

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Report, Published Version

Lehfeldt, Rainer; Mulckau, Alexander

EarlyDike – Sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem für Seedeiche. FuE-Abschlussbericht B3955.02.04.70403

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106717>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2019): EarlyDike – Sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem für Seedeiche. FuE-Abschlussbericht B3955.02.04.70403. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

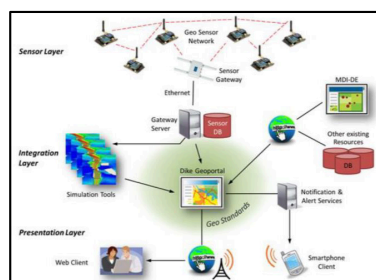
Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung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

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

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

FuE-Abschlussbericht
EarlyDike – Sensor- und risikobasiertes
Frühwarnsystem für Seedeiche

B3955.02.04.70403



August 2019

FuE-Abschlussbericht
EarlyDike – Sensor- und risikobasiertes Frühwarn-
system für Seedeiche

-
Nutzung der Marinen Dateninfrastruktur Deutsch-
land zur Kommunikation

Beginn des Vorhabens: Juni 2015

Auftrags-Nr.: B3955.02.04.70403

Aufgestellt von: Abteilung: K Wasserbau im Küstenbereich
 Referat: K6 KFKI
 Projektleiter: Dr. Rainer Lehfeldt
 Bearbeiter: Alexander Mulckau

Hamburg, August 2019

Der Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

Zusammenfassung

See- und Ästuardeiche zählen zu den wichtigsten Küstenschutzanlagen in Deutschland und ein Versagen dieser Bauwerke hat schwerwiegende Konsequenzen zur Folge. Ein frühzeitiges Erkennen von extremen äußeren Belastungen 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 zusätzliche Belastungsgrößen wie Wind- und Wellenangriff sowie der Zustand der Hochwasserschutzanlagen selber nicht einfließen. Es ist jedoch bekannt, dass es infolge des zeitgleichen Eintretens mehrerer Lastfälle oder durch Vorschädigungen des Bauwerks bereits vor Eintritt des Bemessungsereignisses zu einem frühzeitigen Versagen der Schutzanlagen kommen kann. Vor Gefährdungen infolge solcher Ereignisse kann derzeit nicht rechtzeitig gewarnt werden.

Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel des Forschungsvorhabens EarlyDike, ein sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem für Seedeiche zu entwickeln, das mehrere Belastungsgrößen (z. B. Wasserstand, Strömungen, Wind und Wellen) sowie die Widerstandsfähigkeit des Bauwerks berücksichtigt. Eines der zentralen Produkte des Vorhabens ist ein webbasiertes Geo-Portal, das dem Endnutzer zuverlässige Echtzeitdaten zum Zustand des Bauwerks und zu allen äußeren Belastungen zur Verfügung stellt. Die Informationen dieses Fachportals sollen in die Marine Daten-Infrastruktur Deutschland MDI-DE integriert, d. h. recherchiert und angezeigt werden können.

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Aufgabenstellung und Ziel	1
2	Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)	2
3	Untersuchungsmethoden	3
4	Ergebnisse	4
5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	5
7	Literaturverzeichnis	6

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abbildung 1 Verbundprojekt EarlyDike	4

1 Aufgabenstellung und Ziel

See- und Ästuardeiche zählen zu den wichtigsten Küstenschutzanlagen in Deutschland und ein Versagen dieser Bauwerke hat schwerwiegende Konsequenzen zur Folge. Ein frühzeitiges Erkennen von extremen äußeren Belastungen 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 zusätzliche Belastungsgrößen wie Wind- und Wellenangriff sowie der Zustand der Hochwasserschutzanlagen selber nicht einfließen. Es ist jedoch bekannt, dass es infolge des zeitgleichen Eintretens mehrerer Lastfälle oder durch Vorschädigungen des Bauwerks bereits vor Eintritt des Bemessungsereignisses zu einem frühzeitigen Versagen der Schutzanlagen kommen kann. Vor Gefährdungen infolge solcher Ereignisse kann derzeit nicht rechtzeitig gewarnt werden.

Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel des Forschungsvorhabens EarlyDike, ein sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem für Seedeiche zu entwickeln, das mehrere Belastungsgrößen (z.B. Wasserstand, Strömungen, Wind und Wellen) sowie die Widerstandsfähigkeit des Bauwerks berücksichtigt. Eines der zentralen Produkte des Vorhabens ist ein webbasiertes Geo-Portal, das dem Endnutzer zuverlässige Echtzeitdaten zum Zustand des Bauwerks und zu allen äußeren Belastungen zur Verfügung stellt. Die Informationen dieses Fachportals sollen in die Marine Daten-Infrastruktur Deutschland MDI-DE integriert, d. h. recherchiert und angezeigt werden können.

2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)

Die Ergebnisse des Verbundvorhabens EarlyDike leisten bei der BAW einen Beitrag zu Zielsetzungen, die innerhalb der Verwaltung im Kontext von „Datenmanagement und Qualitätssicherung“ sowie bei der Umsetzung politisch gesetzter Anforderungen verfolgt werden.

Die nationale Umsetzung der europäischen Geodatenrichtlinie INSPIRE wird durch viele einzelne Fördermaßnahmen gestützt, die auch dem Aufbau von Geodaten-Infrastrukturen und damit dem Zugriff auf GeoDaten dienen. Die für INSPIRE vorgesehene innovative Technologie hat besonders im Bereich „big data“ und verteilter Daten-Prozessierung noch große Hürden zu nehmen. Die BAW und das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) verfolgen seit Ende der 90er Jahre mit einer Kette von Vorhaben und eigener Initiative den Auf- und Ausbau von marinen Geodaten-Infrastrukturen, die sowohl den Anforderungen von INSPIRE entsprechen als auch insbesondere für küsten- und meeresbezogene Aufgabenstellungen standardisierte Komponenten einsetzen.

3 Untersuchungsmethoden

In fünf Arbeitspaketen (AP) des Verbundprojekts EarlyDike werden Technologien und Modellierungswerkzeuge entwickelt, die am Beispiel von Seedeichen getestet werden.

AP 1 – Storm Surge Monitor und Simulator: Entwicklung eines statistischen Sturmflutmodells als Grundlage für einen Sturmflutsimulator (Forschungsinstitut Wasser und Umwelt der Universität Siegen (fwu))

AP 2 – Wellenmonitoring und Wellensimulator: Entwicklung eines statistischen Wellenmodells als Grundlage für einen Wellensimulator (Institut für Wasserbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH WB))

AP 3 – Deich-Monitor und -Simulator: Echtzeitmonitoring von Seedeichen und Erprobung von intelligenten Geotextilien (Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) und Institut für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen University))

AP 4 – Flood Simulator and Flood Damage Simulator: Vorhersage von Überflutungsflächen und Abschätzung der potentiellen Schäden in Echtzeit (IWW)

AP 5 – Sensor- und Geodaten-Infrastruktur: Aufbau eines Deichinformationssystems und Integration in die Marine Daten-Infrastruktur Deutschland. (Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik und Geoinformationssysteme der RWTH Aachen University (gia) und Bundesanstalt für Wasserbau (BAW))

4 Ergebnisse

Der Anteil der BAW liegt in der Integration der Ergebnisse aller Arbeitspakete in das Portal der Marinen Daten Infrastruktur Deutschlands (MDI-DE) durch die Bereitstellung von Geodaten-diensten über einen Mapserver und die Beschreibung von Daten und Diensten mittels Metada-ten, die extern in der MDI-DE recherchierbar sind. Sie werden hier mit dem Nord- und Ostsee-Küsten-Informationen-System NOKIS erfasst. Das dabei verwendete Küstenzonen-Profil auf Basis des ISO19115 Metadaten-Standards garantiert die Erfüllung von europäischen und nationalen Anforderungen von INSPIRE, GDI-DE und GovData und damit die Sichtbarkeit der Daten in un-terschiedlichen Zielsystemen. Besonders wichtig sind dabei Angaben zu Nutzungsbedingungen und die Dokumentation der Datenherkunft für die Qualitätssicherung.

Im Deichportal sind neben den Messwerten aus dem Deichkörper und den eigenen flächende-ckenden Modelldaten die Modellvorhersagen des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydro-graphie (BSH) zu Wasserständen, Oberflächenströmungen und Gezeiten integriert. Sie werden als WebMapService (WMS) visualisiert. Für eine bessere geographische Orientierung bindet der Kartendienst den Namenslayer des Küstengazetteers ein, der bei der BAW für die MDI-DE ge-hostet wird.

Damit sind die wesentlichen Schritte der Integration zur Publikation von Projekt-Daten aus dem Verbundprojekt EarlyDike in bestehende Geodaten-Infrastrukturen mit standardisierten Me-thoden erfolgt.

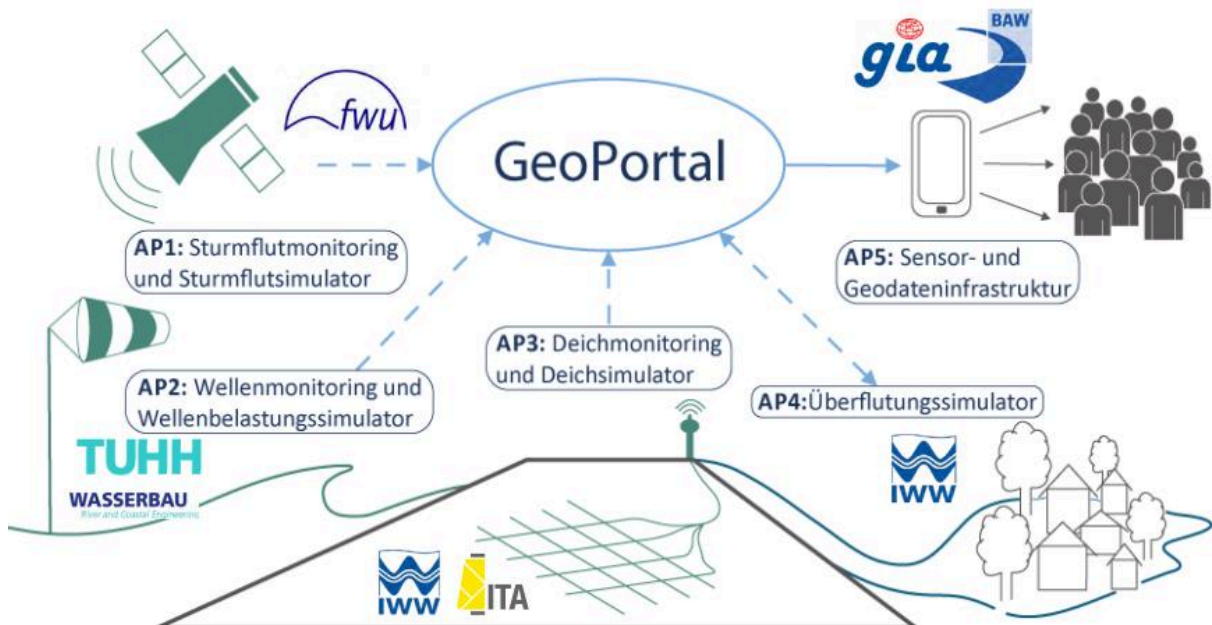


Bild 1: Verbundprojekt EarlyDike

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

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 weitere 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.

Anhand des Projekts EarlyDike wird das Zusammenspiel aller Komponenten einer Online-Geomonitoring- und Simulationsanwendung dargestellt, 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.

6 Literaturverzeichnis

Becker, R.; Herle, S.; Lehfeldt, R.; Fröhle, P.; Jensen, J.; Quadflieg, T.; Schüttrumpf, H. und Blankenbach, J (2016): Distributed and Sensor Based Spatial Data Infrastructure for Dike Monitoring. Copenhagen: International Federation of Surveyors, FIG.

Schüttrumpf, H. (2016): Innovationen im Deichbau – Ausgewählte Beispiele. In: Wasser und Abfall, Vol. 18, Issue 11, S./Art.: 12–15. Wiesbaden: Vieweg

Bundesanstalt für Wasserbau
Hamburg, August 2019

<keine Unterschrift>

Anlage 1

EarlyDike – Sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem für Seedeiche

Schlussbericht nach BNBest-BMBF 98

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 Niedersachsen, 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	
 	Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf
 	Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme (gia) Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Blankenbach
 	Lehrstuhl für Textilmaschinenbau und Institut für Textiltechnik (ITA) Univ.-Prof. Prof. Dr.-Ing. Thomas Gries
	Institut für Wasserbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH-WB) Prof. Dr.- Ing. Peter Fröhle
 	Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnen- und Küstenwasserbau Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen
	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 Wellenaufwurf 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 milliarden schwere 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, KLIMZUG-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 Seegangmodellierung, -analyse und -messung mit Fokus auf die deutsche Ostseeküste, z.B. HoRisk, RAdOst und MUSTOK/SEBOK sowie mit Bezug zur deutschen Nordseeküste, z.B. Seegangbedingungen 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 Hochwasserschutzdeiche 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 Ästuar, 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 Vorhersagedatensätze 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 Arbeitstreffentreffen 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 Textilintegration 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.sturmflutwar-nungen.de/>). Die Vorhersagen des Wasserstands werden derzeit punktuell für ausgewählte Pegelstandorte bereitgestellt. Dabei setzt sich das für die Nordsee verwendete operationelle Vorher-sagesystem aus der Tidevorhersage, numerischen Wettervorhersagemodellen, einem Windstaumodell und dem Model Output Statistics (MOS) System zusammen. Für die spezifischen Pegelstandorte wer-den 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 re-sultieren. Insbesondere entlang komplexer Küstenlinien, wie die der deutschen Nordsee mit vielen In-seln, Buchten, Ästuarien und dem Watt, ist eine einfache Interpolation zwischen den Pegelstandorten von unzureichender Genauigkeit (ARNS ET AL., 2015). Durch die Kombination hydrodynamisch-numeri-scher 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, Punktabstand ~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 besonde- rer Fokus beim Modellaufbau lag auf der robusten und hochauflösenden Abbildung von Wasserständen in Flachwasserbereichen. Dafür wurde ein Rechengitter erzeugt, das der speziellen Flachwassercha- rakteristik, vor allem nahe der Küste, Rechnung trägt. Verbleibende Diskrepanzen zwischen Modeller- gebnissen und Beobachtungen aus der Natur wurden zudem über eine regionale Bias-Korrektur elimi- niert, um so eine Datenbasis auch in unbepegelten Gebieten zu erzeugen.

Die simulierten und bias-korrigierten Wasserstände stellten die Basis für die Separierung von Gezeiten- anteil und Windstau dar. Dafür wurde das Verfahren der „Harmonischen Darstellung der Ungleichheiten“ nach MÜLLER-NAVARRA (2013) verwendet. Das Verfahren ermöglicht Tideanalysen für einzelne Berei- che 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 erklärende Variable (Regressand), während meteorologische Parameter (Wind- und Luftdruckfelder, die in der Praxis aus Wettervorhersagen zur Verfügung stehen) als Prädiktoren herangezogen wurden. Durch die Verwendung des separierten Windstaus aus den simulierten und bias-korrigierten Wasserständen, konnten die empirisch-statistischen Windstaumodelle auf die gesamte deutsche Küstenlinie erweitert werden. Eine weitere wesentliche Weiterentwicklung des hier entwickelten Ansatzes stellte die Berücksichtigung der Tide-Windstau Interaktion in der Deutschen Bucht im Rahmen der empirisch-statistischen Modellentwicklung dar. Hierfür wurden die empirisch-statistischen Windstaumodelle in Abhängigkeit der astronomischen Tidekurve abgeleitet. Die modellierten Windstauvorhersagen wurden anhand unabhängiger Beobachtungsdaten validiert. Insbesondere für die niedrigen und hohen Perzentilen der astronomischen Tidekurve konnten hierdurch deutliche Verbesserungen der Modellgüte erzielt werden.

Die Kombination der genannten Modellkette (Gezeitsynthese plus Windstauvorhersage) ermöglicht nun zum ersten Mal eine räumlich wie zeitlich hochaufgelöste Wasserstandsvorhersage entlang der gesamten deutschen Nordseeküste (einschließlich Inseln und Halligen). Anhand eines Sturmflutereignisses (Orkan XAVER im Dezember 2013) wurde das Verfahren praxisnah angewendet und anschließend in einen operationellen Testbetrieb integriert. Dies geschah in enger Zusammenarbeit mit den Bearbeitern der weiteren Arbeitspakete (DREIER & 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 Wellenaufbau (BSH und LKN-SH) während historischer Sturmflutereignisse zusammengestellt und analysiert.

Als zentrales Element für die Vorhersage der seegangsinduzierten Belastungen sowie der lokalen Seegangsverhältnisse wurde mit Beginn 2016 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 Wellenaufbaues

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 Fügeverfahren 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

Frühwarnsysteme 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-Datensinken entsprechende Clients auf den Sensorknoten implementiert. Die gemessenen Daten werden in Echtzeit weitergeleitet und analysiert. Warnungen bei drohendem Deichversagen können so, basierend auf den Messungen ausgesprochen werden. Die Ergebnisse der verschiedenen Simulationen (Sturmflut, Wellen etc.) werden ebenfalls in Echtzeit mittels GeoMQTT übertragen.

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

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 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-Informationssystem 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 Seegangsparemtern 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 Wellenaufbaus 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 Wellenaufbaus 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 gja
- 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 Wellenaufmessungen 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 Wellenaufbaus 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): *Intelligente Geotextilien – aktueller Stand der Entwicklung*, Studienarbeit am IWW
- ORTMANN, I. (2015): *Intelligente 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. Bevölkerungsschutzes 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 Echtzeitmonitoring 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., BLANKEN-
 BACH, 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 Geosensornetz-
 werken*. - 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 Frühwarnsys-
 tem 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 Über-
 blick*, 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 – Entwick-
 lung eines sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems für Deiche*, Abschlussseminar Früh-
 warnsysteme 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 Frühwarnsys-
 teme 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 Wellenaufbau an Seedeichen in der deutschen Bucht. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben EarlyDike – Teil 3, BMBF-Förderkennzeichen 03G0847C: Teilprojekt 2 – Wellenmonitoring und Wellenbelastungssimulator, Institut für Wasserbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg, 2018.
- EAK: Empfehlungen für Küstenschutzwerke. Korrigierte Ausgabe 2007. *Die Küste*, 65, 2002.
- 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.

Anlage 2

EarlyDike – Entwicklung eines sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems für Seedeiche

Projektzusammenfassung in „Die Küste“

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.

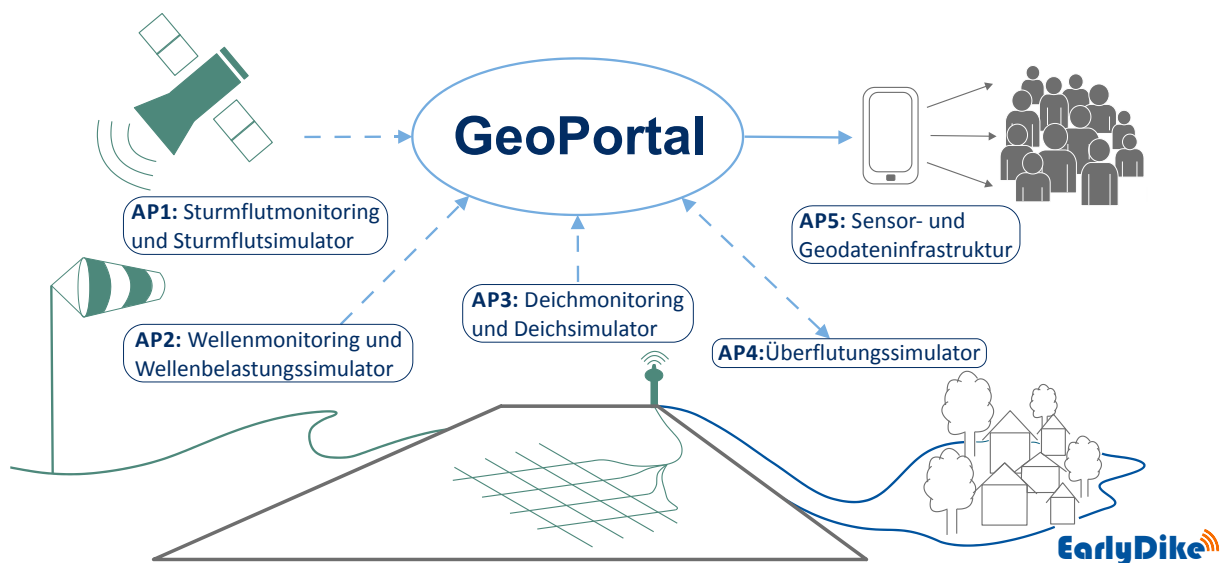


Abbildung 1: Struktur des Verbundprojekt *EarlyDike* mit allen behandelten Arbeitspaketen (AP).

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 Wasserversorgung 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, Punktabstand ~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, das der speziellen Flachwassercharakteristik, vor allem nahe der Küste, Rechnung trägt. Verbleibende Diskrepanzen zwischen Modellergebnissen und Beobachtungen aus der Natur wurden zudem über eine regionale Bias-Korrektur eliminiert, um so eine Datenbasis auch in unbepegelten Gebieten zu erzeugen.

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

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

Die Kombination der genannten Modellkette (Gezeite synthese 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 Wellenaufbau (BSH und LKN-SH) während historischer Sturmflutereignisse zusammengestellt und analysiert.

Als zentrales Element für die Vorhersage der seegangsinduzierten Belastungen sowie der lokalen Seegangsverhältnisse wurde mit Beginn 2016 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 Wellenaufbaues 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 Wellenaufbau zum Zwecke der Validierung des entwickelten Vorhersagesystems.

Im Rahmen des Arbeitspakets 2.2 (Wellenmonitoring) wurde ein prä-operationelles numerisches Seegangsvorhersagemodell (SWAN) für die gesamte Nordsee sowie hochaufgelöst

für ein Detailgebiet in der Nähe von Pellworm implementiert und in den operationellen Betrieb überführt (Langzeit- bzw. Kurzzeitvorhersage). Sämtliche Vorhersagedaten werden im GeoPortal des entwickelten Frühwarnsystems bereitgestellt.

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

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

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

4.3 Deichmonitoring und Deichsimulator

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

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

Hierzu wurden am *Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University (ITA)* garnbasierte Sensoren in ein Geotextil integriert, die bei einem Einbau unterhalb der Außendichtung eines Seedeiches in der Lage sind, einen Anstieg der Sickerlinie innerhalb des Deichkörpers sowie eine Wasserinfiltration durch die Deckschicht des Deiches zuverlässig zu erkennen. Dafür wurden Integrationskonzepte in bestehende textile Herstellungsverfahren für Geotextilien untersucht und verschiedene 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 Wassernwirtschaft der RWTH Aachen University (IWW)* in Deichmodellen auf unterschiedlichen Skalen getestet, validiert und in Zusammenarbeit mit dem *ITA* für den Einbau im Deich optimiert. Hierbei fanden vorerst kleinmaßstäbliche Versuche mit Prototypen der Sensoren statt. Wichtige Erfahrungen aus den kleinmaßstäblichen Untersuchungen konnten in die Entwicklung eines großmaßstäblichen Textils fließen, das schließlich in über mehrere Monate stattfindenden Langzeittests in einem großmaßstäblichen Modelldeich kontinuierlich belastet und vielfachen Nass-Trocken-Wechseln ausgesetzt wurden. Hierbei wurde das Sensortextil anhand der Ergebnisse konventioneller Messtechnik validiert und auf Grundlage der gesammelten Daten eine Methodik zur automatischen Analyse der Sensorsignale abgeleitet.

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

4.4 Sensor- und Geodateninfrastruktur

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-Informationen-System NOKIS standardisierte Metadaten erfasst, die die Anforderungen der relevanten Zielsysteme MDI-DE, GDI-DE und INSPIRE erfüllen und einen automatisierten Informationsfluss über Katalogschnittstellen gewährleisten. Das sichert die Auffindbarkeit von Informationen, deren Nutzung durch interoperable Dienste zur Visualisierung und zum Download unterstützt wird. Eine technische Qualitätssicherung der angebotenen Produkte erfolgte durch die Anwendung der Testsuite der GDI-DE, die Geodaten und Dienste auf Konformität zu den Vorgaben von INSPIRE und GDI-DE prüft, und somit die Durchgängigkeit der Information sicherstellt.

Die inhaltliche Qualitätssicherung erfolgte bei der Verschlagwortung durch die Verwendung des GEneral MUltilingual Environmental Thesaurus (GEMET), der vom Europäischen 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](https://doi.org/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 Wellenaufwurf an Seedeichen in der deutschen Bucht. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben *EarlyDike* – Teil 3, BMBF-Förderkennzeichen 03G0847C: Teilprojekt 2 – Wellenmonitoring und Wellenbelastungssimulator, Institut für Wasserbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg, 2018.
- 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.

Anlage 3

EarlyDike – Sensor- und & Geodateninfrastruktur für ein sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystems für Seedeiche

Abschlussbericht in „Die Küste“

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

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

Schlagwörter

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

Summary

Online monitoring systems for sea dikes have various requirements to data, simulations and communications. Sensors, which are deployed in the dike body and measure the inner state, and simulators, which forecast the outer influential factors such as wind or waves, must be coupled in a real-time-ready architecture. Additionally, third

party data which are accessible by standardized protocols must be integrated as well. Therefore, an event-driven Sensor and Spatial Data Infrastructure (SSDI) is implemented in the 'EarlyDike' project to realize a real-time monitoring system. Furthermore, a web-based geoportal is implemented to enable user-access to the observed and simulated data.

This contribution describes the realization of such a SSDI as part of the 'EarlyDike' project, complying with the necessary requirements of high scalability and interoperability. The interoperability is ensured by geodata standards of the Open Geospatial Consortium (OGC). Especially, the standards of the sensor web are used to access historical sensor data by means of the WWW. The scalability and real-time capability 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 Lenkungs-gremium GDI-DE im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU 2016). Bezüglich Wasser- und Küstenschutz förderte das BMBF den Aufbau der MDI-DE (RÜH und BILL 2012, LEHFELDT und MELLES, 2011) durch die Fusion von NOKIS (NOKIS, 2018) und GDI-BSH (GDI-BSH, 2018) (MDI-DE: PT Jülich 03KIS089 (2010-2013); NOKIS: PT Jülich 03KIS49 (2004-2008)). Die MDI-DE (LEHFELDT und MELLES, 2014) integriert Daten aus dem Küsteningenieurwesen, dem Küstengewässerschutz, dem 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 (GROTHER 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 Integrationschicht (Integration Layer) werden bereits existierende räumlich-zeitliche Daten mit den eigenerfassten Messungen fusioniert und schließlich in einem Deich-Geoportal präsentiert (Präsentationsschicht/ Presentation Layer).

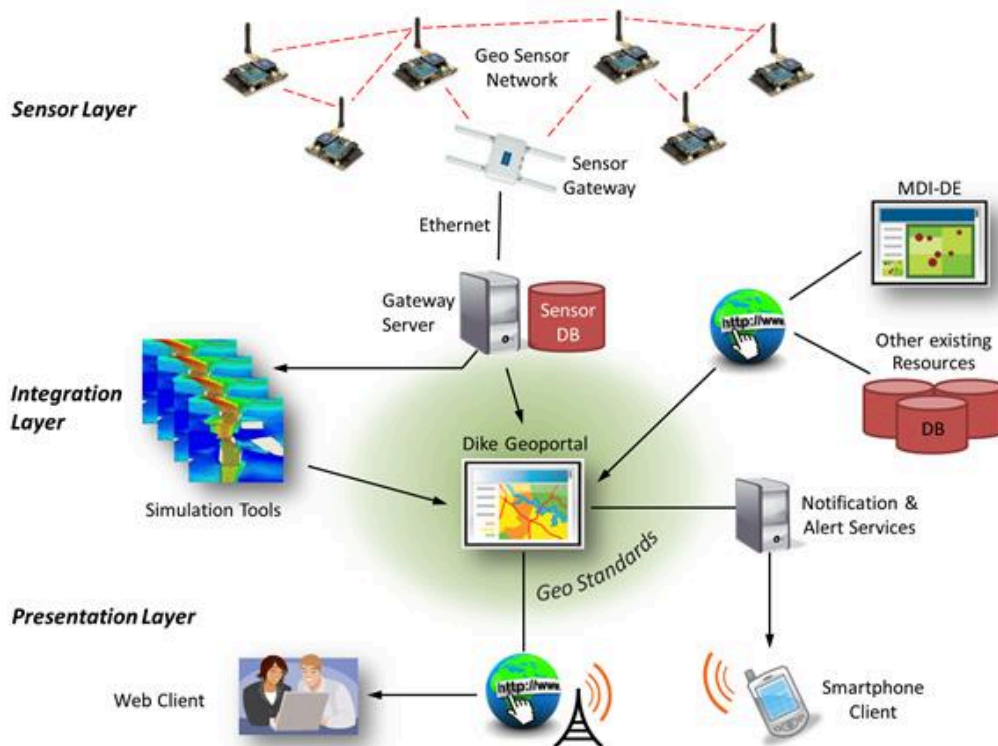


Abbildung 1: Sensor- und räumliche Dateninfrastruktur für das Deich-Monitoring.

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 „Wasmote Plug and Sense“ vom spanischen Unternehmen Libelium (LIBELIUM, 2018) gewählt. Die Basiskomponente ist der sogenannte Wasmote, 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 Wasmote 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 Wasmote-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 „Wasmote 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 "Wasp mote 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 aufgetragenen Referenzspannung bzw. eines Referenzwiderstandes gemessen, was gegenüber der absoluten Spannungs- bzw. Widerstandsmessung mit einem geringeren technischen Aufwand verbunden ist.

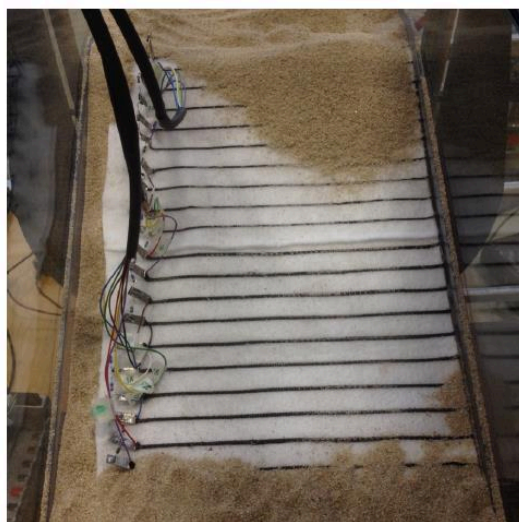


Abbildung 2: Prototyp des Messvlies im kleinmaßstäblichen Deichmodell (Foto: Krebs 2015).

Die Erfassung mit Hilfe der Sensorknoten kann grundsätzlich entweder durch Verwendung handelsüblicher Labormesstechnik, wie sie ebenfalls vom Projektpartner ITA für die Labormessversuche mit den Geotextilien verwendet wird, oder durch den Aufbau eines eigenen miniaturisierten Messmoduls erfolgen. Die erstgenannte Variante besteht 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 Waspnote ausgelesen werden kann. Der Betrieb am Sensorknoten (Waspnote) 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

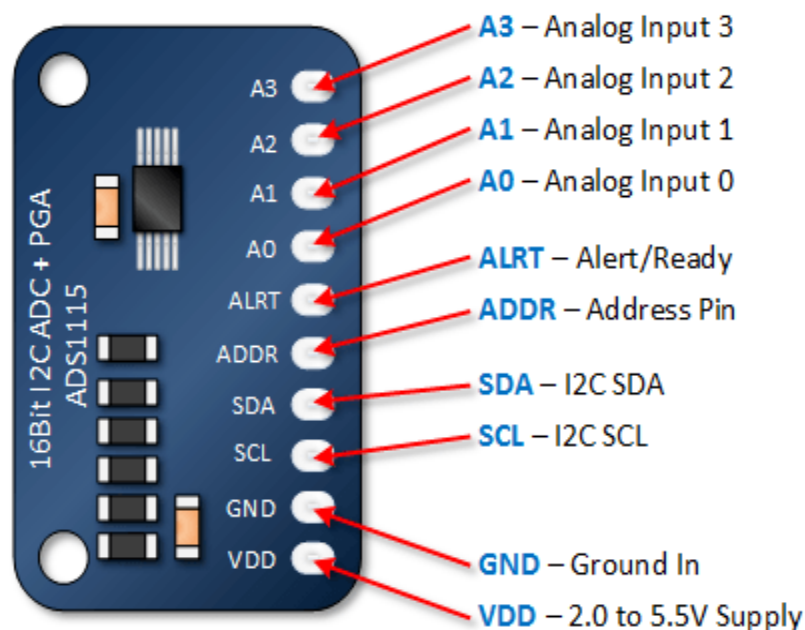


Abbildung 3: Arduino ADS1115 Modul (HENRY'S BENCH O.J.)

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

Die Vorteile dieser Lösung bestehen insbesondere darin, dass kein zusätzliches Mikrokontroller-Board erforderlich ist und das Geotextil als weiterer Sensor am Waspnote 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 Modelldamm eingebracht wurde, konnte das umgesetzte Messsystem angeschlossen und bei den folgenden Versuchskampagnen die Funktionalität überprüft werden. Eine parallel laufende Messung mittels Labormesstechnik bestätigte die Validität der Messungen. Diese konnten anschließend ausgewertet und analysiert werden (vgl KREBS und SCHÜTTRUMPF, 2018).



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

3 Integrationsschicht - Datenfusion

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

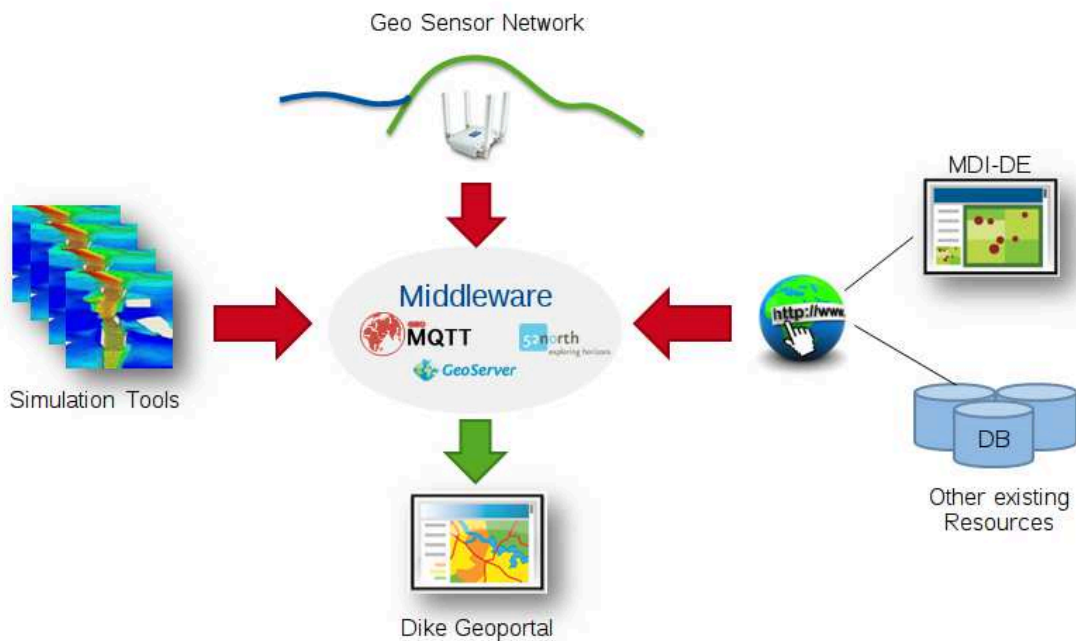


Abbildung 5: Datenfusion in einer Zwischenschicht.

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.

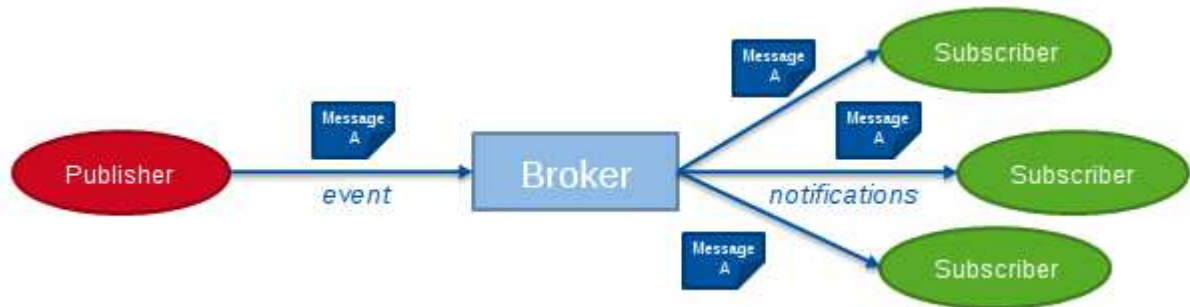


Abbildung 6: Das Publish/Subscribe Modell von MQTT.

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.

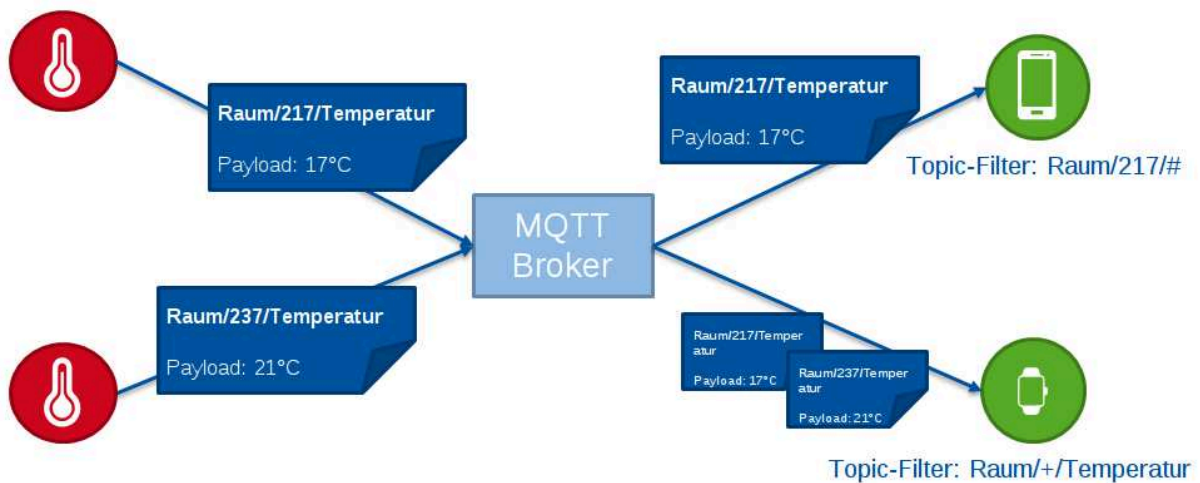


Abbildung 7: MQTT Ereignisse und Benachrichtigungen.

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).

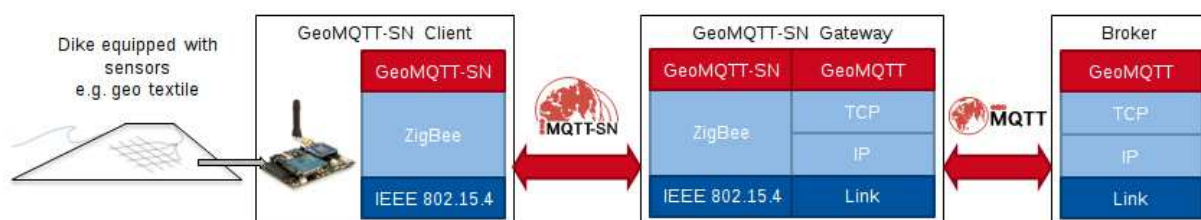


Abbildung 8: Anbindung von Sensorknoten an einen GeoMQTT-Broker.

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 Wasmotes 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 Modeldeich in der Halle des IWW. Der Sensorknoten (Waspote, 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 Modeldeiches 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 (POSTGRES SQL, 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.

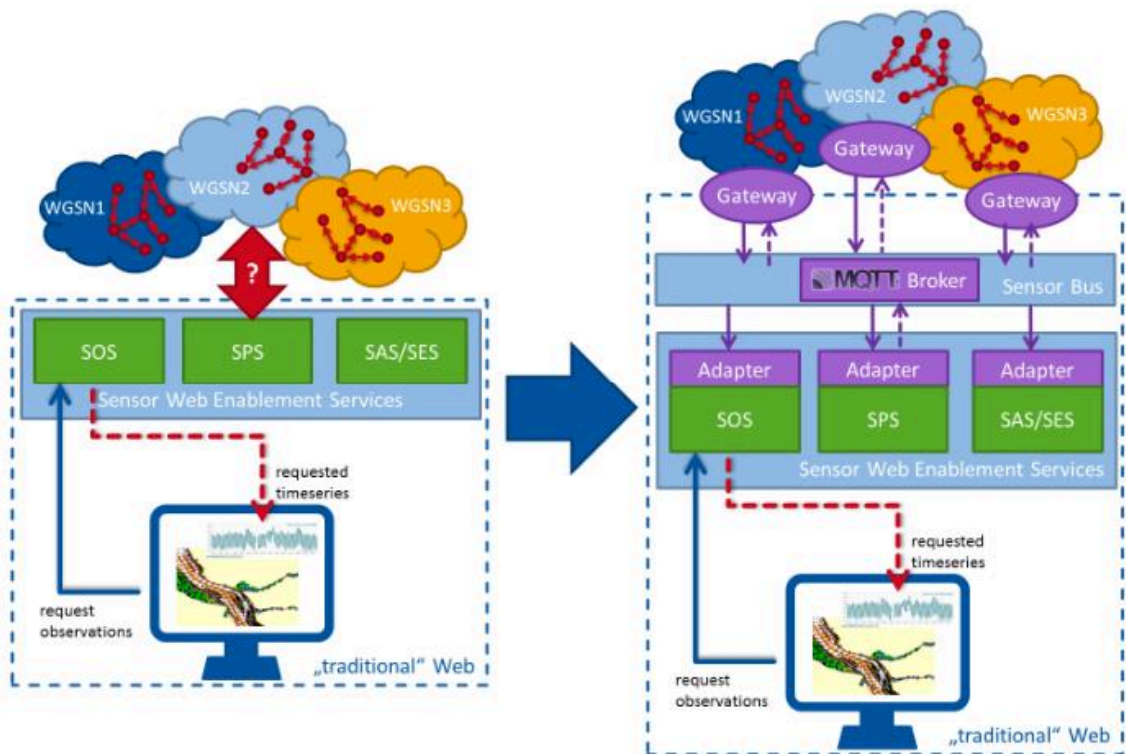


Abbildung 10: Interoperabilitätslücke.

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.

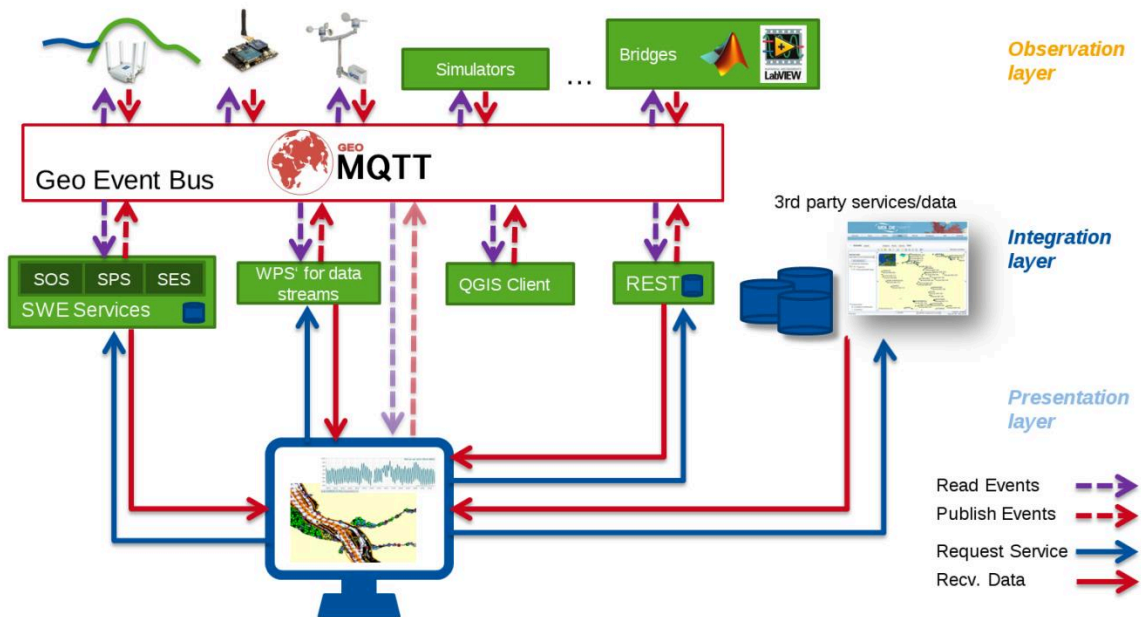


Abbildung 11: GeoEvent Bus in der EarlyDike-Architektur (angelehnt an HERLE et al., 2016).

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

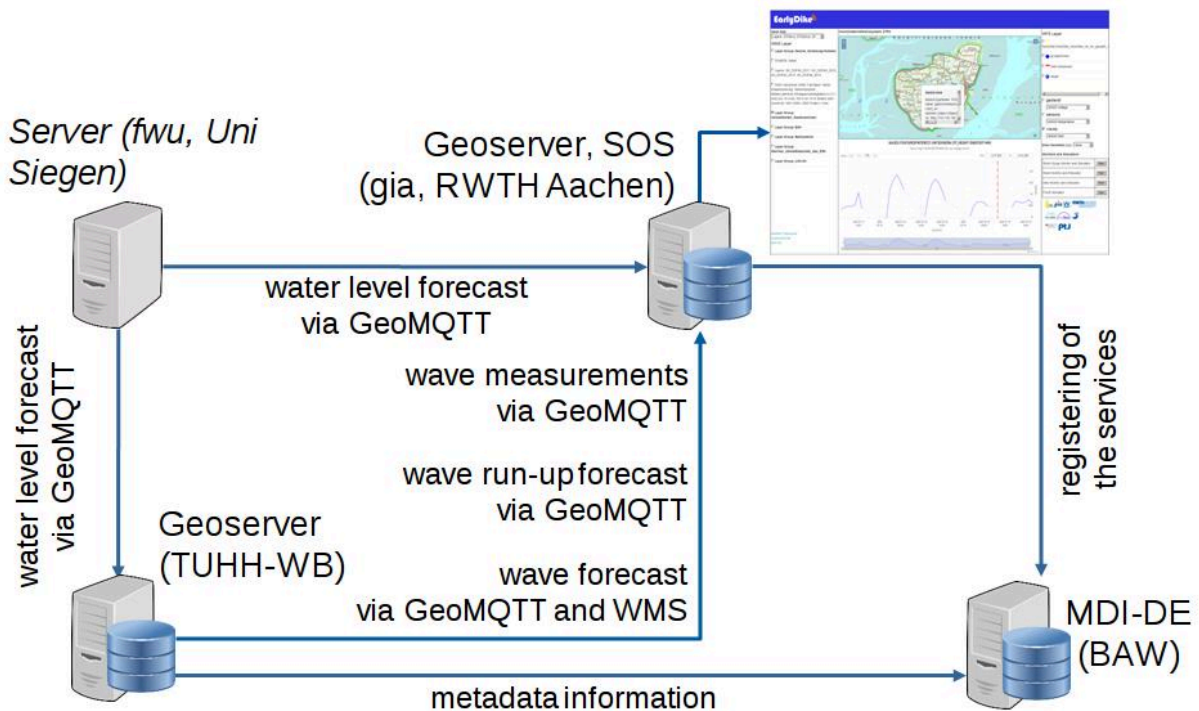


Abbildung 12: Anbindung von Simulatoren und Umsetzung von Prozessketten

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 Form „nc“ zunächst keine einfachen Lösungen vor. Shape-Dateien wurden in einen eigenen Mapserver eingespielt und aus diesem heraus als Dienst in das Geoportal eingebunden. REST (Representational State Transfer)-Dienste wie zum Beispiel beim Dienst „Pegelonline“ der WSV liefern direkt georeferenzierte (Raster)-daten. „Pegelonline“ bietet außerdem Webdienste für z.B. interaktive und statische Visualisierungen von Pegelganglinien an.

Für die Webservices WMS und WFS ergeben sich die genauen Informationen über die GetCapabilities-Abfrage des jeweiligen Dienstes. Sie weisen neben beschreibenden Informationen über die Inhalte auf die verfügbaren Layer, Projektionen und Formate der Daten hin. Gerade bei WMS ist die Information zur verwendeten Kartenprojektion wichtig, da unterschiedliche Projektionen im Geoportal nicht kombiniert werden können. Bei WFS ist dies unproblematisch, da die Koordinaten zwischen den gängigen räumlichen Koordinatenreferenzsystemen transformiert werden können.

4.3.1 Kartenservices

Zur räumlichen Orientierung werden verschiedene mögliche und wählbare Hintergrundkarten über WMS-Dienste angeboten. Da als 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 (LVerGeo SH)	WMS
Geobasisdaten (Landtopographie, Orthophotos, Geländemodelle, Grenzen) in Niedersachsen	Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGLN)	WMS
Geobasisdaten (WebAtlasDE und DGM200)	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG))	WMS
Geobasisdaten (Bathymetrie, Hintergrundkarte)	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)	WMS
Bathymetrie	National Centers for Environmental Information beim National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)	WMS
Wettervorhersagen	Deutscher Wetterdienst (DWD)	GRIB
Meteorologische Daten (z.B. 20th Century Reanalysis)	National Centers for Environmental Information beim National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)	nc
Pegeldaten	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (BAW)	WMS, WFS, REST
Pegeldaten	Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (MELUR)	WMS, WFS, CSV
Stündliche Vorhersage-Windfelder (u- und v-Komponenten) der Modelle Cosmo-EU bzw. Cosmo-DE als Rasterdatensatz	Deutscher Wetterdienst (DWD)	GRIB
Rasterdatensatz Bathymetrie der Nordsee	Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)	WMS
Stündliche Strömungsvorhersagefelder des BSH als Rasterdatensatz	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)	WMS
Seegangsmessdaten der Stationen FINO1 und FINO3, Elbe sowie Nordseeboje 2 bzw. 3	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)	WMS
Vorhersagedaten zu Wasserständen	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)	WMS
Messdaten Seegang, lokale Wasserstände und Strömungen	Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz des Landes Schleswig-Holstein (LKN-SH)	WMS, WFS
Deichlinie Schleswig-Holstein	Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz des Landes Schleswig-Holstein (LKN-SH)	Shape

Deichlinie Niedersachsen	Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (MU)	WMS
--------------------------	--	-----

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 angebotenen WMS (Abb. 14, GetFeatureInfo-Request Deich Niedersachsen) bzw. WFS (Abb. 15) abgerufen und angezeigt werden.

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.

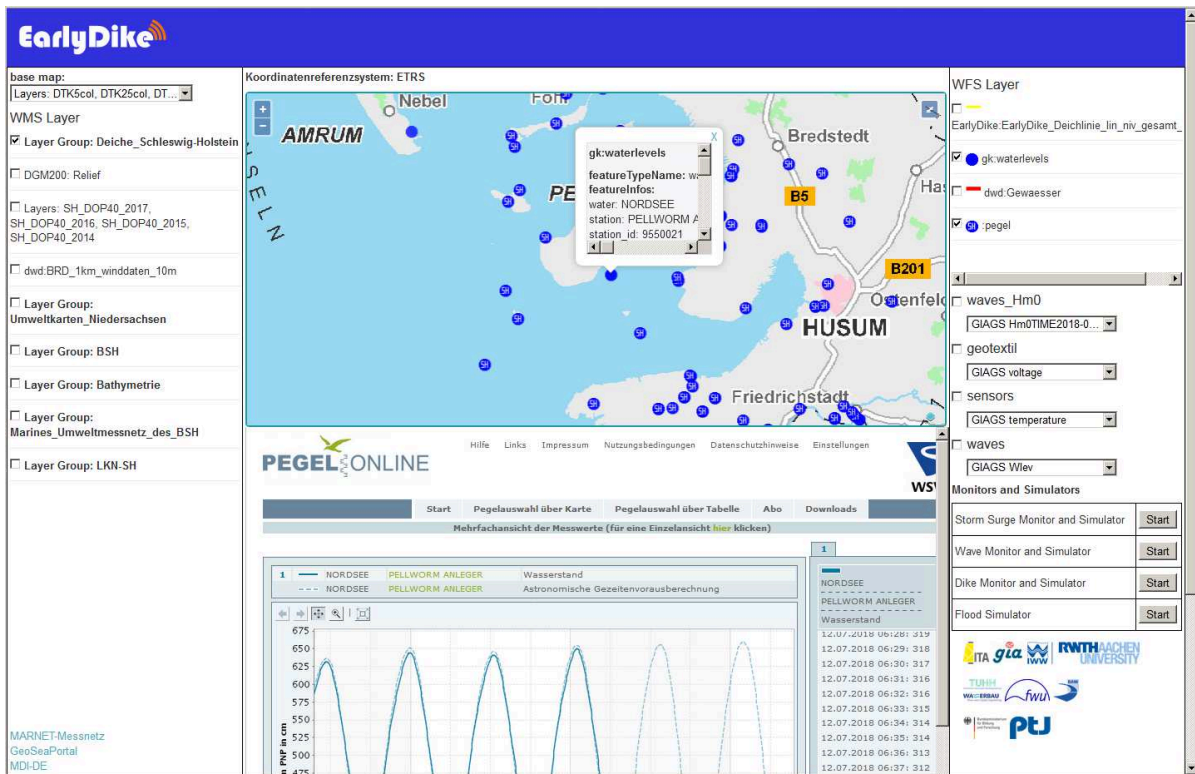


Abbildung 16: WFS der Pegel­daten der WSV und der Umweltverwaltung Schleswig-Holstein mit REST-Schnittstelle des Gewässerkundlichen Informationssystems der WSV (Pegelonline).

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.

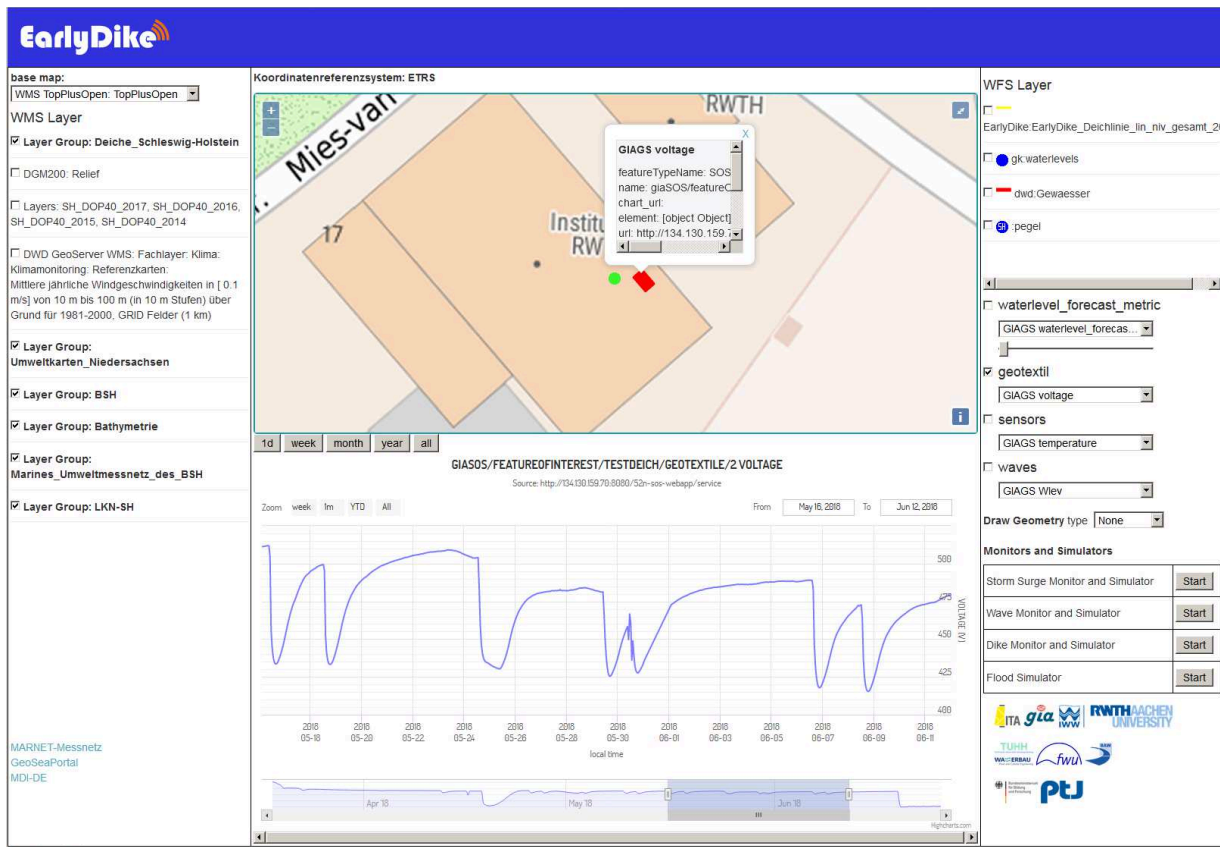


Abbildung 17: Geoportal – Spannungsmesswerte eines Geotextils.

Die Vorhersagen von Wasserständen an den Küsten sind mit einem Zeitstempel bezüglich der Prognoseerstellung versehen. Einzelne Prognoseerstellungzeitpunkte 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.

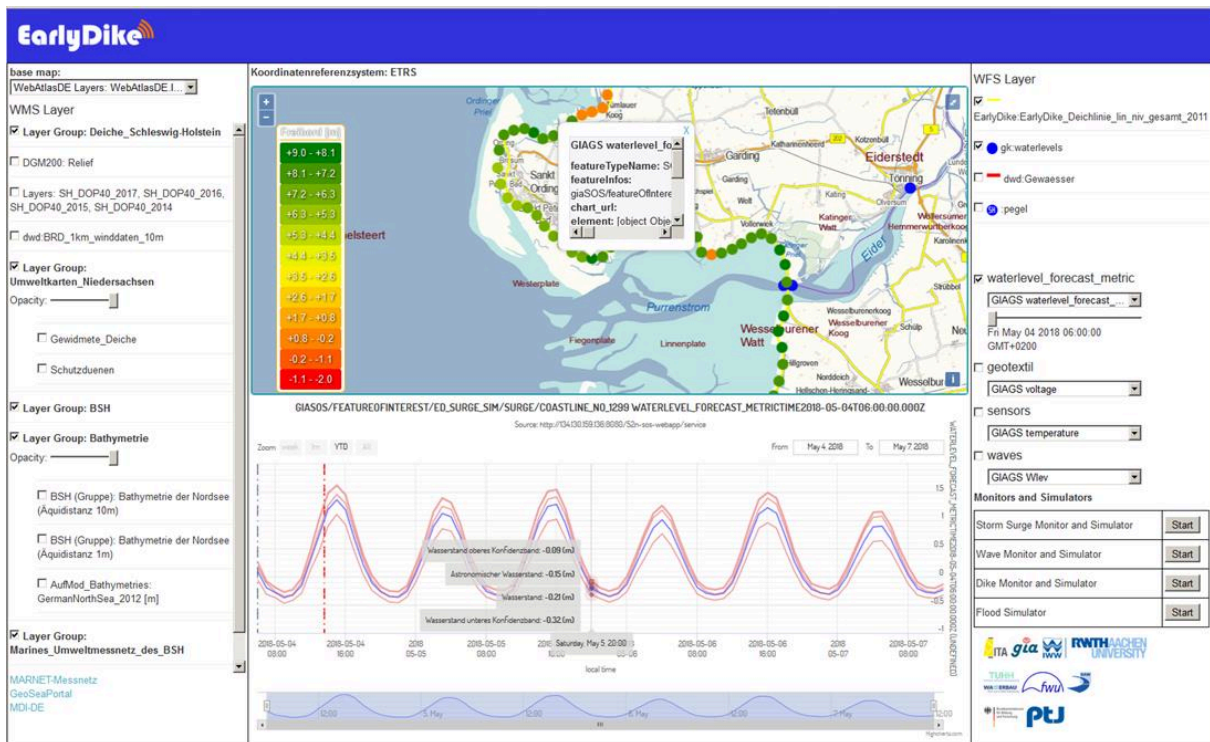


Abbildung 18: Geoportal - Wasserstandsvorhersage 2018-05-04 06UTC der FWU.



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 Wellenaufbausimulation werden in analoger Form visualisiert. In einer Drop-Down-Liste können die gewünschten Parameter zu

Visualisierung als Zeitreihe abgerufen werden. Die jeweils aktuellste Simulation wird dargestellt. 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-Informationen-System (NOKIS) wurde dazu seit 2001 ein Metadaten-Informationen-System als technische Plattform etabliert (LEHFELDT et al., 2014), das von vielen Behörden in der deutschen Küstenzone genutzt wird. Im Gegensatz zu anderen Erfassungs- und Pflege-Werkzeugen bietet NOKIS ein Metadaten-Profil an, das auf die Belange der Küstenzone zugeschnitten ist, und notwendige Zusatzinformationen für Geodaten im Küstenbereich berücksichtigt.

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

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

Mit NOKIS werden Projekte aus der Küstenforschung, deren Berichte und 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-Informationssystem 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.

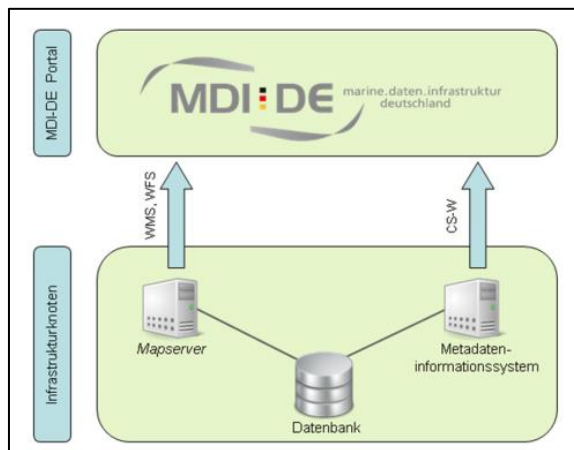


Abbildung 20: Anbindung eines MDI-DE Infrastrukturknotens, vgl. LEHFELDT und MULCKAU (2017)

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



Abbildung 21: Geodaten Infrastrukturen

Die Anbindung der MDI-DE an die nationale Geodateninfrastruktur GDI-DE, die ihrerseits mit dem INSPIRE-Portal der Europäischen Geodateninfrastruktur verknüpft ist, bewirkt, dass die veröffentlichten Daten in den Such-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.

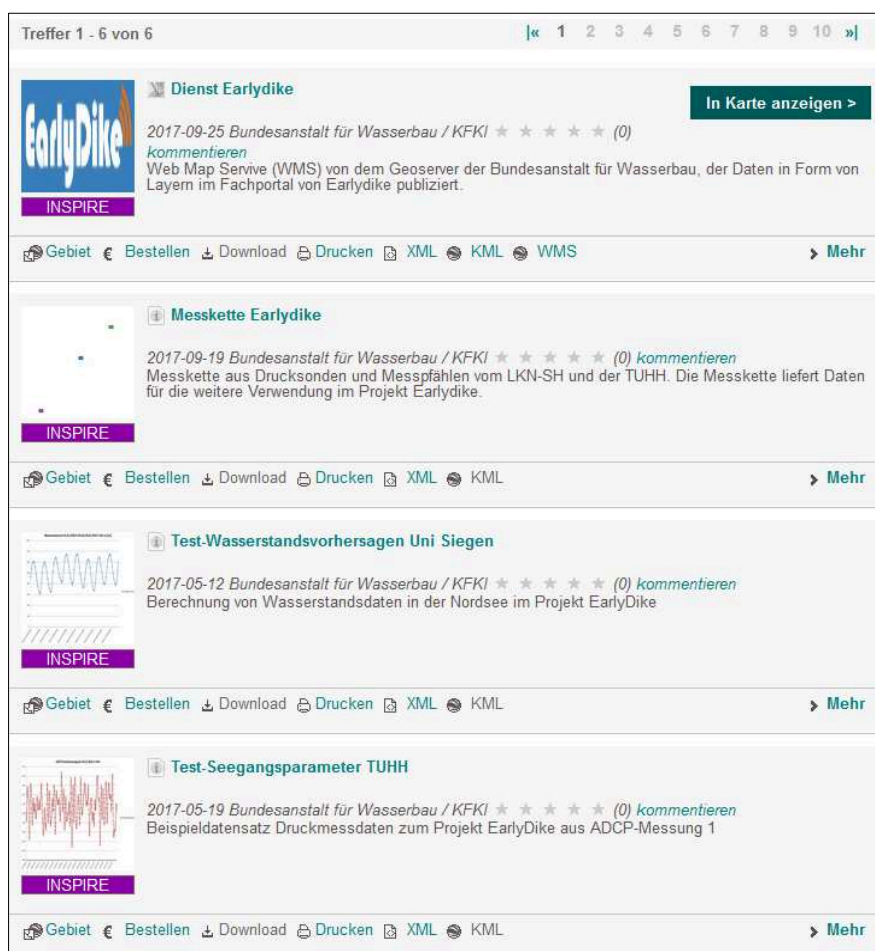


Abbildung 22: Sichtbarkeit der EarlyDike-Metadaten im Geoportale der GDI-DE (<http://www.geoportale.de>)

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 Metadatenatz beim Harvesting z.B. durch die GDI-DE als „gültig“ erkannt.

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

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

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

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

Die in Abb. 22 dargestellte Trefferliste einer Anfrage im Geoportall 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 Geoportall 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.

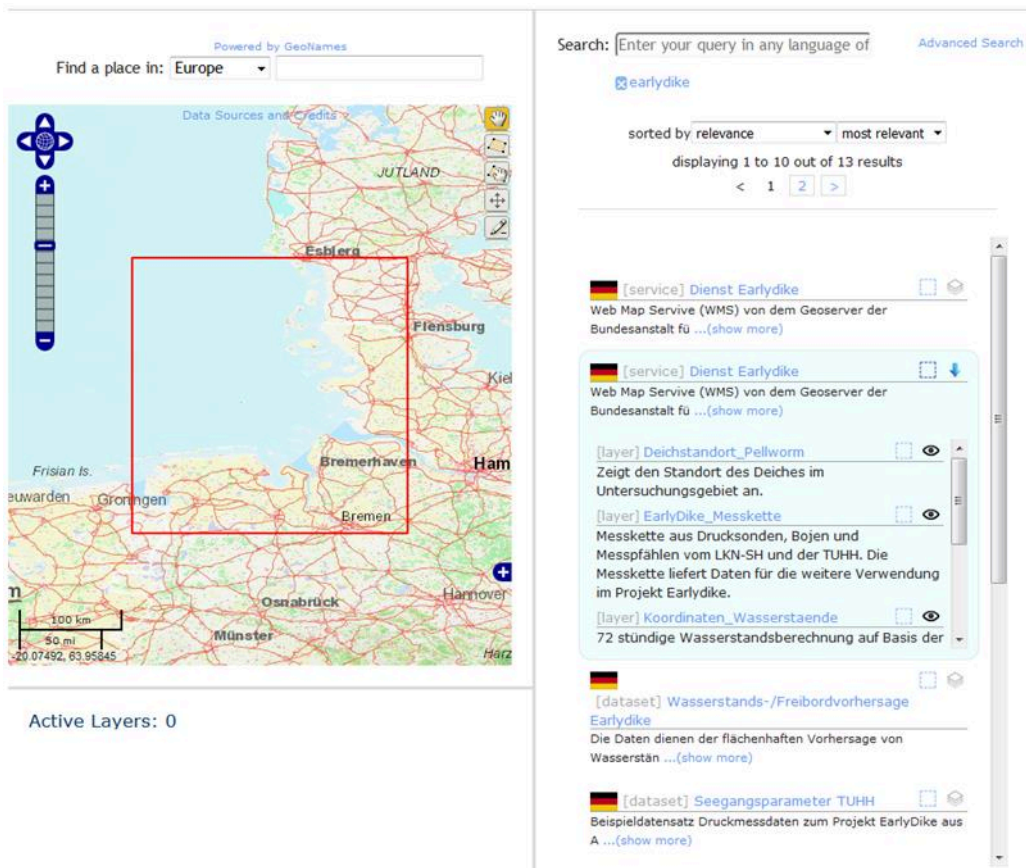


Abbildung 23: Sichtbarkeit der EarlyDike-Metadaten im INSPIRE Geoportal (<http://inspire-geoportal.ec.europa.eu>)

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

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

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

5.5 Zielsysteme von Metadaten

Die Geodateninfrastrukturen, in denen Informationen von EarlyDike publiziert werden sollen, sind in der 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 Metadaten 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.

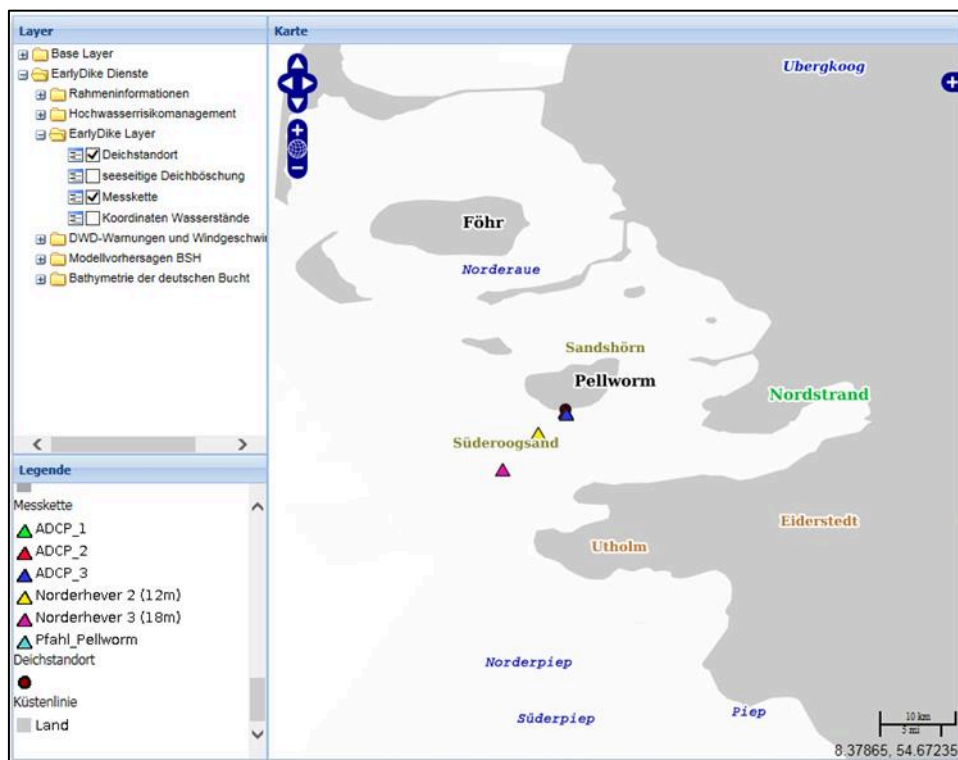


Abbildung 24: EarlyDike Themeneinstieg bei der MDI-DE (<http://mdi-de.baw.de/earlydike/>)

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 weitere 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 notwendigen 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.
- ARDUINO: <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-Informationssystem. 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 and 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-Informationssystem: <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



Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe
Tel. +49 (0) 721 97 26-0 · Fax +49 (0) 721 97 26-45 40

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg
Tel. +49 (0) 40 81 908-0 · Fax +49 (0) 40 81 908-373

www.baw.de