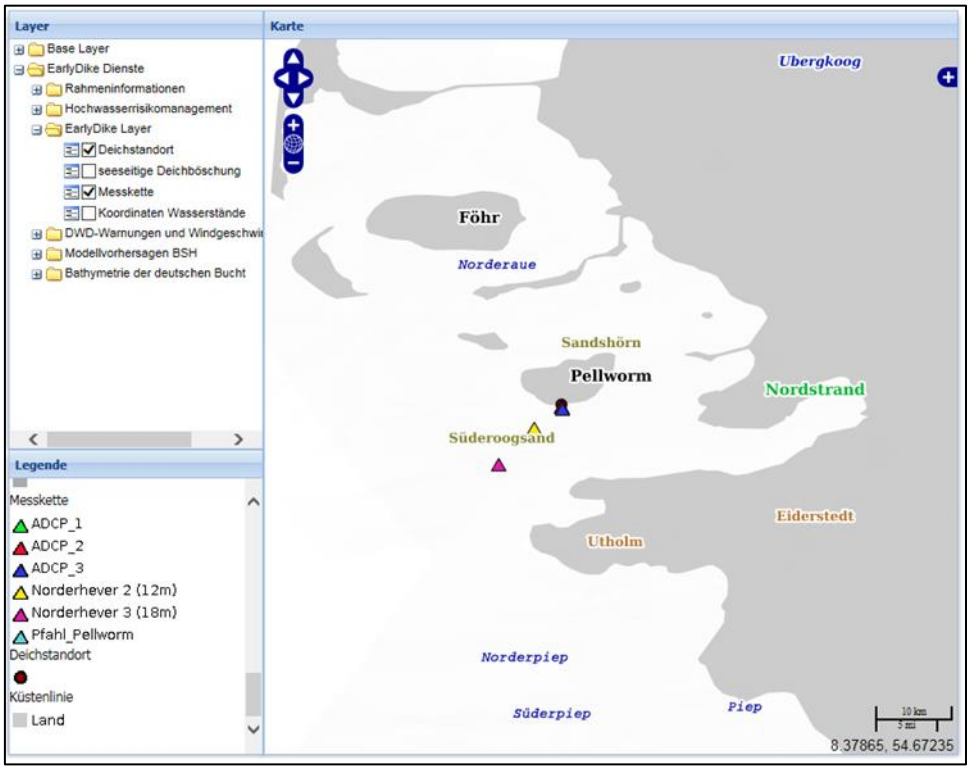


Abbildung 24: EarlyDike Themeneinstieg bei der MDI-DE (http://mdi-de.baw.de/earlydike/)

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 geoportal.de der GDI-DE ausgenutzt. Im Layertree gibt es dafür eine eigene Schaltfläche (vergl. Abb. 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. Als Ergebnisse der verschiedenen Simulatoren fallen weiterte Daten 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 notwenigen hohen Maß an Skalierbarkeit und Interoperabilität. Für die Gewährleistung von Interoperabilität beim Datenaustausch werden Standards, z.B. Geodatenstandards des OGC, verwendet werden. 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 Schriftenverzeichnis

52°NORTH: http://52north.org, [zuletzt aufgerufen am 29.10.2018]

AJAX: http://www.openajax.org/index.php, [zuletzt aufgerufen 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, S. 832-843, 1983.

ARDUIONO: https://www.arduino.cc/, [zuletzt aufgerufen 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. (2018): EarlyDike - Entwicklung eines sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems für Seedeiche. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben EarlyDike – Teil 1. BMBF-Förderkennzeichen 03G0847A, 03G0847B, 03G0847C, 03G0848A.

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. Computers, environment and urban systems, 29(1), pp. 15-31, 2005.

BOCHER, E., NETELER, M.: Geospatial Free and Open Source Software in the 21st Century, Dordrecht, 2012.

BÖHME, S., HOGREBE, D., BLANK, J. Anwender-Handbuch GDI-DE Testsuite [pdf] CPA Software GmbH / GDI-DE. Zu finden auf: < https://testsuite.gdi-de.org/gdi/files/Anwender-Handbuch_GDI-DE-Testsuite.pdf> [zuletzt aufgerufen am 07.07.2018], 2015.

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) (Hrsg.): Statusbericht zum Aufbau der Geodateninfrastruktur Deutschland | Stand: 24.06.2016, http://www.geoportal.de/SharedDocs/Downloads/DE/GDI-DE/INSPIRE_Bericht_Mitgliedstaat_DE_2016.pdf?__blob=publicationFile. 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, 2018.

DREIER, N., FRÖHLE, P. (2018): 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.

GEOPORTAL NRW: https://www.geoportal.nrw.de, [zuletzt aufgerufen am 29.10.2018].

GEOSERVER: http://geoserver.org, [zuletzt aufgerufen am 29.10.2018].

GDI-BSH: Geodateninfrastruktur des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie: https://www.bsh.de/DE/DATEN/GeoSeaPortal/geoseaportal.html, [zuletzt aufgerufen am 29.10.2018].

GDI-DE: Geodateninfrastruktur Deutschland [online] Zu finden auf: <http://www.geoportal.de> [zuletzt aufgerufen am 08.07.2018], 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. 2012

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/, o.J.

HERLE, S.; BECKER, R. und 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 aufgerufen 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), http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/-LexUriServ.do?uri=CELEX:32007L0002:EN:NOT, 2007.

ISO: Representations of dates and times, ISO 8601:2004.

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 aufgerufen 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. [zuletzt aufgerufen am 01.02.2019]: https://www.geoportal.de/SharedDocs/Downloads/DE/GDI-DE/Deutsche_-Uebersetzung_der_ISO-Felder.pdf

KOHLHUS, 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, 2014, S. 81 – 96, 2014.

KREBS, V., SCHÜTTRUMPF, H. (2018): 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.

LEHFELDT, R., MULCKAU, A.: Leitfaden zur Anbindung eines Infrastrukturknotens an die MDI-DE. Zu finden auf: <https://www.mdi-de.org/downloads/MDI-DE_Leitfaden_-ISK_2.2.pdf> [zuletzt aufgerufen am 07.03.2018], 2017.

LEHFELDT, R., MELLES, J.: Marine Daten-Infrastruktur Deutschland (MDI-DE). DIE KÜSTE, 82, S. 1-23, 2014.

LEHFELDT, R., MELLES, J.: Die Marine Dateninfrastruktur Deutschland MDI-DE. In: Karl-Peter Traub, Jörn Kohlus und Thomas Lüllwitz (Hg.): Geoinformationen für die Küstenzone. Norden Halmstad: Points Verlag (3), S. 107–116, 2011.

LEHFELDT, R., REIMERS, H.-C., KOHLUS, J.: NOKIS – Nord- und Ostsee Küsten-Informations-System. DIE KÜSTE, 82, S. 155 – 194, 2014.

LEHFELDT, R., REIMERS, H.-C., KOHLUS, J, SELLERHOFF, F.: A Network of Metadata and Web Services for Integrated Coastal Zone Management.Proc. International Conference on Coastal an Port Engineering in Developing Countries COPEDEC VII, 24.2-28.2., Dubai, U.A.E. Cyber Proceedings, paper 207, 11p., 2008.

LIBELIUM: http://www.libelium.com/, [zuletzt aufgerufen am 29.10.2018].

METROPOLREGION HAMBURG: http://geoportal.metropolregion.hamburg.de, [zuletzt aufgerufen am 29.10.2018].

MQTT: http://mqtt.org/, [zuletzt aufgerufen am 29.10.2018].

NIEHÜSER, S., DANGENDORF, S., ARNS, A., JENSEN, J. (2018): 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.

NOKIS: Nord-Ostsee-Küsten-Informations-System: http://projekt.mdi-de.org/services/nokis.html, [zuletzt aufgerufen am 29.10.2018]

OASIS: MQTT Version 3.1.1 OASIS Standard, 2014.

OGC: http://www.opengeospatial.org/standards, [zuletzt aufgerufen am 29.10.2018]

OGC-SOS: http://www.opengeospatial.org/standards/sos, [zuletzt aufgerufen am 29.10.2018]

OGC-SWE: http://www.opengeospatial.org/ogc/markets-technologies/swe, [zuletzt aufgerufen am 29.10.2018]

OGC-WMS: http://www.opengeospatial.org/standards/wms, [zuletzt aufgerufen am 29.10.2018]

OGC-WFS: http://www.opengeospatial.org/standards/wfs, [zuletzt aufgerufen 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 aufgerufen 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, pp. 445-453, 2013.

POSTGRESQL: http://www.postgresql.org/, [zuletzt aufgerufen am 29.10.2018].

QUADFLIEG T.; TOMOSCHEIT S.; GRIES T.: Humidity and strain monitoring for textile reinforced concrete. In: Proceedings of SMAR 2013, the 2nd Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, September 2013, Istanbul TR, 2013.

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. Stand 10.12.2014: http://nodc.ogs.-trieste.it/documents/EDMERP1.doc

SCHWAB, M., QUADFLIEG, T., GRIES, T. (2018): 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.

SENAT BERLIN: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen Berlin, http://www.stadtentwicklung.berlin.de/geoinformation, [zuletzt aufgerufen 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: abcverlag, S. 114-123, 2010.

STANFORD-CLARK, A., und 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, [zuletzt aufgerufen 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, S. 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, [zuletzt aufgerufen am 29.10.2018]

WOSNIOK, C., RÄDER, M.: Leitfaden zur Pflege und Erstellung von Metadaten in der MDI-DE. [pdf] AG Metadaten in der MDI-DE. Zu finden auf: <https://www.mdi-de.org/images/mdi-de/Dokumente/MDI-DE_Leitfaden_Metadaten_v1.0.1.pdf> [zuletzt aufgerufen am 07.08.2018], 2013