

Schlussbericht nach BNBest-BMBF 98

EcoDIke - Grüne Seedeiche und Deckwerke für den Küstenschutz

Projektlaufzeit 10/2016 bis 09/2019

Förderkennzeichen 03F0757A-F

Babette Scheres, M.Sc. RWTH; Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf
Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen University

Felix Soltau, M.Sc.; Marius Ulm, M.Sc.; J.-Prof. Dr.-Ing. Arne Arns; Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen
Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Universität Siegen

Annelie Graunke, M.Sc.; Cajus Bisgwa, M.Sc.; Univ.-Prof. Dr. Nicole Wrage-Mönnig
Professur Grünland und Futterbauwissenschaften, Universität Rostock

Kara Keimer, M.Sc.; Viktoria Kosmalla, M.Sc.; Dr.-Ing. David Schürenkamp; Prof. Dr.-Ing. habil. Nils Goseberg
Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abt. Hydromechanik, Küsteningenieurwesen und Seebau, TU Braunschweig

Björn Deutschmann, M.Sc.
Institut für Umweltforschung (Biologie V), RWTH Aachen University
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Henner Hollert
Institut für Umweltforschung (Biologie V), RWTH Aachen University
ab dem 1.10.2019: Abteilung Evolutionsökologie und Umwelttoxikologie, Goethe Universität Frankfurt am Main

Maike Paul, Ph.D.; Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Schlurmann
Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen, Leibniz Universität Hannover

Philipp Jordan, M.Sc.; Dr.-Ing. Natasa Manojlovic; Prof. Dr.-Ing. Peter Fröhle
Institut für Wasserbau, Technische Universität Hamburg

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

Aachen, im März 2020

Inhalt

1	Kurze Darstellung	1
1.1	Aufgabenstellung.....	1
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	1
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	4
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	7
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
2	Eingehende Darstellung.....	10
2.1	Verwendung der Zuwendungen und erzielttes Ergebnis im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	10
2.2	Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	14
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	14
2.4	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	16
2.5	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	18
2.6	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 6.....	19
3	Literaturverzeichnis.....	25

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Deckwerke, See- und Ästuardeiche an der Deutschen Küste werden entsprechend der geltenden Anforderungen für einen sicheren und nachhaltigen Sturmflutschutz geplant, bemessen und gebaut (CIRIA 2013; EAK 2002). Hierbei werden die hydraulischen Belastungen (d. h. Wasserstände und Wellenparameter) sowie die geotechnischen (z. B. Bodenparameter) und lokalen Randbedingungen (z. B. Platzverhältnisse) einbezogen. Umwelt- und naturschutzfachliche Aspekte werden durch Nutzung lokaler Ressourcen und Minimalisierung des Ressourcenverbrauchs sowie Ausgleichsmaßnahmen berücksichtigt. Der ökologische Wert des eigentlichen Deichsystems und ökosystemare Aspekte finden bislang nur geringe Beachtung im Planungsprozess. Hauptziel des Forschungsvorhabens EcoDike war die Steigerung des ökosystemaren Werts von Deichen und Deckwerken unter gleichzeitiger Beachtung der Deichsicherheit. Hierzu ist es erforderlich, Deiche und Deckwerke nicht nur als Küstenschutzbauwerk, sondern auch als Ökosystem zu verstehen und die komplexen Wechselwirkungen zwischen Deich und Meer zu begreifen und durch begleitende intelligente und innovative Maßnahmen des Monitorings und der Deichunterhaltung die Deichsicherheit im Rahmen einer integrierten risikobasierten Strategie zu erhalten bzw. möglichst zu steigern. Die Deichsicherheit und damit der Küstenschutz stehen hierbei weiterhin an erster Stelle. Die Bearbeitung des EcoDike-Projekts erfolgte auf der Grundlage theoretischer Überlegungen, Laboruntersuchungen, klein- und großmaßstäblicher Experimente sowie Untersuchungen in der Natur. Grundlage war ein transdisziplinärer Ansatz unter Berücksichtigung der wachsenden Nutzungsanforderungen an die Küste, des Klimawandels sowie der Leistungen der Ökosysteme der Küste.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das EcoDike-Projekt wurde als KüNO-Forschungsvorhaben beantragt und durchgeführt. Die finanzielle Förderung erfolgte somit im Rahmen des KüNO-Programms (Küstenforschung Nordsee-Ostsee) durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Eine fachliche Begleitung des Projektes fand durch das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) statt. Die beteiligten Institutionen sind in der nachfolgenden Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Beteiligte Institutionen

	Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) RWTH Aachen University Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf
	Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) Universität Siegen Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen

  <p>Traditio et Innovatio</p>	<p>Grünland und Futterbauwissenschaften, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät Universität Rostock (UR) Prof. Dr. Nicole Wrage-Mönnig</p>
 	<p>Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI) TU Braunschweig Prof. Dr.-Ing. habil. Nils Goseberg</p>
	<p>Institut für Umweltforschung (IUF) RWTH Aachen University Prof. Dr. Henner Hollert</p>
 <p>Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen</p>	<p>Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen (LuFI) Leibniz Universität Hannover Prof. Dr. Torsten Schlurmann</p>
	<p>Institut für Wasserbau (IWB) Technische Universität Hamburg (TUHH) Prof. Dr.-Ing. Peter Fröhle</p>

Das IWW konzentriert sich auf drei Forschungsschwerpunkte („Küste und Hochwasser“, „Morphodynamik und Sedimente“, „Energie und Umwelt“), die durch die Bearbeitung nationaler und internationaler Forschungsprojekte bedient werden. Dazu gehören Projekte wie: BMBF-Reise, BMBF-HoRisk, BMBF-ZukunftHallig, EU/BMBF-FlowDike, EU-AMICE, DFG-Floodsearch und weitere. Prof. Schüttrumpf arbeitet seit mehr als 20 Jahren u. a. in den Bereichen Wasserwirtschaft, Küsteningenieurwesen und konstruktiver Wasserbau an experimentellen und numerischen Forschungsaufgaben, die sich durch eine hoch interdisziplinäre Arbeitsweise und Arbeitsgruppen ausweisen.

Die wissenschaftlichen Schwerpunkte des fwu liegen im Bereich der Extremwertstatistik, der Meeresspiegelforschung sowie mehrdimensionaler numerischer Modellierung. Das fwu greift bei seiner Forschung auf fundierte Erfahrung zurück, resultierend aus der Bearbeitung zahlreicher Projekte, wie z. B. BMBF-EarlyDike, BMBF-AMSeL Ostsee, BMBF-MSL_absolut, BMBF-EXTREMENESS, DFG-SEASCAPE oder DFG-TIDEDYN. Die Forschungsarbeiten am fwu werden seit 28 Jahren von Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen, mit langjähriger Erfahrung im Küsteningenieurwesen und Binnenwasserbau, betreut. Die Forschungsziele des Instituts werden durch interdisziplinäre Lösungsansätze erreicht. Dabei steht der Wissenstransfer zwischen Wissenschaft und Praxis im Fokus.

Die Professur Grünland und Futterbau der UR erforscht die Beziehungen zwischen der Phytodiversität des Grünlands und der Resilienz, Produktivität und Ressourcennutzung verschiedener Grünlandssysteme. Es existiert eine starke Expertise in der Klimaforschung, die sowohl die Treibhausgasemissionen von Grünlandssystemen als auch die Auswirkungen des Klimawandels auf z. B. die Produktivität oder die Ressourcennutzung von Grünland

untersucht. Die wichtigsten aktuellen Projekte in diesem Bereich sind BMBF-EcoDike, DFG-DASIM, ESF-Wetscapes und EU-Multisward.

Die Forschungsschwerpunkte der Abteilung Hydromechanik, Küsteningenieurwesen und Seebau des LWI liegen auf sachorientierten Themenkomplexen, die abzielen auf die Verbesserung der Kenntnisse über die Wechselwirkungen zwischen Seegang, Bauwerk, Baugrund, Sediment und Morphologie, auf die Entwicklung wissenschaftlich-technischer Grundlagen und Werkzeuge für die Bemessung von Bauwerken und die Entwicklung neuer Bauwerkskonzepte und Lösungen. Das Projekt wurde innerhalb der Arbeitsgruppe „Nachhaltiger Küstenschutz“ bearbeitet. Das LWI betreibt eine Versuchshalle mit zahlreichen Versuchseinrichtungen für physikalische Modellversuche. Zu den technischen Voraussetzungen, die zur Durchführung des vom LWI durchgeführten Projektteils notwendig waren, zählte v. a. die Möglichkeit zur Benutzung der Versuchseinrichtungen (insbesondere des Doppelwellenkanals, Messtechnik im Labor und im Feld etc.). Es konnte hinsichtlich der Versuchsdurchführung an Vorarbeiten und Erfahrungen aus ähnlichen Versuchen angeknüpft werden. Für die Dauer des Projektes wurde vom LWI ein/e wissenschaftliche/r Mitarbeiter/in beschäftigt.

Anthropogene und natürliche Schadstoffe üben adverse Effekte auf verschiedenen Ebenen biologischer Organisation aus – von Biomolekülen bis hin zu Ökosystemen. Das IUF entwickelt Testsysteme für die Abschätzung von akuten und mechanismus-spezifischen, wie auch chronischen Schädigungspotenzialen in den verschiedenen Umweltkompartimenten Wasser, Sedimente und terrestrischen Böden. Die Forschungsmethoden reichen von *In-vitro*-Methoden, Modellorganismen-tests und Populationstests im Labor und feldbasierten Testsystemen. Die Extrapolation der Testergebnisse resultiert in einer Umweltrisikobewertung. Besondere Kompetenz besitzt das IUF in der Kombination aus quantitativen und mechanistischen Methoden (z. B. Modellierung und multivariate Statistik) und ökologischer/ökotoxikologischer Forschung. Insbesondere Technikfolgenabschätzung, Green Toxicology, aquatische und marine Ökotoxikologie, die Entwicklung und Implementierung von effekt-basierten Methoden und die Hochwasserfolgenabschätzung sind von großer Bedeutung und werden in nationalen und internationalen Projekten umgesetzt: BMBF-Stencil, BMBF-Sign, BMBF-Sign 2.0, BMBF-Neurobox, BMBF-DreamResourceConti, BMBF-PEPCAT, DFG-Stencil, DFG-Exzellenzcluster Fuel Science Center, DFG-Floodsearch, DFG-Passe Doble, EU-Grace, EU-Solutions, Norman. Prof. Henner Hollert arbeitet seit über 20 Jahren im Kontext der retrospektiven und prospektiven Ökotoxikologie und Technikfolgenabschätzung. Er hat über 350 internationale peer-reviewed Veröffentlichungen, einen H-Index von 43 und wurde kürzlich von der *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* zum Fellow ernannt und hat 2019 den europäischen Preis für seine Lehre im Bereich der Umweltforschung erhalten

Das LuFI hat einen starken Forschungsschwerpunkt und eine lange Tradition im Küsteningenieurwesen einschließlich des Integrierten Küstenzonenmanagements (IKZM), der Modellierung von Offshore- und Küstenprozessen in BMBF- und BMU-Projekten (z. B. BMWi-GIGAWIND, BMU-OOMU, BMBF-Last-Mile Evacuation, BMBF-GITEWS, BMWF-Delight, BMBF-TwinSea, BMBF-Condike), sowie die Auswirkungen von wellen- und gezeitenströmungsinduzierten Prozessen auf Küstenstrukturen und morphodynamische Prozesse in kleinen und großen Skalen unter Klimaprojektionen. Prof. Schlurmann verfügt

über mehr als 15 Jahre Erfahrung, auch im Zusammenhang mit den Vereinten Nationen, mit mehr als 50 Publikationen in der angewandten Küstenforschung und Risikoanalyse.

Das Institut für Wasserbau (IWB) der TUHH weist ein starkes Forschungsprofil im Wasserbau und in der hydrodynamisch-numerischen Modellierung von Wellen, Seegang, Strömungen und Sedimenttransport für Küsten- und Binnengewässer auf. Außerdem kann das IWB auf eine breite Expertise im Entwurf und der Bemessung von Strukturen im (Küsten-)Wasserbau zurückgreifen. Hier spielen die Effekte des Klimawandels auf die Hydrodynamik, den Sedimenttransport und letztendlich auf die Beanspruchung von Bauwerken eine entscheidende Rolle in der Forschung des IWB. Dies wird durch die Ergebnisse aus einer Breite an nationalen sowie internationalen Forschungsprojekten (z. B. KLIMZUG-Nord, RAdOst, PEARL etc.) und der Beteiligung des Instituts in CliCCS unterstrichen. Des Weiteren hat das IWB der TUHH durch die Beteiligung an Projekten wie dem H2020 Projekt RECONNECT oder dem INTERREG Vb Projekt FAIR in der Forschung einen starken Fokus auf Nature-based Solutions (NbS) und Grüne Infrastruktur (GI) sowie die Unterhaltung und das Management von wasserbaulicher Infrastruktur mit einem Schwerpunkt auf Hochwasserschutzanlagen gelegt.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das EcoDike-Projekt ist in sechs Arbeitspakete unterteilt, deren enge Wechselbeziehungen im nachfolgenden Organigramm dargestellt sind.

Teilprojekt 1 (federführender Partner: fwu) befasste sich mit der Hydro- und Morphodynamik am grünen Seedeich. Dazu wurde der aktuelle Wissensstand zur Wirkung von Vegetation auf dem Deichvorland in Bezug auf die Hydro- und Morphodynamik aus der Literatur zusammengetragen und ausgewertet. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden mit numerischen Simulationen verglichen und ein initiales Beobachtungskollektiv erstellt. Darauf aufbauend wurden statistische Analysen des Wellenverhaltens über Vegetationsfeldern mittels Regressionsmodell und Entscheidungsbaumansatz durchgeführt, mit dem Ziel der Abschätzung der Wellendämpfung durch Vegetation.

In Teilprojekt 2 (federführender Partner: UR) sollten Pflanzenarten identifiziert werden, die Alternativen zu den bislang genutzten Arten darstellen. Dazu wurde zunächst eine Inventur bestehender Untersuchungen auf Deichen und benachbarten Ökosystemen durchgeführt. Die so entstandene Datenbank wurde durch eigene Datenerhebungen auf Nordseedeichen ergänzt. Mit Hilfe von multivariater Statistik wurden auf Basis von Arteigenschaften Arten identifiziert, die potentiell in Frage kommen könnten. Durch Nutzung von Expertenwissen wurden hieraus Saatgutmischungen erstellt, die in einem Experiment an der UR sowie am IWW und LuFI angebaut und getestet wurden (siehe auch Teilprojekt 3 und 4). An der UR wurden Untersuchungen zur Etablierung der Arten, deren Stickstoff- und Wassernutzung, dem Futterwert, Blühangebot und der Durchwurzelung durchgeführt.

Teilprojekt 3 (federführender Partner: LWI) befasste sich u. a. mit den hydraulischen Einwirkungen am Seedeich (Wellenauflauf, Brandungstau) mit Fokus auf den Prozessen im Deichvorland mit Vegetation (Transmission, Wellendämpfung). Dazu gehörte die Analyse bisheriger Konzepte für Deichsicherheit mit Fokus auf multifunktionale natürliche Lösungen.

Ausgewählte Konzepte wurden schließlich in maßstäblichen Modellexperimenten auf ihre hydraulische Wirksamkeit und strukturelle Integrität unter Welleneinwirkung im Wellenkanal des LWI getestet. Ziel ist die Entwicklung von Richtlinien für den Entwurf grüner Küstendeiche/Deckwerke unter Berücksichtigung von Wellenbelastung, Wellenauflauf, Wellenüberlauf, Überströmung einschließlich Formeln für die Stabilität gegen Wellenbelastung. Bezüglich der Sicherheit des Deichbauwerks selbst wurden am IWW experimentelle Untersuchungen zum Erosionswiderstand der in Teilprojekt 2 definierten Testvegetationen durchgeführt. Hierzu fanden Überströmversuche, Wellendruckschlagsimulationen und Scherfestigkeitsmessungen in Kombination mit Vegetationsanalysen (Deckungsgrad, Wurzelparameter) statt. Am IUF wurden zwei im Deichbau verwendbare Geotextilien hinsichtlich ihres ökotoxikologischen Potenzials untersucht.

Teilprojekt 4 (federführender Partner: LuFI) untersuchte die Unterschiede zwischen den Testvegetationen im Vergleich zur konventionellen Grasmischung in Bezug auf ihre Belastbarkeit durch welleninduzierte Kräfte wie z. B. Druckschlag oder Wellenauflauf. Hierzu wurden zum einen neue Messverfahren entwickelt und zum anderen Methoden aus Teilprojekt 3 übernommen, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen.

In Teilprojekt 5 EcoDike – Instandhaltung (federführender Partner: TUHH) wurde zunächst eine Analyse des Status Quo der Unterhaltungsstrategien und der Unterhaltungsprozesse in den Küstenländern, die für den Hochwasserschutz an der Küste und für den Küstenschutz zuständig sind, durchgeführt. Zudem wurden mittels einer Analyse des Risikos bzw. der Versagenswahrscheinlichkeiten von Deichen mit Bezug zur Unterhaltung und Instandhaltung mögliche Schwachstellen einzelner Elemente von Deichen ermittelt. Hierbei wurde die Qualität der Grasnarbe als wesentliches Kriterium für die Sicherheit von Deichen identifiziert. Darauf aufbauend wurde ein risikobasierter Ansatz zur Bewertung der Sicherheit von Deichen und zur Deichunterhaltung erarbeitet, der unterstützt durch in-situ Tests zur Verbesserung der Objektivierung der Bewertung des Zustands von Deichen beiträgt. Wesentliche Aspekte der in-situ Tests sind die Qualität der Grasnarbe, die Scherfestigkeit sowie die Erosionsstabilität der Grasnarbe.

In Teilprojekt 6 (federführender Partner: IWW) wurde auf Basis der Ergebnisse der Teilprojekte 1-5 ein Handbuch für Planung, Konstruktion, Monitoring und Unterhaltung von ökologisch aufgewerteten Seedeichen und Deckwerken an der deutschen Küste erarbeitet. Dieses ist nach der Veröffentlichung frei erwerblich.

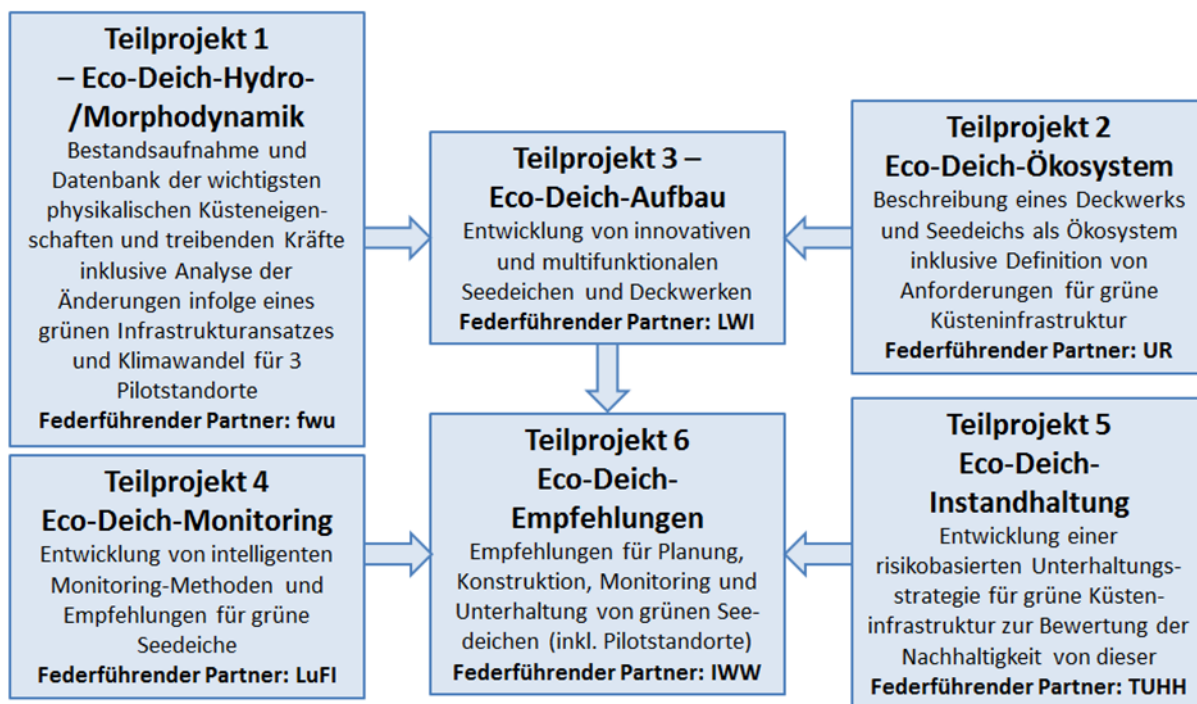


Abbildung 1: Projektstruktur

Basierend auf der interdisziplinären Kooperation von Biologen, Umweltforschern und Ingenieuren und der Kombination von theoretischen Überlegungen, Laboruntersuchungen, klein- und großmaßstäblichen Experimenten sowie Untersuchungen in der Natur wurde ein grundlegend neues Verständnis und eine Wirkungsanalyse des Ökosystems „Deich“ erarbeitet, um hieraus Empfehlungen für ökologisch aufgewertete und ökosystemfördernde Seedeiche aufzustellen. Um diese Ziele zu erreichen, war eine enge interinstitutionelle Zusammenarbeit erforderlich. Zur Koordination der einzelnen Arbeitspakete fanden regelmäßige Projekttreffen statt. Diese sind in der nachfolgenden Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Projektablauf

Projekttermin und Ort	Inhalte des Treffens (Kurzzusammenfassung)	Teilnehmer
11.01.2017, Aachen	Projektstartgespräch: Besprechung der Vorhabenbeschreibung, Arbeitsplanung und des Projektfortschritts	alle projektbeteiligten Institutionen
27.03.2017, Braunschweig	Bilaterales Projektgespräch: Besprechung der geplanten Modellversuche mit Bezug auf die Testvegetationen	IWW, LuFI, LWI, UR
31.05.2017, Hannover	Bilaterales Projektgespräch: Besprechung der geplanten Modellversuche zur Deichsicherheit, Arbeitsplanung	IWW, LWI
19.06.2017, Hamburg	2. Projekttreffen: Austausch zum aktuellen Arbeitsstand und dem geplanten weiteren Vorgehen	alle projektbeteiligten Institutionen
20.06.2017, Hamburg	1. Sitzung der projektbegleitenden Gruppe: Überblick über das Gesamtvorhaben, Vorstellung der Teilprojekte inkl. bisheriger Arbeiten und geplantem weiteren Vorgehen	pbG, alle projektbeteiligten Institutionen

Projekttermin und Ort	Inhalte des Treffens (Kurzzusammenfassung)	Teilnehmer
31.08.2017, Braunschweig	3. Projekttreffen: Besprechung der bisherigen Ergebnisse und dem weiteren Vorgehen. Diskussion offener Fragestellungen	alle projektbeteiligten Institutionen
13.02.2018, Hannover	2. Sitzung der projektbegleitenden Gruppe: Vorstellung des Projektstands und der geplanten weiteren Arbeiten	pbG, alle projektbeteiligten Institutionen
07.05.2018, Bremen	Austausch mit Bremischem Deichverband über das EcoDike und EcoSurvey Projekt. Besichtigung verschiedener intensiv und extensiv unterhaltener Deichabschnitte	Bremischer Deichverband, R. Kesel, EcoDike-Projektteam
27.08.2018, Hannover	4. Projekttreffen: Besprechung der weiteren Ergebnisse der einzelnen Teilprojekte, Zusammenführung von Ergebnissen	alle projektbeteiligten Institutionen
07.11.2018, Hamburg	3. Sitzung der projektbegleitenden Gruppe: Darstellung und Diskussion der aktuellen Ergebnisse aus Modellversuchen und numerischen Simulationen	pbG, alle projektbeteiligten Institutionen
20.03.2019, Hannover	5. Projekttreffen: Austausch zum aktuellen Arbeitsstand und dem geplanten weiteren Vorgehen, Diskussion neuester Ergebnisse	alle projektbeteiligten Institutionen
21.05.2019, Hamburg	4. Sitzung der projektbegleitenden Gruppe: Präsentation und Diskussion der Ergebnisse der Teilprojekte, Abstimmungen bzgl. kostenneutraler Verlängerungen und Abschlussbericht	pbG, alle projektbeteiligten Institutionen

Interne Arbeitstreffen fanden in häufigen und kurzen Zeitabständen statt und sind nicht alle aufgeführt. Diese Treffen dienten der detaillierten Planung der Experimente bzw. numerischen Simulationen, deren Anpassung und Optimierung. Zusätzlich wurden die Datenerfassung und Auswertung abgestimmt.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Der wissenschaftliche und technische Stand, an den angeknüpft wurde, ist im angehängten Fachbericht und in den im Rahmen des Projekts hervorgegangenen Veröffentlichungen detailliert dargestellt.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Grundlage des Projektes war die enge Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern. Die Planung, Konstruktion und Durchführung der physikalischen und numerischen Modellierungen sowie die anschließende Auswertung der gewonnenen Daten und Zusammenführung der Ergebnisse erfolgten im engen Austausch.

Begleitet wurde das EcoDike-Projekt durch eine vom KFKI eingesetzte projektbegleitende Gruppe, deren Mitglieder aus den im KFKI vertretenen Verwaltungen kommen. Diese hat eine Beratungsfunktion und dient dem unmittelbaren Austausch zwischen Wissenschaft und Praxis. Im Fall des EcoDike-Projektes bestand die projektbegleitende Gruppe aus folgenden Mitgliedern:

- Herr Prof. hon. Frank Thorenz (Forschungsleiter KFKI; NLWKN, Norden-Norderney)
- Frau Anika Rühl (Der Senator für Umwelt, Bau und Verkehr Bremen)
- Frau Dr. Gabriele Gönnert (LSBG)
- Frau Friederike Kundy (LKN.SH)
- Frau Kathrin Schmitt (bfg)
- Frau Monique Busse (Der Senator für Umwelt, Bau und Verkehr Bremen)
- Herr Michael Schaper (LSBG)

Neben den Mitgliedern der projektbegleitenden Gruppe, insbesondere Frau Kundy und Herrn Thorenz, waren vor allem Herr Johann Oldewurtel (Deichacht Norden) sowie Herr Wolfgang Jensen und Frau Angelika Strahl (Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz) bei der Auswahl von Flächen für Vegetationsaufnahmen sowie weitere Messungen in der Natur behilflich.

Weiterhin fand ein Wissensaustausch mit dem Institut für Wasserbau der TH Nürnberg unter Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Carstensen und dem bremischen Deichverband am rechten Weserufer statt. Letzterer teilte seine Erfahrungen mit der extensiven und intensiven Unterhaltung von Deichen und die Ergebnisse der zugehörigen Untersuchungen des EcoSurvey-Projektes.

Ein spezieller Dank richtet sich an Dr. Iris Möller und Dr. Ben Evans sowie das gesamte Projektteam des Projekts Foreshore Assessment using Space Technology (FAST) für die großzügige Bereitstellung unveröffentlichter Daten und die wertvolle Kommunikation (TP1).

Bei der Planung des Experiments an der UR (TP2) war Herr Dr.-Ing. Stefan Cantré von der Professur Geotechnik und Küstenwasserbau sehr behilflich. Der Versuchsdeich wurde von der Firma BMR Tiefbau GmbH, Erdbau, Kanalbau und Straßenbau unentgeltlich gebaut, der wir an dieser Stelle noch einmal ausdrücklich danken.

Seitens TP3 ist ein herzlicher Dank an Dr. Holger Freund, Institut für Chemie und Biologie des Meeres (ICBM, Uni Oldenburg) zu richten, der bei den Felduntersuchungen zur hydraulischen Wirksamkeit der Salzwiesenvegetation und insbesondere bei den Kartierungen mit seiner Expertise zur Seite stand. Außerdem an Prof. Dr.-Ing. Markus Böhl, Institut für Festkörpermechanik (IFM, TU Braunschweig) für dessen Unterstützung bei den Laboranalysen der biomechanischen Eigenschaften der Salzwiesenvegetation.

Die Überströmversuche am IWW fanden in Kooperation mit Dipl.-Ing. PhD Stefan Felder vom Water Research Laboratory der UNSW Sydney statt, der zusätzliche Messtechnik zur Verfügung stellte und bei der Versuchsdurchführung und Datenanalyse unterstützte.

Gemeinsam mit der Fa. Gewatech und der Bundesanstalt für Gewässerkunde konnten faunistische und ökotoxikologische Untersuchungen (IUF) an verschiedenen Deckwerksprobekörpern am Mittellandkanal durchgeführt werden.

Untersuchungen des LuFI (TP4) wurden durch folgende Institute der Leibniz Universität Hannover durch Bereitstellung von Laboren und Laborgeräten unterstützt:

- Institut für Bodenkunde, Dr. Leopold Sauheitl und Viola Rünzi
- Institut für Geotechnik, Dr. Khalid Abdel-Rahman
- Institut für Technische Chemie, Dr. Frank Stahl
- ZVA - Dezentrale Versuchsanlage im Gartenbau, Herr Oliver Stahlschmidt

Des Weiteren stellte Herr Raimund Kesel von Ecosurvey in Bremen freundlicherweise eine Scherflügelsonde zur Verfügung und Herr Björn Eckardt vom SeaLife Hannover stellte das Salz für die Salzbelastung der Versuchsflächen bereit.

Die Pull-Out Versuche fanden auf Deichflächen in der Leybucht in Kooperation mit Johann Oldewurtel vom Entwässerungsverband Norden und für kontrollierte Sättigungsversuche in Kooperation mit dem Rasenland Pattensen (Herr Albrecht Frhr. Knigge jun.) statt. Zudem gab es einen Erfahrungsaustausch mit Frau Petra Fleischer (BAW) und Dr. Mona Buhme (Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT) aus dem Konsortium Bioshoreline, die zudem Filtertextil für die Deckung des Versuchsdeichs bereitstellten.

Im Rahmen der Analyse der aktuell in Deutschland angewandten Unterhaltungsstrategien und Unterhaltungsprozesse, die durch das IWB der TUHH durchgeführt wurde (TP5), sind Mitarbeiter der folgenden Behörden und Institutionen interviewt worden:

- Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer (Hamburg)
- Bezirksamt Bergedorf (Hamburg)
- Hamburg Port Authority
- Senator für Umwelt, Bau und Verkehr (Bremen)
- Bremischer Deichverband am rechten Weserufer
- Bremischer Deichverband am linken Weserufer
- Bremenports
- Deich- und Hauptsielverband Haseldorfer Marsch (Schleswig-Holstein)
- Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein
- Artlenburger Deichverband (Niedersachsen)
- Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (Betriebsbereiche Stade und Aurich)
- Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Vorpommern
- Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg

Die in-situ Tests und Erprobungen entwickelter Inspektionsmethoden der TUHH fanden in Zusammenarbeit mit dem LSBG in Person von Michael Schaper statt.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendungen und erzielttes Ergebnis im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Deiche stellen eines der wichtigsten Elemente des Küstenschutzes in Deutschland dar. Dabei ist die konstruktive und funktionale Bemessung von Deichen maßgebend für den zuverlässigen Überflutungsschutz der im Hinterland lebenden Menschen und vorhandenen Schutzgüter. Ökologische Aspekte werden bislang zumeist nur über die Minimalisierung oder Kompensierung von ökologischen Eingriffen und die Optimierung der Ressourcennutzung berücksichtigt. Der ökologische Wert des Deichbauwerks selbst wird bei der Planung von Seedeichen nicht direkt einbezogen.

Deiche werden als Erdbauwerke mit seeseitiger und landseitiger Böschung konstruiert. Im Falle von mäßigen hydraulischen Belastungen wird eine dichte Grasnarbe zum Schutz der Deichoberfläche vor Erosion etabliert. Bei höheren Belastungen kommen Deckwerke, z. B. Schüttsteindeckwerke, zum Einsatz. Zur Erhöhung des ökologischen Werts von Seedeichen sind konstruktive Anpassungen denkbar, wie z. B. die Anwendung ökologisch wertvoller Seedeichvegetation oder begrünter Deckwerke. Weiterhin ist die Anwendung von natürlichen oder naturbasierten Lösungen im Vorland, wie z. B. Vorlandvegetation oder naturbasierte Wellenbrecher, von ökologischer Bedeutung und kann zudem die Belastungen auf das Deichbauwerk verringern.

Im Falle von ökologischen Aufwertungen des Deichsystems ist die Deichsicherheit und damit der Überflutungsschutz weiterhin zu gewährleisten. Ziel des EcoDike-Projektes war es daher, die ökologischen Funktionen und Dienstleistungen des Schutzbauwerks „Deich“ aufzuwerten und dabei die technische Funktionalität zu wahren. Hierzu wurde das Deichvorland bzgl. hydrodynamischer und morphodynamischer Aspekte und der Deichkörper bzgl. Deichvegetation, Monitoring, Unterhaltung und Stoffausträgen wissenschaftlich untersucht (Abbildung 2), um schließlich Empfehlungen für ökologisch aufgewertete Seedeiche aufzustellen.

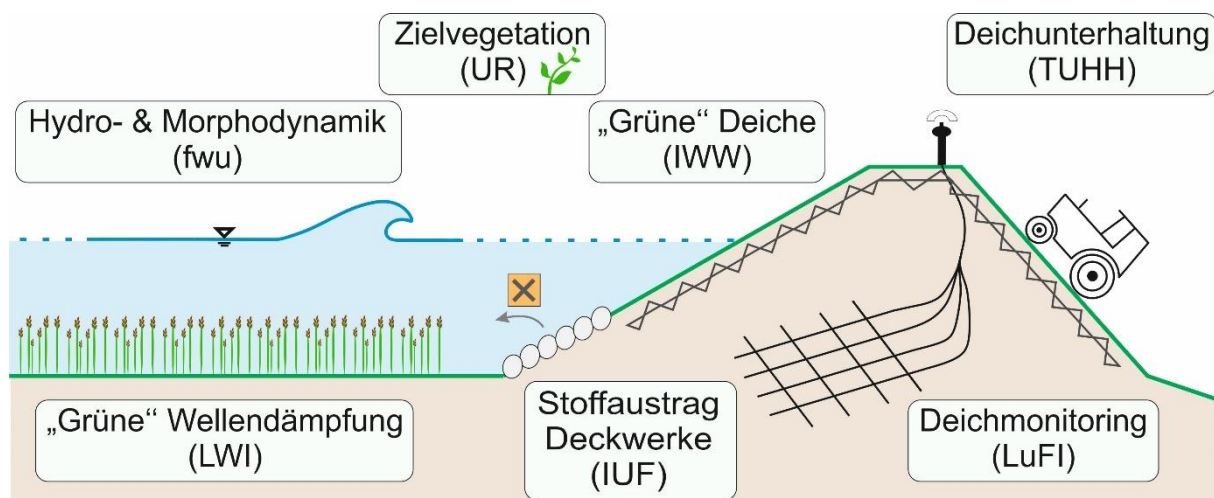


Abbildung 2: Übersicht der behandelten Themen im EcoDike-Projekt

Im Folgenden werden die einzelnen Teilprojekte, deren Zielsetzung, Methodik und Ergebnisse kurz zusammengefasst. Eine ausführliche Darstellung kann dem angehängten Fachbericht entnommen werden.

Teilprojekt 1 (federführender Partner: fwu)

Im Teilprojekt Hydro- und Morphodynamik am grünen Seedeich wird die Auswirkung von Vegetation auf dem Deichvorland auf die Dämpfung von Wellen untersucht, bevor diese den Deich erreichen und belasten. Ziel war es, ein Vorhersagemodell für unterschiedliche Vegetationstypen und Wellenszenarien zu entwickeln, das eine Abschätzung der zu erwartenden Wellendämpfung liefert. Dazu wurden zunächst die bereits bekannten Auswirkungen der Interaktion zwischen Vegetation und Welle aus publizierten Studien zusammengetragen und ausgewertet. Insgesamt konnten hierbei neun verschiedene Parameter identifiziert werden, die als relevant für die Ausprägung der Wellendämpfung erachtet und deshalb weiter betrachtet wurden. Nachfolgend wurde ein dreidimensionales hydrodynamisch numerisches Modell erstellt, in dem einige dieser Parameter systematisch variiert wurden. Damit war es zum einen möglich, Systemverständnis zu entwickeln und die Systemsensitivität und Unsicherheiten abzuschätzen, zum anderen wurde ein initiales Beobachtungskollektiv erstellt. Mit diesem Kollektiv konnte anschließend erstmals eine statistische Analyse durchgeführt und ein Vorhersagemodell zur Abschätzung der Wellendämpfung anhand der betrachteten Parameter entwickelt werden. In vorausgegangenen Untersuchungen war dafür die Verwendung eines multiplen Regressionsmodells für am geeignetsten befunden worden. Ergänzend zum Regressionsmodell konnte eine für die Praxis notwendige größere Flexibilität, insbesondere in Bezug auf die Eingangswerte, durch die Anwendung eines Entscheidungsbaumansatzes gewährleistet werden. Beide Modelle wurden im Projektverlauf kontinuierlich durch Erweiterung des zugrunde liegenden Datenkollektives verbessert. Letztlich bietet der erarbeitete Regressionsansatz durch eindeutige Eingabe- und Ausgabewerte für die zu erwartende Wellendämpfung eine optimale Grundlage für weitergehende Studien zum Prozessverständnis bei der Interaktion von Wellen mit Vegetation. Der Entscheidungsbaumansatz hingegen zielt auf die Anwendung in der Praxis ab. Er bietet die Möglichkeit, Eingangsdaten flexibler in Form von Wertebereichen zu verwenden und gibt eine zu erwartende Dämpfungsklasse als Orientierung für den Nutzen eines Vegetationsfeldes zurück. Durch die Implementierung einer solchen Methodik in Planungsprozesse von Schutzstrategien kann zukünftig ein höheres Schutzniveau und zudem aktiv eine ökologische Aufwertung konventioneller Schutzkörper erreicht werden.

Teilprojekt 2 (federführender Partner: UR)

Ziel des Teilprojekts war es, Zielvegetationen zu definieren, die bei mindestens gleichbleibender Deichsicherheit ökologisch wertvoller als bisherige Vegetationen sind. Hierzu wurden aus Literaturrecherchen, eigenen Vegetationserhebungen auf Deichen, multifaktorieller Auswertung der Daten und Experteneinschätzungen zunächst sechs Testvegetationen entwickelt. Dies waren neben der bisherigen Mischung nach EAK (2002; Testvegetation TV1) eine, in der die Gräser aus TV1 ersetzt waren (TV2: andere Gräser), eine, in der zur TV1 Kräuter und Leguminosen hinzugefügt wurden (TV3: EAK plus Kräuter/Leguminosen), eine Mischung aus TV2 und 3 (TV4: andere Gräser plus

Kräuter/Leguminosen), eine von Kräutern und Leguminosen dominierte eigene Mischung (TV5: eigene Mischung) sowie eine fertig gekaufte kräuterreiche Mischung für lehmige Böden (TV6: gekaufte Mischung). Diese Mischungen wurden im April 2018 auf einem Versuchsdeich mit Ost- und Nordseebereich (unterschiedliche Substrate sowie Salzeintrag über Winter auf der Nordseeseite mittels Sprays und Überströmungssimulation) ausgesät. Die Etablierung der einzelnen TVs war ein wichtiges Kriterium für deren Eignung. Hierzu wurden regelmäßige Erhebungen der Deckungsgrade (insgesamt und einzelner Arten) sowie der Wuchshöhen durchgeführt. Zur Bestimmung des ökologischen Werts wurden neben Artenzahl und funktionaler Diversität das Blühangebot erhoben sowie Proben zur Bestimmung des Futterwerts sowie der isotopischen Signaturen von Kohlenstoff und Stickstoff entnommen. Mit letzteren lassen sich Rückschlüsse auf die Wasserverfügbarkeit für die Vegetation (und damit indirekt die Durchwurzelung) sowie die Stickstofffixierung ziehen. Weiterhin wurde die Triebdichte untersucht. Es zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen Nord- und Ostseesubstrat (deutlich schlechteres Wachstum auf Ostseesubstrat) und zwischen den Testvegetationen. Insbesondere TV5 zeigte eine gute Entwicklung der Deckungsgrade, allerdings bei geringen Triebdichten. TV3 und 4 waren in Bezug auf Triebdichten und insbesondere Deckungsgrade der Vergleichsvegetation TV1 ähnlich. Auch bei diesen Mischungen waren aber das Blühangebot, die funktionale Diversität und die Artenzahl und damit der ökologische Wert höher als bei TV1.

Teilprojekt 3 (federführender Partner: LWI)

Die bisherigen Konzepte für die Erhöhung der Sicherheit gegen Deichbruch und die verschiedenen Typen von Küstendeichen und Deckwerken sowie weitere Lösungen zur Verbesserung der Sicherheit wurden systematisch zusammengestellt und analysiert. Ein besonderes Augenmerk wurde auf multifunktionale natürliche Lösungen gelegt, welche sich leicht an den Klimawandel anpassen lassen. In dieser Auflistung und Analyse wurden die potentiell besten Lösungen für bereits existierende und neue Küstendeiche / Deckwerke berücksichtigt. Dabei wurde zwischen (i) Konzepten / Lösungen zur Reduzierung der Wellenbelastung auf den Deich und (ii) Konzepten/Lösungen zur Erhöhung der Widerstände der einzelnen Bestandteile des gesamten Deichs gegen Wellenüberlauf unterschieden. Die Analyse ermöglichte die Entwicklung neuer Konzepte für grüne Küstendeiche / Deckwerke. Ausgewählte Konzepte wurden in kleinmaßstäblichen Modellexperimenten auf ihre hydraulische Wirksamkeit und strukturelle Integrität unter Wellen- und Strömungsangriff im Wellenkanal des LWI getestet. Das Ziel der systematischen Laborexperimente war die Untersuchung des Einflusses von Vorstrandbewuchs auf die Dämpfung der Wellenenergie, den Wellenaufbau sowie die Wellenbelastung auf Küstenschutzbauwerke. Hierzu wurde unter verschiedenen Wellenbedingungen und Wasserständen der Einfluss von verschiedenen idealisierten Vegetationen auf einem horizontalen Vorstrand auf die hydraulischen Einwirkungen eines Küstenschutzdeiches untersucht. Für (i) die Ermittlung der biomechanischen Eigenschaften, (ii) einer verbesserten Parametrisierung der idealisierten Vorlandvegetation und (iii) der Ermittlung der hydraulischen Wirksamkeit von Salzwiesenvegetation im Allgemeinen sind Feld- und Laboruntersuchungen von Salzwiesenvegetation durchgeführt worden. Dazu wurden im ersten und zweiten Quartal 2019 Zug- und Biegeversuche, die Ermittlung der Wuchshöhen und -dichten sowie Probenentnahmen ausgewählter Arten in der Salzwiese Cäciliengroden am Jadebusen

durchgeführt. Die Proben wurden anschließend im Labor hinsichtlich Biegesteifigkeit und Flächenträgheitsmoment untersucht und artspezifische Steckbriefe mit biomechanischen Parametern erstellt. Die erlangten Erkenntnisse sollten dazu dienen, neue Entwurfsrichtlinien für grüne Küstendeiche und Deckwerke zu entwickeln, wobei unter anderem Wellenbelastung, Wellenauflauf, Wellenüberlauf, Überströmung einschließlich Formeln für die Stabilität gegen Wellenbelastung berücksichtigt werden. Detaillierte Ergebnisse finden sich im Schlussbericht des Teilvorhabens EcoDike-B.

Ziel am IWW war es, die Sicherheit des Deichbauwerks selbst zu untersuchen. Hierzu wurden die in Teilprojekt 2 definierten Testvegetationen in Pflanzcontainern etabliert und der Erosionswiderstand nach einer Vegetationsphase von 6 Monaten mithilfe von physikalischen Modellversuchen getestet. Als Referenzvegetation diente die Standardsaatmischung nach EAK (2002). Anhand von Überströmversuchen, Wellendruckschlagsimulationen und Scherfestigkeitsmessungen konnte der Erosionswiderstand der verschiedenen Vegetationen untersucht werden. Vegetationsanalysen, u. a. Deckungsgrad und Wurzelndichte, erlaubten eine Korrelation des hydraulischen Widerstands mit Vegetationsparametern.

Ziel des IUF war es, etwaige für den Deichbau verwendete künstliche Materialien hinsichtlich ihres ökotoxikologischen Potenzials zu untersuchen und ihren Einsatz für ökologische Deichdeckwerke zu bewerten. Für die am IWW durchgeführten Überstromversuche kamen zwei unterschiedliche Geotextilien zur Stabilisierung der Pflanzenvegetation zum Einsatz, welche anschließend hinsichtlich nachteiliger Effekte gegenüber verschiedenen biologischen Endpunkten untersucht wurden. Durch vorherige Auslaugversuche mit simuliertem Wellenschlag und die Herstellung von Extrakten mit Lösungsmittel konnte unterschieden werden zwischen dem aktuell bioverfügbaren Schädigungspotenzial ausgelaugter Schadstoffe und den potenziellen Effekten in einem Worst-case-Szenario.

Teilprojekt 4 (federführender Partner: LuFI)

Ziel dieses Teilprojekts war die Bewertung der Testvegetationen hinsichtlich ihrer Widerstandskraft gegenüber Wellenbelastung und die Entwicklung geeigneter Methoden zur quantitativen Erfassung dieser Widerstandskraft. Hierzu wurden die in Teilprojekt 2 definierten Testvegetationen auf einem Modelldeich im Außenwellenbecken des LuFI etabliert und für vergleichende Studien unterschiedlich stark mit Wellen belastet. Um die Widerstandskraft hinreichend zu quantifizieren, wurde ein Auszugsversuch entwickelt, der die Widerstandskraft gegen Ziehen senkrecht zur Grasnarbe misst. Dieser wurde sowohl auf homogenen Rasenflächen als auch in situ auf gut etablierten grünen Deckwerken getestet und für die Untersuchung der Testvegetationen auf dem Modelldeich verwendet. Parallele Analysen von biologischen und biomechanischen Parametern erlaubten ferner die Ermittlung von Wirkzusammenhängen zwischen Vegetationsarten, ihrem Entwicklungsstadium und ihrer Widerstandskraft.

Teilprojekt 5 (federführender Partner: TUHH)

Im Rahmen von Teilprojekt 5 war es das Ziel des Instituts für Wasserbau der TUHH die Deichunterhaltung zu untersuchen und bestehende sowie neue Methoden in einem risikobasierten Unterhaltungsansatz zusammenzuführen. Um die Unterhaltungsprozesse und -strategien grüner Deiche weiterzuentwickeln, bedurfte es zunächst einer Analyse des Status

Quo. Hierzu wurden mittels Experteninterviews mit Mitarbeitern der für die Unterhaltung zuständigen Behörden und Institutionen die aktuell in den deutschen Küstenbundesländern angewandten Unterhaltungsstrategien und Unterhaltungsprozesse ermittelt und analysiert. Des Weiteren wurden mit Bezug zur Deichunterhaltung und -instandhaltung mittels einer Analyse des Risikos bzw. einer Analyse der Versagenswahrscheinlichkeit von Deichen mögliche Schwachstellen einzelner Elemente im Deich ermittelt. Die Qualität der Grasnarbe wurde als wesentliches Kriterium für die Deichsicherheit identifiziert. Darauf aufbauend wurde ein risikobasierter Ansatz zur Bewertung der Sicherheit von Deichen im Zuge der Deichunterhaltung entwickelt. Dieser Ansatz wird durch am IWB konzipierte in-situ Tests zur Verbesserung und Objektivierung der Bewertung von Deichen, die in der Regel im Rahmen von Inspektionen bzw. Deichschauungen erfolgt, unterstützt. Mittels einfacher Untersuchungsmethoden und -routinen sowie teils selbst entwickelten Testgeräten wurden die optische Grasnarbenqualität (Bedeckungsgrad und Fehlstellengröße), Risse und Wühltierschäden, die Scherfestigkeit sowie die Erosionsstabilität gegen Schubspannungen aus Überströmen betrachtet. Zur Objektivierung der Zustandsbewertung bzw. der einheitlichen Klassifizierung sind Bewertungsschemata für die betrachteten Parameter entwickelt worden. Durch verschiedene Feldversuche zur Erprobung der Tests und Methoden konnten erste Zusammenhänge zwischen optisch bewerteter Grasnarbenqualität und Erosionsstabilität der Grasnarbe erkannt werden.

Teilprojekt 6 (federführender Partner: IWW)

Auf Basis der Ergebnisse der Teilprojekte 1–5 wurde ein Handbuch für Planung, Konstruktion, Monitoring und Unterhaltung von ökologisch aufgewertete Seedeichen und Deckwerken an der deutschen Küste erarbeitet. Dieses ist nach der Veröffentlichung frei erwerblich.

2.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis wird separat übermittelt.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Folgen des Klimawandels, insbesondere steigende Meeresspiegel, sowie alternde Infrastruktur und daraus resultierende steigende Unterhaltungskosten machen Anpassungen des Küstenschutzes unabdingbar (Hinkel et al., 2014; Sutton-Grier et al., 2018). Das gleichzeitig allgemein steigende Umweltbewusstsein erfordert zudem umweltfreundliche oder sogar umweltfördernde, innovative Küstenschutzmaßnahmen (de Vriend, 2014; Temmerman et al., 2013).

Zum Schutz der in küstennahen Gebieten lebenden Bevölkerung und ihrer Güter haben sich an der deutschen Nord- und Ostseeküste Seedeiche bewährt. Diese bilden eine Barriere zwischen Land und Meer und schützen so das Hinterland vor Überflutungen. Die Bemessung und Konstruktion von Seedeichen erfolgt gemäß gängigen Empfehlungen, z. B. dem International Levee Handbook (CIRIA, 2013) oder der EAK (2002), und der Küstenschutzpläne der jeweiligen Bundesländer. Bei der Bemessung werden die hydrodynamischen Belastungen

sowie die geotechnischen und sonstigen lokalen Randbedingungen berücksichtigt. Ökosystemare Aspekte finden hierbei bislang keine oder nur geringe Beachtung.

Seedeiche fungieren jedoch nicht nur als Küstenschutzelement, sondern stellen auch ein Ökosystem dar, das wertvolle Ökosystemleistungen mit sich bringen kann. Die ökologische Aufwertung von Deichsystemen kann positive Effekte in Hinblick auf die Biodiversität, Nährstoffkreisläufe, Luft- und Wasserreinigung, Ästhetik und kulturelle Aspekte haben. Dabei ist die Funktion des Deiches als Küstenschutzelement jedoch weiterhin von oberster Priorität und die Deichsicherheit zu gewährleisten (Scheres und Schüttrumpf, 2019).

Naturbasierte Küstenschutzlösungen haben in den letzten Jahren mehr und mehr Interesse in der Wissenschaft, Praxis und Gesellschaft geweckt (Pontee et al., 2016; Schoonees et al., 2019). Dabei werden insbesondere der Vorlandvegetation und -fauna nicht nur positive ökologische Effekte, sondern auch gewisse Küstenschutzfunktionen zugeschrieben (Barbier et al., 2011; Gutiérrez et al., 2011; Narayan et al., 2016). So konnten beispielsweise positive hydrodynamische Effekte (Wellendämpfung und -dissipation) und morphologische Effekte (Sedimentfang und -stabilisierung) für Mangrovenwälder, Korallenriffe, Salzwiesen etc. nachgewiesen werden. Aufgrund von immer noch bestehenden Wissenslücken und Unsicherheiten bzgl. der (konstanten) Küstenschutzfunktion sowie der Umsetzung und Unterhaltung stehen Ingenieure jedoch weiterhin vor Herausforderungen bei der Nutzung von Vorlandökosystemen als Küstenschutzelement (Bouma et al., 2014). Für die ökologisch wertvollere Gestaltung des Deichbauwerks selbst gibt es zudem kein ganzheitliches, wissenschaftlich fundiertes Konzept.

Das EcoDike-Projekt hat sich daher zum Ziel gesetzt, Ansätze und Methoden zur ökologischen Aufwertung von Deichsystemen unter Bewahrung der Deichsicherheit zu erarbeiten und wissenschaftlich zu untersuchen, um schlussendlich Empfehlungen für ökologisch aufgewertete Seedeiche zusammenzustellen. Hierbei war eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von Ingenieuren, Biologen und Umweltforschern sowie die Anwendung unterschiedlichster wissenschaftlicher Methoden Grundvoraussetzung und letztlich zielführend.

Die Interaktion von hydrodynamischen Prozessen und Vorlandökosystemen wurde mithilfe von Felduntersuchungen sowie durch numerische und experimentelle Modellierung untersucht und somit die Vorteile der verschiedenen Methoden ausgenutzt. Während Felduntersuchungen und physikalische Modellierungen die untersuchten Prozesse veranschaulichen und erforderlich sind, um Validierungsdaten für die Numerik zu generieren, konnten mit den numerischen Modellierungen kostengünstig und in einer komplett störungsfreien Umgebung weitere Parameterstudien durchgeführt werden. Durch Zusammenführung aller Ergebnisse konnte schließlich der Datensatz zur Bewertung der Küstenschutzfunktion von Vorlandökosystemen erweitert und analysiert werden.

Zur ökologischen Aufwertung des Deichbauwerks selbst kommt unter anderem die Anpassung der gängigen Saatgutmischungen in Frage. Aktuelle Empfehlungen nutzen Gräsermischungen

mit höchstens sehr geringem Kräuteranteil und geringer Diversität. Der ökologische Wert und die Biodiversität der Deichdeckschicht können jedoch durch Verwendung ökologisch wertvollere Vegetation, insbesondere Kräutern und Leguminosen, erhöht werden. Dabei ist weiterhin zwingend der Erosionsschutz der Deckschicht zu gewährleisten. Die Zusammenarbeit von Biologen und Ingenieuren ermöglichte in diesem Zusammenhang die Definition von neuen Testvegetationen (Graunke und Wrage-Mönnig, 2018) und die Untersuchung dieser bezüglich ihres ökologischen Werts, der Etablierung unter Küstenbedingungen und dem Erosionswiderstand (Michalzik et al., 2018, 2019; Scheres et al., 2018). Hierzu wurde eine Reichweite von Methoden, u. a. physikalische Modellversuche, in-situ Tests und Laboranalysen, erforderlich, um sowohl die ökologischen als auch ingenieurtechnischen Anforderungen an eine mögliche Zielvegetation für ökologisch aufgewertete Seedeiche zu untersuchen.

Mit der Anpassung des Deichbauwerks sind weiterhin auch Anpassungen des Monitorings und der Unterhaltung erforderlich. Mithilfe von umfangreichen Experteninterviews konnte der aktuelle Stand der Technik analysiert werden (Jordan et al., 2019) und darauf basierend innovative, an grüne Seedeiche angepasste Methoden zum Monitoring und zur Unterhaltung entwickelt und erprobt werden.

Die Projektbeteiligten haben durch ihre Erfahrung (Numerik, experimentelle Methoden etc.) sowie durch ihre institutionelle Ausstattung (Hardware, Messtechnik und Versuchseinrichtungen, u. a. Wellen- und Strömungskanäle sowie in Deutschland einzigartiges Außenwellenbecken) und die enge Kooperation eine erfolgreiche Abwicklung des Projekts erzielt. Die Untersuchungen des EcoDike-Projekts resultieren in einem grundlegend neuen Verständnis des Ökosystems „Deich“ und ersten Empfehlungen zur ökologischen Aufwertung von Seedeichen unter Bewahrung der Deichsicherheit.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die detaillierten Untersuchungen unter Berücksichtigung von ingenieurtechnischen und ökologischen Gesichtspunkten resultieren in einem grundlegend neuen Verständnis des Ökosystems „Deich“ und vertieften Erkenntnissen zum naturbasierten Küstenschutz und dessen Gestaltung. Die neuen Erkenntnisse liefern sowohl der Wissenschaft als auch der Praxis Einblicke in die Wirkzusammenhänge von Ökologie und Küstenschutz und den Anforderungen an ein ökologisch aufgewertetes Küstenschutzbauwerk. Dies ist Grundlage für die Planung und Weiterentwicklung eines angepassten, umweltverträglichen/-fördernden Küstenschutzes. Die hier erarbeiteten Ergebnisse zur Gestaltung ökologisch aufgewerteter Seedeiche können direkt für die Planung und den Betrieb herangezogen werden, bzw. im Rahmen wissenschaftlicher Arbeiten weiterentwickelt werden.

Die Ergebnisse des EcoDike-Projektes wurden und werden auf Konferenzen und in Veröffentlichungen dargestellt und stehen somit potentiellen Nutzern zur Verfügung. Die

genaue Auflistung der Veröffentlichungen kann Kapitel 2.6 entnommen werden. Potentielle Nutzer der Ergebnisse sind:

- Niedersächsisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
- Amt für ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, Husum
- Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein
- Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer, Freie und Hansestadt Hamburg
- Staatliches Amt für Umwelt und Natur, Rostock; Mecklenburg-Vorpommern
- Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg
- Ingenieurbüros, Hersteller

Bereits während der Projektlaufzeit fand ein intensiver Austausch zwischen interessierten Unternehmen (z. B. HUESKER) und Institutionen (z. B. NLWKN, LKN, LSBG etc.) statt. Ergebnisse des Projekts stehen Ingenieurbüros, Herstellern und öffentlichen Organisationen und Verwaltungen im Rahmen der o.g. Veröffentlichungen zur Verfügung.

Die im EcoDike-Projekt angewandten Methoden und Modelle haben sich zur Beantwortung der Fragestellungen als geeignet herausgestellt und werden an den einzelnen Instituten aktiv weiter genutzt und weiterentwickelt:

- Das erarbeitete Regressionsmodell (TP1) ermöglicht ein wissenschaftlich erweitertes Prozessverständnis der komplexen Wechselwirkung unterschiedlicher Einflussgrößen bei der Dämpfung von Wellen durch Vegetation. Der entwickelte Entscheidungsbaumansatz zur Bestimmung einer Wellendämpfungsklasse kann mit erweiterter Datengrundlage und nach abschließender Validierung zukünftig in der Praxis eingesetzt werden. (fwu)
- Der gebaute Versuchsdeich mit Nord- und Ostseeseite steht für weitere Untersuchungen zur Verfügung. Es bietet sich an, die weitere Vegetationsentwicklung in Folgeprojekten längerfristig zu analysieren, da sich die Zusammensetzung durch Konkurrenz zwischen Arten im dynamischen Gleichgewicht mit der Nutzung weiter verändern wird. (UR)
- Es wurde eine eingehende ingenieurtechnische Parametrisierung von Vorlandvegetation durchgeführt und erstmals das Flächenträgheitsmoment verschiedener Vegetationsarten anhand von Dünnschnitten bestimmt. Ferner wurden Ergebnisse zur hydraulischen Wirksamkeit von Vegetationsfeldern erlangt. Die Ergebnisse stehen in Form von Protokollen für weitere Untersuchungen zur Verfügung. Außerdem wurden Methoden entwickelt / erprobt zur Ermittlung biomechanischer Eigenschaften wie (i) Flächenträgheit (mittels Bildanalyse) und (ii) Biegesteifigkeit (mittels Zweipunkt-Biegeversuch) – mit dem Ziel, Vegetationsflächen numerisch und experimentell modellieren zu können. Zusätzlich wurde neuartige dem Zweck angepasste Messtechnik entwickelt: mithilfe der digitalen und automatisierten Feldflügelsonde kann im Feld der Scherwiderstand der Böden ermittelt werden. (LWI)
- Neue und bislang kaum erprobte Messtechnik, z. B. Taschenscherfestigkeitsmesser bei bewachsenem Untergrund und die Messung der Fließgeschwindigkeit und

Reinwassertiefe mittels Void Fraction Measurement System (VFMS), wurden im EcoDike-Projekt getestet und fachfremde Analysen, z. B. Wurzelanalysen, eingeführt. Bewährte Methoden werden auch zukünftig weiter eingesetzt und weiterentwickelt. Details zur Messtechnik sind in den jeweiligen Veröffentlichungen zu finden. (IWW)

- Entwicklung eines Extraktionsverfahrens von Geotextilien im Pressurized Liquid Extraktion (PLE) System. Weiterentwicklung von Auslaugversuchen unter Berücksichtigung von Wellenschlag. Erste ökotoxikologische Daten der eingesetzten Geotextilien der Firma Hüsker bezüglich teratogener Effekte und Verhaltenseffekte auf Fische und mutagenes Potenzial *in vitro*. Ermittlung ökotoxikologischer Effekte unter realistischen Expositionsbedingungen (Berücksichtigung der Bioverfügbarkeit und simuliertem Wellenschlag). Vergleiche des maximalen Schädigungspotenzials eingesetzter Geotextilien und ihrem Schädigungspotenzials unter realistischen Expositionsbedingungen. (IUF)
- Der entwickelte Auszugsversuch verbessert die Bewertung der Widerstandskraft von grünen Deckwerken maßgeblich. Die zugehörige Messeinrichtung sowie Nutzungsprotokolle und Auswerteroutinen stehen für weitere Untersuchungen zur Verfügung. (LuFI)
- Der Modelldeich im Außenwellenbecken wurde über die letzten Probenahmen im Projekt hinaus gepflegt und kann für weitere Untersuchungen genutzt werden. Die Steuerung der Wellenmaschine sowie die verwendeten hydraulischen Parameter liegen als Protokolle vor, so dass vergleichende Studien mit identischen hydraulischen Belastungen möglich sind. (LuFI)
- Durch die Experteninterviews erfolgte erstmals eine umfassende Aufnahme des Status Quo der Deichunterhaltung in Deutschland, welche als Grundlage für Weiterentwicklung und Verbesserung fortlaufend genutzt wird. Neu entwickelte Untersuchungsmethoden und -geräte (z. B. der sog. „Deichelefant“ zur Untersuchung der Erosionsstabilität gegen Überströmen) sowie erarbeitete Bewertungsschemata (z. B. die Grasnarbenmatrix) werden auch in Zukunft eingesetzt und sollen im Rahmen weiterer Arbeiten oder Projekte weiterentwickelt werden. (TUHH)

Weiterhin wurde/wird das neu erlangte Wissen in die Lehre integriert und fließt in neue Forschungsanträge.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Zeitraum des EcoDike-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 des Ergebnisses nach Nr. 6

Die Ergebnisse vom EcoDike-Projekt wurden sowohl in Fachzeitschriften veröffentlicht als auch auf Konferenzen vorgestellt. Im Folgenden sind alle Veröffentlichungen aufgelistet:

Veröffentlichungen in Zeitschriften und Tagungsbänden

Graunke, A.; Müller, J.; Wrage-Mönnig, N. (in Vorbereitung): Improving the ecological value of sea dikes. In: Die Küste.

Graunke, A.; Wrage-Mönnig, N. (2018): Grüne Seedeiche für den Küstenschutz. In: Taube, F.; Grünland und Futterbau/Ökologischer Landbau (Hrsg.): Leistungen von Gras und Klee-Gras auf Acker und Grünland. ISBN 978-3-00-060516-1, S. 95–99

Jordan, P.; Manojlovic N.; Fröhle, P. (2019): Unterhaltung grüner Seedeiche im deutschen Küstenraum - Eine Analyse der existierenden Unterhaltungsstrategien. In: Tagungsband HTG Kongress Lübeck, 11.–13.09.2019. Hafentechnische Gesellschaft e.V., S. 73–83.

Keimer, K.; Schürenkamp, D.; Goseberg, N. (2020): Nature-based flood protection: The efficiency of vegetated foreshores for reducing wave loads on coastal dikes. ICCE Sydney 2020. Abstract accepted.

Keimer, K.; Schürenkamp, D.; Miescke, F.; Goseberg, N. (*in prep.*): Ecosystem services of salt marshes for coastal protection: Laboratory study of hydrodynamic processes on very shallow foreshores at sea dikes using idealized vegetation meadows. Journal of Coastal Engineering.

KiKA (2019): Land unter! Küstenschutz der Zukunft. In: Erde an Zukunft, Folge vom 05.01.2019. <https://www.kika.de/erde-an-zukunft/sendungen/sendung110170.html>.

Kosmalla, V.; Schürenkamp, D.; Keimer, K.; Goseberg, N. (*in prep.*): Ecosystem services of salt marshes for coastal protection: Field study of biostabilizing processes on foreshores at sea dikes. Journal of Coastal Research.

Michalzik, J.; Liebisch, S.; Schlurmann, T. (2018): Development of an Outdoor Wave Basin for Long-Term Model Tests with Real Vegetation for Green Coastal Infrastructures. In: 7th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science (Coastlab18). Santander, Spain, 22.–26.05.2018.

Michalzik, J.; Liebisch, S.; Schlurmann, T. (2018): Effects of Wave Load on the Long-Term Vegetation Development and their Resistance as Grass Revetments on Sea Dikes. In: 36th International Conference on Coastal Engineering (ICCE). Baltimore, Maryland, USA, 30.07.–03.08.2018. doi: 10.9753/icce.v36.waves.87.

Michalzik, J.; Liebisch, S.; Schlurmann, T. (2019): Development of an Outdoor Wave Basin to Conduct Long-Term Model Tests with Real Vegetation for Green Coastal Infrastructures. In: Journal of Marine Science and Engineering 7 (1), S. 18. doi: 10.3390/jmse7010018.

Scheres, B.; Arns, A.; Bisgwa, C.; Deutschmann, B.; Fröhle, P.; Goseberg, N.; Graunke, A.; Hoffmann, T. K.; Hollert, H.; Jensen, J.; Jordan, P.; Keimer, K.; Manojlovic, N.; Michalzik,

- J.; Paul, M.; Schlurmann, T.; Schürenkamp, D.; Soltau, F.; Ulm, M.; Wrage-Mönnig, N.; Schüttrumpf, H. (under review): EcoDike – Grüne Seedeiche und Deckwerke für den Küstenschutz. In: Die Küste.
- Scheres, B.; Graunke, A.; Wrage-Mönnig, N.; Michalzik, J.; Liebisch, S.; Schlurmann, T.; Schüttrumpf, H. (2018): Ökologisch wertvolle Deckschichten für Seedeiche: Stand der Technik, Zielvegetation und aktuelle Untersuchungen. In: 48. Internationales Wasserbau-Symposium Aachen 2018. Aachen, 18.–19.01.2018, S. 1–7.
- Scheres, B.; Graunke, A.; Wrage-Mönnig, N.; Schüttrumpf, H. (2018): Full-Scale Model Tests on the Erosion Resistance of Ecologically Valuable Sea Dike Vegetation. In: The 9th Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering: CGJoint 2018. Tainan, Taiwan, 11.–17.11.2018, S. 329–337.
- Scheres, B.; Schüttrumpf, H. (2017): Conception of Ecologically Valuable Sea Dike Systems. In: Mediterranean Coastal Foundation (Hg.): The Thirteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation. MEDCOAST 17. Mellieha, Malta, 31.10.–04.11.2017, S. 893–904.
- Scheres, B.; Schüttrumpf, H. (2018): Deiche ökologisch wertvoll gestalten. In: Wasser und Abfall (20), S. 64–67.
- Scheres, B.; Schüttrumpf, H. (2019): Enhancing the Ecological Value of Sea Dikes. In: Water 11 (8), S.1617. doi: 10.3390/w11081617.
- Scheres, B.; Schüttrumpf, H. (2019): Erosion Resistance of Ecologically Valuable Sea Dike Vegetation – Results of Wave Impact and Overflow Model Tests. In: Proceedings of the 9th Short Course/Conference on Applied Coastal Research (SCACR). Bari, Italy. ISBN: 978-88-97181-73-6.
- Scheres, B.; Schüttrumpf, H. (2019): Nature-Based Solutions in Coastal Research - A New Challenge for Coastal Engineers? In: APAC 2019; Trung Viet, N.; Xiping, D.; Thanh Tung, T. (Eds.): Springer Singapore: Singapore, S. 1383–1389, ISBN 978-981-15-0290-3.
- Scheres, B.; Schüttrumpf, H.; Felder, S. (2020): Flow Resistance and Energy Dissipation in Supercritical Air-Water Flows Down Vegetated Chutes. In: Water Resources Research 56 (2). doi: 10.1029/2019WR026686.
- Schoonees, T.; Gijón Mancheño, A.; Scheres, B.; Bouma, T. J.; Silva, R.; Schlurmann, T.; Schüttrumpf, H. (2019): Hard structures for coastal protection, towards greener designs. In: Estuaries and Coasts 21 (7), S. 755. doi: 10.1007/s12237-019-00551-z.
- Schröder, T. (2018): Die Natur als Bollwerk gegen die Wassermassen. In: Süddeutsche Zeitung. 07.01.2018.
- Schüttrumpf, H.; Scheres, B. (2019): Bäume auf Deichen und Dämmen – Von den wasserbaulichen Grundlagen bis zum Stand der Wissenschaft. In: D. Dujesiefken (Hg.): Jahrbuch der Baumpflege 2019, Bd. 23. Braunschweig, Germany: Haymarket Media, S. 30–39.

- Schüttrumpf, H.; Scheres, B.; Ulm, M.; Arns, A.; Jensen, J.; Graunke, A.; Wrage-Mönnig, N.; Bonakdar, L.; Strusinska-Correia, A.; Brühl, M.; Deutschmann, B. et al. (2018): EcoDike (03FO757 A-F): Grüne Seedeiche und Deckwerke für den Küstenschutz - Projektvorhaben und -synthese. In: KFKI aktuell (17), S. 11–12.
- Soltau, F.; Arns, A.; Jensen, J. (2018): Simulation der Wellendämpfung durch Vegetation auf dem Deichvorland mittels Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). In: Lehmann, B., Schmalz, B. (Hg.): 20. Treffen junger WissenschaftlerInnen deutschsprachiger Wasserbauinstitute (JuWi-Treffen), Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Darmstadt, Heft 156, S. 144–149, <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/7817/>
- Soltau, F.; Arns, A.; Ulm, M.; Jensen, J. (2019): Classifying wave attenuation by vegetation using a decision tree model. In: Goseberg, N., Schlurmann, T. (Hg.): Coastal Structures 2019. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 1021–1026. https://doi.org/10.18451/978-3-939230-64-9_102.
- Soltau, F.; Arns, A.; Ulm, M.; Wieland, J.; Jensen, J. (2017): Numerische Simulation der Wellenbelastung am Deich mit Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). In: Jensen, J. (Hg.): 19. Treffen junger WissenschaftlerInnen deutschsprachiger Wasserbauinstitute (JuWi-Treffen). Siegen (Mitteilungen des Forschungsinstituts Wasser und Umwelt der Universität Siegen, 10), S. 9–12.
- Wrage-Mönnig, N.; Graunke, A. (2018): EcoDike (03FO757 D): Vegetation für naturnahe Deiche und Deckwerke. In: KFKI aktuell (17), S. 12–13.

Geplante Dissertationen

- Graunke, A. (in Bearbeitung): Titel noch festzulegen. Dissertation, Universität Rostock, Rostock.
- Scheres, B. (in Bearbeitung): Titel noch festzulegen. Dissertation, RWTH Aachen University, Aachen.

Poster

- Keimer, K.; Schürenkamp, D.; Goseberg, N. (2019): Ökosystemdienstleistungen für den Küstenschutz – Experimentelle Untersuchungen zur Reduktion der Wellenbelastung von Seedeichen durch Salzwiesen. KüNO Abschlusstagung 2019. Hamburg, 30.10.2019.
- Scheres, B.; Ulm, M.; Arns, A.; Jensen, J.; Graunke, A.; Wrage-Mönnig, N.; Bonakdar, L.; Strusinska-Correia, A.; Brühl, M.; Deutschmann, B. et al. (2017): EcoDike – Grüne Seedeiche und Deckwerke für den Küstenschutz. KüNO-Jahrestagung 2017. Rostock, 11.10.2017.
- Scheres, B.; Ulm, M.; Soltau, F.; Arns, A.; Jensen, J.; Graunke, A.; Wrage-Mönnig, N.; Schürenkamp, D.; Strusinska-Correia, A.; Brühl, M.; Goseberg, N.; Deutschmann, B. et al.

(2018): EcoDike – Grüne Seedeiche und Deckwerke für den Küstenschutz. KüNO-Jahrestagung 2018. Hannover, 28.08.2018.

Soltau, F.; Ulm, M.; Arns, A.; Möller, I.; Jensen, J. (2019): Estimating wave attenuation by vegetation using regression and decision tree models. European Geosciences Union General Assembly 2019. Wien, Österreich, 11.04.2019.

Vorträge

Graunke, A.; Wrage-Mönnig, N. (2018): Grüne Seedeiche für den Küstenschutz. 62. Jahrestagung der AGGF 2018. Kiel, 30.08.-01.09.2018.

Jordan, P.; Manojlovic N.; Fröhle, P. (2019): Unterhaltung grüner Seedeiche im deutschen Küstenraum - Eine Analyse der existierenden Unterhaltungsstrategien. HTG Kongress 2019. Lübeck, 11.-13.09.2019.

Michalzik, J. (2017): Ecodike Teilvorhaben 4 Ecodike Monitoring - Entwicklung innovativer Monitoringverfahren und -empfehlungen für „grüne“ Seedeiche und Deckwerke mittels großskaliger Modellversuche. EcoMeeting. Hannover, 09.-10.03.2017.

Michalzik, J.; Liebisch, S.; Paul, M.; Schlurmann, T. (2019): Grüne Seedeiche für den Küstenschutz – Wechselwirkungen zwischen Wellenbelastung und Entwicklung ökologisch wertvoller Grasdeckwerke. Hydrologisches Gespräch. Husum, 15.03.2019.

Michalzik, J.; Liebisch, S.; Schlurmann, T. (2018): Development of an Outdoor Wave Basin for Long-Term Model Tests with Real Vegetation for Green Coastal Infrastructures. 7th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science (Coastlab18). Santander, Spain, 22-26.05.2018.

Michalzik, J.; Liebisch, S.; Schlurmann, T. (2018): Effects of Wave Load on the Long-Term Vegetation Development and their Resistance as Grass Revetments on Sea Dikes. 36th International Conference on Coastal Engineering (ICCE). Baltimore, Maryland, USA, 30.07.-03.08.2018.

Michalzik, J.; Liebisch, S.; Schlurmann, T. (2018): Einfluss von Wellenbelastung auf die Entwicklung der Widerstandskraft von Grasdeckwerken. CoastDoc. Braunschweig, 27.09.2018.

Scheres, B.; Arns, A.; Bisgwa, C.; Deutschmann, B.; Fröhle, P.; Goseberg, N.; Graunke, A.; Hoffmann, T. K.; Hollert, H.; Jensen, J.; Jordan, P.; Keimer, K.; Manojlovic, N.; Michalzik, J.; Paul, M.; Schlurmann, T.; Schürenkamp, D.; Soltau, F.; Ulm, M.; Wrage-Mönnig, N.; Schüttrumpf, H. (2019): Seedeiche sicher und ökologisch wertvoll gestalten – ein Brückenschlag zwischen Ingenieurwesen und Ökologie. KüNO Abschlusstagung 2019. Hamburg, 30.10.2019.

Scheres, B.; Graunke, A.; Wrage-Mönnig, N.; Michalzik, J.; Liebisch, S.; Schlurmann, T.; Schüttrumpf, H. (2018): Ökologisch wertvolle Deckschichten für Seedeiche: Stand der

- Technik, Zielvegetation und aktuelle Untersuchungen. 48. Internationales Wasserbau-Symposium Aachen 2018. Aachen, 18.-19.01.2018.
- Scheres, B.; Graunke, A.; Wrage-Mönnig, N.; Schüttrumpf, H. (2018): Full-Scale Model Tests on the Erosion Resistance of Ecologically Valuable Sea Dike Vegetation. 9th Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering (CGJoint 2018). Tainan, Taiwan, 11.-17.11.2018.
- Scheres, B.; Schüttrumpf, H. (2017): Conception of Ecologically Valuable Sea Dike Systems. The Thirteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation (MEDCOAST 17). Mellieha, Malta, 31.10.-04.11.2017.
- Scheres, B.; Schüttrumpf, H. (2019): Erosion Resistance of Ecologically Valuable Sea Dike Vegetation – Results of Wave Impact and Overflow Model Tests. SCACR 2019 – International Short Course/Conference on Applied Coastal Research. Bari, Italien, 09.-11.09.2019.
- Scheres, B.; Schüttrumpf, H. (2019): Nature-based Solutions im Küstenschutz – Herausforderungen für Wissenschaft und Praxis. 2. HTG-Forum Wissenschaft. Hamburg, 08.05.2019.
- Scheres, B.; Schüttrumpf, H. (2019): EcoDike - Grüne Seedeiche und Deckwerke für den Küstenschutz. 14. Master Class Course Conference "Renewable Energies". Eberswalde, 02.-06.12.2019.
- Scheres, B.; Schüttrumpf, H.; Ulm, M.; Arns, A.; Jensen, J.; Graunke, A.; Wrage-Mönnig, N.; Bonakdar, L.; Strusinska-Correia, A.; Brühl, M.; Deutschmann, B. et al. (2018): Grüne Seedeiche und Deckwerke für den Küstenschutz – Projektvorhaben und -synthese. 22. KFKI Seminar 2017. Bremerhaven, 22.11.2017.
- Scheres, B.; Schüttrumpf, H.; Ulm, M.; Arns, A.; Jensen, J.; Graunke, A.; Wrage-Mönnig, N.; Bonakdar, L.; Strusinska-Correia, A.; Brühl, M.; Deutschmann, B. et al. (2017): EcoDike – Grüne Seedeiche und Deckwerke für den Küstenschutz. KüNO-Jahrestagung 2017. Rostock, 11.10.2017.
- Schürenkamp, D.; Kosmalla, V.; Goseberg, N. (2019): Untersuchung ökohydraulischer Prozesse für ökosystemfördernden Küstenschutz. Hydrologisches Gespräch. Husum, 15.03.2019.
- Schürenkamp, D.; Paul, M.; Jordan, P.; Keimer, K.; Soltau, A.; Bisgwa, C.; Deutschmann, B.; Fröhle, P.; Goseberg, N.; Graunke, A.; Hoffmann, T. K.; Hollert, H.; Jensen, J.; Manojlovic, N.; Michalzik, J.; Scheres, B.; Schlurmann, H.; Schüttrumpf, H.; Ulm, M.; Wrage-Mönnig, N. (2019): EcoDike – Zur ökologischen Aufwertung von See- und Ästuardeichen an der deutschen Küste. 24. KFKI-Seminar 2019. Hamburg, 21.11.2019.
- Schüttrumpf, H.; Scheres, B. (2019): Bäume auf Deichen und Dämmen – Von den wasserbaulichen Grundlagen bis zum Stand der Wissenschaft. Deutsche Baumpflegetage 2019. Augsburg, 07.-09.05.2019.

- Schüttrumpf, H.; Scheres, B. (2019): Nature-Based Solutions in Coastal Research - A New Challenge for Coastal Engineers? 10th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC 2019). Hanoi, Vietnam, 25.-28.09.2019.
- Schüttrumpf, H.; Scheres, B.; Ulm, M.; Soltau, F.; Arns, A.; Jensen, J.; Graunke, A.; Wrage-Mönnig, N.; Schürenkamp, D.; Strusinska-Correia, A.; Brühl, M.; Goseberg, N.; Deutschmann, B. et al. (2018): EcoDike – Grüne Seedeiche und Deckwerke für den Küstenschutz. KüNO-Jahrestagung 2018. Hannover, 28.08.2018.
- Soltau, F.; Arns, A.; Jensen, J. (2018): Simulation der Wellendämpfung durch Vegetation auf dem Deichvorland mittels Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). 20. Treffen junger WissenschaftlerInnen deutschsprachiger Wasserbauinstitute (JuWi-Treffen). Darmstadt, 29.-31.08.2018.
- Soltau, F.; Arns, A.; Ulm, M.; Jensen, J. (2019): Classifying wave attenuation by vegetation using a decision tree model. Coastal Structures Conference 2019. Hannover, 30.09.-02.10.2019.
- Soltau, F.; Arns, A.; Ulm, M.; Wieland, J.; Jensen, J. (2017): Numerische Simulation der Wellenbelastung am Deich mit Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). 19. Treffen junger WissenschaftlerInnen deutschsprachiger Wasserbauinstitute (JuWi-Treffen). Siegen, 23.-25.08.2017.
- Wrage-Mönnig, N.; Graunke, A. (2018): Vegetation für naturnahe Deiche und Deckwerke. 22. KFKI Seminar 2017. Bremerhaven, 22.11.2017.

3 Literaturverzeichnis

- Barbier, E. B.; Hacker, S. D.; Kennedy, C.; Koch, E. W.; Stier, A. C.; Silliman, B. R. (2011): The value of estuarine and coastal ecosystem services. In: *Ecological Monographs* 81 (2), S. 169–193. DOI: 10.1890/10-1510.1.
- Bouma, T. J.; van Belzen, J.; Balke, T.; Zhu, Z.; Airoldi, L.; Blight, A. J.; Davies, A. J.; Galvan, C.; Hawkins, S. J.; Hoggart, S. P.G.; Lara, J. L. et al. (2014): Identifying knowledge gaps hampering application of intertidal habitats in coastal protection: Opportunities & steps to take. In: *Coastal Engineering* 87, S. 147–157. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2013.11.014.
- CIRIA (2013): *The International Levee Handbook*. London, UK: Construction Industry Research and Information Association (CIRIA) (CIRIA, C731).
- de Vriend, H.J. (2014): Building with Nature: Mainstreaming the Concept. In: Rainer Lehfeldt und Rebekka Kopmann (Hg.): *ICHE 2014. Proceedings of the 11th International Conference on Hydroscience & Engineering*. Hamburg, Germany, 28.09.-02.10.2014, S. 29–36.
- EAK (2002): *Empfehlungen für Küstenschutzwerke. Korrigierte Ausgabe 2002*. In: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) (Hg.): *Die Küste*, Bd. 65. Karlsruhe, Germany: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW).
- Graunke, A.; Wrage-Mönnig, N. (2018): Grüne Seedeiche für den Küstenschutz. In: *Leistungen von Gras und Klee-Gras auf Acker und Grünland*, 62. Jahrestagung der AGGF. Kiel, Deutschland. Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau, *Leistungen von Gras und Klee-Gras auf Acker und Grünland*, S. 95–99. Online verfügbar unter https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/aggf_2018_graunke_wrage_moennig.pdf, zuletzt geprüft am 02.07.2019.
- Gutiérrez, J. L.; Jones, C. G.; Byers, J. E.; Arkema, K. K.; Berkenbusch, K.; Commito, J. A.; Duarte, C. M.; Hacker, S. D.; Lambrinos, J. G.; Hendriks, I. E.; Hogarth, P. J. et al. (2011): Physical ecosystem engineers and the functioning of estuaries and coasts. In: Eric Wolanski und Donald S. McLusky (Hg.): *Treatise on Estuarine and Coastal Science*, Bd. 7. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier/Academic Press, S. 53–81.
- Hinkel, J.; Lincke, D.; Vafeidis, A. T.; Perrette, M.; Nicholls, R. J.; Tol, R. S. J.; Marzeion, B.; Fettweis, X.; Ionescu, C.; Levermann, A. (2014): Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111 (9), S. 3292–3297. DOI: 10.1073/pnas.1222469111.
- Jordan, P.; Manojlovic, N.; Fröhle, P. (2019): Unterhaltung grüner Seedeiche im deutschen Küstenraum - Eine Analyse der existierenden Unterhaltungsstrategien. In: *Tagungsband HTG Kongress Lübeck*, 11.-13.09.2019. Hafentechnische Gesellschaft e.V., S. 73–83.
- Michalzik, J.; Liebisch, S.; Schlurmann, T. (2018): Effects of Wave Load on the Long-Term Vegetation Development and their Resistance as Grass Revetments on Sea Dikes. In: *36th International Conference on Coastal Engineering (ICCE)*. Baltimore, Maryland, USA, 30.07.-03.08.2018.

- Michalzik, J.; Liebisch, S.; Schlurmann, T. (2019): Development of an Outdoor Wave Basin to Conduct Long-Term Model Tests with Real Vegetation for Green Coastal Infrastructures. In: *JMSE* 7 (1), S. 18. DOI: 10.3390/jmse7010018.
- Narayan, S.; Beck, M. W.; Reguero, B. G.; Losada, I. J.; van Wesenbeeck, B.; Pontee, N.; Sanchirico, J. N.; Ingram, J. C.; Lange, G.-M.; Burks-Copes, K. A. (2016): The effectiveness, costs and coastal protection benefits of natural and nature-based defences. In: *PloS one* 11 (5), e0154735. DOI: 10.1371/journal.pone.0154735.
- Pontee, N.; Narayan, S.; Beck, M. W.; Hosking, A. H. (2016): Nature-based solutions. Lessons from around the world. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering* 169 (1), S. 29–36. DOI: 10.1680/jmaen.15.00027.
- Scheres, B.; Graunke, A.; Wrage-Mönnig, N.; Schüttrumpf, H. (2018): Full-scale model tests on the erosion resistance of ecologically valuable sea dike vegetation. In: *Proceedings of the 9th Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering*. Tainan, Taiwan, 11.-17.11.2018, S. 329–337.
- Scheres, B.; Schüttrumpf, H. (2019): Enhancing the ecological value of sea dikes. In: *Water* 11 (8), S. 1617. DOI: 10.3390/w11081617.
- Schoonees, T.; Gijón Mancheño, A.; Scheres, B.; Bouma, T. J.; Silva, R.; Schlurmann, T.; Schüttrumpf, H. (2019): Hard structures for coastal protection, towards greener designs. In: *Estuaries and Coasts* 21 (7), S. 755. DOI: 10.1007/s12237-019-00551-z.
- Sutton-Grier, A. E.; Gittman, R. K.; Arkema, K. K.; Bennett, R. O.; Benoit, J.; Blicht, S.; Burks-Copes, K. A.; Colden, A.; Dausman, A.; DeAngelis, B. M.; Hughes, A. R. et al. (2018): Investing in natural and nature-based infrastructure: building better along our coasts. In: *Sustainability* 10 (2), S. 523. DOI: 10.3390/su10020523.
- Temmerman, S.; Meire, P.; Bouma, T. J.; Herman, P. M. J.; Ysebaert, T.; de Vriend, H. J. (2013): Ecosystem-based coastal defence in the face of global change. In: *Nature* 504 (7478), S. 79–83. DOI: 10.1038/nature12859.

ANHANG

FACHBERICHT

Scheres, B.; Arns, A.; Bisgwa, C.; Deutschmann, B.; Fröhle, P.; Goseberg, N.; Graunke, A.; Hoffmann, T. K.; Hollert, H.; Jensen, J.; Jordan, P.; Keimer, K.; Manojlovic, N.; Michalzik, J.; Paul, M.; Schlurmann, T.; Schürenkamp, D.; Soltau, F.; Ulm, M.; Wrage-Mönnig, N.; Schüttrumpf, H. (under review): EcoDike – Grüne Seedeiche und Deckwerke für den Küstenschutz. In: Die Küste