

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Periodical Part, Published Version

**Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.)**

**Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2019**

BAWForschungskompodium

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107121>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2020): Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2019. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAWForschungskompodium).

**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.

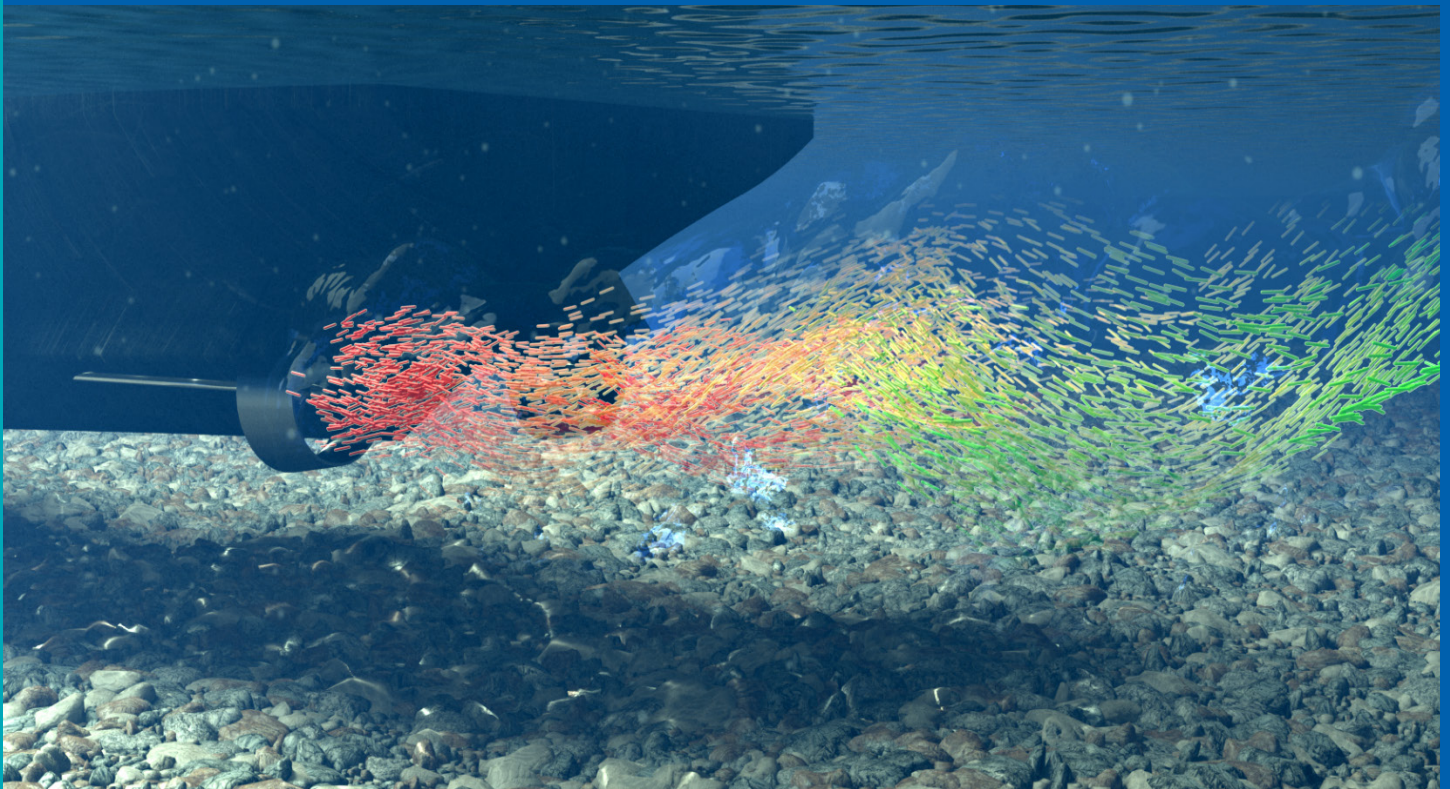
Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply;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



# Forschungskompodium

Verkehrswasserbau

2019



## Impressum

Herausgeber (im Eigenverlag):  
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)  
Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe  
Postfach 21 02 53, 76152 Karlsruhe  
Telefon: +49 (0) 721 97 26-0  
Telefax: +49 (0) 721 97 26-4540  
E-Mail: [info@baw.de](mailto:info@baw.de), [www.baw.de](http://www.baw.de)



Creative Commons BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Soweit nicht anders angegeben, liegen alle Bildrechte bei der BAW.

Karlsruhe · April 2020

# Forschungskompodium

Verkehrswasserbau

## 2019



# Ressortforschung als Teil der deutschen Wissenschaftslandschaft

Liebe Leserin, lieber Leser,

Den Begriff Forschung verbindet die breite Öffentlichkeit in erster Linie mit Universitäten und Hochschulen. Dort wird sicherlich auch der größte Teil der Forschungsleistungen erbracht. Aber die Wissenschaftslandschaft in Deutschland ist erheblich vielfältiger. Eine wichtige Säule ist die Ressortforschung des Bundes, die schwerpunktmäßig von mehr als 40 Bundeseinrichtungen mit Ressortforschungsaufgaben geleistet wird. Ressortforschung bildet eine Brücke zwischen Wissenschaft, Gesellschaft und Politik und dient in erster Linie der Politikberatung der Ministerien. Ressortforschung zielt auf die Gewinnung wissenschaftlicher Erkenntnisse ab, die direkten Bezug zu den Tätigkeitsfeldern der einzelnen Ministerien haben und dort regelmäßig Grundlage für administrative oder politische Entscheidungen sind. Mithin ist Ressortforschung stets problemorientiert und praxisnah und grenzt sich von der Grundlagenforschung klar ab. Weiteres Merkmal der Ressortforschung ist, dass sie sich durch ein hohes Maß an Kontinuität auszeichnet. Die Qualität der Ressortforschung muss sich stets an der Qualität der universitären Forschung messen lassen. Das gilt für die eingesetzten Methoden und Verfahren, für die Forschungsinfrastruktur sowie für die Dokumentation und Präsentation der Forschungsergebnisse.

Die Besonderheit der Ressortforschung in der Bundesanstalt für Wasserbau besteht darin, dass unsere Forschungsleistungen nicht nur der Politikberatung für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur dienen, sondern zugleich auch unsere Projektberatung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes unterstützen. Mit unserer Forschung treffen wir heute die wissenschaftliche Vorsorge, um die anerkannt hohe Qualität unserer Beratungsleistungen auf dem Gebiet des Verkehrswasserbaus auch morgen zu sichern.

Unsere Forschungsthemen sind auf die aktuellen und zukünftig zu erwartenden Fragestellungen, letztere im Sinne einer vorausschauenden Forschung, ausgerichtet. Eng damit verknüpft ist die Antennenfunktion unserer Forschung. Es gilt, neue Entwicklungen, Chancen und Risiken für das Verkehrssystem Schiff/Wasserstraße frühzeitig zu erkennen und rechtzeitig geeignete Handlungsempfehlungen zu entwickeln. Die auf diese Weise gebildete Kompetenz steht direkt für unsere Beratungs- und Unterstützungsleistungen zur Verfügung. In der kurzfristig abrufbaren wissenschaftlichen Kompetenz und der Fähigkeit, langfristig angelegte Fragestellungen kontinuierlich bearbeiten zu können, liegt eine unserer Stärken.

Im Jahr 2019 haben wir mehr als 100 Forschungsvorhaben bearbeitet. Der Anteil von Forschung und Entwicklung an unserer gesamten Arbeitsleistung betrug rund 28 Prozent. Dies entspricht dem Wert der Vorjahre und liegt in dem in der BAW-Strategie 2030 festgelegten Zielkorridor.

Das vorliegende Forschungskompodium 2019 gibt einen vollständigen Überblick über die im Berichtsjahr neu begonnenen, laufenden und abgeschlossenen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben. Wir hoffen, dass Sie bei der Lektüre des Forschungskompodiums den besonderen Reiz der Ressortforschung im Verkehrswasserbau entdecken.

Ihr



Prof. Dr.-Ing. Christoph Heinzelmann  
Leiter der Bundesanstalt für Wasserbau



Dr.-Ing. Jan Kayser  
Forschungsbeauftragter der BAW

Karlsruhe, im April 2020



# Inhalt

Teil I: Allgemeine Angaben zur Forschung der BAW	VII
Teil II: Einzelvorhaben	XI





# Teil I: Allgemeine Angaben zur Forschung der BAW

## 1 Aufgabe der BAW

Angesichts der hohen Erwartungen an die Zuverlässigkeit des Verkehrssystems Schiff/Wasserstraße stellt sich insbesondere die Frage, welche Strategien zu ergreifen sind, um die künftigen Anforderungen der Schifffahrt vor dem Hintergrund der alternden Infrastruktur, gewachsener wasserwirtschaftlicher und ökologischer Anforderungen sowie möglicher klimabedingter Veränderungen sicher, wirtschaftlich und umweltfreundlich zu bewältigen. Neben Sicherheits- und Zuverlässigkeitsaspekten, Maßnahmen zur Bauwerkserhaltung, Fragen der Qualitätssicherung sowie Möglichkeiten der Standardisierung verkehrswasserbaulicher Lösungen werden hierbei einem erweiterten Wasserstraßenmanagement, der Bereitstellung aktueller Informationen mittels moderner Telematiksysteme sowie der Bewertung von Ausbaupotenzialen auf der Basis hoch genauer fahrdynamischer Analysen zentrale Bedeutung zukommen. Als Ressortforschungseinrichtung des Bundes führt die BAW stets angewandte, praxisorientierte Forschung und Entwicklung durch. Dabei sind die Forschungsthemen auf die aktuellen und zukünftig zu erwartenden Fragestellungen, letztere im Sinne einer vorausschauenden Forschung („Vorlauftforschung“), ausgerichtet. Eng damit verknüpft ist die „Antennenfunktion“ der Forschung und Entwicklung der BAW. Dabei gilt es, neue Entwicklungen, Chancen und Risiken für das Verkehrssystem Schiff/Wasserstraße möglichst frühzeitig zu erkennen und rechtzeitig geeignete Handlungsempfehlungen zu entwickeln. Die auf diese Weise gebildete Kompetenz steht direkt für Beratungs- und Unterstützungsleistungen zur Verfügung. In der kurzfristig abrufbaren wissenschaftlichen Kompetenz und der Fähigkeit, langfristig angelegte Fragestellungen kontinuierlich bearbeiten zu können, liegt eine besondere Stärke der BAW.

## 2 Forschungsfelder

Das Forschungsprogramm bildet den mittelfristigen, strategischen Rahmen der BAW-Forschung und gliedert sich auf der obersten Ebene in die drei Forschungsfelder: Infrastruktur, Mobilität und Umwelt. Diese Forschungsfelder werden jeweils durch Themenfelder untersetzt, die wiederum ein oder mehrere Oberthemen umfassen. Die Oberthemen bilden schließlich den Rahmen für die konkreten Forschungsprojekte.

### Infrastruktur

- Zuverlässigkeit der Infrastruktur
- Erhaltung der Infrastruktur
- Wirtschaftlichkeit der Infrastruktur
- Nachhaltiges Sedimentmanagement
- Strombau der Zukunft

### Mobilität

- Schiffssteuerung und Verkehrslenkung
- Anpassungen an den Klimawandel

### Umwelt

- Fischdurchgängigkeit an Wasserstraßen
- Energiewende
- Baubedingte Emissionen und Immissionen
- Technisch-biologische Ufersicherungen

### 3 Forschungscluster

Für die Forschung kann über Finanzmittel aus mehreren Forschungsclustern verfügt werden. Die Finanzmittel stehen für Personal- und Sachausgaben zur Verfügung. Sie werden für Eigenforschung und für Kooperationen mit anderen Wissenschaftseinrichtungen eingesetzt. Die Größenordnung der Finanzmittel wird absehbar konstant bleiben.

#### Finanzierungsarten der BAW im Bereich Forschung und Entwicklung

- Die überwiegende Zahl der FuE-Vorhaben wird aus dem Bundeshaushalt Kapitel 1203 Titelgruppe 02 (**Eigenmittel Forschung**) finanziert.
- Das BMVI-Expertenetzwerk ist ein Forschungsformat in der Ressortforschung. Unter dem Leitmotiv „Wissen – Können – Handeln“ haben sich sieben Ressortforschungseinrichtungen und Fachbehörden des BMVI 2016 zu einem Netzwerk zusammengeschlossen. Die FuE-Vorhaben des Experten-/Forschungsnetzwerks zu Querschnittsthemen im Geschäftsbereich des BMVI werden aus dem Bundeshaushalt Kapitel 1210 Titelgruppe 03 finanziert.
- Beim KFKI handelt es sich um einen Zusammenschluss von Verwaltungen aus Bund und Küstenländern, die in der Küstenforschung tätig sind. Das KFKI verfolgt das Ziel, Naturvorgänge an der Küste zu erfassen und zu prognostizieren. Die Geschäftsstelle des KFKI ist bei der BAW am Standort Hamburg angesiedelt. Die beteiligten Länder sind an der Finanzierung beteiligt.
- Im Rahmen der Forschungsinitiative **mFUND** fördert das BMVI Forschungs- und Entwicklungsprojekte rund um digitale datenbasierte Anwendungen für die Mobilität 4.0. Die Finanzierung der FuE-Vorhaben unterliegt den Regeln des Zuwendungsrechts.
- Außerdem werden eine Reihe von FuE-Vorhaben durch Zuwendungen des BMBF und EU-Fördermittel finanziert, hierbei handelt es sich um die sogenannte Drittmittelforschung.

### 4 Ausgaben und Einnahmen der BAW im Jahr 2019

Personalausgaben:	29.981 T€
Sächliche Verwaltungsausgaben inkl. IT:	18.118 T€
Bauinvestitionen:	351 T€
Investitionen in Geräte und Anlagen inkl. IT:	5.623 T€
<b>Summe Ausgaben:</b>	<b>54.073 T€</b>
<b>Einnahmen:</b>	<b>1.821 T€</b>

### 5 Finanzplanung 1203 Tgr. 02

Angaben in T€

2019 Ist	2020 Soll	2021 Soll	2022 Soll
15.284	11.501	11.954	11.954

davon BAW

2019 Ist	2020 Soll	2021 Soll	2022 Soll
6.557	5.901	5.977	5.977

## 6 Personal

	2017	2018	2019
Beamte	60	59	62
Tarifbeschäftigte	364	372	397
Auszubildende	10	9	11
<b>Beschäftigte gesamt</b>	<b>434</b>	<b>440</b>	<b>470</b>

Neben dem Stammpersonal werden im Bereich Forschung und Entwicklung 45 befristet beschäftigte Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter eingesetzt. Davon sind 9 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter im Rahmen des Expertennetzwerks beschäftigt.

## 7 Anteil Forschung und Entwicklung

	2017	2018	2019
Anteil FuE/externe Produkte	27,4	27,4	28,4

Prozentualer Anteil der für Forschung und Entwicklung aufgewendeten Arbeitszeit, bezogen auf die externen fachlichen Produkte.

## 8 2019 – Daten und Fakten

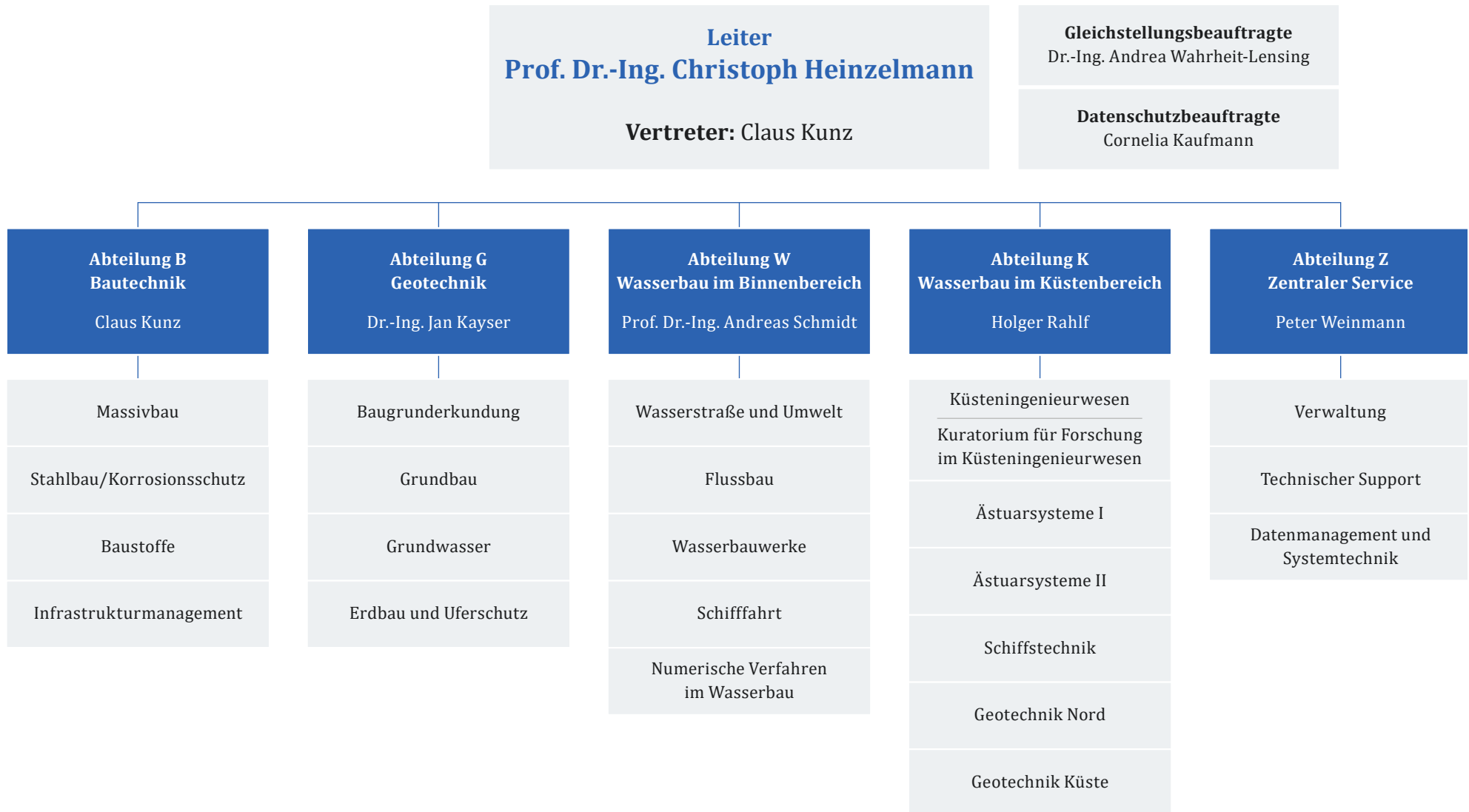
- Tätigkeiten in Ausschüssen: 262
- Promotionen: 2
- Veröffentlichungen und Vorträge: 95
- Lehraufträge: 12
- Forschungsvorhaben: 105
  - Beendet: 10
  - Aktiv: 95
- Veranstaltungen: 14  
(8 Kolloquien und 6 Aussprachetage mit insges. 1.276 Teilnehmern (991/285))

## 9 Forschungsmanagement

Forschung und Entwicklung sind Leitungsaufgabe in der BAW. Die BAW verfügt über ein zentrales und unmittelbar an die Leitung angebundenes Forschungsmanagement. Der Leitung der BAW obliegen insbesondere die strategische Zielbestimmung und Priorisierung. Der Forschungsbeauftragte nimmt übergreifende Koordinierungsaufgaben wahr und berät die Leitung in allen grundsätzlichen Forschungsangelegenheiten. Weiter obliegen ihm die interne Koordinierung der Vorhaben, der zur Verfügung stehenden Haushaltsmittel und die Abstimmung mit dem BMVI. Die von der Leitung ernannte Forschungsreferentin unterstützt den Forschungsbeauftragten in der Wahrnehmung seiner Aufgaben.

Zur abteilungsinternen Koordination des Managements von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben werden von den Abteilungsleitungen Forschungskordinatorinnen und -koordinatoren als Ansprechpersonen benannt. Dabei handelt es sich um wissenschaftliches Personal mit ausgewiesener langjähriger Forschungserfahrung, das die Abteilungsleitungen bei der Steuerung und Organisation der Forschungsaktivitäten in ihrem jeweiligen Fachbereich unterstützt. Darüber hinaus ist die Forschungskoordination bestrebt, die Ergebnisorientierung und Transparenz der Vorhaben zu erhöhen, die Abstimmung und Verzahnung der Vorhaben auch abteilungsübergreifend untereinander zu intensivieren, den internen und externen Wissenstransfer zu verstetigen, die wissenschaftlichen Kooperationen mit nationalen und internationalen Forschungseinrichtungen auszubauen sowie den Zugang zu Fördermöglichkeiten durch Drittmittel zu erleichtern.

## 10 Organigramm der BAW



## Teil II: Einzelvorhaben

### Inhaltsverzeichnis

#### I. Berichte zu abgeschlossenen FuE-Vorhaben in 2019

<b>Titel</b>	<b>Auftragsnummer FuE-Vorhaben</b>	<b>Referat</b>	<b>Forschungs- bereich*</b>	<b>Seite</b>
Sicherheitskonzept für bestehende Wasserbauwerke (SiBeWa)	B3951.00.04.70001	B0	I	3
Verkehrslastmodelle für typische WSV-Brücken	B3951.01.04.70004	B1	I	5
Scherfestigkeit von Beton und Mauerwerk an bestehenden Wasserbauwerken	B3951.03.04.70014	B3	I	7
Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen	B3953.01.04.70004	W1	U	9
Strategien zur Abfluss- und Stauregelung der Wasserstraßen bei extremen Wetterereignissen	B3953.03.04.70005	W3	I	11
Bausteine zur Modellvalidierung aus Naturmessungen	B3955.01.04.70227	K2	U	13
MOSSCO – Modulares System für Schelfmeere und Küsten	B3955.02.04.70224	K2	U	15
EarlyDike – Sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem für Seedeiche	B3955.02.04.70403	K2	I	17
Aufbau eines Deutsche-Bucht-Modells einschließlich der Ästuare Ems, Jade-Weser und Elbe	B3955.03.04.70227	K3	U	19
Bemessung korrodierter Stahlpundwände im Wasserbau	B3952.05.04.10158	K5	I	21

\* I = Infrastruktur, M = Mobilität, U = Umwelt

## II. Berichte zu aktiven FuE-Vorhaben<sup>1</sup>

<b>Titel</b>	<b>Auftragsnummer FuE-Vorhaben</b>	<b>Referat</b>	<b>Forschungs- bereich*</b>	<b>Seite</b>
Reliability Analysis of Existing Hydraulic Structures	B3951.00.04.70002	B0	I	25
Querkrafttragfähigkeit schubunbewehrter Stahlbetonquerschnitte	B3951.01.04.70005	B1	I	27
Numerische Untersuchungen an massiven Wasserbauwerken	B3951.01.04.70006	B1	I	29
Korrosionsschutzuntersuchungen – Vergleich Naturlagerung zu Labortestverfahren	B3951.02.04.70006	B2	I	31
Entwicklung eines Bemessungskonzeptes für den Nachweis der Tragfähigkeit von Schlauchwehrmembranen	B3951.02.04.70007	B2	I	33
Bemessung galvanischer Anoden im Stahlwasserbau	B3951.02.04.70008	B2	I	35
Reparatur bzw. Ersatz von Korrosionsschutzmaßnahmen zum Erhalt des Korrosionsschutzes und der Stahlkonstruktion – Smart Repair	B3951.02.04.70009	B2	I	37
Mikrobiell induzierte Korrosion	B3951.02.04.70010	B2	I	39
Frostwiderstand zementgebundener Baustoffe	B3951.03.04.08099	B3	I	41
Messverfahren Hydratationswärme	B3951.03.04.70004	B3	I	43
Betone für Verkehrswasserbauwerke mit Hydroabrasionsbeanspruchung	B3951.03.04.70008	B3	I	45
Instandsetzung von Schleusenanlagen unter Betrieb (IuB)	B3951.03.04.70011	B3	I	47
Chemischer Angriff auf Gründungselemente	B3951.03.04.70015	B3	I	49
Betonstahlkorrosion im Rissbereich von Verkehrswasserbauwerken	B3951.03.04.70016	B3	I	51
Instandsetzungssysteme aus textilbewehrten Mörteln und Betonen für Wasserbauwerke	B3951.03.04.70017	B3	I	53
Risikoklassifikation von Verkehrswasserbauwerken	B3951.04.04.70002	B4	I	55

<sup>1</sup> (Stand: 01.01.2020)

\* I = Infrastruktur, M = Mobilität, U = Umwelt

<b>Titel</b>	<b>Auftragsnummer FuE-Vorhaben</b>	<b>Referat</b>	<b>Forschungs- bereich*</b>	<b>Seite</b>
Tragfähigkeitskennzahlen für bestehende Konstruktionen	B3951.04.04.70003	B4	I	57
Digitalisierung im Verkehrswasserbau	B3951.04.04.70005	B4	I	59
Resilienz kritischer Verkehrsinfrastrukturen am Beispiel der Wasserstraßen	B3951.04.04.70006	B4	I	61
Ermittlung geotechnischer Parameter aus geophysikalischen Messungen	B3952.01.04.70003	G1	I	63
GeoValML – Das interoperable Austauschformat für boden- und felsmechanische Kennwerte	B3952.01.04.70004	G1	I	65
Böden unter Stoßbelastung	B3952.02.04.10014	G2	I	67
Modellierung der Verformung nichtbindiger Böden unter zyklischer Belastungseinwirkung von Schleusenbauwerken	B3952.02.04.10045	G2	I	69
Ermittlung charakteristischer Kennwerte veränderlich-fester Gesteine unter Berücksichtigung des Porenwasserdrucks	B3952.02.04.70005	G2	I	71
Chemischer Angriff auf geotechnische Elemente	B3952.02.04.70006	G2	I	73
Untersuchung des Bodeneintrags in den Frischbeton von Ortbetonbohrpfählen	B3952.02.04.70007	G2	I	75
Numerik für Boden-Wasser-Wechselwirkung	B3952.00.04.70001	G3	I	77
Hydraulische Wechselwirkungen zwischen Grund- und Oberflächenwasser	B3952.03.04.70002	G3	U	79
Kolmation als Schlüsselgröße der Wechselwirkung Oberflächenwasser – Grundwasser	B3952.03.04.70003	G3	U	81
Interaktion Oberflächenwasser – Grundwasser in den tidebeeinflussten Gebieten der deutschen Nordsee-Ästuare	B3952.03.04.70004	G3	U	83
Chemischer Angriff auf geotechnische Elemente	B3952.03.04.70005	G3	I	85
Hydraulischer Widerstand feinkörniger Böden	B3952.03.04.70006	G3	I	87
Geohydraulische Anisotropie des Untergrunds	B3952.03.04.70007	G3	U	89

\* I = Infrastruktur, M = Mobilität, U = Umwelt



<b>Titel</b>	<b>Auftragsnummer FuE-Vorhaben</b>	<b>Referat</b>	<b>Forschungs- bereich*</b>	<b>Seite</b>
Geohydraulik Schleuse Hessigheim	B3952.03.04.70008	G3	U	91
Bestandsaufnahme vorhandener Deckwerke	B3952.04.04.10006	G4	I	93
Technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen	B3952.04.04.10151	G4	U	95
Filterstabilität grober Gesteinskörnungen	B3952.04.04.70001	G4	I	97
Wellen-induzierte Porenströmungen im Gewässerbett und ihre Auswirkungen auf den Erosionsbeginn	B3952.04.04.70008	G4	I	99
Zuverlässigkeitsbasierte Deckwerksbemessung	B3952.04.04.70009	G4	I	101
Entwicklung definiert abbaubarer Geotextilien zur Anwendung als temporäre Filter in technisch- biologischen Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen	B3952.04.04.70011	G4	U	103
Erosion bindiger Böden	B3952.04.04.70012	G4	I	105
Hydraulische Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen	B3953.01.04.70002	W1	U	107
Ethohydraulische Versuche zur Passierbarkeit des Einstiegs von Fischaufstiegsanlagen	B3953.01.04.70006	W1	U	109
Berücksichtigung zeitabhängiger Strömungsprozesse bei der Beurteilung der Hydraulik von Fischaufstiegsanlagen	B3953.01.04.70008	W1	U	111
Betroffenheitsanalyse und Anpassungsoptionen für Binnenwasserstraßen zur Aufrechterhaltung eines wirtschaftlichen und konkurrenzfähigen Verkehrsträgers	B3953.02.04.70006	W2	M	113
Koordinierte Bewirtschaftung von Staustufenketten	B3953.03.04.70003	W3	I	115
Entwicklung von Verfahrensweisen zur Simulation bewegter Objekte mit OpenFOAM®	B3953.03.04.70004	W3	I	117
Fluid-Struktur-Wechselwirkung im Stahlwasserbau	B3953.03.04.70006	W3	I	119
Aktualisierung der Kriterien für die hydraulische Bemessung von Schleusen	B3953.03.04.70007	W3	I	121
Einwirkung des Propellerstrahls auf die Gewässersohle	B3953.04.04.10038	W4	I	123
Binnenschiffsführungssimulation	B3953.04.04.70003	W4	M	125

\* I = Infrastruktur, M = Mobilität, U = Umwelt

<b>Titel</b>	<b>Auftragsnummer FuE-Vorhaben</b>	<b>Referat</b>	<b>Forschungs- bereich*</b>	<b>Seite</b>
EU-Vorhaben PROMINENT	B3953.04.04.70007	W4	U	127
Fast-Time-Simulation von Binnenschiffen mit FaRAO	B3953.04.04.70008	W4	M	129
HN-Modellierung von Binnenschiffsbelastungen auf Ufer und Sohle	B3953.04.04.70009	W4	M	131
Betroffenheitsanalyse und Anpassungsoptionen für Binnenwasserstraßen zur Aufrechterhaltung eines wirtschaftlichen und konkurrenzfähigen Verkehrsträgers	B3953.04.04.70010	W4	M	133
Minderung verkehrsbedingter stofflicher Belastungen in Luft, Wasser und Boden – Betriebliche und technische Optimierungen in der Binnenschifffahrt	B3953.04.04.70011	W4	U	135
AIS-basierte Bewertung des Schiffsverkehrs	B3953.04.04.70012	W4	M	137
Langfristsimulation in Fließgewässern	B3953.05.04.70004	W5	I	139
Integration von Zuverlässigkeitsanalysen in die hydro- und morphodynamische Modellierung von Binnenwasserstraßen	B3953.05.04.70005	W5	I	141
Implementierung numerischer Verfahren für flussbauliche Fragestellungen in der Entwicklungsumgebung DUNE	B3953.05.04.70006	W5	I	143
IMMERSE	B3955.00.04.70001	K0	I	145
Maßstabseffekte im schiffbaulichen Modellversuch	B3955.01.04.70174	K1	M	147
Schiffshydrodynamik von Seeschiffen	B3955.01.04.70225	K1	M	149
SafeZone: Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs	B3955.01.04.70226	K1	M	151
An- und Ablegemanöver großer Schiffe in der Schiffsführungssimulation	B3955.01.04.70233	K1	M	153
EasyGSH-DB	B3955.02.04.70229	K2	I	155
Sedimenttransport in der Trübungszone von Ästuaren	B3955.02.04.70230	K2	I	157
Integration D-Flow FM	B3955.03.04.70221	K3	M	159
MudEstuary – Die Beeinflussung der Dynamik der Tideästuare durch Flüssigschlick	B3955.03.04.70235	K3	U	161

\* I = Infrastruktur, M = Mobilität, U = Umwelt

<b>Titel</b>	<b>Auftragsnummer FuE-Vorhaben</b>	<b>Referat</b>	<b>Forschungs- bereich*</b>	<b>Seite</b>
BMVI-Expertennetzwerk: Küste	B3955.03.04.70236	K3	I	163
EXTREMENESS-C	B3955.03.04.70237	K3	M	165
BASEWAD – BALancing SEDiment deficits in the WADden Sea	B3955.03.04.70238	K3	U	167
MudEms – Flüssigschlick im Emsästuar	B3955.03.04.70241	K3	I	169
Batteriehybrid-Betrieb Vermessungsboote	B3955.04.04.70001	K4	M	171
Bestimmung der Widerstandsfähigkeit von Deichen	B3952.05.04.70318	K5	I	173
Störung des Baugrundes durch Kampfmittelsondierungen	B3952.05.04.70362	K5	I	175
Festigkeiten nichtbindiger Böden	B3952.05.04.70390	K5	I	177
Rückverankerung mit Stahlrammpfählen	B3952.05.04.70410	K5	I	179
Deckwerksanalyse mit der Diskreten-Elemente-Methode	B3952.06.04.70270	K6	I	181
Bestimmung des Tragverhaltens von offenen Stahlrohrpfählen	B3952.06.04.70378	K6	I	183
Datenmanagement und Qualitätssicherung im Verkehrswasserbau (DMQS) 2.0	B3954.07.04.70006	Z3	I	185

### III. Berichte zu neuen FuE-Vorhaben in 2019

<b>Titel</b>	<b>Auftragsnummer FuE-Vorhaben</b>	<b>Referat</b>	<b>Forschungs- bereich*</b>	<b>Seite</b>
Monitoring für massive Wasserbauwerke	B3951.01.04.70007	B1	I	189
Ermittlung der Systemtragfähigkeit unter Berücksichtigung von Schädigungsgraden an Stahlwasserbauten	B3951.02.04.70011	B2	I	191
Tragfähigkeitsorientierte Bewertung von Bauwerksschäden	B3951.04.04.70008	B4	I	193
Fischabstieg an Wehranlagen – Untersuchungen zur Mehrphasenströmung beim Wehrüberfall	B3953.01.04.70009	W1	U	195

\* I = Infrastruktur, M = Mobilität, U = Umwelt

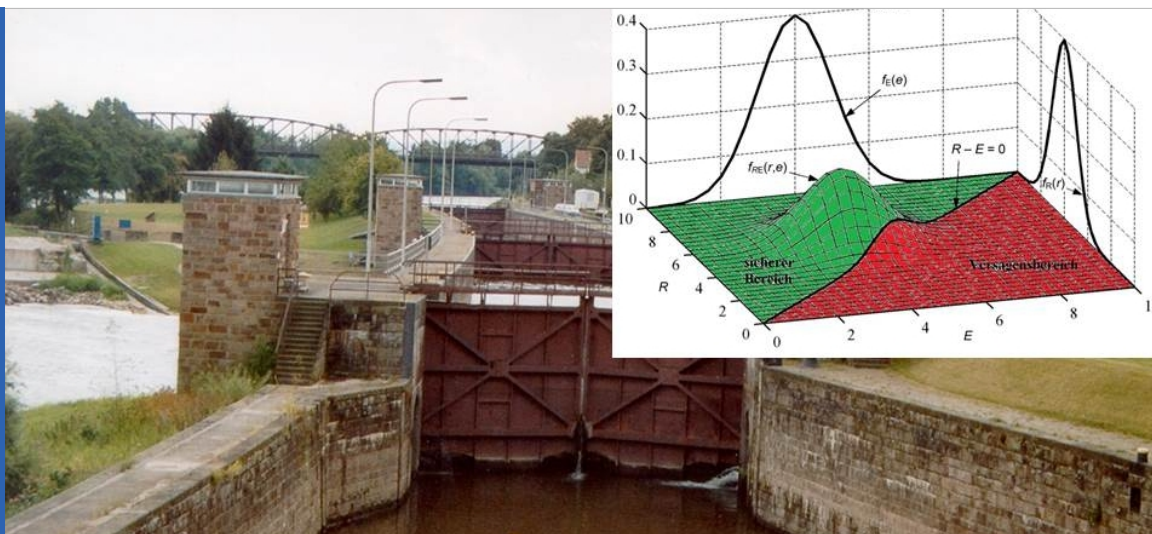
<b>Titel</b>	<b>Auftragsnummer FuE-Vorhaben</b>	<b>Referat</b>	<b>Forschungs- bereich*</b>	<b>Seite</b>
Modellierung aufwärtsgerichteter Fischwanderung im Kraftwerksunterwasser	B3953.01.04.70010	W1	U	197
DANUBIUS-PP – Etablierung einer europäischen Forschungsinfrastruktur zu Fluss-Meer-Systemen	B3953.02.04.70007	W2	U	199
Rauheitswirkung von Vorlandvegetation	B3953.02.04.70008	W2	U	201
Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Modellierung der Strömungen mit freier Oberfläche gekoppelt mit der Umströmung von Schiffen in freifließenden Wasserstraßen	B3953.04.04.70013	W4	M	203
Projekt SCIPPPER	B3953.04.04.70014	W4	M	205
Entwicklung eines Verkehrssimulationsmodells auf Binnenwasserstraßen	B3953.04.04.70015	W4	M	207
Automatisierung in der Binnenschifffahrt	B3953.04.04.70016	W4	M	209
Binnenschiffsemissionen (BinEm)	B3953.04.04.70017	W4	U	211
SMMS – Stratigraphische Modellkomponenten zur Verbesserung von hochaufgelösten und regionalisierten morphodynamischen Simulationsmodellen	B3955.02.04.70233	K2	I	213
Prozessintegration und Performanzsteigerung des biogeochemischen Modells der Tideelbe	B3955.03.04.70239	K3	U	215

\* I = Infrastruktur, M = Mobilität, U = Umwelt



## I. Abgeschlossene FuE-Vorhaben in 2019





## Sicherheitskonzept für bestehende Wasserbauwerke (SiBeWa)

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die derzeit in Deutschland gültigen Bemessungsnormen gelten für Neubauten. Die Normen basieren auf einem semi-probabilistischen Sicherheitskonzept, bei dem die Streuungen von Einwirkungen (z. B. Lasten) und Widerständen (z. B. Material-Festigkeiten) jeweils über charakteristische Werte und dazugehörige Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigt werden. Mit Hilfe der daraus resultierenden Bemessungswerte wird innerhalb von Grenzzustandsgleichungen  $E_d < R_d$  das gewünschte Sicherheitsniveau (z. B. nach DIN EN 1990) sichergestellt. Bestehende Wasserbauwerke genügen vielfach nicht mehr den aktuellen Normen, die Fortschreibungen und Erkenntniszuwächse sowie auch neue Zuverlässigkeitskonzepte enthalten. Bei bestehenden Bauwerken können gesellschaftlich adäquate Zuverlässigkeitsziele und Erkenntnisse aus qualifizierten Bestandsaufnahmen (z. B. Geometrie, Kenntnisse über das statische System, Messungen von Einwirkungen, Erkundung von Materialeigenschaften, ...) genutzt werden, um die im Normkonzept enthaltenen Unsicherheiten zu reduzieren.

Ziel des FuE-Vorhabens ist für bestehende Wasserbauwerke die Ermittlung eines angemessenen Sicherheitsniveaus sowie die Bestimmung von modifizierten Teilsicherheitsbeiwerten, ggf. in Abhängigkeit von Randbedingungen, so dass die in Normen verankerten üblichen Nachweisformate genutzt werden können. Damit soll eine praxisgerechte, sichere und wirtschaftliche Nachweisführung von bestehenden Wasserbauwerken bei Anwendung des semi-probabilistischen Sicherheitskonzeptes ermöglicht werden und eine allgemein anerkannte Regel der Technik für bestehende Wasserbauwerke erstellt werden.

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

Die bestehenden, im Mittel rund 70 Jahre alten Wasserbauwerke der WSV lassen sich mit Regelwerken für den Neubau schwerlich nachweisen, obwohl manche Bauwerke keine signifikanten Auffälligkeiten zeigen. Stilllegungen

#### Auftragsnummer:

B3951.00.04.70001

#### Auftragsleitung :



Claus Kunz  
claus.kunz@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Dr. Florian Stauder  
(von 09/2011 bis 12/2014)

#### Laufzeit:

2011 bis 2019



einerseits und generelle Grundinstandsetzungen andererseits strapazieren unverhältnismäßig Sachmittel- und Personalressourcen der WSV und behindern den Wasserstraßenverkehr. Ein unverhältnismäßiges Versagen von Wasserbauwerken muss dennoch ausgeschlossen sein.

Eine Nachrechnungs-Unterlage nach dem aktuellen Sicherheitskonzept, das die Erkenntnisse aus dem Betrieb und Bestand des Bauwerks (Informationen über die tatsächliche Nutzung, vorhandene Bauwerkseigenschaften, ...) angemessen berücksichtigt, soll das baurechtliche und nachweis-rechnerische Defizit beseitigen, eine – gegebenenfalls auch quantitative – Auskunft über die Sicherheit der Anlagen geben und zu einer Priorisierung von Instandhaltungsmaßnahmen führen.

### 3 Untersuchungsmethoden

Die Untersuchung beinhaltete nach einem Literaturstudium über einschlägige Bearbeitungen die Durchführung von probabilistischen Analysen von Einwirkungen (Lasten) und Widerständen (Baustoffe), die im (Verkehrs-)Wasserbau von Bedeutung sind, mit Hilfe der Zuverlässigkeitstheorie. Weitere Methoden waren Zuverlässigkeitsberechnungen nach FORM/SORM (**F**irst **O**rder/**S**econd **O**rder **R**eliability **M**ethods) als vereinfachte Verfahren sowie probabilistische Berechnungen, jeweils mit einschlägiger Fachsoftware. Zur Durchführung der Zuverlässigkeitsanalysen waren Grenzzustandsfunktionen für die maßgebenden Versagensarten bei (Verkehrs-)Wasserbauwerken aufzustellen und innerhalb von Parameterstudien zu analysieren (Kunz und Stauder 2013).

### 4 Ergebnisse

Aus Überlegungen wurde das Zuverlässigkeitsniveau für neue Wasserbauwerke zu  $\beta = 3,8$  über die geplante Nutzungsdauer  $T_N = 100$  Jahre identifiziert. Aus dem Sicherheitskonzept nach DIN EN 1990 lässt sich für bestehende Bauwerke ein restnutzungsdauer-orientiertes Konzept ableiten, das nach schadensfreien Jahren zu modifizierten äquivalenten Zuverlässigkeiten für die Restnutzungsdauern führt, vgl. Bild 1. Zum Nachweis bestehender Wasserbauwerke wurde damit ein angepasstes Zuverlässigkeitskonzept erarbeitet, um die Besonderheiten bestehender Tragwerke innerhalb der Nachweisgleichungen berücksichtigen zu können. Untersuchungen zu Modellunsicherheiten, Variationskoeffizienten und Umrechnungsbeiwerten wurden angestellt. Auf Basis der Beziehungen in DIN EN 1990 wurden modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte für verkehrswasserbau-relevante Einwirkungen und Widerstände erarbeitet, wobei als Restnutzungsdauer ein  $T_{RN} = 30$  Jahre gilt.

In Stauder (2015) sind Grundlagen, Literaturübersichten, einige Konzept-Ideen für die Anpassung des Zuverlässigkeitsniveaus, probabilistische Parameterstudien an einer exemplarisch unbewehrten Gewichtsstützmauer und angepasste Teilsicherheitsbeiwerte für einige relevante Einwirkungen und Widerstände dargestellt. Teilsicherheitsbeiwerte für bestehende massive Wasserbauwerke wurden nach dem Konzept der Restnutzungsdauer bestimmt (Kunz 2015). Ergebnisse der Untersuchungen flossen in die Bearbeitung eines BAWMerkblasses „Tragfähigkeit bestehender Wasserbauwerke (TbW)“ (BAW 2016) ein. In Vergleichsberechnungen an Wasserbauwerken wurden die modifizierten Teilsicherheitsbeiwerte bereits angesetzt und ließen dadurch bestehende Wasserbauwerke als rechnerisch standsicher bewerten.

Das Vorhaben wurde 2017 fachlich beendet, wobei in der Endphase das Nachfolge-Vorhaben B3951.00.04.70002, Zuverlässigkeit bestehender Wasserbauwerke (ZuBeWa), vorbereitet wurde. Der Abschlussbericht wird erstellt.

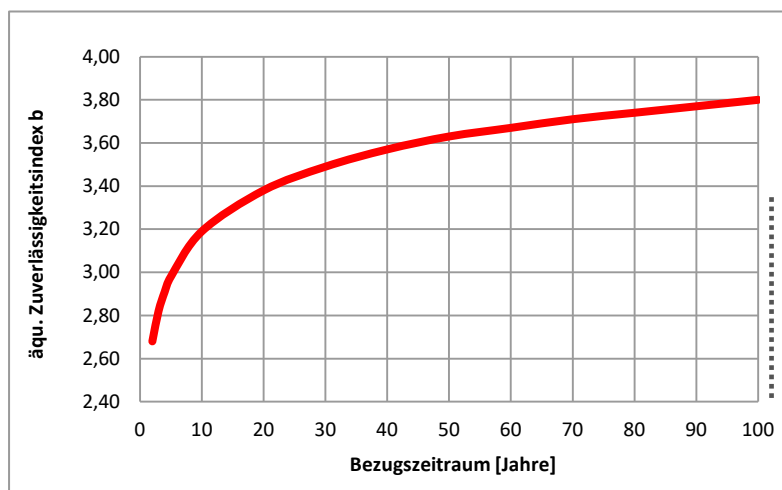


Bild 1: Äquivalenter Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  über den Bezugszeitraum.

#### Literatur:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2016): BAWMerkblass Tragfähigkeit bestehender massiver Wasserbauwerke (TbW). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien).

Kunz, C. (2015): Ein Konzept für Teilsicherheitsbeiwerte für bestehende Wasserbauwerke. In: Bautechnik 92 (8). Berlin: Ernst & Sohn, S. 549–556.

Kunz, C. und Stauder, F. (2013): Sicherheitskonzept für bestehende Wasserbauwerke. In: Bautechnik-Tag 2013, Tagungsband, Hamburg, 11. bis 12.04.2013. Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein.

Stauder, F. (2015): Zuverlässigkeitskonzept für bestehende Tragwerke im Wasserbau. Dissertation D-386. Technische Universität Kaiserslautern.



## Verkehrslastmodelle für typische WSV-Brücken

### Lastmodelle für Tragfähigkeit und Ermüdung

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die in der „Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie)“ aus 2011 formulierte Vorgehensweise zur Bestimmung des Ziellastniveaus beruht auf Verkehrsmessungen an drei verschiedenen Autobahnbrücken. Eine Übertragung auf untergeordnete Straßen und auf Brücken mit zwei Fahrspuren im Begegnungsverkehr, wie es in der Wasserstraßen und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) die Regel ist, ist unter diesen Voraussetzungen zu hinterfragen.

Die Aufgabenstellung besteht zunächst darin, die jetzige Verkehrsbelastung von Brücken in der Unterhaltungslast der WSV durch gezielte Messungen nach verschiedenen Kriterien zu erfassen. Mit diesen messtechnisch erfassten und statistisch als Verteilungsfunktion aufbereiteten Verkehrscharakteristiken werden Simulationsrechnungen durchgeführt. Dabei können durch die Veränderung einzelner Parameter auch mögliche künftige Belastungssituationen wie die Zunahme des Schwerverkehrs oder die Berücksichtigung von genehmigungspflichtigem Schwerverkehr einbezogen werden. Die über eine Extremwertbetrachtung ermittelten charakteristischen Kennwerte werden mit normativen Lastmodellen verglichen.

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

Die WSV besitzt – bemessen nach historischen Brückenklassen – eine Vielzahl von Brücken im untergeordneten Verkehrsnetz, zum Teil mit gewichtsbeschränkender Beschilderung, welche einer Nachrechnung gemäß der Nachrechnungsrichtlinie mit dem dort formulierten Ziellastniveau nicht standhalten und in weiterer Konsequenz verstärkt oder durch einen Neubau ersetzt werden müssten. Aufgrund der vergleichsweise schwachen Frequenzierung dieser oftmals als Wirtschaftswegbrücke oder im Ortsverkehr genutzten Bauwerke liegt die Vermutung nahe, dass der aktuell vorhandene und auch in Zukunft zu erwartende Verkehr mit den heute geltenden Lastmodellen überschätzt wird und viele der betroffenen Bauwerke nach wie vor ausreichend dimensioniert sind. Das Forschungsvorhaben hat somit eine hohe wirtschaftliche Bedeutung.

#### Auftragsnummer:

B3951.01.04.70004

#### Auftragsleitung:



Rainer Ehmann  
 rainer.ehmann@baw.de

#### Laufzeit:

2013 bis 2019

### 3 Untersuchungsmethoden

An ausgewählten Brücken der WSV wurden die durch den laufenden Verkehr ausgelösten Bauwerksreaktionen gemessen. Gleichzeitig wurde vorgesehen, den vorhandenen Verkehr in Menge, Fahrzeugart und Abstände der passierenden Fahrzeuge zu erfassen. Die Erstellung einer aussagekräftigen Messkonzeption erfolgte durch eine vorausgehende realitätsnahe Tragwerksmodellierung und Belastung mit entsprechenden Verkehrsszenarien. Eine Kalibrierung der rechnerischen Bauwerksreaktionen (Dehnungen, Verdrehungen usw.) erfolgte durch Vergleich mit gemessenen Reaktionen, die bei Überfahrten mit vermessenen und gewogenen Fahrzeugen in unterschiedlichen Konstellationen gewonnen wurden, siehe Bild 1. Die Messdauer war unterschiedlich, von vier Monaten bis zu einem Jahr, angepasst an das Brückenobjekt und die zugehörigen Randbedingungen. Die Messwerte der hochfrequenten Messungen waren entsprechend aufzubereiten und auszuwerten. Ziel der Messungen war die möglichst genaue Erfassung der Rad- und Achslasten (Bridge Weigh In Motion), des Fahrzeugtyps, der Geschwindigkeiten und der Abstände untereinander.

Die gewonnenen Messdaten wurden, wie in Freundt et al. (2016) erläutert, statistisch aufbereitet und ingenieurmäßig bewertet. Für Tragfähigkeitsbetrachtungen waren über Extremwertanalysen charakteristische Einwirkungsgrößen mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren zu ermitteln. Die Untersuchungen zur Ermüdung erfolgten normgemäß durch eine lineare Schadensakkumulation und einen Vergleich mit Ermüdungslastmodellen nach Eurocode.

### 4 Ergebnisse

Inzwischen wurden in Kooperation mit zwei Ingenieurbüros an fünf Brücken Messungen durchgeführt und Auswertungen angestellt, an einer sechsten Brücke erfolgte die Bearbeitung komplett durch die BAW. Die Brücken überführen unterschiedliche Straßenkategorien von der Kreisstraße bis hin zur hochfrequentierten Bundesstraße. Die Brücken sind mit zwei Fahrspuren im Begegnungsverkehr ausgestattet, mit Ausnahme einer einspurigen Wirtschaftswegbrücke, die zudem gewichtsbeschränkt beschildert ist. Die Bauweisen der Brücken sind Stabbogenbrücken, Fachwerträgerbrücken sowie Plattenbalkendeckbrücken.

Messungen und Berechnungen zur Ermüdungssicherheit ergaben auch bei hoher Schwerverkehrsbelastung und ungünstigen Kerbfällen eine geringe Schädigung und somit rechnerische Nutzungsdauern von weit über 100 Jahren. Es kann geschlussfolgert werden, dass die normativen Ermüdungslastmodelle für die hier untersuchten Verkehrsbelastungen zu ungünstig sind und entsprechend anzupassen sind.

Bei den Untersuchungen zur statischen Tragfähigkeit wurden die charakteristischen Werte aus Extremwertbetrachtungen von simulierten und gemessenen Daten gewonnen und über relevante Kennwerte (Biegemomente, Querkräfte, Normalkräfte) wurden Vergleiche zu normativen Lastmodellen hergestellt, siehe auch Freundt und Böning (2011).

Das Forschungsvorhaben wurde im Mai 2019 abgeschlossen, der Forschungsbericht ist unter HENRY verfügbar. Es konnten dabei konkrete Empfehlungen für die Bestimmung des Ziellastniveaus (Tragfähigkeit) von WSV-typischen Brücken entwickelt werden. Dabei werden auch globale Beiwerte zu den Lastmodellen LM1 nach DIN-Fachbericht und EC 1-2 angegeben. Die Methodik und Randbedingungen entsprechen jener der Nachrechnungsrichtlinie bzw. eines jüngeren BAST-Vorhabens zu dieser Problematik. Der Fokus liegt dabei auf Schwerverkehrsstärken bis zu DTV-SV von 3.000. Gegenüber der Nachrechnungsrichtlinie wurde in diesem Bereich stärker differenziert, wodurch sich Vergünstigungen ergeben.

Für Ermüdungsnachweise werden in Abhängigkeit der Schwerverkehrsstärke und Verkehrszusammensetzung die Anpassungsfaktoren auf das Ermüdungslastmodell 3 aus Schmidmeier et al. (2017) angegeben.



Bild 1: Kalibrierung der Messeinrichtung durch Befahren der Brücke mit gewogenen Schwerfahrzeugen.

#### Literatur:

Freundt, U.; Böning, S.; Hölzer, D.; Ehmman, R. (2016): Verkehrslastmodelle aus Brückenmonitoring von Brücken in unterschiedlichen Straßenkategorien. Technische Akademie Esslingen, 2. Brückenkolloquium, Juni 2016.

Freundt, U.; Böning, S. (2011): Verkehrslastmodelle für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand. In: Berichte der BAST B 82.

Schmidmeier, M.; Schütz, K. G.; Ehmman, R.; Willberg, U. (2017): Nachrechnung bestehender Straßenbrücken auf Grundlage messbasierter Lastmodelle. In: Der Bauingenieur 92, S. 174–178.



# Scherfestigkeit von Beton und Mauerwerk an bestehenden Wasserbauwerken

## Reibungsbeiwert in Arbeits- und Betonierfugen

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Bei der statischen Bewertung der Standsicherheit von Wasserbauwerken ist ein zentraler Nachweis die Untersuchung der Sicherheit gegenüber „Gleiten in der Arbeitsfuge“ gem. DIN EN 1992-1-1:2011-01. Hierbei bleiben jedoch insbesondere bei der Annahme der Reibungsbeiwerte die speziellen Verhältnisse im Wasserbau unberücksichtigt.

Das Ziel des Vorhabens besteht in der Herleitung bzw. Festlegung der modellmäßigen und versuchstechnischen Grundlagen und Randbedingungen zur Bestimmung belastbarer, wasserbauspezifischer Reibungsbeiwerte zum Führen statischer Sicherheitsnachweise. Ferner sollen neben der Scherversuchsmodellierung zur Definition der Laborversuchskenngrößen auch die Eignung des Nachweisformats gemäß DIN EN 1992-1-1:2011-01 zur statischen Berechnung der vorhandenen Tragfähigkeit am Bauteil überprüft werden.

Das FuE-Vorhaben Scherfestigkeit von Beton und Mauerwerk an bestehenden Wasserbauwerken ist Teil des BMVI-Expertennetzwerks „Wissen – Können – Handeln“, das 2016 durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) initiiert wurde.

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

Für bestehende Wasserbauwerke der WSV sind innerhalb der Baubestandsunterlagen Bestandsstatiken vorzuhalten, die weitestgehend den heutigen allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechen. Die gegenwärtige bundesweite Überprüfung in diesem Sinne legt die Vermutung nahe, dass für viele Bauwerke entsprechende Unterlagen fehlen und dementsprechend neu aufzustellen bzw. zu ergänzen sind. Unabhängig hiervon besteht die Notwendigkeit, die hinsichtlich der Standsicherheit auffälligen Bauwerke im Rahmen einer Begutachtung statisch zu bewerten. Dabei ist die Betrachtung der Sicherheit gegenüber „Gleiten in der Arbeitsfuge“ von essenzieller Be-

#### Auftragsnummer:

B3951.03.04.70014

#### Auftragsleitung:

Dr. Thorsten Reschke  
thorsten.reschke@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Dr. Viktória Malárics-Pfaff  
viktoria.malarics-pfaff@baw.de  
Dr. Helmut Fleischer  
helmut.fleischer@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2019

deutung. Dieser Nachweis wird auf Basis des BAW-Merkblatts „Bewertung der Tragfähigkeit bestehender, massiver Wasserbauwerke (TbW)“ gemäß der Vorgaben in DIN EN 1992-1-1:2011-01, Abschnitt 6.2.5 geführt, wobei die zum Nachweis notwendigen Reibungsbeiwerte in pauschalierter Form aus der Norm entnommen werden und als eher konservativ einzuschätzen sind. Die speziellen Verhältnisse im Wasserbau bleiben hierbei unberücksichtigt. Realitätsnähere Kenngrößen und Modellierung könnten jedoch Reserven bei der rechnerischen Bewertung bestehender Wasserbauwerke erschließen.

### 3 Untersuchungsmethoden

Der in einem ersten Arbeitsschritt erhobene aktuelle Sachstand umfasst die versuchstechnische Ermittlung von Scherfestigkeitskennwerten von Beton und Mauerwerk sowie deren Verwendung in den gängigen Nachweisformaten der europäischen und internationalen Bemessungsstandards. Ferner geht er auf theoretische Untersuchungen zur Aufstellung eines statischen Basismodells ein.

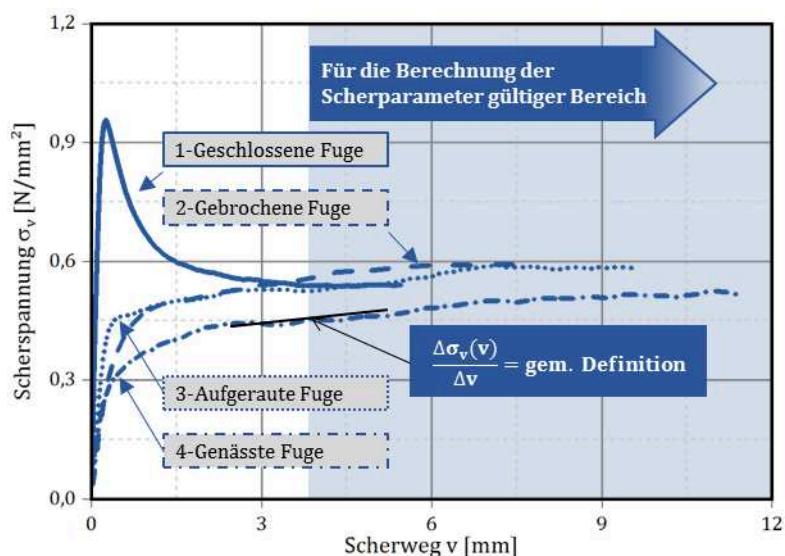
Im Rahmen der experimentellen Tätigkeit fungierten die Grundsatzversuche an geeigneten Probekörpern am Rahmenschergerät der BAW zum Nachweis der Eignung des Basismodells; parallel hierzu erfolgte die Validierung der Prüfmaschine. Diese Vorarbeiten mündeten in der Ausarbeitung eines einheitlichen Konzepts zur Durchführung von Laborscherversuchen zur Ermittlung der maßgebenden Scherfestigkeitsgrößen für die Berechnung der Tragfähigkeit bestehender Wasserbauwerke.

Die umfangreichen Ergebnisse resultierten in Empfehlungen für die zukünftige Verwendung der experimentell bestimmten Scherfestigkeitsparameter in den Nachweisformaten zur statischen Berechnung der Gleitsicherheit in Arbeitsfugen von Massivbauwerken unter wasserbauspezifischen Randbedingungen.

### 4 Ergebnisse

Im Anschluss an die Validierung des Rahmenschergeräts der BAW lieferten weitere, im Rahmen einer Kooperation mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) durchgeführte, studentische Abschlussarbeiten Erkenntnisse zum Einfluss verschiedener modellierter und praxisrelevanter Fugenbeschaffenheiten sowie -neigungen auf die maßgebenden Scherparameter (u. a. Galiazzo 2018). Ferner führten diese zu den ersten Modellansätzen zur Ermittlung der Reibungskenngrößen aus dem Scherversuch an Betonproben. Danach nimmt beispielsweise der Reibungsbeiwert mit steigender Normalspannung ab (Höffgen et. al. 2018). Ergänzende Experimente fokussierten auf die Quantifizierung des Maßstabeffekts auf das Schertragverhalten in den Arbeitsfugen der betrachteten klein- und großformatigen Betonproben.

Auf Basis der Untersuchungen an einer Vielzahl von Bohrkernen aus der Schleuse Kiel-Holtenau ließen sich jene Auswertungsmethoden erarbeiten sowie Definitionen deklarieren, welche eine realistische Beschreibung des Schertragverhaltens von Bestandswasserbauwerken anhand der im Rahmenschergerät der BAW gewonnenen Ergebnisse sicherstellen (Wengrzik 2019). Z. B. trägt dem signifikant von der Oberflächenbeschaffenheit abhängigen Scherverhalten in den Fugen ein Kriterium Rechnung und regelt den für die Berechnung der Scherparameter relevanten Bereich der detektierten Scherspannungs- und Dilatanzverläufe im Hinblick auf weiterführende Betrachtungen (siehe Bild 1). Darüber hinaus fanden dreidimensionale Messungen mithilfe eines Streifenlichtprojektors zur Rauheit der Betonier- bzw. Arbeitsfugenoberflächen statt. Zwar konnten erste Korrelationen zwischen relevanten Rauheits- sowie Scherparametern identifiziert werden, belastbare Aussagen bedürfen jedoch zukünftiger Forschungstätigkeit.



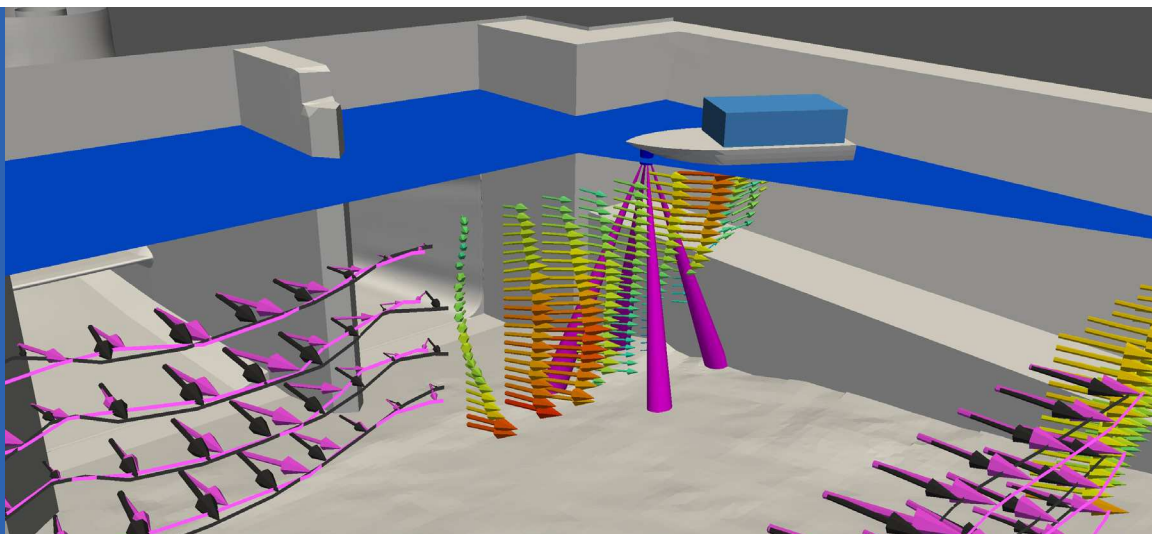
#### Literatur:

Galiazzo, M. (2018): Streuung des Scherverhaltens von Beton mit gleichmäßigen Scherflächen. Bachelorarbeit. Karlsruhe: KIT.

Höffgen, J. P. et. al. (2018): Shear-friction behavior of non-reinforced concrete joints at low normal stresses In: Bauhaus-Universität Weimar, Ludwig, H.-M. (Hg.) Tagungsbericht der 20. Internationalen Baustofftagung 2018, S. 1025-1032.

Wengrzik, D. (2019): Experimentelle Untersuchungen zur Übertragbarkeit von Rahmenscherversuchen auf reale Wasserbauwerke. Masterarbeit. Karlsruhe: KIT.

Bild 1: Änderung des Scherverhaltens infolge mehrfacher Scherbeanspruchung in Anlehnung an Wengrzik (2019).



## Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen

Ermittlung von Strömungsgeschwindigkeiten im Unterwasser von Wasserkraftanlagen mittels ADCP – Anwendung und Unsicherheitsanalyse

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Bundesanstalt für Wasserbau fungiert als Berater der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) bei der Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit an Bundeswasserstraßen (BWaStr). Im Rahmen der Planungen von Fischaufstiegsanlagen (FAA) ist die Grundlagenermittlung von zentraler Bedeutung. Hierzu zählt auch die detaillierte Beschreibung der Strömungscharakteristik im Bereich der FAA. Bei Standorten mit Wasserkraftanlagen ist der interessierende Bereich in der Regel das Unterwasser im Nahbereich des Saugrohrauslasses. Naturmessungen mit akustischen Messverfahren (acoustic doppler current profiler – ADCP) liefern hierbei Geschwindigkeitsinformationen, die entweder als Eingangsdaten für die Kalibrierung numerischer oder gegenständlicher Modelle (Titelbild) oder direkt als Bewertungsgrundlage genutzt werden können. Da auf Basis dieser Daten planungsrelevante Entscheidungen getroffen werden, ist die Qualität der ermittelten Messdaten von großer Bedeutung. Die Genauigkeit des ADCP-Verfahrens hängt neben den üblichen Messunsicherheiten in großem Maße von den Strömungsbedingungen im Unterwasser ab, welche im Nahbereich von Wasserkraftanlagen häufig nicht den erforderlichen Bedingungen für gute Messergebnisse entsprechen (Mueller et al. 2007, Harding et al. 2016). Aus diesem Grund wurde eine Unsicherheitsanalyse für den Einsatz des ADCP-Messverfahrens im Unterwasser von Wasserkraftanlagen durchgeführt.

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

Seit der Novellierung des Wasserhaushaltsgesetzes zum 1. März 2010 ist die Erhaltung bzw. Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit und insbesondere des Fischaufstiegs gesetzlicher Auftrag der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. Im Hinblick auf die Dringlichkeit der Maßnahmen und die große Zahl von ca. 250 durchgängig zu gestaltenden Stauanlagen, besteht ein großer Bedarf an belastbaren quantitativen Aussagen zu den Fließgeschwindigkeiten in deren Unterwasser. Diese sind entscheidend für die Planung und Bemessung der Einstiege in die Fischaufstiegsanlage.

#### Auftragsnummer:

B3953.01.04.70004

#### Auftragsleitung:



Markus Zinkhahn  
 markus.zinkhahn@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Dr. Patrick Heneka  
 patrick.heneka@baw.de

#### Laufzeit:

2012 bis 2019

### 3 Untersuchungsmethoden

Das ADCP ist ein akustisches Messverfahren basierend auf Messung der Dopplerverschiebung von rückgestreuten akustischen Signalen. Mit dem ADCP ist es möglich, die zeitlich gemittelten Strömungsgeschwindigkeiten in allen drei Raumrichtungen zu erfassen. Bootsgestützte ADCP-Sonden befinden sich kurz unterhalb der Wasseroberfläche und messen je nach Typ mit vier nach unten gerichteten Strahlen. Die Sonde misst dabei nicht in der Vertikalachse unterhalb der Sonde, sondern ermittelt die Geschwindigkeitsinformationen aus einer Interpolation eines größeren Messvolumens. Das Messvolumen wird mit zunehmender Wassertiefe größer, da sich die Strahlen auffächern (Titelbild). Bei typischen ADCP haben die Strahlen in 4 m Wassertiefe bereits einen horizontalen Abstand von 2,7 m. Beim Einsatz des ADCP in stark heterogenen Strömungsbedingungen, wie sie im Unterwasser von Wasserkraftanlagen auftreten, führt dies zu einem systematischen Messfehler. Dieser lässt sich theoretisch auf Grund der dem Messgerät zugrundeliegenden ADCP-Gleichungen bestimmen, sofern das Strömungsfeld bekannt ist. Da dies a priori jedoch nicht der Fall ist, wurde im Rahmen dieses Projektes der systematische Fehler an Hand eines 3D-hydrnumerischen Modells eines Wasserkraftwerksunterwassers abgeschätzt. Neben der Inhomogenität führt auch die Turbulenz, d. h. die zeitliche Schwankung der Messgrößen zu einem Fehler. Dieser ist jedoch zufällig und lässt sich über die Anzahl der Messwiederholungen verringern.

### 4 Ergebnisse

Der systematische Messfehler aufgrund der inhomogenen Strömung in dem hier untersuchten Beispiel (kalibriertes 3D-HN-Modell der Staustufe Wallstadt/Main) unterscheidet sich in den drei Raumrichtungen. Die größten Unsicherheiten sind bei den Strömungskomponenten quer zur Hauptströmung (Bild 1, Mitte) mit maximalen Abweichungen von  $\pm 0,3$  m/s zu erwarten. In Hauptströmungsrichtung betragen die maximalen Abweichungen in der Regel unter 0,1 m/s und nur selten darüber (Bild 1, oben). Dies gilt auch für die Vertikalgeschwindigkeit (Bild 1, unten).

Im Feld ist es praktisch nicht möglich, den systematischen Fehler zu bestimmen, weil dazu die Kenntnis über das tatsächliche Geschwindigkeitsfeld nötig ist, jedoch nur das fehlerbehaftete, gemessene Geschwindigkeitsfeld erfasst werden kann. Anders verhält es sich bei dem zufälligen Fehler aufgrund der turbulenten Schwankungen. Hier kann die Messunsicherheit, vorausgesetzt dass sich die Randbedingungen wie z. B. Turbinendurchflüsse, Leit-Laufgradstellungen und Wasserstände über die Zeit nicht ändern, durch häufige Messwiederholungen reduziert werden. Wie viele Wiederholungen in Form von Messquerfahrten notwendig sind, hängt dabei vom Turbulenzgrad der Strömung und der angestrebten Messgenauigkeit ab. Bei einem Turbulenzgrad von 0,5 (die Geschwindigkeitsschwankung beträgt die Hälfte der mittleren Fließgeschwindigkeit) sind beispielsweise etwa 100 Messwiederholungen nötig, um den zeitlichen Mittelwert mit einer Genauigkeit von  $\pm 10$  % bestimmen zu können. Der Zusammenhang zwischen Anzahl der Messwiederholungen und Messgenauigkeit ist nicht linear, sodass eine Verdoppelung der Wiederholungen den Fehler nur auf ca. 7 % reduziert, eine Halbierung jedoch zu einem Messfehler von ca. 16 % führt. Die Herausforderungen bestehen zum einen darin, dass der Turbulenzgrad vor Ort nicht bekannt und zudem räumlich sehr unterschiedlich ist und somit abgeschätzt werden muss. Zum anderen bedeutet eine Vielzahl von Messwiederholungen einen hohen Zeitaufwand (für ca. 100 Querfahrten zwischen 1–3 h) was gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass sich die Abflussbedingungen während der Messdauer ändern. Hier ist eine Abwägung zu treffen, um beiden Aspekten Rechnung zu tragen.

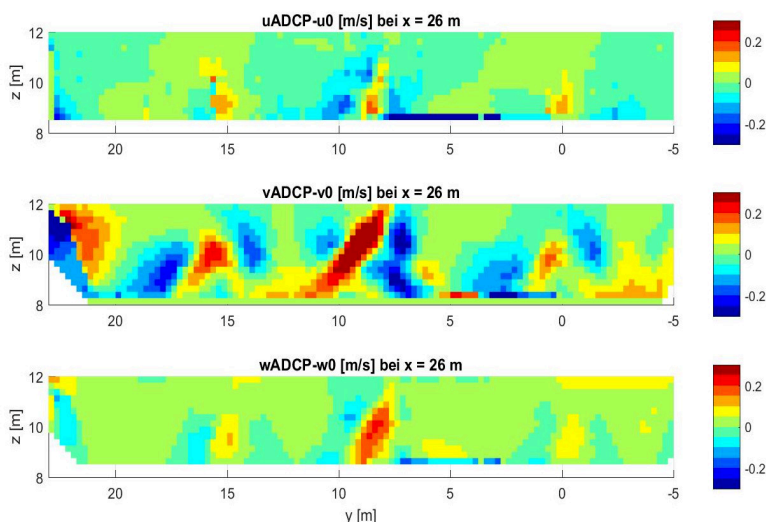


Bild 1: Erwartete Abweichungen (m/s) in den mittleren Geschwindigkeitskomponenten (u, v, w) durch das Messverfahren in 26 m Entfernung vom Saugrohrende am Beispiel Wallstadt/Main.

#### Literatur:

Harding, S. F.; Richmond, M. C.; Romero-Gomez, P.; Serkowski, J. A. (2016): Effects of non-homogeneous flow on ADCP data processing in a hydro turbine forebay. In: *Flow Measurement and Instrumentation* 52, S. 1–9.

Mueller, D. S.; Abad, J. D.; García, C. M.; Gartner, J. W.; García, M. H.; Oberg, K. A. (2007): Errors in Acoustic Doppler Profiler Velocity Measurements Caused by Flow Disturbance. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 133 (12), S. 1411–1420.



## Strategien zur Abfluss- und Stauregelung der Wasserstraßen bei extremen Wetterereignissen

### Nutzung von kurzfristigen Niederschlags- und Abflussvorhersagen

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Etwa 3.000 km der Bundeswasserstraßen sind mit Staustufen ausgebaut, die im Allgemeinen aus beweglichem Wehr, Schleuse und Laufwasserkraftwerk bestehen. Durch das Ändern des Abflusses über Kraftwerk und Wehr hält ein lokaler Regler den gewünschten Wasserstand oberhalb der jeweiligen Staustufe. Die Abfluss- und Stauregelung soll mehrere, mitunter gegensätzliche Ziele erfüllen: Einhaltung des Stauziels innerhalb der festgelegten Toleranz, Verminderung von Abflussschwankungen, optimale Nutzung der Wasserkraft und Reduzierung des Verschleißes der Wehrverschlüsse.

Im Zuge des Klimawandels ist mit einer Zunahme extremer Wetterereignisse zu rechnen. Insbesondere während Niedrigwasserperioden sind Starkregenereignisse in urbanen Einzugsgebieten problematisch für die Abfluss- und Stauregelung. Infolge einer Überlastung der städtischen Kanalisation bringen Regen- oder Mischwassereinleitungen für wenige Stunden ein Vielfaches des natürlichen Abflusses in die Wasserstraße ein. Dies kann zu großen Überschreitungen der Stautoleranz sowie zu verstärkten Schwankungen des Abflusses über Kraftwerk und Wehr führen, was eine Gefahr für die Schifffahrt darstellt (Kasper et al. 2017). Ziel dieses Vorhabens ist es, das bestehende Regelungskonzept um die Nutzung von Abflussvorhersagen zu erweitern und damit robuster gegenüber Starkregenereignissen zu machen. Dazu werden kurzfristige Niederschlagsprognosen mit einem vorausschauenden Regelungssystem verknüpft.

Das FuE-Vorhaben „Strategien zur Abfluss- und Stauregelung der Wasserstraßen bei extremen Wetterereignissen“ ist Teil des BMVI-Expertenetzwerks, das 2016 durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) initiiert wurde. Sieben Ressortforschungseinrichtungen und Fachbehörden des BMVI greifen gemeinsam drängende Probleme der Verkehrsinfrastrukturen auf – durch Forschungsarbeiten zur Anpassung an den Klimawandel, zur umweltgerechten Gestaltung sowie zur Erhöhung der Zuverlässigkeit.

#### Auftragsnummer:

B3953.03.04.70005

#### Auftragsleitung:

Franz Simons  
 franz.simons@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Julia Kasper  
 julia.kasper@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2019



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

Durch die Anwendung moderner Regelungsmethoden und die Einbindung von kurzfristigen Niederschlags- und Abflussvorhersagen steht der WSV ein zukunftsfähiges Regelungssystem zur Verfügung, das auch bei zunehmenden Auswirkungen des Klimawandels eine robuste Abfluss- und Stauregelung sicherstellt. Die neue Regelungsstrategie soll die Wirkung stoßartiger Belastungen in Stauhaltungen kompensieren, indem sie vorausschauend reagiert, die Gefährdung durch starke Wasserstands- und Abflussschwankungen minimiert und eine schnelle „Erholung“ des Systems ermöglicht. Auf diese Weise wird die Resilienz der Wasserstraßen erhöht und die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt gewährleistet.

## 3 Untersuchungsmethoden

Um Informationen über bevorstehende Starkregenereignisse in die Abfluss- und Stauregelung der Wasserstraßen einzubinden, müssen verschiedene Komponenten aufeinander abgestimmt werden: Niederschlagsprognosen, Niederschlags-Abfluss-Modell und Regelungssystem. Dazu werden im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks hochaufgelöste Vorhersagen aus extrapolierten Radarniederschlagsdaten, dem sogenannten Nowcasting, durch den Deutschen Wetterdienst (DWD) aufbereitet. Die Wirkungsweise des neuen Konzepts wird anhand von Simulationen am Beispiel der Neckarstauhaltung Hofen untersucht, in die ein Teil der Stuttgarter Kanalisation entlastet. Das Tiefbauamt der Stadt Stuttgart hat Messdaten zu Mischwasserereinigungen aus dem Hauptsammler Nesenbach in den Neckar zur Verfügung gestellt.

## 4 Ergebnisse

Aus den kurzfristigen Prognosen des DWD werden mithilfe eines vereinfachten Niederschlags-Abfluss-Modells der Stuttgarter Kanalisation Prognosen für Mischwasserentlastungen aus dem Hauptsammler Nesenbach in die Neckarstauhaltung Hofen berechnet. Anhand historischer Ereignisse wurde gezeigt, dass die Einleitungsprognosen eine ausreichende Genauigkeit aufweisen (Kasper et al. 2018).

Die bestehende Reglerstruktur wird um eine modellprädiktive Vorsteuerung ergänzt, die vom Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart entwickelt wurde (Amann et al. 2016). Ein Optimierungsalgorithmus bestimmt anhand eines linearisierten Stauhaltungsmodells aus gegebenen Zuflussprognosen einen idealen zeitlichen Verlauf von Wasserstand und Abfluss. Im automatisierten Betrieb wird der Wert des Wasserstands für den nächsten Zeitschritt als Soll-Wasserstand an den Regler ausgegeben. Im manuellen Betrieb kann der optimierte Wasserstands- und Abflussverlauf zur Entscheidungsunterstützung genutzt werden. Bild 1 veranschaulicht, wie die modellprädiktive Vorsteuerung den Soll-Wasserstand aufgrund der vorhergesagten Einleitung im Rahmen der erlaubten Toleranz absenkt. Der lokale Regler gleicht die Ungenauigkeit der Vorhersage und den dadurch ansteigenden Wasserstand durch eine Abflusserhöhung aus.

Simulationen haben gezeigt, dass Verletzungen der Stautoleranz infolge von seitlichen Einleitungen durch die Berücksichtigung von Zuflussprognosen verhindert werden können. Während die bisherige Regelung große Abflussschwankungen verstärkt, können diese durch die modellprädiktive Vorsteuerung deutlich gedämpft werden (Kasper et al. 2018).

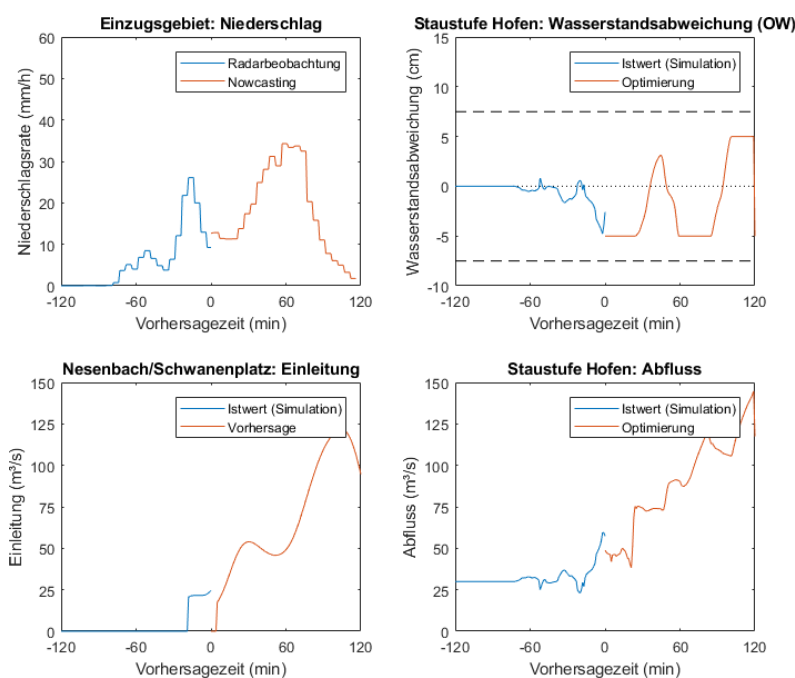


Bild 1: Simulationsergebnisse des Prognose- und Regelungssystems für ein Starkregenereignis im Einzugsgebiet Stuttgart.

### Literatur:

Amann, K.-U.; Arnold, E.; Sawodny, O. (2016): Online real-time scheduled model predictive feedforward control for impounded river reaches applied to the Moselle river. In: 2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Fort Worth, TX, USA: IEEE, S. 1276–1281.

Kasper, J.; Pranner, G.; Simons, F.; Denhard, M.; Thorenz, C. (2018): Enhancing automated water level control at navigable waterways by high-resolution weather predictions. In: La Loggia, G.; Freni, G.; Puleo, V.; De Marchis M. (Hg.): EPiC Series in Engineering 3. Manchester, UK: Easy-Chair, S. 1022–1029.

Kasper, J.; Simons, F.; Belzner, F.; Schmitt-Heiderich, P. (2017): Einfluss von Starkregenereignissen auf die Abfluss- und Stauregelung am Beispiel der Neckarstauhaltung Hofen. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hg.): Veranstaltungen 5/2017. Koblenz: BfG, S. 139–146.



## Bausteine zur Modellvalidierung aus Naturmessungen

### Abschätzung der Schwebstoffkonzentration aus Trübung

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Für zukünftige Fragestellungen der Unterhaltung und der wasserbaulichen Entwicklung der Bundeswasserstraßen im Küstenbereich spielt das Verständnis der ästuarinen Schwebstoffdynamik eine zentrale Rolle. Um die genannten Fachaufgaben zu bearbeiten, werden an der BAW überwiegend numerische Simulationsverfahren eingesetzt. Diese benötigen qualitativ hochwertige Naturmessungen als Eingangsgrößen und zur Validierung.

Im Hinblick auf eine umfassende Bewertung der Modellgüte ist die notwendigerweise eingeschränkte räumliche und zeitliche Verfügbarkeit von Messungen in der Natur sowie deren Messunsicherheit zu berücksichtigen. Als ein Beitrag zur Qualitätssicherung, wird dieser Aspekt der Modellvalidierung aus Sicht der Naturmessung systematisch für die Größe „Schwebstoffkonzentration“ (SPMC) aufbereitet. Zur Optimierung der Steuerung der dreidimensionalen numerischen Simulationsmodelle werden ästuarspezifische Prozesse der Schwebstoffdynamik und deren Wechselwirkung in Elbe und Weser analysiert.

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

Die im Rahmen der gutachterlichen Tätigkeit der BAW erzeugten und bewerteten Ergebnisse der numerischen Simulationsverfahren bilden die Grundlage für teils weitreichende politische Entscheidungen im öffentlichen Raum (z. B. Fahrrinnenanpassungen von Elbe und Weser). Adressiert an die BAW und somit die WSV bedeutet dies, dass die Simulationsmodelle stets durch qualitativ hochwertige Messungen in der Natur abzusichern und die Modellergebnisse zu validieren sind. Die im Projekt wissenschaftlich erarbeiteten und dokumentierten Ergebnisse zur Schwebstoffdynamik fließen direkt in die Durchführung der Modellvalidierung und in die Projektarbeit der BAW ein. Mit den Untersuchungen wird ein Beitrag zur Qualitätssicherung der Messungen und Simulationsergebnisse geleistet. Damit kann die bis dato hohe gutachterliche Qualität der BAW sichergestellt und weiter verbessert werden und Antworten an die WSV können noch umfassender und zugleich spezifischer gegeben werden.

#### Auftragsnummer:

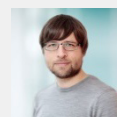
B3955.01.04.70227

#### Auftragsleitung:



Dr. Frank Kösters  
 frank.koesters@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Dr. Steffen Grünler  
 steffen.gruenler@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2019

### 3 Untersuchungsmethoden

Es werden bereits bestehende und aktuell durchgeführte Laboruntersuchungen und Messungen in der Natur ästuarübergreifend wissenschaftlich analysiert, quantifiziert und bewertet. Die Abschätzung von Messunsicherheiten (speziell der SPMC) und der sich daraus abzuleitende Einfluss auf die Modellvalidierung werden im Rahmen der Untersuchungen besonders betrachtet.

Mittels einer Multisensorkalibrierung werden empirisch-analytische Ansätze entwickelt, die orts-, zeit- und sensorspezifische Abschätzungen der SPMC aus Trübungszeitreihen an den Dauermessstationen erlauben. Während des gesamten Bearbeitungsprozesses werden Quellen von Messunsicherheiten (Sensor, geophysikalische Randbedingungen etc.) identifiziert und quantifiziert, um die Datenqualität bewerten zu können, die Wiederholbarkeit der Messungen zu garantieren und um final die aus den Daten abgeleiteten Prozesse von den Unsicherheiten des Messverfahrens trennen zu können (Waldmann 2010).

### 4 Ergebnisse

Auf Grundlage der Multisensorkalibrierung ist eine orts- und sensorspezifische Abschätzung der SPMC inklusive der dazugehörigen Messunsicherheiten an den Dauermessstationen der Trübung im Weser- und Elbeästuar möglich. Im Rahmen der Arbeiten wurde auch eine umfangreiche Datenaufbereitung und Qualitätssicherung der Langzeitmessungen der Trübung und des Salzgehaltes durchgeführt. Auf Bild 1 sind die umgerechneten SPMC und überlagerten Isohalinen entlang des Weser- und Elbeästuars sowie die jeweiligen Oberwasserabflüsse dargestellt. Im Rahmen der Arbeiten der BAW fließen die vorliegenden Ergebnisse direkt in die Validierung der Simulationsergebnisse ein. Die Ergebnisse aus der Multisensorkalibrierung fließen darüber hinaus in die Erarbeitung internationaler Handlungsempfehlungen ein. Ziel ist es, die normativen Ansätze und verschiedenen Verfahren zur Abschätzung der SPMC, inklusive der Quantifizierung der Messunsicherheiten, aus optischen und akustischen Langzeitmessungen in einen allgemein akzeptierten Leitfaden zu überführen (Fettweis et al. 2017).

Auf Grundlage dieser Daten wird die Variabilität der Zone des Trübungsmaximums (TMZ) untersucht. Für die Weser und Elbe wurde der Einfluss des Oberwasserabflusses auf die TMZ untersucht. So zeigen die ersten Ergebnisse, dass sich die TMZ bei mittleren Niedrigwasserabflüssen (MNQ) bis mittleren Abflüssen (MQ) zwischen Weser-km 46 – 63 und Elbe-km 655 – 665 ausprägt. Bei MQ und mittleren Hochwasserabflüssen (MHQ) verschiebt sich die TMZ in der Weser etwa 20 km, in der Elbe bis 40 km in Richtung Ästuar-mündung. Die Arbeiten liefern auch Hinweise zur Dynamik der TMZ bei Einzelereignissen wie extremen Oberwasserabflüssen (z. B. Sommerhochwasser 2013). Für die Weser vermuten Grabemann und Krause (2001) ein „Herausdrücken“ der TMZ bei sehr hohen Oberwasserabflüssen (800 – 1500 m<sup>3</sup>/s). Die aufbereiteten und analysierten Messungen bestätigen diese Annahme.

Für den Zusammenhang zwischen der SPMC (Referenzmessung) und den Trübungssignalen wurden mehrere Regressionsansätze getestet, von denen die einfache, lineare Regression im log<sub>10</sub>-transformierten Bereich die statistisch zuverlässigsten Modellparameter liefert (BAW 2018). Als Ergebnis stehen zuverlässige Modellparameter Trübung/SPMC samt Modellstatistiken zur Verfügung, so dass eine Abschätzung von SPMC-Zeitreihen an den Dauermessstationen in Weser und Elbe möglich ist.

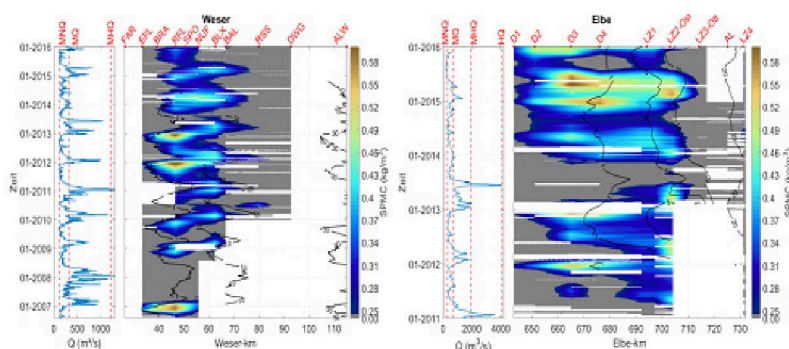


Bild 1: Gemessene Oberwasserabflüsse, tidegemittelte SPMC und überlagerte Isohalinen für die Ästuarie Weser und Elbe. Werte unter 0,25 kg/m<sup>3</sup> sind grau eingefärbt (Definition TMZ nach Grabemann und Krause 2001). Weiße Felder bedeuten Datenlücken. In rot dargestellt ist die Lage der Dauermessstationen.

#### Literatur:

BAW (2018): Kalibrierung von Trübungsmessungen für Aussagen zur Schwebstoffkonzentration in den Ästuaren Weser und Elbe. 15 S., B3955.02.04.70227-1

Grabemann, I.; Krause, G. (2001): On Different Time Scales of Suspended Matter Dynamics in the Weser Estuary. In: Estuaries (5). 688–698.

Fettweis, M. et al. (2017): On best practice for in situ high-frequency long-term observations of suspended particulate matter concentration using optical and acoustic systems. In: Pedocchi, F. et al. (Ed.): INTERCOH 2017. 14th Int. Conf. on Cohesive Sediment Transport Processes. Montevideo, Uruguay: book of abstracts, 69–70.

Waldmann, C.; Tamburri, M.; Prien, R. D.; Fietzek, P. (2010): Assessment of sensor performance. In: Ocean Science (6). 235–245.



## MOSSCO – Modulares System für Schelfmeere und Küsten

### Biologische Einflüsse auf den Sedimenttransport

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Das „Modulare System für Schelfmeere und Küsten“ (MOSSCO) ist ein Verbundprojekt des Helmholtz-Zentrums Geesthacht, Institut für Küstenforschung (HZG), des Leibniz-Instituts für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) und der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), und wird im Rahmen des Forschungsprogramms „Forschung für Nachhaltigkeit“ (FONA) gefördert.

Aktuelle im Küsteningenieurwesen eingesetzte Modellverfahren berücksichtigen in der Regel keine biologischen Einflüsse sondern sind auf eine rein abiotische Betrachtungsweise ausgelegt. Insbesondere bei Untersuchungen des Sedimenttransportes kann diese Vereinfachung zu abweichenden Ergebnissen führen. Im Rahmen der MOSSCO – Synthese soll daher unter anderem der Einfluss von zwei biologischen Prozessen auf den Sedimenttransport untersucht werden: Zum einen hat die Grabaktivität von Makroinvertebraten einen erodierenden Einfluss auf die Gewässersohle, wodurch der Sedimenttransport erhöht wird. Gegenläufig dazu wird als zweiter Effekt der Einfluss von benthischen Mikroalgen untersucht. Benthische Mikroalgen haben die Fähigkeit, durch die Absonderungen von extrazellulären polymeren Substanzen (EPS) die Sedimente an der Gewässersohle zu verkleben und damit die Sohle zu stabilisieren. EPS ist zum Beispiel auch ein wichtiger Faktor bei der Flokkulation von Schwebstoffen.

Die Kopplung dieser beiden biologischen Prozesse an bestehende hydraulische Modellsysteme ist ein wichtiger Baustein zur Weiterentwicklung von Modellverfahren zur Betrachtung des Sedimenttransportes im Bereich von Küsten und Ästuaren.

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

Die BAW kann mit diesem Teilprojekt ihre wissenschaftliche Kompetenz insbesondere im Hinblick auf die zunehmende Verzahnung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben mit den vielfältigen (öffentlichen und privaten) Planungsvorhaben im Ästuar- und Küstenbereich weiter ausbauen und somit die Beratungsqualität für die WSV weiter steigern. So werden die an den

#### Auftragsnummer:

B3955.02.04.70224

#### Auftragsleitung:



Dr. Frank Kösters  
 frank.koesters@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Dr. Arne Hammrich  
 arne.hammrich@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2019

Universitäten und Großforschungseinrichtungen erarbeiteten Methoden direkt für die angewandte Forschung in der BAW genutzt und fördern die kontinuierliche Weiterentwicklung der Methoden und Verfahren. Die von der BAW im Projekt erarbeiteten und dokumentierten Ergebnisse werden für die WSV im Hinblick auf die Aufgaben des Sedimentmanagements und der Wasserstraßenunterhaltung aufbereitet und zur Nutzung zur Verfügung gestellt. Somit bildet MOSSCO einen Baustein zur integrierten Betrachtung kohäsiver Sedimentdynamik und biogeochemischer Nährstoffzyklen. Dies ist bereits heute eine drängende Frage der WSV, deren Bedeutung in Zukunft noch weiter zunehmen wird.

### 3 Untersuchungsmethoden

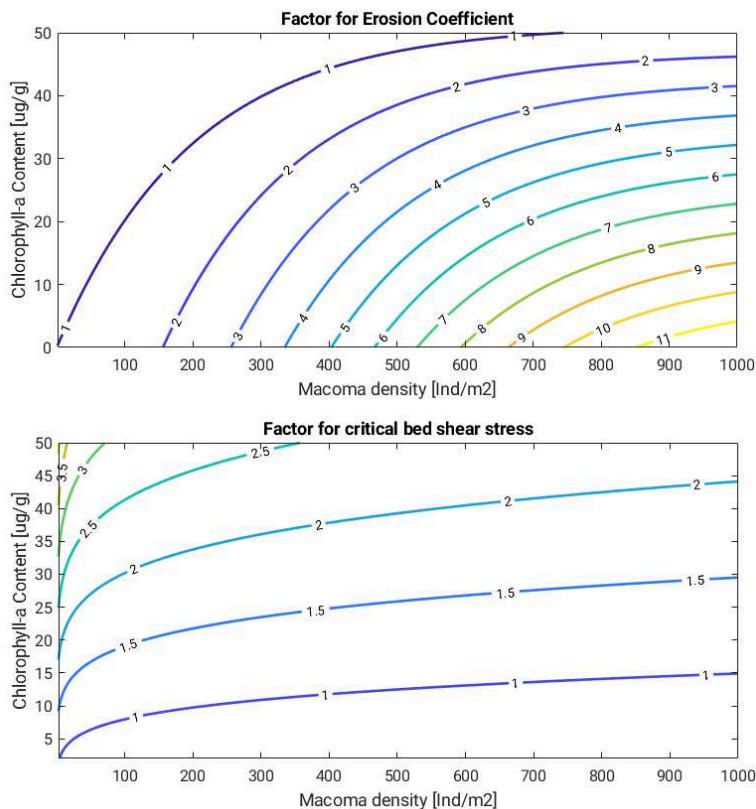
MOSSCO-Synthese nutzt im Wesentlichen die in der ersten Projektphase (MOSSCO) entwickelten Konzepte und Modell-Infrastruktur. Es kommen also primär numerische Modelle zum Einsatz.

Neben der numerischen Modellierung werden auch grundlegende Modellierungskonzepte erarbeitet. Bisher wurden in MOSSCO die biologischen Effekte einzelner Makrofauna-Arten auf den Sedimenttransport linear überlagert. Diese Beschränkung soll in MOSSCO-Synthese behoben werden, indem mit Projektpartnern ein neuer, auf Verhaltensweisen basierter Modellansatz zur Beschreibung der Wechselwirkung zwischen Makrofaunagemeinschaften und Sediment entwickelt wird.

Die neu implementierten Modellansätze werden anhand des Nordsee Setups validiert und die biologisch modulierte Partikeldynamik bzw. die Sedimentbilanz im küstennahen Bereich wird untersucht. Anschließend werden Messdatensätze (z. B. aus anderen KüNO-Projekten wie NOAH) herangezogen, um die Auswirkung von Makrofaunagemeinschaften auf die Sedimentbilanz im Bereich der nordfriesischen Küstenschelf Übergangszone zu validieren und Szenario Studien durchzuführen.

### 4 Ergebnisse

Der Einfluss des Makrozoobenthos wurde exemplarisch anhand der in der südlichen Nordsee weit verbreiteten Muschelart *Fabulina fabula* im Modell nachgebildet und untersucht (Nasermoaddeli et al. 2018). Diesem erosionssteigernden Prozess wirkt der stabilisierende Effekt benthischer Mikroalgen entgegen. Beide Prozesse wurden nun in einem vereinfachten eindimensionalen Modell implementiert, um den gemeinsamen Einfluss von benthischen Mikroalgen und Makrozoobenthos auf die Nettoerosionsrate zu untersuchen. Durch den 1 dimensional Modellansatz, und die damit verbundenen kurzen Rechenzeiten, können nun extrem viele Simulationen in kurzer Zeit durchgeführt und analysiert werden. Dies ermöglicht zum Beispiel Sensitivitätsstudien für verschiedene Korngrößen in Abhängigkeit von der Muschelabundanz und/oder der Algenkonzentration durchgeführt werden. Die Ergebnisse können dann als wichtige Parametrisierungen für komplexe höherdimensionale Simulationen dienen.



#### Literatur:

Nasermoaddeli, M. H.; Lemmen, C.; Kösters, F.; Stigge, G.; Kerimoglu, O.; Burchard, H.; Klingbeil, K.; Hofmeister, R.; Kreuz, M.; Wirtz, K. (2018): A model study on the large-scale effect of macrofauna on the suspended sediment concentration in a shallow shelf sea. In: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*.

Paarlberg, A. J.; Knaapen, M. A. F.; de Vries, M. B.; Hulscher, S. J. M. H.; Wang, Z. B. (2005): Biological influences on morphology and bed composition of an intertidal flat. In: *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 64 (4), 577–590. DOI: 10.1016/j.ecss.2005.04.008

Bild 1: Veränderung des Erosionsfaktors (oben), bzw. der kritischen Bodenschubspannung durch benthische Mikroalgen und Makrozoobenthos (nach Paarlberg 2005).



## EarlyDike - Sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem für Seedeiche

Nutzung der Marinen Dateninfrastruktur Deutschland zur Kommunikation

### 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 Dateninfrastruktur 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.

#### Auftragsnummer:

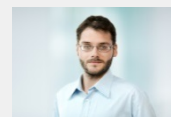
B3955.02.04.70403

#### Auftragsleitung:



Dr.-Ing. Rainer Lehfeldt  
 rainer.lehfeldt@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Alexander Mulckau M. Sc.  
 alexander.mulckau@baw.de

#### Laufzeit:

2015 bis 2019

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 and 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 In-tegration in die Marine Dateninfrastruktur Deutschland. (Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik und Geoinformationssysteme der RWTH Aachen University (gia) und der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW))

### 4 Ergebnisse

Der Anteil der BAW liegt in der Integration der Ergebnisse aller Arbeitspakete in das Portal der Marinen Dateninfrastruktur Deutschland (MDI-DE) durch die Bereitstellung von Geodatendiensten über einen Mapserver und die Beschreibung von Daten und Diensten mittels Metadaten, 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 unterschiedlichen 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 flächendeckenden Modelldaten die Modellvorhersagen des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (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 gehostet wird.

Damit sind die wesentlichen Schritte der Integration zur Publikation von Projektdaten aus dem Verbundprojekt EarlyDike in bestehende Geodaten-Infrastrukturen mit standardisierten Methoden erfolgt.

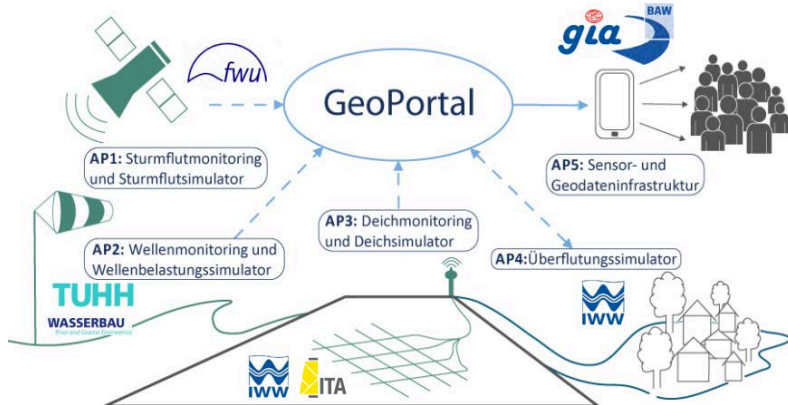


Bild 1: Verbundprojekt EarlyDike

#### Literatur:

Becker, R.; Herle, S.; Lehfeldt, R.; Fröhle, P.; Jensen, J.; Quadflieg, T.; Schüttrumpf, H.; 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.

Der Abschlussbericht wurde veröffentlicht in „DIE KÜSTE“, 88 (2018).



## Aufbau eines Deutsche Bucht Modells einschließlich der Ästuare Ems, Jade-Weser und Elbe

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Wasserstände, Salzgehalte und Sedimenttransporte in der Deutschen Bucht stehen in enger Wechselwirkung mit den angrenzenden Ästuaren. Wasserbauliche Fragestellungen in dieser Region können daher ein großes Modellgebiet erfordern, das alle relevanten Prozesse in hoher Auflösung abbildet. Ziel dieses Projektes ist der Aufbau eines hydrodynamisch-numerischen (HN-) Modells der Deutschen Bucht inklusive der Ästuare Ems, Jade-Weser und Elbe, das die Hydrodynamik und Transportprozesse von Salz und Wärme dreidimensional und in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung berechnet. Das Modell soll u. a. im operationellen Betrieb, für Hindcastrechnungen und für wasserbauliche Systemstudien eingesetzt werden können. Grundlage für die Projektbearbeitung bilden moderne Modell- und Analyseverfahren sowie die Erfahrungen aus an der BAW durchgeführten Projekten, z. B. AufMod (Heyer und Schrottke 2013), OPTEL-C (Kremp et al. 2012) und KLIWAS (Seiffert et al. 2014).

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

Der Nutzen des hochaufgelösten 3D-HN-Modells der Deutschen Bucht ist vielfältig. Die Wirkung wasserbaulicher Maßnahmen im Mündungsbereich der Ästuare, die Wirkung von Extremereignissen wie Sturmfluten und hohen Oberwasserzuflüssen oder der Einfluss eines möglichen Klimawandels können so für den gesamten Küstenraum und die angrenzenden Ästuare Ems, Jade-Weser und Elbe abgeschätzt werden. Es wird jetzt schon für laufende Untersuchungen eingesetzt wie beispielsweise im Rahmen des KFKI-Projektes EXTREMENESS-C, des BMVI-Expertennetzwerks ([www.bmvi-expertennetzwerk.de](http://www.bmvi-expertennetzwerk.de)) oder des Pilotprojektes „Klima und Wasser – Projektdienst für Wasserstraßen und Schifffahrt“ (ProWaS).

**Auftragsnummer:**

B3955.03.04.70227

**Auftragsleitung:**Dr. Annette Büscher  
[annette.buescher@baw.de](mailto:annette.buescher@baw.de)**Laufzeit:**

2015 bis 2019



### 3 Untersuchungsmethoden

Im Projekt wird das Modellverfahren UnTRIM2009 mit Subgrid-Technologie in Kopplung mit SediMorph (Modellierung der Bodenreibung) verwendet. Die seeseitigen Wasserstandsrandwerte werden vom niederländischen HN-Modell DCSMv6FM (Zijl 2014) geliefert, das bei der BAW in Kooperation mit Deltares betrieben wird. Die Daten zum Wind- und Temperaturfeld stammen aus dem Reanalysedatensatz COSMO REA 6 der Universität Bonn.

### 4 Ergebnisse

Parameterstudien zur Modellsensitivität ergeben, dass die Höhe der Rauheiten, das Rauheitsmodell, die Gitterauflösung und die Güte der seeseitigen Randwerte den größten Einfluss auf die Hydrodynamik des Deutsche-Bucht-Modells haben. Basierend auf einer Simulation des Jahres 2010 erfolgt die Modellkalibrierung daher über eine Optimierung der Rauheitsparameter und der Gitterauflösung durch den Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messungen für einen Spring-Nipp-Zeitraum mit normalen Tideverhältnissen. Die Validierung des Modells erfolgt anhand eines zweiten Spring-Nipp-Zeitraumes mit normalen Tideverhältnissen und hohen Oberwassersituationen in den Ästuaren sowie für einen Zeitraum mit Sturmflutbedingungen.

Das Deutsche-Bucht-Modell zeigt für Wasserstand, Strömung und Salzgehalt eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung (s. Bild 1). Statistische Analysen des Wasserstandes für das Simulationsjahr 2010 ergeben, dass das Modell die Tidedynamik auch über einen langen Simulationszeitraum von einem Jahr gut abbildet. Der normierte uRMSE liegt zwischen 0,07 und 0,14, der normierte Bias\* zwischen 0,05 und 0,10 sowie die normierte Standardabweichung  $\sigma^*$  zwischen 0,92 und 0,99. Die Korrelationskoeffizienten liegen bei mindestens 0,99. Dabei variieren die Kennzahlen in Abhängigkeit vom betrachteten Pegel. Die statistischen Analysen der Wasserstände werden mit NCDELTA und TAYLORTARGETDIAGRAM (<http://wiki.baw.de/>) ermittelt.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Deutsche-Bucht-Modell für Berechnungen des Wasserstands, der Strömungsgeschwindigkeiten und des Salzgehaltes geeignet ist. Im Anschluss soll das Modell für den Einsatz im operationellen Betrieb getestet werden. Darüber hinaus soll das Modell einheitliche Randwertdatensätze für andere Modelle liefern und für Untersuchungen von Extremereignissen, für Untersuchungen zum Einfluss eines möglichen Klimawandels sowie bei wasserbaulichen Fragestellungen in den Mündungsbereichen der Ästuarie verwendet werden.

Die Modellierung der Wassertemperatur in den Ästuaren liefert im Hinblick auf den gewählten Berechnungsansatz ebenfalls zufriedenstellende Ergebnisse. Zur Verbesserung der Ergebnisse soll zukünftig für die Berechnung der Wassertemperatur die Strahlungsbilanz berücksichtigt werden.

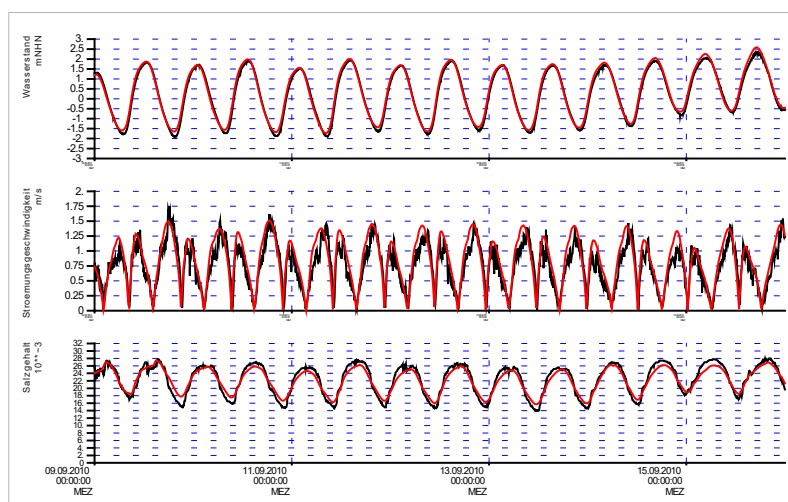


Bild 1: Wasserstand am Pegel Scharhoern sowie Strömungsgeschwindigkeit und Salzgehalte bei der Messstation LZ4a (jeweils 2,5 m über der Sohle) für Messung (schwarz) und Simulation (rot).

#### Literatur:

Heyer, H.; Schrottko, K. (2013): Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht – AufMod. FuE Bericht A39550270116, 5.

Kremp, C.; Rudolph, E.; Sehili, A. (2012): OPTEL-C: Entwicklung eines operationellen Tidemodells der Elbe sowie einer Modellkopplung mit dem BSH-Vorhersagemodell der Nordsee. In: Die Küste (79), 141–168.

Seiffert, R.; Hesser, F.; Büscher, A.; Fricke, B.; Holzwarth, I.; Rudolph, E.; Sehili, A.; Seiß, G.; Winkel, N. (2014): Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.04/3.02. In: KLIWAS Schriftenreihe (36).

Zijl, F. (2014): An application of Delft3D Flexible Mesh for operational water-level forecasting on the North-west European Shelf and North Sea (DCSMv6). NGHS Symposium, Delft Software Days November 2014, Delft, Netherlands.



## Bemessung korrodierter Stahlpundwände im Wasserbau

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Stahlpundwände überbrücken Geländesprünge in Häfen sowie an Wasserstraßen und stellen ein im Wasserbau weit verbreitetes Bauteil dar. Ihre Nutzungsdauer ist aufgrund korrosiver Wanddickenverluste beschränkt. Der zutreffenden Beurteilung des Korrosionszustandes auf Grundlage von Restwanddickenmessungen kommt somit eine hohe Bedeutung zu. Spundwände korrodieren jedoch nicht gleichmäßig: Intensität und Korrosionstyp variieren nicht nur von einer Bohle zur nächsten, sondern auch längs der Bohlenhöhe und im Bohlenquerschnitt. Die Beschreibung dieser komplexen Situation erfordert ein Untersuchungsprogramm, das eine ausreichende Anzahl aussagekräftiger Daten liefert, die mittels statistischer Verfahren auszuwerten sind.

Ziel des FuE-Projektes war es, die Durchführung, Auswertung und Interpretation der zeit- und kostenintensiven Restwanddickenmessungen zu optimieren. Zudem sollte das FuE-Projekt zu einem tieferen Verständnis der Korrosionseinflussfaktoren und deren Wechselwirkungen führen.

### 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV)

Als Betreiber einer Vielzahl von Spundwandbauwerken ist es für die WSV von großem Interesse, den Aufwand bei der Durchführung von Restwanddickenmessungen zu verringern bzw. deren Aussagekraft zu vergrößern. Bisher wurden Spundwanddickenmessungen von der BAW mit und im Auftrag der WSV mittels Ultraschall durchgeführt. Zukünftig soll eine Vergabe an qualifizierte Ingenieurbüros z. B. in Form einer BAW-Empfehlung (BAW, 2017) unterstützt werden.

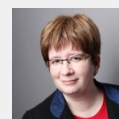
### 3 Untersuchungsmethoden

Bis 2005 war die BAW gemeinsam mit Partnern aus Italien, Luxemburg und Frankreich am EU-Projekt „Design Method for Steel Structures in Marine Environments Including the Corrosion Behaviour“ beteiligt. Die Untersuchungsmethoden wurden detailliert im Endbericht (European Communities 2007) beschrieben.

#### Projekt-Nr.:

B3952.05.04.10158

#### Projektleiterin:



Anne Heeling  
 anne.heeling@baw.de

#### Laufzeit:

2006 bis 2019

Die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Restwanddickenmessungen (s. Bild 1) wird bei der BAW durch die eigenentwickelte Datenbankanwendung WaDiMe (= WandDickenMessung) unterstützt. Die WaDiMe-Programme wurden zwischen 2007 und 2014 weiterentwickelt. Die Programmierarbeiten wurden von der Firma Skill Networks, Hamburg durchgeführt.

In Zusammenarbeit mit den jeweiligen Herstellern bzw. Vertreibern von Messgeräten wurden zwischen 2006 und 2014 alternative Verfahren zur Spundwanddickenmessung durch Vergleichsuntersuchungen im Labor und am Spundwandbauwerk in der Natur bezüglich der Praxistauglichkeit und Messgenauigkeit geprüft und bewertet.

#### 4 Ergebnisse

Das EU-Projekt lieferte eine Vielzahl von Erkenntnissen zu Korrosionseinflussfaktoren und deren Wechselwirkungen, die detailliert dem Endbericht (European Communities 2007) zu entnehmen sind und zwischen 2005 und 2007 auf Fachveranstaltungen vorgeführt wurden:

- In Zusammenarbeit mit der Firma Statsoft Europe GmbH, Hamburg, wurde ein Berechnungsverfahren für die Kennwerte der Korrosion (mittlere und maximale Abrostung bzw. Restwanddicke) und ein Prognosemodell vorgelegt, wonach sich mittlere Abrostungen mittels einer tiefenbezogenen Exponentialfunktion darstellen und aus Milieuparametern berechnen lassen.
- Um die Aussagekraft von Spundwanddickenmessungen zu erhöhen, wurden Empfehlungen zur erforderlichen Anzahl von Einzelmesswerten pro Korrosionszone und Bauwerk sowie zur Verteilung und Anzahl der Messquerschnitte (Bild 1) längs der Höhe einer Spundwandbohle gegeben.

Bei den Vergleichsuntersuchungen lieferte lediglich das Mehrfachecho-Ultraschall-Verfahren Cygnus Dive im Labor und Vor-Ort zutreffende, reproduzier- und verifizierbare Messwerte bei gleichzeitig geringerem Aufwand bei der Reinigung der Messstellen und einfacher Bedienbarkeit.

Die mittleren und maximalen Abrostungen aus der BAW-Datenbank WaDiMe sind als Anhaltswerte für das Abrostungsverhalten in den einzelnen Korrosionszonen von Spundwänden im Meer- und Süßwasser in die Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ (z. B. EAU 2012) eingegangen.

Damit Wanddickenmessungen von den Wasserstraßen- und Schifffahrtsämtern vermehrt an Ingenieurbüros vergeben werden können, wurde die BAW Empfehlung „Spundwanddickenmessungen in Häfen und an Wasserstraßen: Grundlagen, Planung, Durchführung, Auswertung und Interpretation (ESM)“ erarbeitet (BAW 2017), die zukünftig als Ausschreibungsgrundlage für Wanddickenmessungen dienen kann. Die ESM wurde im BAW-Brief 03/2018 vorgestellt.

Mit der Abgabe des Abschlussberichtes wurde das Forschungsvorhaben im Juni 2019 beendet.

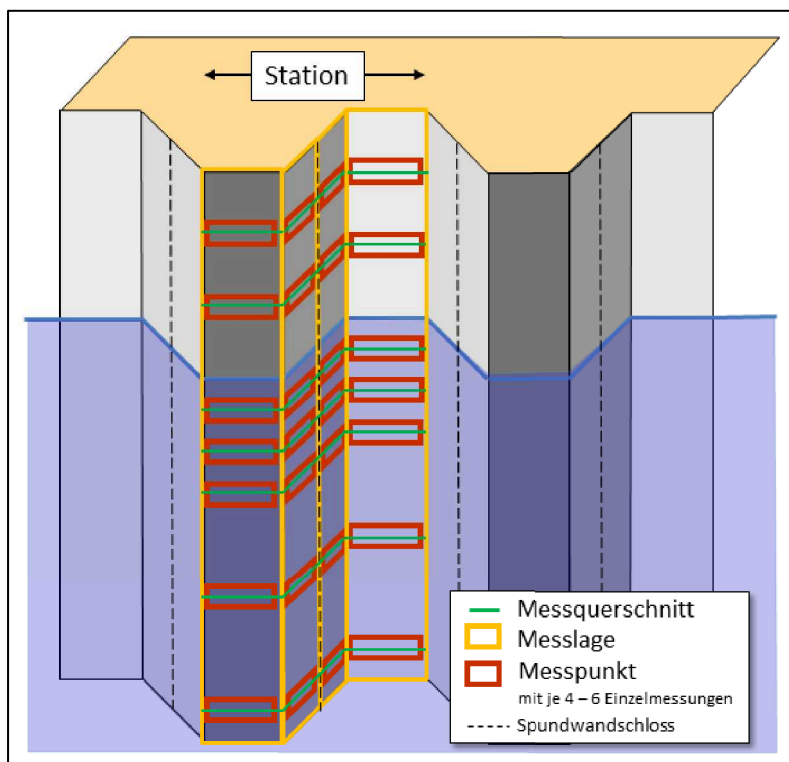


Bild 1: Messstellen einer Restwanddickenmessung

#### Literatur:

BAW (2017): BAWempfehlung Spundwanddickenmessung in Häfen und an Wasserstraßen: Grundlagen, Planung, Durchführung, Auswertung und Interpretation (ESM).

BAW (2018): BAWBrief 03/2018: Spundwanddickenmessungen in Häfen und an Wasserstraßen. Neue BAW-Empfehlung „ESM“ erschienen.

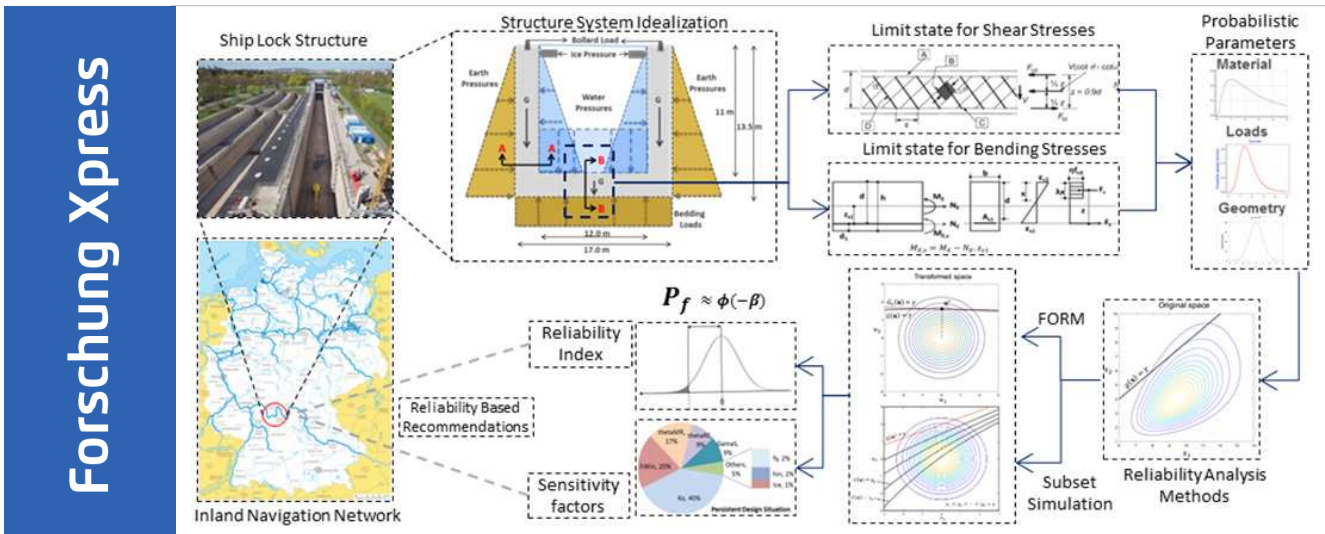
EAU (2012): Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“. Häfen und Wasserstraßen. EAU 2012. 11. vollständig überarbeitete Aufl., Arbeitsausschuss „Ufereinfassungen“ der HTG und der DGGT, Ernst & Sohn Verlag, Berlin.

European Communities (2007): Design method for steel structures in marine environment including the corrosion behaviour. Final report. ECSC Steel RTD program. Contract number 7210-PR/317. Final report.

Heeling, A. (2016): Ermittlung und Bewertung des Korrosionszustandes von Stahlspundwänden in Häfen und an Wasserstraßen. BAWMitteilungen Nr. 100, Karlsruhe.

## II. Aktive FuE-Vorhaben





## Reliability Analysis of Existing Hydraulic Structures

### 1 Objective and tasks

The principal objective of the project is to develop an appropriate framework and tools based on probabilistic methods for the evaluation of existing hydraulic structures in the inland navigation system of Germany. The evaluation through probabilistic methods would serve as an additional verification of the structural safety alongside the existing structural analysis approaches. It is intended to attain insight regarding safety of structures which these methods offer including their abilities to evaluate safety indexes, identify critical failure modes and sensitive parameters. Additionally these methods give prognosis on the future state and remaining lifetime of the structure considering the spatial and temporal randomness of the parameters which current methods lack. Different methods would be employed based on availability of data for each expected failure mechanism. Based on importance factors of parameters recommendations for testing and investigation would be made. The results will be integrated into workflow of BAW-Guideline TbW (BAW 2016).

### 2 Importance for Federal Waterways and Shipping Administration (WSV)

The asset capital is approximately € 50 billion (2010) and around € 200 million is invested for maintenance of system every year. 50 % of these structures are older than 80 years and 30 % older than 100 years (Westendarp et al. 2014). In order to ensure the safety and cost effectiveness for maintenance and operation, probabilistic approach could be used. This would provide uniform reliability indices for comparison with required safety levels additionally providing critical structural forms, parameters and failure modes. With this information the Federal Waterways and Shipping Administration (WSV) can at a system level prioritize its maintainers and asset management operations. To ensure the targets are met, the probabilistic structural analysis methods are integrated in BAW (2016) in level C and would also serve as verification of level A and B.

**Project Number:**

B3951.00.04.70002

**Project Leader:**



Claus Kunz  
claus.kunz@baw.de

**Person in Charge:**



Arslan Tahir  
arslan.tahir@baw.de

**Duration:**

2017 bis 2022

### 3 Methods

In agreement with the existing standards (DIN EN 1992-1-1 2010, DIN 19702 2013) and guideline TbW (BAW 2016), the current study performs a reliability analysis of a generic unreinforced concrete ship lock wall structure and investigates the influence of crack and pore-water pressures on the structural safety using full probabilistic methods. For the study two failure mechanisms (overturning and compressive failure) were considered for Ultimate Limit States (ULS) whereas for Serviceability Limit State (SLS) two modes (limitation in compressive stress and crack in joint) were considered. The limit state functions were derived and appropriate probabilistic models for associated parameters were selected for the use in full probabilistic reliability assessment and calculation of the probability of failure  $P_f$ . Defining a Taylor series expansion of the limit state function to the first order at the design point provides an effective solution for estimating  $P_f$ . This method is known as the First Order Reliability Method (FORM) which uses HLRF algorithm (Rackwitz and Fiessler 1978). Additionally a Monte Carlo simulation based method i. e. Subset simulation (SS) was employed to verify the results of FORM.

### 4 Results

The reliability analysis using FORM method was conducted for a typical unreinforced (plain) concrete ship lock chamber wall, loads and limits states (ULS and SLS) as indicated in Figure 1. The analysis was conducted for a wall thickness of 3 m, a wall height of 8 m, a groundwater level at 5 m height, varying water levels in the chamber and for two major load cases, with and without considering crack and pore-water pressures. For Ultimate Limit State (ULS) it was observed that reliability levels are (nearly) achieved without crack and pore water pressures (PWP), considering the target safety level ( $\beta_T = 3.8$ ) by (DIN EN 1990 2010), indicated in Figure 1 (B), whereas a decrease is seen when PWP was considered in the cross-sectional analysis. The difference varies with changing the water level in the chamber and the limit state function as indicated in Figure 1 (A). A difference of 100 % is seen since cases with chamber water levels less than 5 m show failure for gaping joint SLS verification. Regardless of ULS or SLS verifications an exponential increase of reliability is seen for cases where the water level is greater than 5m. This could be contributed to the fact that considered groundwater level is at 5m and since water in the chamber is a stabilizing force, the load cases with higher chamber water level have significantly higher structural safety. The same reasoning could be applied to the reduction in the difference in reliability levels for cases with and without PWP as indicated in Figure 1 (A). Further investigation shows that this point could be due to the limitation of the analytical method prescribed by the existing crack and pore-water methodology in codes and guidelines. The so called alpha values calculated as a byproduct of FORM method, indicate the extent of the sensitivity of the parameter on the reliability. The performed sensitivity analysis for the limit state "Overturning" indicates that friction angle, concrete weight and groundwater are the critical parameters.

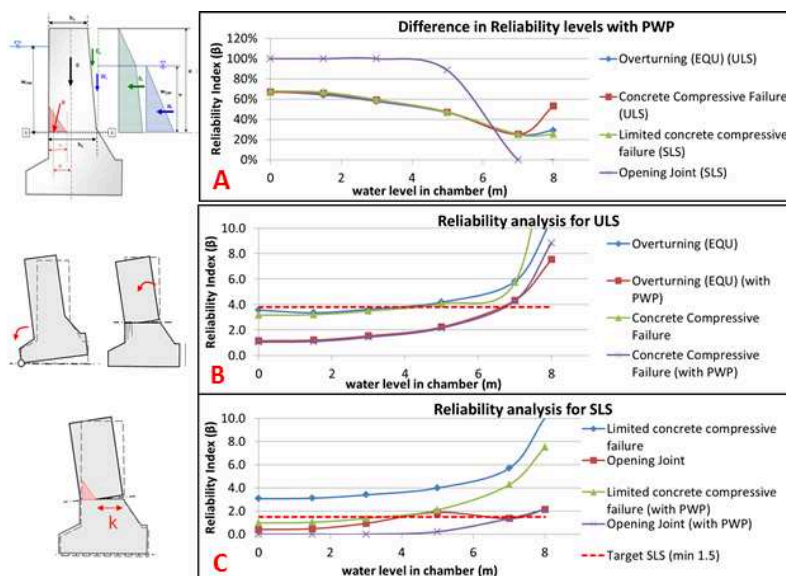


Figure 1: Results of Reliability analysis for different failure modes for ULS and SLS, with/without consideration of crack and pore-water pressures.

#### Literature:

BAW (2016): BAW-Merkblatt: Bewertung der Tragfähigkeit bestehender, massiver Wasserbauwerke (TbW). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

DIN 19702 (2013): Massivbauwerke im Wasserbau – Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit.

DIN EN 1990(2010-12): Eurocode-0: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung

DIN EN 1992-1-1 (2010-12): Eurocode 2 - Teil 1-1: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken.

Rackwitz, R; Fiessler, B. (1978): Structural reliability under combined random load sequences. In: Computers & Structures 9 (5), 489–94.

Westendarp, A.; Becker, H.; Bödefeld, J.; Fleischer, H.; Kunz, C.; Maisner, M.; Spörel, F. (2014): Erhaltung und Instandsetzung von massiven Verkehrswasserbauwerken. In: E. K. Bergmeister, F. Fingerloos; J.-D. Wörner (Eds.), BetonKalender 2015, 185–246. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH.



## Querkrafttragfähigkeit schubunbewehrter Stahlbetonquerschnitte

Entwicklung eines alternativen Ingenieurmodells zur rechnerischen Tragfähigkeitsbewertung bestehender Wasserbauwerke

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Bei der Tragfähigkeitsbewertung älterer Wasserbauwerke aus Stahlbeton werden die heutigen strengeren Anforderungen an die Querkrafttragfähigkeit häufig nicht erfüllt. Dabei bleiben die Besonderheiten massiver Wasserbauwerke wie die flächenhafte Beanspruchung oder das statische System, die im Allgemeinen einen günstigen Einfluss auf die Querkrafttragfähigkeit haben, in den gängigen Bemessungsregeln unberücksichtigt.

Ziel ist es daher, ein alternatives Ingenieurmodell zur Abschätzung der Querkrafttragfähigkeit von Bestandsbauwerken der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) zu erarbeiten, um diese unter Berücksichtigung ihrer wasserbauspezifischen Besonderheiten angemessen bewerten zu können und darüber hinaus gegebenenfalls erforderliche Tragfähigkeitssteigerungen einfacher Verstärkungsmaßnahmen abzuschätzen. Das Bemessungsmodell soll in das BAW-Merkblatt zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Wasserbauwerke eingebunden werden.

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

Bei Nachrechnungen im Zuge von Umbaumaßnahmen, Zustandsbewertungen oder der Neuerstellung statischer Berechnungen nach aktuellen Regeln weisen WSV-eigene Ingenieurbauwerke oft rechnerische Defizite in der Querkrafttragfähigkeit auf, auch wenn sich die Bauwerke augenscheinlich in einem guten Zustand befinden und der WSV zum entsprechenden Zeitpunkt keine Bauwerksschäden bekannt sind, die nachweislich auf Querkraftversagen zurückzuführen sind.

Normgerechte Querkraftverstärkungen sind meist extrem aufwändig, greifen stark in die Bausubstanz ein oder sind aus konstruktiven Gründen überhaupt nicht möglich.

#### Auftragsnummer:

B3951.01.04.70005

#### Auftragsleitung:



Matthias Lutz  
matthias.lutz@baw.de

#### Laufzeit:

2013 bis 2020



Mithilfe eines Rechenmodells, das die wasserbauspezifischen Besonderheiten auf Grundlage der neueren Erkenntnisse realitätsnah berücksichtigt, könnte das Sicherheitsniveau bestehender Bauwerke günstiger eingeschätzt, Verstärkungsmaßnahmen reduziert bzw. unnötige Verstärkungen oder Stilllegungen vermieden werden.

### 3 Untersuchungsmethoden

Die Bewältigung dieser Forschungsaufgabe erfolgt in Zusammenarbeit mit dem Institut für Betonbau der Technischen Universität Graz unter Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. N. V. Tue.

Auf Grundlage einer intensiven Auseinandersetzung mit vorhandenen Querkraft-Rechenmodellen wurde ein alternatives Rechenmodell für die Ermittlung des kritischen Schubrisses entwickelt und im zweiten Schritt durch eine ganzheitliche Betrachtung des Tragverhaltens von Balken ohne Querkraftbewehrung ergänzt (Tue et al. 2014).

Zu dessen Überprüfung waren Querkraftversuche an Kragbalken und Durchlaufträgern unter Streckenlasten erforderlich, da Versuche in der Vergangenheit überwiegend an Einfeldträgern durchgeführt wurden und weitere Schubfeldtypen bisher fehlten (Tue et al. 2015). In mehreren Versuchsreihen wurde an Stahlbetonträgern im Labor für konstruktiven Ingenieurbau in Graz das Trag- und Verformungsverhalten der Träger bis zum Bruch dokumentiert. Eine Besonderheit war die Verwendung eines Feuerwehrschauchs zur Aufbringung einer echten Streckenlast.

Neben konventionellen Techniken wurden fotogrammetrische Messmethoden mit einem dualen Kamerasystem zur optischen Verformungsanalyse der Schubrissbildung eingesetzt. Daneben kam bei einigen Versuchen mit querkraftbewehrten Balken ein faseroptisches Verfahren zum Einsatz, bei dem Messkabel in einen gefrästen Schlitz entlang der Bügel- und der Längsbewehrung eingeklebt wurden, wodurch eine kontinuierliche Dehnungsverteilung in hoher Ortsauflösung erzielt werden konnte (Bild 1).

### 4 Ergebnisse

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein neuer Ansatz zur Beschreibung des Querkraftverhaltens von schubslanken Biegebauteilen erarbeitet und der Einfluss des statischen Systems und der Belastungsart auf das Querkrafttragverhalten durch experimentelle Untersuchungen bestätigt.

Gemäß dem neuen Rechenmodell sind die prognostizierten Tragfähigkeiten für die mehrheitlich vorliegenden Gegebenheiten bei Wasserbauwerken merklich günstiger als nach den gängigen Bemessungsvorschriften. Die Höhe der zu erwartenden Differenzen wurde auf Grundlage einer Parameterstudie für die vereinfachte Abschätzung nachzurechnender Bauwerke quantifiziert.

Durch weitere Versuche wurde die Grundlage für eine ganzheitliche Betrachtung des Querkrafttragverhaltens von Balken mit und ohne Querkraftbewehrung unterschiedlicher Belastungsarten und Systeme geschaffen. Mithilfe der experimentell erfassten Risskinematik und des gemessenen Dehnungsverlaufes in der Bewehrung konnte eine mechanische Beschreibung der Kraftübertragung über den kritischen Schubriss von Balken mit geringer Querkraftbewehrung entwickelt werden. Bereits kleine Schubbewehrungsgrade bei Balken des Schubtyps 2 und 3 bewirken eine Steigerung der Traglast (Betschoga et al. 2018). Die wirksame Schubbewehrung ist damit vom statischen System und der Belastung abhängig. Hieraus lässt sich ableiten, dass eine nachträgliche Querkraftverstärkung durch Dübel auch ohne Umschließung der Längsbewehrung eine deutliche Tragfähigkeitssteigerung erzielt.

Das Forschungsvorhaben ist weitgehend abgeschlossen und ein Abschlussbericht wird erstellt.

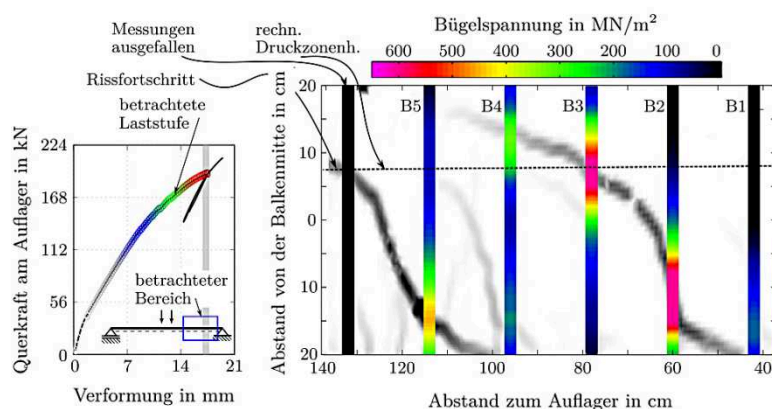


Bild 1: Auswertung der Bügelspannungen und des Rissfortschritts im Versuchsbalken mit Faseroptik und Fotogrammetrie.

#### Literatur:

Betschoga, C.; Tue, N. V.; Ehmman, R.; Tung, N. D. (2018): Shear tests on reinforced concrete beams with low amounts of shear reinforcement. Tagungsband zum FIB Congress 07.-11.10.2018, Melbourne.

Tue, N. V.; Ehmman, R.; Tung, N. D. (2015): Schubversuche an Stahlbetonbalken unterschiedlicher M/V-Kombinationen. In: Beton- und Stahlbetonbau (110), S. 446-457.

Tue, N. V.; Theiler, W.; Tung, N. D. (2014): Schubverhalten von Biegebauteilen ohne Querkraftbewehrung. In: Beton- und Stahlbetonbau (109), S. 666-677.

## Forschung Xpress



# Numerische Untersuchungen an massiven Wasserbauwerken

## Nachweiskonzeption: Unbewehrte Bauteile unter Teilflächenbelastung

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Nachrechnung massiver Wasserbauwerke aus Beton, Stahlbeton oder Mauerwerk beruht i. A. auf der homogenen Anwendung von vereinfachten Annahmen, sowie eines stark reduzierten Stoffgesetzes. Die Gegenüberstellung mit aktuellen numerischen Untersuchungsmethoden umfasst zwei Bereiche: Der erste Projektabschnitt untersuchte und validierte den Ansatz für Riss- und Porenwasserdruck nach DIN 19702. Der zweite Projektfokus adressiert Tragfähigkeitsreserven in der Homogenisierung und Materialabbildung. Hier finden sich die breiten Streuungen der Zusammensetzung, Verarbeitung und Durchmischung der Baustoffe im 5 %-Quantil-Ansatz der charakteristischen Materialkennwerte wieder. Zusätzlich verhindert z. B. die normgerechte Nullsetzung der Zugfestigkeit bei Biegebeanspruchung den Nachweis der Tragfähigkeit von Nischen und ähnlichen lokalen Kräfteinleitungsstellen für unbewehrten Beton und Mauerwerk. Infolge dessen werden nicht selten aufwändige Verstärkungen oder Zusatzkonstruktionen wie Verankerungen oder Ummantelungen der Nischenbereiche notwendig.

Das zweite Ziel ist daher die Herleitung eines Nachweis- und Sicherheitsformats für die Bemessung unbewehrter Bauteile unter Teilflächenbelastung. Die Basis hierfür bilden nichtlinear-numerische Analysen mit realitätsnahen Stoffgesetzen unter Berücksichtigung der räumlichen Verteilung der Materialparameter. Das Bemessungsmodell soll sich an dem BAW-Merkblatt zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Wasserbauwerke (TbW) (BAW 2016) orientieren und in dieses eingebunden werden.

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

Für einen Großteil der Wasserbauwerke in Deutschland ist ihre Tragfähigkeit in Aspekten wie (Revisions-)Nischen etc. nach gültigen Regelwerken nicht direkt nachweisbar. Ein nach TbW Stufe C entwickeltes Bemessungsmodell könnte einerseits die WSV bei der Notwendigkeitsabschätzung und andererseits bei der Effizienzbeurteilung von Nachrüstungsmaßnahmen unterstützen. Die Einordnung der Nischen und ihrer Belastung in eine Ent-

#### Auftragsnummer:

B3951.01.04.70006

#### Auftragsleitung:



Sophie Rüd

sophie.rued@baw.de

#### Laufzeit:

2018 bis 2023

scheidungsmatrix, nach ihrer geometrischen und materialspezifischen/bauzeitlichen Zuordnung, entspricht einer Reduktion des Untersuchungsaufwandes im Einzelfall.

### 3 Untersuchungsmethoden

Der Einsatz von FEM-Simulationen mit einem nichtlinearen Materialmodell und räumlich verteilten Materialeigenschaften erlaubt die Abbildung von Schädigung und lokalem Versagen. Dies modelliert ein realistischeres Materialverhalten und die Möglichkeit zur Lastumverteilung im massiven Bauteil. Beides ermöglicht eine Betrachtung der darin jeweils begründeten Tragfähigkeitsreserven. Ein Sicherheitsformat hingegen begründet sich in der Kombination von Szenarien verschiedener Kennwertverteilungen. Metamodellbasierte Sensitivitätsanalysen zur Abbildung des Einflusses der 3D-Verteilungsvariation stellen den Übergang von Einzelfallanalysen hin zu einer grundsätzlicheren Bewertung der Lastfälle.

**Materialverteilungsfelder:** Die Modellierung der räumlichen Verteilung der Materialeigenschaften kann maßgebend für die rechnerische Tragfähigkeit sein. Beispielsweise lassen sich Kiesnester durch eine Verteilung mit starker punktueller Lokalisierung abbilden und Arbeitsfugen durch Lokalisierungen in Ebenen. Die Auswahl, Umsetzung und Bewertung der Verteilungsfunktionen und -parameter stellt somit einen Schwerpunkt des Forschungsprojektes dar. Der aktuelle Stand setzt eine nachbarunabhängige Zufallsverteilung an, die elementweise bzw. pro Elementcluster Materialeigenschaften zuweist. Die Kombinationen aus räumlicher Zuweisung und Material in erneuter, zufälliger Variation stellen Unterensembles pro Materialverteilung dar. Die Erstellung dieser (Unter-) Ensembles als Eingabedateien für die FEM-Berechnung wurde im Programm Matlab automatisiert und soll im weiteren Projektverlauf noch um realistischere bzw. worst-case-basierte Verteilungsfelder ergänzt werden.

**FEM** Im Rahmen der FEM-Software LS-DYNA wurden zunächst verschiedene bereits implementierte Materialmodelle auf ihre Eignung zur Nachbildung von unbewehrtem Beton überprüft. Die Auswahl des „Continuous Surface Cap Model“ (CSCM) erfolgte nach Kriterien bezüglich des Zug-Druckverhalten für Einzelelementtests und Multielementtests (Zylinder/Würfel) sowie nach den Bruchbildern der Multielementtests im Vergleich zu den Sollbruchbildern nach (DIN EN 12390-3:2009). Für die Abbildung der Materialbandbreite ist aus Druckfestigkeit und maximaler Aggregatsgröße eine generische Materialparametrisierung ansteuerbar. Diese adressiert jedoch vornehmlich den Druckfestigkeitsbereich von 20 bis 58 MPa, wohingegen der Wasserbau und insbesondere dessen historischer Bestand auch deutlich niedrigere Werte umfasst.

### 4 Ergebnisse

Parameterstudien mit dem Optimierungsprogramm LS-Opt ermöglichten es, eine Korrelation der CSCM generierten Druckfestigkeiten für Werte bis unter 1 MPa abzuleiten. Für die Untersuchung des (räumlichen) Verteilungseinflusses wurden erste Simulationsreihen an Zylindermodellen und einem Basismodell einer generischen Nische durchgeführt. In aktuell laufenden Benchmarks wird exemplarisch der Einsatz des ausgewählten Materialmodells und der räumlichen Verteilung mit der Standard-Nachrechnung gegenübergestellt. Die aktuellen Simulationen dienen der Validierung der Modellierungsansätze und zu einer Abschätzung der Anwendbarkeit von Indikatoren zur Auswertung und Kategorisierung für die Nischensimulationen. Zudem stellen sie auch ein Feedback für die Projektstrategie an sich dar, da sie in einer ersten Gegenüberstellung eine rechnerische Traglaststeigerung aufzeigen. Exemplarisch visualisiert Bild 1 anhand der Spannungsdehnungsverläufe und beispielhaften Schädigungsbildern die Traglaststeigerung sowie die sich ergebende Schädigungslokalisierungen.

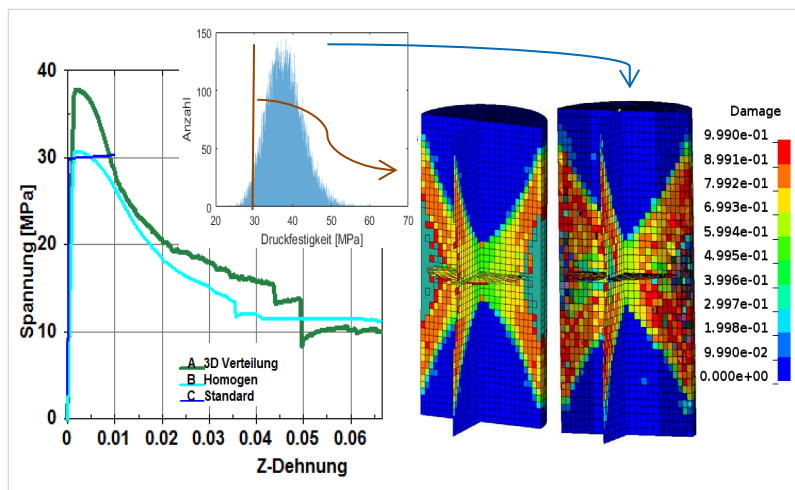


Bild 1: Vergleich der Spannungsdehnungsverläufe und Schädigungsverhalten für eine 3D-Verteilung zu homogenen Proben (CSCM und standard (linearelastisch-idealplastisch)) für eine charakteristische Druckfestigkeit von 30 MPa.

#### Literatur:

DIN 19702:2013-02: Massivbauwerke im Wasserbau – Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit. Beuth Verlag, Berlin.

BAW (2016): BAWMerkblatt Bewertung der Tragfähigkeit bestehender, massiver Wasserbauwerke (TbW). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien).

DIN EN 12390-3:2009: Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern (Deutsche Fassung EN 12390-3:2009).



## Korrosionsschutzuntersuchungen – Vergleich Naturauslagerung zu Labortestverfahren

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Zur Einschätzung bzw. Evaluierung von Kurzzeit-Labortestverfahren für den Korrosionsschutz müssen diese mit Langzeitauslagerungen in der Natur vergleichbar sein. Diese Fragestellung beschäftigt seit langem auch die internationale Normung, wobei immer noch verlässliche Daten fehlen (Binder 2008). Von den beiden Prüfarten können jedoch die Resultate wiederum nur dann sinnvoll verglichen werden, wenn Unterschiede in der Applikation der einzelnen Schutzsysteme ausgeschaltet werden. Auch die zwischenzeitlich, vor allem bei Langzeitversuchen, auftretenden Alterungserscheinungen an der zu untersuchenden Korrosionsschutzbeschichtung sollten Berücksichtigung finden. Bei diesem Vorhaben sollen deshalb erstmals beide Prüfplattenserien in denselben Beschichtungsvorgängen hergestellt und anschließend in der Natur und im Labor geprüft und verglichen werden. Korrosionsschutzbeschichtungen für Stahlwasserbauten der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) werden grundsätzlich nach Labortestverfahren der Richtlinien zur Prüfung von Beschichtungsstoffen (RPB-BAW) geprüft und zugelassen. Den Laboruntersuchungen folgt anschließend noch ein Naturauslagerungstest, u. a. um die Laborergebnisse zu verifizieren. Die Testdauer der Langzeitauslagerung in der Natur (LZA) beträgt hierbei fünf Jahre.

Ziel der Untersuchungen ist es, einen Vergleich der Labortests mit praxisnahen Belastungen der Natur zu ermöglichen. Es ist vorgesehen, beschichtete Prüfplatten mit Korrosionsschutzsystemen verschiedener Hersteller mit jeweils identischer Applikation sowohl für die Langzeitauslagerung in der Natur wie auch für Kurzzeittests im Labor zu verwenden. Als ein relativ objektives Bemessungskriterium für die Schutzwirkung kann die Unterrostung an einer künstlichen Verletzung herangezogen werden. Da bei allen relevanten bisherigen Testverfahren die Unterrostung an der spezifischen künstlichen Verletzung (2,0 mm-Fräschnitt) maßgeblich ist, ist zu prüfen, inwieweit noch praxisrelevantere Verletzungen, wie z. B. Stoß (durch Transport- oder Einbauschäden von Bauteilen), gefunden werden können.

#### Auftragsnummer:

B3951.02.04.70006

#### Auftragsleitung:



Dr. Matthias Schmid  
 matthias.schmid@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Roland Baier  
 roland.baier@baw.de

#### Laufzeit:

2014 bis 2019

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

Für die Bauwerke der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) müssen qualitätsgeprüfte Korrosionsschutzstoffe für den Bauwerkserhalt bereitgestellt werden. Es ist zunächst zu prüfen, ob die Laborverfahren die Kriterien für brauchbare Schutzsysteme in ausreichender Differenzierung abbilden. Im Detail ist zu untersuchen, ob weitere bzw. neue Kriterien, die als typische Belastungen von Stahlwasserbauten in Betracht kommen, getestet werden müssten. Diese beinhalten z. B. die Belastung von Stahlwasserbauteilen durch Schlag, Stoß oder Scherung, welche bisher in keinem Regelwerk konsequent umgesetzt worden sind. Darüber hinaus müssen sich die Labortestverfahren an der Wirklichkeit messen. Hierzu dient u. a. der Vergleich von Kurzzeit-Laboreergebnissen mit jenen der Langzeitauslagerungen in der Natur unter Ausschluss von Präparationseinflüssen der Probelplatten.

## 3 Untersuchungsmethoden

Die Untersuchungen stützen sich auf unterschiedliche Vorgehensweisen, d. h. sowohl auf Labor- wie auch auf Naturauslagerungsversuche. Das Hauptkriterium ist die jeweilige Unterrostungstiefe der aufgetragenen Korrosionsschutzbeschichtung an den künstlichen Verletzungen. Daneben sollen noch Unterrostungsprüfungen an den Versuchsblechen mit neuartiger künstlicher Verletzung durch eine stoßartige Schlagverletzung (Impact-Test, in Anlehnung an DIN EN ISO 6272) durchgeführt werden. Diese erfolgt mit einem fallenden Gewicht aus definierter Fallhöhe und simuliert die Wirklichkeit von Schlagbeanspruchungen (Schiffstouchierung, Torausbau, mechanische Arbeiten am Verschlussorgan, Transportschäden) möglicherweise besser als eine einfache Fräsverletzung. Durch anschließende Prüfung der so geschädigten Probelplatten im neutralen Salzsprühnebeltest nach DIN EN ISO 9227 (NSS) kann die Korrosionsschutzwirkung des Beschichtungssystemes für diesen Extremfall ebenfalls abgeschätzt werden. Die Ergebnisse der Unterrostungen sollen statistisch ausgewertet werden, um eventuell existierende Korrelationen mit den anderen Testreihen zu ermitteln.

## 4 Ergebnisse

Die Auslagerungskampagne 2013 bis 2018 konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Alle Langzeitauslagerungsplatten wurden von den vier Binnen- und Küstenstandorten eingeholt, gereinigt und bewertet (Bild 1). Nach Abschluss des eigentlichen Zulassungsverfahrens wird im Anschluss der Vergleich der Natur- und Laborergebnisse erfolgen. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Korrelation einzelner Laborverfahren mit den Ergebnissen der Langzeitauslagerung.



Bild 1: Probelplatten nach der Naturauslagerung.

### Literatur:

Binder, G. (2008): Determine usable coating systems – results of laboratory tests versus long term trials in nature. In: NACE corrosion 2008, New Orleans, paper 08001 (2008), 1–15.

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2011): BAWRichtlinie Prüfung von Beschichtungssystemen für den Korrosionsschutz im Stahlwasserbau (RPB). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien).



## Entwicklung eines Bemessungskonzeptes für den Nachweis der Tragfähigkeit von Schlauchwehrmembranen

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Wurden in der Vergangenheit fast ausschließlich Wehrverschlüsse aus Stahl eingesetzt, stellt sich das Schlauchwehr unter bestimmten Randbedingungen als Alternative dar (Gebhardt 2006). Ferner zeichnet sich ab, dass auch dieser Verschlusstyp als ein Standard für künftige Neubaumaßnahmen von Wehranlagen der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) festgelegt wird.

Bislang gibt es weltweit keine einheitliche Methodik bei der Bemessung von Schlauchmembranen oder Normen, in denen das Sicherheitsniveau (z. B. Sicherheitsbeiwerte, Degradationsfaktoren) festgelegt wird. Eine Ausnahme ist Japan, wo es eine Richtlinie zur Planung von Schlauchwehren gibt, ohne dabei im Detail auf die Bemessung einzugehen. Da in Deutschland kein einheitliches Bemessungskonzept für Schlauchwehre existiert, wäre eigentlich eine Zustimmung im Einzelfall für jeden Neubau erforderlich. Dies hätte u. a. gegebenenfalls unterschiedliche Sicherheitsniveaus zur Folge.

Ziel des FuE-Vorhabens ist es, für die zur Anwendung geeigneten Membranen und deren Steifigkeitsparameter eine möglichst realitätsnahe Beanspruchungsermittlung durchzuführen. Anschließend soll ein eurocodekonformes Bemessungskonzept für Schlauchwehrmembranen entwickelt werden.

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

Die WSV wird zukünftig alte Wehranlagen durch neue ersetzen müssen. Dabei wird es auch zur Planung und Ausführung von Schlauchwehren kommen (z. B. Wehr Beihingen, Wehr Obernau, Wehr Neckarsulm und weitere an der Lahn). Um ein ausreichendes und einheitliches Sicherheitsniveau an den Anlagen der WSV zu erhalten und die Planungs- und Genehmigungsverfahren zu vereinfachen, ist das Vorhandensein eines Bemessungskonzeptes für den Nachweis der Tragfähigkeit von Schlauchwehrmembranen von großer Bedeutung.

#### Auftragsnummer:

B3951.02.04.70007

#### Auftragsleitung:



Ralf Gurt  
 ralf.gurt@baw.de

#### Laufzeit:

2014 bis 2020

### 3 Untersuchungsmethoden

Die zur Anwendung kommenden Schlauchwehrmembranen weisen ein nichtlineares, anisotropes Materialverhalten auf. Kraft-Verformungskurven aus Materialversuchen sind Voraussetzungen zur Bestimmung der Steifigkeitsparameter für die Materialgesetze in der Simulation. Neben den Zug- und Druckversuchen sind gegebenenfalls ergänzende biaxiale Zugversuche zur vollständigen Ermittlung der Simulationsparameter notwendig. Anschließend werden numerische Simulationen der Beanspruchungszustände von Schlauchmembranen mithilfe der Finiten-Elemente-Methode durchgeführt. Dabei kommen kommerzielle Programme zum Einsatz, die entsprechend große Verformungen und Nichtlinearitäten unterstützen. Materialgesetze, Belastungen und Kontakteigenschaften werden hier für die Berechnung hinterlegt. Relevante Spannungen werden ausgewertet und zur Bestimmung von Spannungskonzentrationen verwendet. Naturmessungen können (zur Verifizierung einzelner Ergebnisse) gegebenenfalls herangezogen werden.

### 4 Ergebnisse

Die Schlauchmembrane besteht aus elastomerbeschichteten Geweben. Die Gewebelinien aus Polyester oder Polyamid können nur auf Zug belastet werden. Der Beschichtungsstoff (beispielsweise EPDM) ist vergleichsweise zugschlaff und dient hauptsächlich zum Schutz der Gewebelinien und zum Abdichten des Schlauchvolumens. Diese werden als Deckschichten bezeichnet. Die InkompRESSibilität der Elastomere ( $\nu \approx 0,5$ ) führt jedoch zur Aufnahme von Druckspannungen in den Deckschichten. Somit kann sich im Falten- und Auflagerbereich – ähnlich wie beim Stahlbeton – ein Kräftepaar zwischen den beiden Materialien ausbilden. Daher ist es wichtig, diese Bereiche bei der Modellierung ausreichend genau abzubilden. Hierzu gehört die Unterscheidung zwischen Gewebe- und Elastomerlagen. Erste Untersuchungen mit einem homogenisierten Querschnitt erzielten nicht den gewünschten Erfolg. Aufgrund der höheren Zugsteifigkeit der Gewebe gegenüber dem Elastomer würde sich im verschmierten Zustand eine entsprechend hohe Biegespannung im Gewebe einstellen. Für die Bereiche der Auflagerbedingungen und der Falten nahe den Wangen ist die detaillierte Modellierung besonders wichtig. Daher ist der Aufbau als Verbundwerkstoff mit mehreren Elementlagen das Mittel der Wahl (Gurt et al. 2015).

In Bild 1 ist ein Vergleich einer realen Schlauchfalte mit einer Falte aus der Simulation zu sehen. Es ist gut zu erkennen, dass kaum ein Unterschied feststellbar ist. Mit ausreichender Berechnungsdauer können somit die Spannungen im Bereich der Falten zuverlässig ermittelt werden. Ebenso sind das Betrachten und das Analysieren des Verhaltens der Membrane im Schlauchinneren möglich.

Im Oktober 2019 wurde das BAWMerkblatt „Schlauchwehre (MSW) – Teil B: Nachweis der Tragfähigkeit von Membranen wassergefüllter Schlauchwehre an Binnenwasserstraßen“ (Bundesanstalt für Wasserbau 2019) vom BMVI offiziell eingeführt. Dieses beinhaltet ein Nachweisformat im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN EN 1990 (2010). Mit diesem Merkblatt können Neubauten geplant und statisch nachgewiesen werden.

Weitere Teile des Merkblattes werden die hydraulische Bemessung (A), die Materialwahl und -prüfung (C) sowie den Betrieb und die Unterhaltung (D) von Schlauchwehren behandeln. In weiteren numerischen Untersuchungen sollen weitere Klemmsysteme und Befestigungsdetails untersucht werden. Erfahrungen aus den laufenden Neubauprojekten werden ebenfalls in die weitere Forschung eingehen.

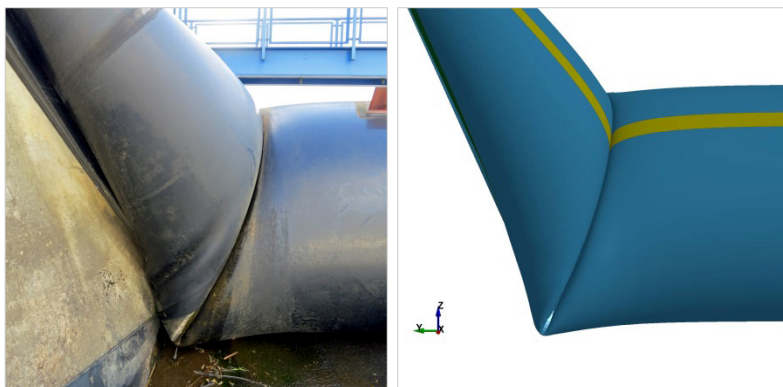


Bild 1: Realität und Simulation des Faltenbereichs im Vergleich, Blick von Unterwasser.

#### Literatur:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2019): BAWMerkblatt Schlauchwehre (MSW). Teil B: Nachweis der Tragfähigkeit von Membranen wassergefüllter Schlauchwehre an Binnenwasserstraßen. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien).

DIN EN 1990:2010-12: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung. Berlin: Beuth-Verlag.

Gebhardt, M. (2006): Hydraulische und statische Bemessung von Schlauchwehren. Karlsruhe: Universität Karlsruhe (TH), Institut für Wasser und Gewässerentwicklung – Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik. Dissertation.

Gurt, R.; Deutscher, M.; Gebhardt, M. (2015): Design and Analysis of Reinforced Rubber Membranes for Inflatable Dams. In: Onate, E.; Bletzinger, K.-U.; Kröplin, B. (Hg.) (2015): Structural Membranes: VII International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures. Barcelona, S. 306–317.



## Bemessung galvanischer Anoden im Stahlwasserbau

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Galvanische Anoden ergänzen oder ersetzen Fremdstromanlagen in vielen Bereichen des Stahlwasserbaus. Dabei sind die Auswirkungen, im Unterschied zu Fremdstromanlagen, nicht unmittelbar überprüfbar. Dies gilt besonders für das Erreichen des gewollten Schutzzieles der Potenzialabsenkung sowie für den Ablauf der elektrochemischen Reaktionen an der Oberfläche des jeweiligen Anoden- und Kathodenmetalls im Gewässer. Das heißt, dass z. B. auf der Kathodenseite Überschuss zu Störeinflüssen (kathodische Delamination und Blasenbildung) an der Korrosionsschutzbeschichtung führen und durch Nebenreaktionen eine gefährliche Wasserstoffentwicklung einleiten könnte. Andererseits ist auf der Anodenseite sowohl eine übermäßige Eigenkorrosion als auch ein inertes, stromloses Verhalten der Anoden wegen der Gefahr der Passivierung zu vermeiden.

In diesem Projekt sollen elektrochemische Messmethoden zur Bemessung von galvanischen Anoden in für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) charakteristischen Gewässern hinsichtlich

- einer konkreteren Aussage über Dimensionierung, Anbringung und Verbrauch der galvanischen Anoden,
- der Funktionssicherheit beim Kathodischen Korrosionsschutz mit galvanischen Anoden in Verbindung mit Korrosionsschutzbeschichtungen,
- der Erfassung und Charakterisierung möglicher Nebenreaktionen an der Anodenoberfläche sowie
- Möglichkeiten der Funktionskontrolle und Verbrauchsüberwachung untersucht werden.

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

Im Bereich der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) werden an Stahlwasserbauten etwa 400 Kathodische Korrosionsschutz Anlagen (KKS) betrieben. Ein Teil dieser KKS-Anlagen basiert auf dem galvanischen Prinzip der Metallauflösung im Wasser, wodurch diese Stahl-

#### Auftragsnummer:

B3951.02.04.70008

#### Auftragsleitung:



Dr. Matthias Schmid  
 matthias.schmid@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2021



bauwerke temporär vor der Korrosion geschützt werden. Für die Auslegung von KKS-Anlagen gilt das BAWMerkblatt „Kathodischer Korrosionsschutz im Stahlwasserbau“ (MKKS) (Binder 2015). Der hierin wiedergegebene Stand der Technik liefert allerdings keine Aussage über die Varianz der angegebenen Werte, z. B. für den praktischen Energieinhalt von Anoden und für Schutzstromdichten. Die hier vorgestellte Untersuchung soll daher das tatsächliche Verhalten von Anoden in Grenzfällen aufzeigen und so der Sicherstellung und Effektivierung des Einsatzes galvanischer Anoden dienen.

### 3 Untersuchungsmethoden

Es werden Versuche im Labor- und Technikumsmaßstab zur Parameterstudie durchgeführt (Bild 1). Hierbei werden die Gewässerparameter wie Leitfähigkeit, Salzkonzentration und Sauerstoffsättigung variiert. Weiterhin erfolgt auch eine Variation der eingesetzten Schutzstromdichten. Eine spätere Umsetzung auf tatsächlich zu schützende Bauwerke ist vorgesehen. Die drei Anodenmetalle Magnesium, Aluminium und Zink bzw. die typischerweise verwendeten Legierungen werden in den jeweils zur Anwendung vorgesehenen Gewässertypen auf ihr Auflöse- bzw. Passivierungsverhalten und die dabei durch den Schutzstrom freigesetzte Ladungsmenge getestet. Der fließende Schutzstrom (indirekt auch die lokale Stromdichte) und das jeweilige Anodenpotential werden durch Messungen mit einem Potentiostaten erfasst und untersucht.

Ein wichtiger Baustein ist die Ermittlung eines Wirkungsgrads des jeweiligen Anodenmetalls unter den gegebenen Gewässerbedingungen durch Vergleich der tatsächlichen und der theoretischen Schutzstrommenge.

### 4 Ergebnisse

Im Berichtszeitraum wurden keine Ergebnisse erzielt.

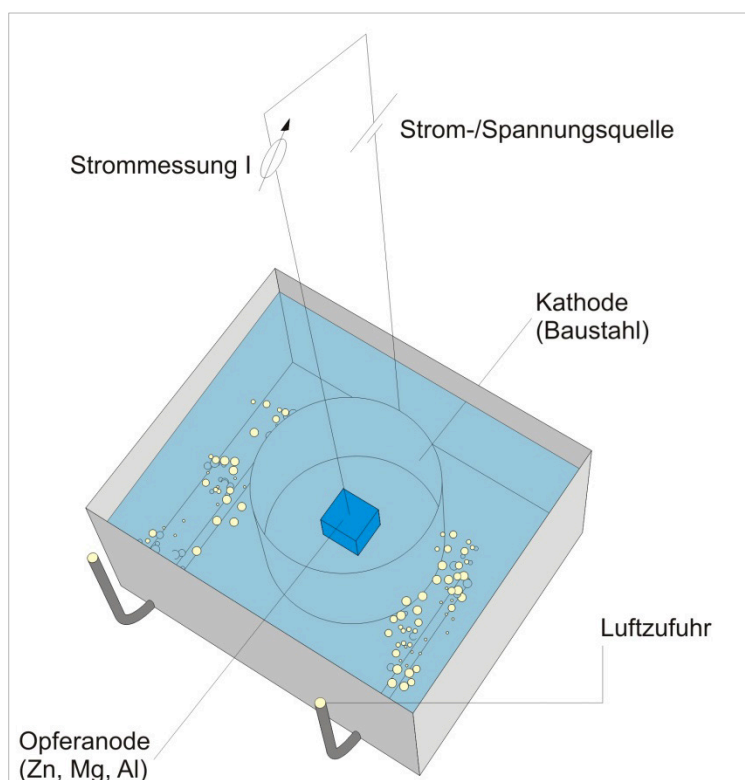
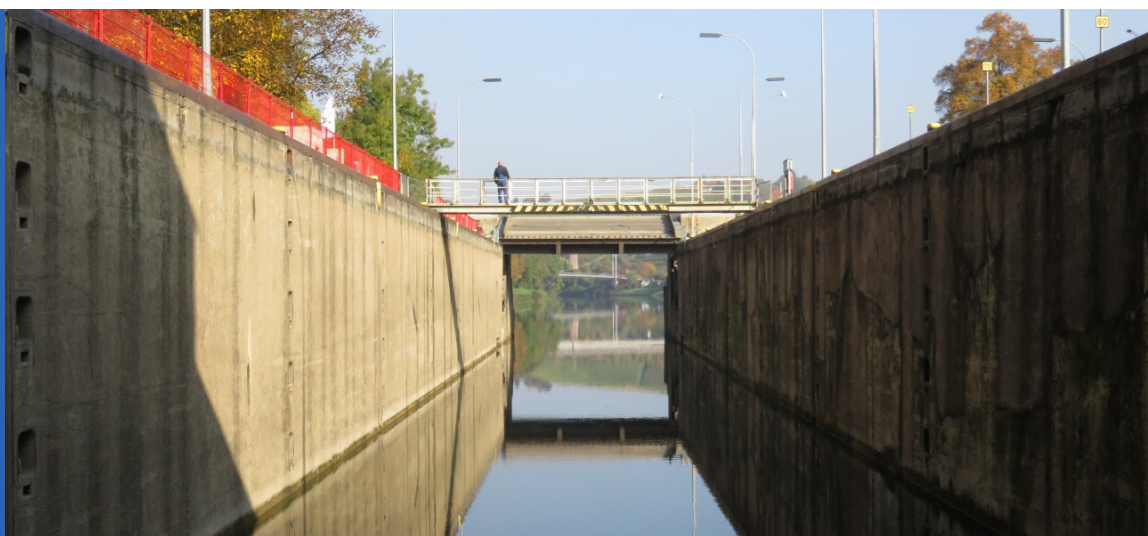


Bild 1: Schematische Zeichnung des Versuchsaufbaus.

#### Literatur:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2011): BAWMerkblatt Kathodischer Korrosionsschutz im Stahlwasserbau (MKKS). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien).



## Reparatur bzw. Ersatz von Korrosionsschutzmaßnahmen zum Erhalt des Korrosionsschutzes und der Stahlkonstruktion – Smart Repair

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Durch eine frühzeitige Reparatur bzw. den Einsatz von intelligenten Korrosionsschutzmaßnahmen zum Erhalt des Korrosionsschutzes von Bauwerken im Stahlwasserbau und Stahlhochbau ergeben sich sowohl langfristige Kosteneinsparungen als auch Sicherheitsgewinne. Sogenanntes „Smart Repair“ von Korrosionsschutzbeschichtungen kann bei Anwendung allgemein, speziell aber auch während der Bauwerksinspektion als kurzfristige Ausbesserungsmethode zu einer Verlängerung der Zeitspanne bis zur Grundinstandsetzung oder gar Ersatzneubau führen.

Das FuE-Vorhaben „Reparatur bzw. Ersatz von Korrosionsschutzmaßnahmen zum Erhalt des Korrosionsschutzes und der Stahlkonstruktion“ ist Teil des BMVI-Expertennetzwerks, das 2016 durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) initiiert wurde. Sieben Ressortforschungseinrichtungen und Fachbehörden des BMVI greifen gemeinsam drängende Probleme der Verkehrsinfrastrukturen durch Innovationen bei ihrer Anpassung an den Klimawandel, bei ihrer umweltgerechten Gestaltung sowie bei der Erhöhung ihrer Zuverlässigkeit auf.

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

Da ein Großteil der Infrastruktur der Bundeswasserstraßen bereits ein fortgeschrittenes Betriebsalter erreicht hat (Bild 1), drängt sich in vielen Fällen die zeitnahe Umsetzung eines Neubaus bzw. einer größeren Instandsetzungsmaßnahme auf. Häufig werden diese Maßnahmen im Vorfeld über einen sehr langen Zeitraum geplant und anschließend von Fachfirmen ausgeführt.

Dieses Vorgehen kann durch eine gezielte Reparatur der Beschichtungen für den Korrosionsschutz, die bereits rechtzeitig ausgeführt wurde, hinausgezögert werden. Daher ist es besonders wichtig, entsprechende Lösungen zu erarbeiten, damit es für den Anwender ohne viel Aufwand und detaillierte

#### Auftragsnummer:

B3951.02.04.70009

#### Auftragsleitung:



Mario Hörnig  
 mario.hoernig@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2019

Vorkenntnisse möglich ist, diese Reparaturarbeiten durchzuführen. Dazu sollen die gewonnenen Erkenntnisse aus den Labor- und Felduntersuchungen einen ersten Ansatzpunkt liefern, der gegebenenfalls darüber hinaus in ein etablierbares Prüfzenario für Reparaturprodukte aufgehen kann.

Im Zusammenhang mit Ausbesserungsbeschichtungen bzw. spezifischen Reparaturlösungen soll die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) bei den bereits bekannten Herausforderungen bei partiellen Entschichtungsverfahren in Bezug auf die Freisetzung von umwelt- und gesundheitsgefährdenden Stoffen (z. B. PAK und Asbest) durch toxikologische Untersuchungen im Labor, welche die Erkenntnisse der BAW vervollständigen, beraten und unterstützt werden.

### 3 Untersuchungsmethoden

Zur Prüfung der Anwendbarkeit bzw. der Funktionalität von Ausbesserungs- bzw. Reparaturprodukten im Stahlwasserbau und im Stahlhochbau sollen Untersuchungen sowohl im Labor als auch am Bauwerk Aufschluss geben. Dabei soll die Untersuchung von Aspekten der Handhabung genauso eine Rolle spielen wie die Einsatzfähigkeit und auch das Langzeitverhalten. Hierfür stehen in der WSV verschiedene Bauwerke zur Verfügung, welche es ermöglichen, bestimmte Produkte „vor Ort“ anzuwenden und über einen längeren Zeitraum zu überwachen.

Darüber hinaus sind jedoch Untersuchungen im Labor unabdingbar, um z. B. Extrembelastungen simulieren zu können. Nur wenn die Produkte und Lösungen an ihre Einsatzgrenzen gebracht werden, können auch Aussagen über das langfristige Verhalten am Bauwerk getroffen werden.

Nicht zuletzt sollen Recherchen über die bestehenden Schadenssituationen an verschiedenen Bauwerken Aufschluss über die zu reparierenden Bereiche geben. Genauso ist es von entscheidender Bedeutung zu erkennen, welche Schäden grundsätzlich als reparierbar einzustufen sind und bei welchen Schäden eine vollwertige Instandsetzung unter ökonomischen Gesichtspunkten vorzuziehen ist. Daher wird eine beispielhafte Kalkulation von Ausbesserung im Vergleich zur Teil- und/oder Vollinstandsetzung am Bauwerk angestrebt, um Grundlagen über die Effektivität dieser Arbeiten in Erfahrung zu bringen.

### 4 Ergebnisse

Innerhalb der neuen Versuchsreihe wurde die Art und Weise der initialen Oberflächenbeschädigung überarbeitet. Die Proben wurden dazu in einem Abrasionsteststand belastet, sodass die Originalbeschichtung gezielt entfernt werden konnte. Diese Art der Entschichtung ermöglichte, eine in ihren Abmessungen sehr genaue Schädigungsfläche zu erzeugen. Die nachgeschalteten Prozesse der korrosiven Belastung im mehrwöchigen kontinuierlichen Salzsprühnebel sowie der eigentlichen Reparatur der beschädigten Stellen waren identisch mit den vorherigen Versuchsreihen. Die veränderte Schädigungsstelle ließ es zu, dass Analyseverfahren wie Haftfestigkeitsprüfung oder Messung des Grades der Korrosion durchgeführt werden konnten und die Aussagekraft der einzelnen Ergebnisse erhöht wurde.

Aufgrund des hohen Praxisbezuges dieses Forschungsprojektes wurden in den vergangenen Monaten verschiedene Bauwerke der WSV besucht, um dort die Einsatzmöglichkeiten und Leistungsqualitäten der verschiedenen Reparatursysteme im Feld zu überprüfen. Erste Zwischenkontrollen der angelegten Versuchsflächen konnten bereits durchgeführt werden und zeigten größtenteils gute, zumindest aber differenzierbare Ergebnisse. Gleichzeitig wurde der nicht unwesentliche Bedarf an einem individuellen Erfahrungsaustausch und themenspezifischer Aufklärung im Bereich der Reparatur von Beschichtungsschäden der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der einzelnen Außenbezirke erkannt. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen und die Thematik von „Smart Repair“ dem eigentlichen Anwender zugänglich zu machen, wurde von der BAW ein Konzept für ein Schulungsprogramm erarbeitet, welches zukünftig direkt in den Außenbezirken der WSV stattfinden soll.



Bild 1: Detailaufnahme eines Korrosionsschutzschadens eines Schleusenobertores am Neckar.



## Mikrobiell induzierte Korrosion

### Ermittlung von Ursachen, Nachweismöglichkeiten und Vorhersage

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

In den vergangenen Jahren konnte eine Reihe von unvorhergesehenen Schadensfällen an Stahlwasserbauwerken beobachtet werden. Diesen Fällen war gemein, dass sie auf einen verstärkten lokalen Korrosionsangriff zurückzuführen sind, welcher durch die Einwirkung von Mikroorganismen hervorgerufen wurde. Diese sogenannte mikrobiell induzierte Korrosion (MIC) konnte zuletzt am Rhein-Herne-Kanal an Spundwänden aus den 1970er Jahren nachgewiesen werden. Hier konnte eine beschleunigte Korrosion der Spundwände mit lokal vollständigen Durchrostungen festgestellt werden, die partiell zu einem Funktionsverlust führte und eine Instandsetzung zwingend erforderlich machte.

Aus den an diesem Beispiel und früheren Fällen generierten Beobachtungen und Daten ergibt sich das Bild eines bisher schwer vorhersagbaren Phänomens mit einer lokal potentiell großen Schadenswirkung.

In diesem neuen Vorhaben sollen die auslösenden bzw. begünstigenden Faktoren, die Wechselwirkung von MIC und klassischen Korrosionsschutzstrategien und die möglichen Folgen von MIC untersucht werden. Hierzu sollen Untersuchungen an bekannten geschädigten Bauwerken und Laborversuche durchgeführt werden. Für die Laborversuche ist geplant, Bakterienkulturen zu verwenden, die bereits aus früheren Schadensfällen in der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) gewonnen wurden.

Aus den Versuchen soll ein Konzept zur Risikobewertung von Standorten und eine Strategie zum Nachweis und zur Sanierung von Schäden durch MIC abgeleitet werden.

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

Die WSV besitzt entlang der von ihr betreuten Wasserstraßen eine Vielzahl an Spundwänden als Kammerwände in Schleusen und zur Uferbefestigung entlang von Kanälen. Da MIC zu einer bislang unvorhersehbaren, vorzeitigen Schädigung von Stahlwasserbauwerken führen kann, welche in vielen Fällen nicht rechtzeitig erkannt wird, ist eine verbesserte Vorhersage/

#### Auftragsnummer:

B3951.02.04.70010

#### Auftragsleitung:



Sven-Erik Wulf  
 sven-erik.wulf@baw.de

#### Laufzeit:

2018 bis 2021

Identifikation der Materialschädigung bzw. von potentiell durch MIC gefährdeten Standorten wünschenswert und von großem wirtschaftlichem Interesse.

### 3 Untersuchungsmethoden

Zunächst ist eine intensive Sichtung der nationalen wie internationalen Fachliteratur zum Thema der mikrobiell induzierten Korrosion vorgesehen (Brill 1995, Videla und Herrera 2005). Hierbei scheint eine Fokussierung auf in der Fachliteratur dokumentierte Schadensfälle sinnvoll. Aus dieser Literaturrecherche sollen Parameter abgeleitet werden, welche für das Auftreten mikrobiell induzierter Korrosion von Stahlwasserbauwerken dominant sein können. Hier ist zudem geplant, Begehungen von aktuellen und bereits bekannten Schadensfällen, beispielsweise am Rhein-Herne-Kanal, mit einer genaueren Beprobung der Standorte durchzuführen, um gegebenenfalls Lücken in den Messdaten zu schließen bzw. neue aus der Literaturrecherche abgeleitete Parameter mit in die Vorortuntersuchungen einfließen zu lassen. Anschließend werden die bei der Begehung gewonnenen Daten ausgewertet und die genommenen Proben näher charakterisiert, u. a. durch Kohlenstoff/Schwefel-Bestimmung (z. B. zum Nachweis von bakteriellen Stoffwechselprodukten), BAW-Farbreaktion, chemische Analytik von Bodenproben und Korrosionsprodukten sowie gegebenenfalls durch metallografische Untersuchungen an geschädigten Stahlbauteilen.

Ein zweiter Aspekt ist der Aufbau eines geeigneten Laborversuchs, um mikrobielle Korrosionsprozesse unter definierten Bedingungen nachzustellen und untersuchen zu können. Hierbei sollen möglichst auch neue elektrochemische Messmethoden, z. B. elektrochemische Impedanzspektroskopie (Little und Lee 2007), zur Anwendung kommen. Bei der Entwicklung des Versuchsmodells sollen die Erkenntnisse aus den untersuchten Schadensfällen mit einfließen. Beispielsweise können die vor Ort gewonnenen Bakterienkulturen im Modellversuch verwendet werden, um so praxisnahe Korrosionsprozesse im Labor nachstellen zu können. Auf diese Weise können gegebenenfalls Aussagen über die Übertragbarkeit der Ergebnisse vom Laborversuch ins Feld generiert werden.

### 4 Ergebnisse

Bei Sichtung der zahlreich vorliegenden Fachliteratur wird deutlich, dass die mikrobielle Korrosion von einer Vielzahl von Parametern, z. B. der vorliegenden Umweltbedingungen und somit der Lebensbedingungen der Mikroorganismen, beeinflusst ist. Hierbei zeigt sich, dass im Bereich der Binnengewässer in vielen Fällen vor allem die ubiquitär vorkommenden, sulfatreduzierenden Bakterien (SRB) eine entscheidende Rolle beim Beschleunigen der Korrosionsvorgänge an den betroffenen Stahlbauwerken spielen. Dies zeigt sich auch an aktuellen Schadensfällen im Bereich der WSV, z. B. an den Schleusen Bachhausen, Canow und Geesthacht, wo die Schädigung nachweislich auch von der Wasserseite erfolgte. Hier konnten an allen Standorten auffällige Korrosionserscheinungen (pustelförmig), vor allem im Unterwasser und der WWZ, beobachtet und vor Ort die für die Beteiligung von SRB typischen Eisensulfide nachgewiesen werden. Im Labor konnten neben MIC-spezifischen Mineralien (Siderit) mit Hilfe der C/S-Analyse zum Teil sehr hohe Schwefelgehalte von bis zu 15 % in Korrosionsprodukten nachgewiesen werden, welche nur durch die Beteiligung von SRB erklärbar sind.

In einem ersten Laborversuch wurde ein wassergefülltes Stahlrohr mit Bakterien von einem Schadensfall geimpft. Es konnte gezeigt werden, dass sich beim Vorhandensein von SRBs innerhalb von wenigen Wochen an der Rohrwand ein Biofilm aufbaut und ein für diese Bakterien günstiges anaerobes und basisches Milieu einstellt.



Bild 1: Abgelöste, auffällige Rostpusteln an einem Edelstahlblech in einer Schleuse, an welchen deutlich Sulfide nachgewiesen wurden.

#### Literatur:

Brill, H. (Hg.) (1995): Mikrobielle Materialzerstörung und Materialschutz. Jena, Stuttgart: G. Fischer Verlag.

Little, B. J.; Lee, J. S. (2007): Electrochemical techniques applied to microbially influenced corrosion. In: Microbiologically Influenced Corrosion. Hoboken; John Wiley & Sons, Inc.

Videla, H. A.; Herrera, L. K. (2005): Microbiologically influenced corrosion: looking to the future. In: International Microbiology 8, 169–180.



## Frostwiderstand zementgebundener Baustoffe

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Angesichts der rasanten technischen Entwicklung auf dem Baustoffsektor und eines grenzüberschreitenden europäischen Marktes wird es zunehmend erforderlich, das auf langjährigen Erfahrungen mit bestimmten Baustoffen und Bauverfahren basierende deskriptive Konzept zur Sicherstellung eines ausreichenden Frostwiderstandes des Betons durch eine direkte Prüfung (performance concept) zu ergänzen. Auf diese Weise soll sichergestellt werden, dass die im Verkehrswasserbau geforderte Nutzungsdauer von 100 Jahren auch mit ausreichender Wahrscheinlichkeit erreicht wird. Von maßgeblicher Bedeutung für die Intensität eines Frostangriffes auf Beton und damit auch für Prüfverfahren und Abnahmekriterien sind die Temperaturbeanspruchung und der Wassersättigungsgrad des Betons am jeweiligen Verwendungsort. Über die Größenordnung beider Parameter im Bauwerk lagen bislang kaum Informationen vor. Die Zielsetzungen des Vorhabens lauten wie folgt:

- a) Verifizierung der Frostprüfung gemäß ZTV-W LB 219 (heute: BAW-Merkblatt „Frostprüfung von Beton“)
- b) Ermittlung der tatsächlichen Temperaturbeanspruchung und des Wassersättigungsgrades im Beton von Verkehrswasserbauwerken über die Durchführung von Langzeitmessungen
- c) Unterstützung der Aktivitäten der Arbeitsgruppe "Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse" des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) (Siebel et al. 2005)

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

Verkehrswasserbauwerke unterliegen aufgrund ihrer direkten Beaufschlagung mit Süß- bzw. Meerwasser in Verbindung mit einer großen Anzahl von Frost-Tau-Wechseln infolge von betriebs- und/oder gezeitenbedingten Wasserstandsänderungen einer besonders intensiven Frostbeanspruchung. Der zielsicheren Vermeidung von Betonen mit unzureichendem Frostwiderstand kommt im Verkehrswasserbau angesichts der eingesetzten Betonkubaturen und im Hinblick auf die Vermeidung instandsetzungsbedingter Schifffahrtsunterbrechungen eine erhebliche Bedeutung zu.

#### Auftragsnummer:

B3951.03.04.08099

#### Auftragsleitung:

Andreas Westendarp  
andreas.westendarp@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Dr. Frank Spörel  
frank.sporel@baw.de

#### Laufzeit:

1998 bis 2019

### 3 Untersuchungsmethoden

Die Bestimmung des Frostwiderstands und weiterer Parameter, insbesondere zur Porenstruktur des Zementsteins, erfolgte an Betonen aus bestehenden Bauwerken sowie an gesondert hergestellten, im Labor bzw. an Bauwerken ausgelagerten Betonprobekörpern. Die Ermittlung der Temperaturbeanspruchung und des Sättigungsgrades von Beton in Schleusenbauwerken erfolgt über Langzeitmessungen über mehrere Jahre hinweg mittels Temperatursensoren und Multiring-Elektroden an mehreren Bauwerken.

### 4 Ergebnisse

Die Untersuchungen zu den Schritten a) und b) gemäß Kapitel 1 haben zur Entwicklung des heute gültigen BAW-Merkblattes „Frostprüfung von Beton“ geführt. Derzeit noch laufende Auslagerungsversuche von Betonen dienen zur Erfassung von Schädigungen infolge von Frosteinwirkung unter Praxisbedingungen im Vergleich zur Schnellprüfung mittels CIF-Test. Da eine Frostschädigung in der Praxis ein lang andauernder Prozess ist, sind langlaufende Auslagerungsversuche erforderlich, um eine fundierte Beurteilung durchführen zu können. Messaufnehmer für die Bestimmung von Temperaturen und Feuchtigkeitsgehalten wurden in einer Kammerwand der Doppelschleuse Hohenwarthe sowie in Sparbeckenwänden der Schleuse Hilpoltstein installiert (Westendarp 2009, Spörel et al. 2009, Spörel 2010a-d, 2012). Danach sind jahreszeitliche Schwankungen des Sättigungsgrades in den Expositionen mit mäßiger Sättigung (hier: XF1) grundsätzlich wesentlich stärker ausgeprägt als mit hoher Sättigung (hier: XF3). Hohe Sättigungsgrade treten in den Expositionsklassen XF1 und XF2 als seltene Spitzenwerte auf, an die sich in der Regel eine Trocknungsphase anschließt. Bei Bauteilen mit ständigem oder periodischem Wasserkontakt, wie beispielsweise Schleusen im Unterwasser- und im Wasserwechselbereich, ist der Sättigungsgrad des Randbereiches hingegen weitgehend konstant auf hohem Niveau. Im Bereich der Betondeckung treten in der Wasserwechselzone kaum Schwankungen auf, während hier im frei bewitterten Bereich jahreszeitliche Schwankungen auf niedrigerem Niveau vorhanden sind. Hohe Wassersättigungsgrade in Verbindung mit ausgeprägten Temperaturänderungen infolge von betriebsbedingten Wasserstandsänderungen führen bei Verkehrswasserbauwerken zu Frostbeanspruchungen, die für deutsche Gegebenheiten dem pessimalen Bereich zuzuordnen sind. Die Untersuchungsergebnisse wurden im Rahmen einer Dissertation analysiert (Spörel 2013) und ergänzend mit Erkenntnissen zur Schadensausprägung vorgestellt (Spörel 2016). Zur Erweiterung der Datenbasis wurde die 2013 in Betrieb gegangene Schleuse Kersdorf während der Bauphase mit dem gleichen Messsystem wie die Schleusen Hohenwarthe und Hilpoltstein ausgerüstet. Zur Erfassung einer XF3-Beanspruchung an horizontalen Flächen wurde in 2012 eine Betonplatte hergestellt und analog zu den Bauwerksmessungen mit Temperatursensoren und MRE ausgestattet und auf dem Gelände der BAW ausgelagert. Auswertungen zum Elektrolytwiderstand in unterschiedlicher Messtiefe (R) liefern neue Erkenntnisse zu Gefriervorgängen und frostinduzierten Wasseraufnahmen während des CIF-Tests an Bohrkernen aus dem Bauteil (Bild 1). Diese werden zum Abgleich mit den Vorgängen unter Praxisbedingungen und einer Einordnung der Beanspruchungsintensität herangezogen.

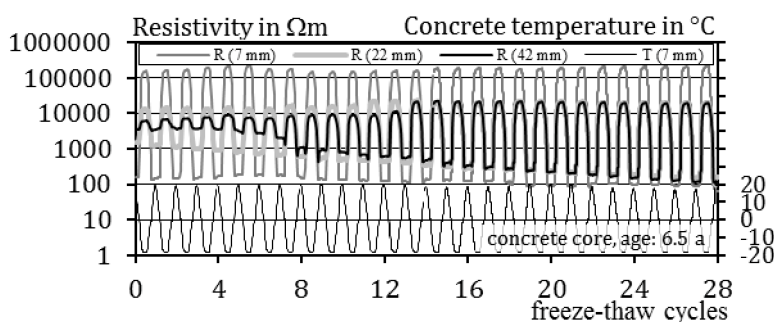


Bild 1: Frostbeanspruchung während des CIF-Tests (Spörel 2019).

#### Literatur:

Siebel, E. et al. (2005): Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 560.

Spörel, F. (2019): Monitoring of the freeze-thaw attack on concrete. In: NTNU Trondheim (Hg.) Workshop Proceedings No. 16. Concrete in Arctic Conditions. S. 75–78.

Spörel, F. (2016): Freeze-thaw attack on concrete structures – laboratory testing, monitoring, practical experience. In: Hasholt, M. T. et al. (ed.) Proc. of the International RILEM Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering, Segment on Frost Action in Concrete. Lngby: RILEM publications, S. 151–160.

Spörel, F. (2013): Frostbeanspruchung und Feuchtehaushalt in Betonbauwerken. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 604.

Spörel, F. (2012): Freeze-thaw attack on concrete structures. Proc. of the 9th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, Karlsruhe, S. 667–672.

Spörel, F. (2010a): Bauwerke des Wasserbaus unter Frostbeanspruchung. Frostkolloquium des DAfStb, BAW, BaSt, Berlin.

Spörel, F. (2010b): Bauwerksmessungen. Tagungsband, 39. Aachener Baustofftag.

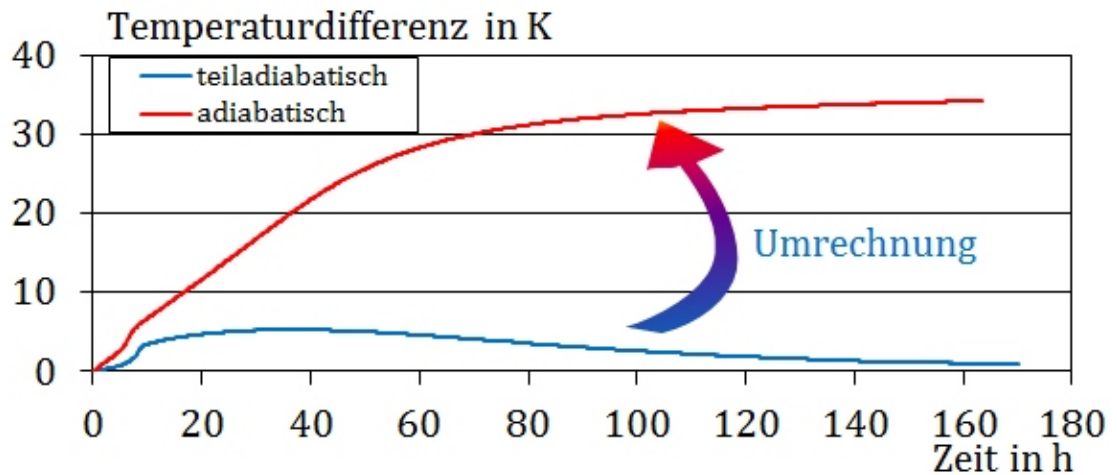
Spörel, F. (2010c): Dauerhaftigkeit Bauwerke: Frostwiderstand zementgebundener Baustoffe. In: Tagungsband BAW-Kolloquium „Forschung und Entwicklung im Küstenverkehrswasserbau“, S. 51–58.

Spörel, F. (2010d): Frostbeanspruchung von Wasserbauwerken am Beispiel der Schleuse Hohenwarthe. VDB Regionalgruppentagung, Rheinfelden.

Spörel, F.; Westendarp, A. (2015): Frostwiderstand von Beton im Verkehrswasserbau. DBV Rundschreiben 244, Ausgabe März 2015, S. 10–12.

Spörel, F.; Westendarp, A.; Brameshuber, W. (2009): Frostbeanspruchung von Schleusenbauwerken. Tagungsband 17. Internationale Baustofftagung ibausil in Weimar, S. 2-735–2-740.

Westendarp, A. (2009): Wasserbauwerke unter Frostbeanspruchung. 6. Symposium „Baustoffe und Bauwerkserhaltung“, Universität Karlsruhe.



## Messverfahren Hydratationswärme

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Entwicklung der Hydratationswärme im Beton ist zur Erfassung der daraus resultierenden Zwangspannungen in massigen Bauteilen von Bedeutung. Die adiabatische Temperaturerhöhung geht als Eingangsparameter direkt in die Zwangbemessung ein. Daher kommt den Messverfahren zur Erfassung dieses Eingangsparameters eine besondere Bedeutung zu. Zur Bestimmung der Hydratationswärme und der Ableitung der adiabatischen Temperaturerhöhung des Betons stehen zahlreiche Verfahren zur Verfügung. Inwiefern die Ergebnisse der Verfahren miteinander korrelieren, ist nicht bekannt und soll im Rahmen des FuE-Vorhabens untersucht werden. Insbesondere ist dabei der Abgleich zwischen rechnerischen und experimentellen Verfahren von Interesse.

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

Die Hydratationswärmeentwicklung ist im Bereich der WSV bei einem Großteil der Bauvorhaben von Interesse, da in der Regel massige Bauteile vorhanden sind. Zur Ermittlung der adiabatischen Temperaturerhöhung sieht die ZTV-W LB 215 (2012) neben dem quasiadiabatischen 8-m<sup>3</sup>-Block weitere Methoden vor, die in der Leistungsbeschreibung festgelegt werden können, wie beispielsweise das adiabatische Betonkalorimeter oder eine rechnerische Ermittlung. Unter bestimmten Randbedingungen, wie zum Beispiel Baumaßnahmen mit geringen Betonkubaturen, wird häufig der Aufwand für den 8-m<sup>3</sup>-Block diskutiert, alternative Nachweisformate werden in Erwägung gezogen. Einfache Versuche oder Rechenverfahren wären bei entsprechender Eignung insbesondere in diesen Fällen gegebenenfalls eine Alternative.

### 3 Untersuchungsmethoden

Zur rechnerischen Bestimmung der adiabatischen Temperaturerhöhung von Beton gibt es verschiedene Verfahren. Sie benötigen als wesentlichen Eingangsparameter die Hydratationswärmeentwicklung des Zementes. Diese wird bei der Zementherstellung im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) bestimmt. Die Hydratationswärmeentwicklung des Zementes kann mit drei verschiedenen Methoden experimentell ermittelt werden.

#### Auftragsnummer:

B3951.03.04.70004

#### Auftragsleitung:

Dr. Frank Spörel  
 frank.spoerel@baw.de

#### Laufzeit:

2008 bis 2020



Diese Methoden haben als eigentliche Aufgabe die Klassifizierung der LH-Eigenschaft eines Zementes, also die Kennzeichnung eines Zementes mit niedriger Hydratationswärmeentwicklung. Das Verfahren nach DIN EN 196-8:2010-07, das sogenannte Lösungswärmeverfahren, ist das Referenzverfahren, welches aber kaum noch verbreitet ist. Stattdessen verwenden fast alle Zementhersteller das Verfahren der isothermen Wärmeflusskalorimetrie (DIN EN 196-11:2019-03). Beim weiteren zulässigen Verfahren nach DIN EN 196-9:2010-07 handelt es sich um ein teiladiabatisches Verfahren an einem mit dem zu prüfenden Zement hergestellten Mörtel. Dieses Verfahren ist allerdings in Deutschland kaum verbreitet. Bezüglich der Zusammenhänge der mit unterschiedlichen Verfahren ermittelten Kennwerte bestehen derzeit noch einige Unklarheiten. Dies bedeutet, dass allein aus der Wahl des Verfahrens bereits Streuungen beim wesentlichen Eingangsparameter für die Hydratationswärmeberechnung zu erwarten sind. Zur Einordnung der LH-Eigenschaft ist dies gegebenenfalls ausreichend, zur Berechnung der adiabatischen Temperatur ist dies aber eventuell kritisch zu sehen. Daher wurden Untersuchungen an fünf Zementen und daraus hergestellten Betonen durchgeführt, um die Aussagekraft verschiedener Rechenmethoden zu erfassen.

#### 4 Ergebnisse

Die Untersuchungen wurden im Wesentlichen durch den VDZ in Düsseldorf durchgeführt. Ergänzende Ergebnisse zur adiabatischen Temperaturerhöhung wurden durch die BAW bereitgestellt. In einem Sachstandsbericht zur adiabatischen Temperaturerhöhung von Beton wurden die Erkenntnisse zusammengefasst (Müller et al. 2018). Es erfolgte eine Aufbereitung von Daten zur Hydratationswärmeentwicklung, die mit den oben genannten Prüfverfahren an fünf unterschiedlichen Zementen bestimmt wurden. Die Abweichungen zum Referenzverfahren betragen bis zu etwa 60 J/g. Für die eigentliche Aufgabe der Prüfverfahren – die Einstufung der LH-Eigenschaft – war dies unkritisch, für die Verwendung der Messwerte als Eingangsparameter zur Berechnung der adiabatischen Temperaturerhöhung sind jedoch Einschränkungen zu erwarten.

Die weiteren Untersuchungen haben gezeigt, dass nach derzeitigem Erkenntnisstand die adiabatische Temperaturerhöhung von Beton rechnerisch nur mit großen Unsicherheiten prognostiziert werden kann. Mit einem vereinfachten Rechenansatz nach Gleichung (1) konnte die adiabatische Temperaturerhöhung nach sieben Tagen mit annähernd gleichwertiger Genauigkeit abgeschätzt werden wie mit kommerziell erhältlichen komplexen Rechenprogrammen. Ursachen hierfür sind neben Schwankungen aus den Prüfverfahren die für die Berechnungen erforderlichen, auf Basis von Literaturdaten zu treffenden Annahmen. Diese Annahmen können nur eine Abschätzung sein.

$$\Delta T_n(t) = \frac{z \cdot H_{n,i}(t)}{\rho_B \cdot c_B \cdot 0,8} \quad (1)$$

Mit:

$\Delta T_{n(t)}$	Adiabatische Temperaturerhöhung nach t Tagen in K
z	Zementgehalt in kg/m <sup>3</sup>
$H_{n,a(t)}$	isotherme Hydratationswärme des Zements zum Zeitpunkt t in J/g
$\rho_B$	Betonrohddichte in kg/m <sup>3</sup>
$c_B$	Spezifische Wärmekapazität des Beton in J/(g*K) (vereinfachte Annahme: 1,1 )

Die im Rechenansatz zu treffenden Annahmen können unter ungünstigen Randbedingungen Abweichungen von mehreren Kelvin bedingen. Zur Einordnung der Streuung des wesentlichen Eingangsparameters Hydratationswärme des Zementes wäre es empfehlenswert, aktuelle WPK-Daten eines Zementes aus dem Zeitraum eines Jahres heranzuziehen, um Informationen zu Produktionsstreuungen zur Bewertung der Berechnungsergebnisse einbeziehen zu können. In einem nächsten Schritt erfolgt eine Bewertung der Erkenntnisse im Hinblick auf eine Umsetzung im Regelwerk der ZTV-W LB 215 (2012).

Aktuell wurden Messungen im adiabatischen Betonkalorimeter durchgeführt, um die Verfahrensweise der neu und erstmals erschienenen DIN EN 12390-15:2019-10 anzuwenden. Diese sind weitgehend abgeschlossen und werden aktuell ausgewertet.

#### Literatur:

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hg.) (2012) ZTV-W LB 215: Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Zusätzliche technische Vertragsbedingung – Wasserbau).

DIN EN 196-Reihe: Prüfverfahren für Zement – Teil 8: Hydratationswärme – Lösungsverfahren (2010-07); Teil 9: Hydratationswärme – Teiladiabatisches Verfahren (2010-07); Teil 11 Hydratationswärme – Isotherme Wärmeflusskalorimetrie-Verfahren (2019-03). Beuth-Verlag, Berlin.

DIN EN 12390-15:2019-10 Prüfung von Festbeton – Teil 15: Adiabatisches Verfahren zur Bestimmung der Wärme, die während des Erhärtungsprozesses von Beton freigesetzt wird; Deutsche Fassung EN 12390-15:2019.

Müller, C.; Schäffel, P.; Hermerschmidt, W.; Brauer, N.; Ehmke, J. (2018): Sachstandsbericht zur adiabatischen Temperaturerhöhung von Beton. Düsseldorf: VDZ gGmbH.

## Forschung Xpress



# Betone für Verkehrswasserbauwerke mit Hydroabrasionsbeanspruchung

## 1 Aufgabenstellung und Ziel

Im Bereich des Verkehrswasserbaus werden Betonoberflächen durch Hydroabration in unterschiedlicher Ausprägung beansprucht (Tosbecken, Wehrrücken, Sparbeckenzuläufe, Schleusensohlen, Schleusenkammerwände). Im Betonregelwerk wird zur Beschreibung der Intensität der mechanischen Verschleißbeanspruchung eine Expositionsklasseneinteilung XM1 bis XM3 vorgenommen. Inwiefern die im Wesentlichen aus Verkehr herrührende Expositionsklassensystematik auch die Hydroabration angemessen beschreibt, ist oft Gegenstand von Diskussionen. Die Untersuchungen verfolgen daher folgende wesentliche Ziele hinsichtlich der Beschreibung der Einwirkungs- und Widerstandsseite infolge Hydroabration:

- a) Erarbeitung einer Klassifizierung für die Hydroabrasionsbeanspruchung analog zu den Expositionsklassen in Zusammenarbeit mit der TU Dresden
- b) Bewertung von Performance-Prüfverfahren hinsichtlich deren Eignung zur Bewertung relevanter Schädigungsmechanismen durch Hydroabration
- c) Erarbeitung von Anforderungen an Betonausgangsstoffe und Betonzusammensetzungen für einen hinreichenden Hydroabrasionswiderstand.

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

Etwa 10 % der Wehranlagen und 5 % der Schleusenbauwerke im Verantwortungsbereich der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) weisen Schäden infolge Hydroabration auf, welche die Tragfähigkeit oder Gebrauchstauglichkeit beeinträchtigen (Schadensklassen 3 oder 4) (Spörel et al. 2015). Bei Bauwerken, die einer solchen Beanspruchung ausgesetzt sind, ist es daher von zentraler Bedeutung, Betone oder Betonerersatzsysteme einzusetzen, die der Beanspruchung einen ausreichenden Widerstand entgegensetzen. Aufwendige Instandsetzungen sollen damit künftig möglichst vermieden bzw. erforderliche Instandsetzungsmaßnahmen dauerhaft gegenüber dieser Beanspruchung ausgeführt werden.

### Auftragsnummer:

B3951.03.04.70008

### Auftragsleitung:

Dr. Frank Spörel  
 frank.spoerel@baw.de

### Laufzeit:

2010 bis 2021

### 3 Untersuchungsmethoden

Die Erkenntnisgewinne sollen über eine Literatursichtung, theoretische Betrachtungen und Simulationen sowie Bauwerks- und Laboruntersuchungen erfolgen. Im Labormaßstab werden drei für die Simulation einer Beanspruchung aus Hydroabrasion geeignete Prüfverfahren zur Bewertung des Betonwiderstandes herangezogen.

### 4 Ergebnisse

Die Erarbeitung von Schritt a) ist mit einem Vorlauf zu den Schritten b) und c) in Zusammenarbeit mit der TU Dresden, Institut für Wasserbau, erfolgt (Stamm und Helbig 2016). Erste hydroabrasionsbedingt geschädigte Bauwerke der WSV wurden in die Betrachtungen aufgenommen und 3D-hydrodynamische Simulationen der Fließverhältnisse durchgeführt sowie erste Ansätze zur Klassifizierung der Beanspruchung dargestellt. Ergänzende Betrachtungen wurden im Rahmen einer Masterarbeit in der BAW (Siggelkow 2016) am Beispiel einer Wehranlage mit massiven Schäden angestellt. Insgesamt haben die Untersuchungen in den besonders von Schäden betroffenen Bereichen Fließgeschwindigkeiten zwischen etwa 3 und 7 m/s ergeben. Da die Bewegung des Geschiebes und die zeitliche Verfügbarkeit bei den Simulationen derzeit nicht berücksichtigt werden können, erlauben die Erkenntnisse bislang lediglich eine Beschreibung des Schädigungspotentials infolge der Fließgeschwindigkeiten.

Schritt b) wurde im Baustofflabor der BAW mit drei Laborprüfverfahren begonnen. Zur Beschreibung und Bewertung der Einwirkungsintensität der Prüfeinrichtungen wurde unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus Schritt a) eine Masterarbeit durchgeführt (Ullrich 2016). Wesentliche Erkenntnis dieser Untersuchungen war, dass die Prüfverfahren trotz deutlich unterschiedlicher Einwirkungsintensität Unterschiede der Betonqualität gleichermaßen abbilden und differenzieren können. Weiterhin zeigten die Untersuchungen, dass die Anwendung existierender Modelle zur Beschreibung des Fortschritts von Abrasionsschäden unter Einbeziehung der Einwirkungsseite derzeit aufgrund zahlreicher zu treffender Annahmen mit großen Unsicherheiten versehen ist. Darüber hinaus wurde deutlich, dass teilweise Präzisierungen der Prüfrandbedingungen erforderlich sind.

Untersuchungen zu Schritt c) wurden im Rahmen einer Master- und einer Diplomarbeit durchgeführt (Klessing 2017, Uhrner 2017). Eine Zusammenführung der Ergebnisse der drei genannten, in der BAW durchgeführten Abschlussarbeiten sowie weiterführender Auswertungen wurde veröffentlicht (Spörel 2018). Als wesentliches Ergebnis wurde herausgearbeitet, dass der Mikro-Deval-Koeffizient der Gesteinskörnung einen dominanten Einfluss auf den Widerstand des Betons gegenüber Hydroabrasionseinwirkung hat (siehe Bild 1). Dies war bei allen drei Prüfverfahren trotz der teilweise deutlich unterschiedlichen Beanspruchungsintensität der Fall.

Aktuelle Ergebnisse weisen darauf hin, dass eine Kombination aus Eigenschaften der Gesteinskörnung und der Zementsteinmatrix geeignet sein kann, den Abrasionswiderstand zu beschreiben. Gleichung (1) wurde aus den Versuchsergebnissen abgeleitet (Spörel 2019). Weiterführende Auswertungen beschäftigen sich mit der Praxisübertragbarkeit unter Berücksichtigung der Einwirkung.

$$r_{ha} = \frac{f_c}{MD} \quad (1)$$

$r_{ha}$  Hydroabrasive resistance parameter  
 $f_c$  Druckfestigkeit, Nassgelagerte Zylinder,  $h/d=2$  [MPa]  
 $MD$  Micro-Deval Koeffizient, DIN EN 1097-1 [M.-%]

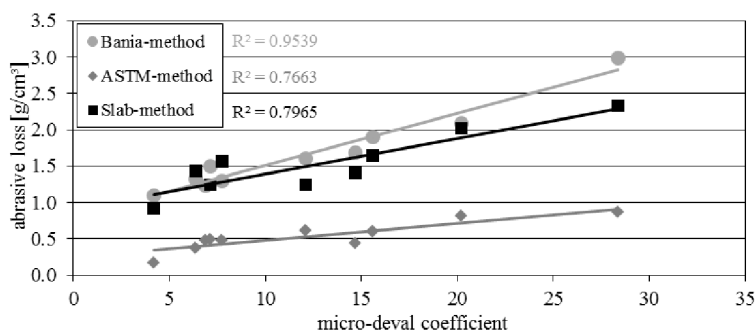


Bild 1: Zusammenhang zwischen Mikro-Deval-Koeffizient der Gesteinskörnung und Hydroabrasionsverschleiß des Betons (Spörel 2018).

#### Literatur:

Klessing, V. (2017): Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Gesteinskörnung auf den Hydroabrasionswiderstand von Beton. Masterarbeit, KIT.

Siggelkow, M. (2016): Hydroabrasion an Wehranlagen – Hydronumerische Simulation zum Verständnis der Schädigungsmechanismen. Masterarbeit, Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft.

Spörel, F. (2018): Hydroabrasive exposure and concrete resistance against abrasion erosion. In: ACI SP-326 Durability and Sustainability of Concrete Structures (DSCS 2018) – Proceedings 2nd International Workshop, 75.1–75.10.

Spörel, F. (2019): Influence of Concrete Properties on the resistance against hydroabrasive impact. In: Proceedings fib Symposium 2019, S. 1979-1986

Spörel, F.; Helbig, U.; Westendarp, A.; Stamm, J. (2015): Hydroabrasionsbeanspruchung von Verkehrswasserbauwerken. In: Bautechnik 92 (8), S. 538–548.

Stamm, J.; Helbig, U. (2016): Wissenschaftliche Bearbeitung der Einwirkseite hydroabrasiver Belastungen auf Wasserbauwerke – research report 2014/14, Technische Universität Dresden.

Uhrner, C. (2017): Einfluss von Sieblinien und Eigenschaften von Gesteinskörnung auf den Betonwiderstand gegenüber Hydroabrasion. Diplomarbeit, TU Dresden.

Ullrich, S. (2016): Bewertung von Performance-Prüfverfahren hinsichtlich deren Eignung zur Beurteilung wasserbaulicher Schädigungsmechanismen durch Hydroabrasion. Masterarbeit, Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft.



## Instandsetzung von Schleusenanlagen unter Betrieb (IuB)

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) verfügt über etwa 260 Schleusenanlagen mit lediglich einer Schleusenkammer. Angesichts der Altersstruktur und des baulichen Zustandes zeichnet sich bei diesen Bauwerken kurz- und mittelfristig ein erheblicher Instandsetzungsbedarf ab, sofern eine weitere mittel- oder langfristige Nutzung der Schleusenanlagen beabsichtigt wird.

Die Durchführung grundlegender Instandsetzungsmaßnahmen am Massiv- oder am Stahlwasserbau bedingt bei Schleusenanlagen mit nur einer Schleusenkammer gemäß Reschke (2016) eine Außerbetriebnahme der gesamten Schleusenanlage und damit eine Unterbrechung zumindest der durchgängigen Schifffahrt auf der zugehörigen Wasserstraße. Für die Grundinstandsetzung des Massivbaus einer Schleusenanlage mit konventionellen Bauverfahren sind selbst unter günstigen Randbedingungen Mindestbauzeiten von etwa zwei bis drei Jahren erforderlich.

Der Zustand einzelner Schleusenanlagen an einer Wasserstraße differiert selbst bei gleicher oder annähernd gleicher Bauweise und Errichtungszeit stark. Ein unmittelbarer Instandsetzungsbedarf der einzelnen Schleusenanlagen an einer Wasserstraße tritt unter rein technischen Gesichtspunkten im Regelfall zu sehr unterschiedlichen Zeitpunkten auf. Die gleichzeitige, zumindest teilweise prophylaktische Instandsetzung aller Schleusenanlagen an einer Wasserstraße während einer mehrjährigen Gesamtspernung dürfte vor diesem Hintergrund genauso wenig ein akzeptabler Weg sein wie wiederkehrende Unterbrechungen der Schifffahrt immer dann, wenn eine weitere Anlage zur Instandsetzung ansteht. Ein Ersatzneubau einzelner Instandsetzungsbedürftiger Schleusenanlagen parallel zum weiterlaufenden Betrieb der vorhandenen Anlage dürfte zwar fallweise, nicht aber bei allen 260 Einkammerschleusen realisierbar sein.

Vor diesem Hintergrund ist die Frage zu beantworten, ob umfassende Instandsetzungsmaßnahmen an Schleusenanlagen zur Sicherstellung einer weiteren mittel- oder langfristigen Nutzung nicht innerhalb bestimmter täglicher Zeitfenster von beispielsweise 12 Stunden, in denen die Schifffahrt kurzzeitig unterbrochen wird, gegebenenfalls in Kombination mit einzelnen mehrwöchigen Schifffahrtssperrungen, realisiert werden können.

#### Auftragsnummer:

B3951.03.04.70011

#### Auftragsleitung:



Andreas Westendarp  
andreas.westendarp@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Thomas Hesse  
thomas.hesse@baw.de  
Wladimir Klein  
wladimir.klein@baw.de  
Dr. Thorsten Reschke  
thorsten.reschke@baw.de  
Dominik Waleczko  
dominik.waleczko@baw.de

#### Laufzeit:

2014 bis 2022

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

Für die Binnenschifffahrt sind immer wiederkehrende längerfristige Unterbrechungen des Verkehrs auf ihren Wasserstraßen nicht akzeptabel. Umfahrungsmöglichkeiten bestehen im Regelfall nicht oder bedingen einen erheblichen wirtschaftlichen Mehraufwand, welcher die Konkurrenzfähigkeit dieses Verkehrsträgers grundsätzlich in Frage stellen würde. Längere Sperrungen würden auch zu Verkehrsverlagerungen führen, die nach Abschluss der Maßnahmen wieder für die Schifffahrt zurückgewonnen werden müssten.

## 3 Untersuchungsmethoden

Um künftig eine Instandsetzung von Einkammerschleusen unter Betrieb möglich zu machen, müssen die vorliegenden Erkenntnisse auf diesem Themengebiet zusammengetragen und weitergehende Untersuchungen angestellt werden. Dabei ist eine modulare Betrachtung der verschiedenen Bauwerksteile (z. B. Kammerwände, Sohle, Unterhaupt, Oberhaupt) und der im Rahmen der Instandsetzung anfallenden Teilprozesse (z. B. Betonabtrag, Reprofilierung, Austausch Stahlwasserbau etc.) sinnvoll. Hierbei wird die gesamte Bandbreite bauwerks- und standortabhängiger Randbedingungen von Einkammerschleusenanlagen der WSV wie beispielsweise Altbetonqualität, Bewehrungssituation oder Hubhöhe berücksichtigt. Auf dieser Basis wird derzeit ein modulares System mit Instandsetzungslösungen für die wesentlichen Bauteile und Randbedingungen bei Einkammerschleusenanlagen entwickelt. Dieses soll der WSV als Informations-, Planungs- und Ausschreibungsbasis (vgl. Waleczko et al. 2019) zur Verfügung gestellt werden.

Die einzelnen Instandsetzungslösungen sollen möglichst bis hin zur Pilotprojektebene bzw. zur Bauausführung realisiert und begleitet werden. Neben theoretischen Betrachtungen, Bauteilversuchen sowie der Begleitung von Instandsetzungsmaßnahmen der WSV und Dritter unter Betrieb, wird zukünftig im Rahmen eines Pilotprojekts (Schleuse Schwabenheim, Neckar) die komplette Grundinstandsetzung einer Schleuse unter Betrieb durchgeführt.

Das Gesamtvorhaben wird in Kooperation zwischen der BAW, dem Amt für Neckarausbau Heidelberg (ANH) und dem Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) durchgeführt.

## 4 Ergebnisse

Bislang sind im Rahmen des Vorhabens nachfolgende Aktivitäten in unterschiedlicher Tiefe (von der grundsätzlichen Machbarkeit bis zur ausgeführten Baumaßnahme) verfolgt worden:

- Erstellung eines Sachstandsberichts, Übersicht über nationale und internationale Projekte
- Analyse der Randbedingungen bei Einkammerschleusenanlagen der WSV (Geometrien, Bauweisen etc.)
- Entwicklung von Konzepten für eine temporäre partielle Trockenlegung von Schleusenkammern
- Begleitung der Vorplanung der beauftragten Ingenieurbüros für die Instandsetzung der Schleuse Schwabenheim unter Betrieb
- Begleitung und Gestaltung des „Verhandlungsverfahrens“ für die Ausschreibung der Instandsetzung der Schleuse Schwabenheim unter Betrieb
- Begleitung der Planungsaktivitäten zur Instandsetzung der Schleuse Raffelberg unter Betrieb zusammen mit dem Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt (WSA) Duisburg-Meiderich
- Entwicklung einer „Rahmenlösung“ für den Austausch der Betoneinbauteile eines Stemmtores im Rahmen der Instandsetzung der Schleuse Kochendorf zusammen mit dem ANH
- Informationssammlung zu geplanten bzw. ausgeführten Maßnahmen, Integration der Erfahrungen in den Modulbaukasten (u. a. Schleuse Hollage/NBA Hannover, Schleuse Rahe/Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Toraustausch Mainschleusen/WSA Schweinfurt sowie Schleuse Wusterwitz/WSA Brandenburg)
- Konzeption von Bauteilversuchen an der mittleren Kammer der Schleuse Feudenheim zur partiellen Trockenlegung und zur Reprofilierung der Kammerwand durch Fertigteile, Ortbetonvorsatzschale und Spundwände als verlorene Schalung in Zusammenarbeit mit dem ANH

Der aktuelle Stand der Erkenntnisse und Ergebnisse wurde im Oktober 2017 im Rahmen eines eigenen BAW-Kolloquiums zur Thematik vorgestellt.

Die Ergebnisse werden der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) bzw. der gesamten Fachöffentlichkeit auf einer internetbasierten Plattform zur Verfügung gestellt.

### Literatur:

Tagungsband BAW-Kolloquium 2017 „Instandsetzung von Schleusen unter Betrieb“. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

Reschke, T. (2016): Instandsetzung von Schleusen unter Betrieb. In: Tagungsband BAW-Kolloquium 2016 „Instandhaltung von Wasserbauwerken“, S. 69–74. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

Waleczko, D.; Haghsheno, S. und Westendarp, A. (2019): Die Bewertung und Auswahl von Instandsetzungsverfahren für Schleusenkammerwände unter laufendem Betrieb. In: Tagungsband 6 Kolloquium Erhaltung von Bauwerken. Esslingen: Technische Akademie.



## Chemischer Angriff auf Gründungselemente

### Betontechnologische Belange

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Geotechnische Elemente aus Beton, Stahlbeton, Mörtel und Zementsuspension (z. B. Bohr- und Verdrängungspfähle oder Verpressanker) werden häufig bei Tiefgründungen und Verankerungen von Wasserbauwerken eingesetzt. Abhängig vom Einsatzgebiet und von der Beschaffenheit des Baugrundes können sie einem chemischen Angriff durch Böden und Wässer ausgesetzt werden. Die Einwirkung variiert im Wesentlichen mit der Art des angreifenden Stoffes, seiner Konzentration und der Fließgeschwindigkeit der umgebenden Wässer und kann eine treibende oder lösende Korrosion des Baustoffes hervorrufen. Die Widerstandsfähigkeit eines Betons oder Mörtels hängt von den verwendeten Ausgangsstoffen, der Zusammensetzung und den Herstellungsparametern ab. Die Folgen einer Betonkorrosion für die Funktionalität des geotechnischen Elements, wie beispielsweise die Veränderungen der Mantelreibung zwischen Verankerungselement und umgebendem Boden, werden wesentlich von der Wirkungsweise und der Wirkungsintensität des chemischen Angriffs sowie von der Art und der Bauweise des Elementes bestimmt.

Die normativen, derzeit weitgehend deskriptiven Regelungen zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen gegenüber einem chemischen Angriff (DIN EN 206-1, DIN 1045-2) sind im Allgemeinen und insbesondere für die Anwendung im Spezialtiefbau mit folgenden Unsicherheiten und Unklarheiten behaftet:

- Unsicherheiten bei den vorgegebenen Grenzwerten der Konzentration der Stoffe zur Definition und Einteilung der Expositionsklassen XA1 bis XA3,
- Diskrepanzen hinsichtlich der Zielnutzungsdauer (50 Jahre anstatt von 100 Jahren bei Infrastrukturbauwerken),
- Besonderheiten der Gründungselemente in der Herstellungsweise und Tragwirkung,
- Annahme eines vollständigen Erhalts der Betonrandzone während der gesamten Zielnutzungsdauer,
- realitätsnahe Abschätzung der Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers.

#### Auftragsnummer:

B3951.03.04.70015

#### Auftragsleitung:



Dr. Amir Rahimi  
 amir.rahimi@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Falk Wagemann  
 falk.wagemann@baw.de

Hilmar Müller  
 hilmar.mueller@baw.de

#### Laufzeit:

2017 bis 2022

Einheitliche leistungsorientierte Konzepte zur Bewertung des Materialwiderstands von Mörtel oder Beton gegenüber einem chemischen Angriff – allgemein und besonders im Hinblick auf spezifische geotechnische Elemente – existieren nicht. Die vorhandenen Laborprüfverfahren liefern unterschiedliche und zum Teil kontroverse Bewertungen der Betone.

Folgende Ziele werden im Vorhaben verfolgt:

- Erarbeitung von Ansätzen zur Ermittlung der Beschaffenheit geotechnischer Elemente und Bewertung ihres Widerstands gegenüber den möglichen Varianten eines chemischen Angriffs,
- Bewertung von Modellen zur Abbildung der verschiedenen Degradationsmechanismen,
- Entwicklung von Konzepten zur Bemessung der Dauerhaftigkeit der Gründungselemente gegenüber einem chemischen Angriff,
- Erstellung von Konzepten zur Optimierung des Widerstands geotechnischer Elemente gegenüber einem chemischen Angriff inklusive des Aufzeigens der Grenzen (nicht vermeidbare Degradation in Abhängigkeit der unterschiedlichen Einwirkungen),
- Die Ergebnisse des Vorhabens sollen soweit aufbereitet werden, dass eine Umsetzung in die Regelwerke der WSV möglich wird (ZTV-W, eigenes BAW-Merkblatt).

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

Die zu entwickelnden Konzepte sollen der WSV eine sichere Bemessung und Bewertung von Gründungselementen, die einer chemischen Beanspruchung durch den Boden und/oder das Grundwasser ausgesetzt sind, ermöglichen. Hierzu ist das Teilvorhaben „Betontechnische Belange“ in das Gesamtvorhaben „Chemischer Angriff auf Gründungselemente“ eingebunden, das sich zudem mit den aus chemischen Substanzen des Grundwassers resultierenden Einwirkungen und der Grenztragfähigkeit geotechnischer Elemente unter chemischem Angriff beschäftigt.

## 3 Untersuchungsmethoden

Die oben genannten Ziele sollen zum einen durch eine tiefgreifende Auswertung der wissenschaftlichen und baupraktischen Literatur aus dem Bereich der Baustoffforschung, der Bauchemie, der Geotechnik und des Wasserbaus erreicht werden; zum anderen soll ein intensiver Erfahrungsaustausch mit Planern, Beratern und ausführenden Unternehmen erfolgen. Im Einzelfall werden auch rechnerische Simulationen durchgeführt, welche zum Ziel haben, experimentell gewonnene Ergebnisse nachzuvollziehen. Bohrkerne an bestehenden geotechnischen Elementen aus Projekten der WSV sollen dabei für genauere Untersuchungen herangezogen werden. Aktuell werden Gefügeuntersuchungen an Bohrkernen von Bohrpfehlen und Düsenstrahlkörpern vorgenommen. Hier stehen insbesondere die Randbereiche der jeweiligen geotechnischen Elemente im Vordergrund. Des Weiteren sollen Lagerungsversuche in unterschiedlich angreifenden Lösungen Aufschluss über den Widerstand verschiedener zementgebundener Baustoffe gegenüber einem chemischen Angriff liefern. Die Konzentration des Teilvorhabens gilt dabei dem Angriff kalklösender Kohlensäure auf Zementstein. Die Arbeiten erfolgen im Rahmen einer Kooperation mit dem Institut für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie der TU Hamburg-Harburg.

## 4 Ergebnisse

Durch Einlagerungsversuche soll ein möglicher Einfluss der Art des Bindemittels auf den Widerstand gegen chemische Einwirkung verschiedener Angriffsmedien untersucht werden. Im Küstenbereich können geotechnische Elemente einem kombinierten Angriff aus Magnesiumsulfat und Magnesiumchlorid ausgesetzt werden. Derzeit werden Einlagerungsversuche an Zementleimprobekörpern aus unterschiedlichen Zementarten (CEM I, CEM I + Flugasche, CEM I + Silicastaub, CEM III/A, CEM III/B) mit einer Salzlösung mit einem definierten Magnesium/Sulfat-Verhältnis durchgeführt. Aus den bisherigen Untersuchungsergebnissen (nach 167 Tagen Einlagerung) sind eine geringere Belagbildung und eine geringere Gewichtszunahme bei Probekörpern aus Hochofenzement im Vergleich zu Probekörpern aus den weiteren Zementarten festzustellen. Ebenso erweist sich ein niedriger Wasserzementwert ( $w/z = 0,30$  im Vergleich zu  $0,50$ ) als günstig. An allen Probekörpern sind bisher keine Schäden nachweisbar; es sind nur Veränderungen in Form von Belagbildung und Gewichtszunahme feststellbar. Es ist noch unklar, inwieweit die Kraftübertragung durch Mantelreibung und Schubkraft (z. B. bei Verpresskörpern) durch eine Belagbildung – sofern sie im Baugrund auftritt – reduziert wird.

### Literatur:

Mues, I. (2018): Experimentelle Untersuchungen zum Aufbau der Gefügestruktur von Düsenstrahlkörpern. Masterthesis Technische Universität Hamburg (TUHH), Institut für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie.



## Betonstahlkorrosion im Rissbereich von Verkehrswasserbauwerken

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

In den letzten Jahren wurden Korrosionsprozesse an gerissenen Stahlbetonbauteilen im Unterwasserbereich mit Süßwasserbeaufschlagung detektiert, die hier aufgrund der gegebenen Randbedingungen (Sauerstoffmangel) bisher für eher nicht möglich gehalten worden sind. Als Ursache gilt eine Depassivierung der Bewehrung aufgrund des Auslaugens des Betons (Calciumhydroxid) durch die intensive Durchströmung der Risse mit Wasser und die anschließende Ausbildung des kathodischen Teilprozesses an entfernten, gut belüfteten Bauwerksstellen (Oberwasserbereich).

Bei Bauwerken im Küstenbereich stellt sich die Frage, ob angesichts ihrer Bauweise mit fein verteilten Rissen grundsätzlich eine zusätzliche Schutzmaßnahme hinsichtlich der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion notwendig ist. Die deutsche Normung (DIN EN 1992-1-1/NA (2015)) sieht vor, bei befahrenen Verkehrsflächen (wie z. B. Parkdecks) mit Chloridbeaufschlagung (Expositionsklasse XD3) besondere Vorkehrungen zu treffen, wie z. B. das Anbringen einer rissüberbrückenden Beschichtung, Abdichtung oder eine rissvermeidende Bauweise. Das heißt, dass eine ausreichende Dauerhaftigkeit durch die Betonzusammensetzung und Betondeckung in diesem Fall nicht gegeben ist.

Die beschriebene Korrosionsproblematik ist in vergleichbarer Form auch für verkehrswasserbautypische Instandsetzungsmaßnahmen an Schleusen und Wehranlagen von Relevanz (Korrosionsschutz der Verankerungselemente zwischen Betonvorsatzschale und Altbeton).

Vor diesem Hintergrund sind die grundsätzlichen Möglichkeiten und Grenzen der Stahlbetonbauweise bei Verkehrswasserbauwerken in Bezug auf Rissbildung und Bewehrungskorrosion kritisch zu hinterfragen.

Das Forschungsvorhaben hat zum Ziel, theoretische Ansätze, Prinzipien und Verfahren zur Prognose und Beurteilung der Korrosionsgefährdung von Bewehrungen in Rissen und Verbundebenen von Wasserbauwerken sowie zur vorsorgenden bzw. nachträglichen Sicherstellung des Korrosionsschutzes der Bewehrungen zu erarbeiten. Die Umsetzung der erzielten Ergebnisse erfolgt mit der Erstellung eines Leitfadens für die Phasen:

#### Auftragsnummer:

B3951.03.04.70016

#### Auftragsleitung:



Dr. Amir Rahimi  
 amir.rahimi@baw.de

#### Laufzeit:

2017 bis 2022



- Planung von Neubau- und Instandsetzungsmaßnahmen,
- Beurteilung bestehender Bauwerke (Zustandsprognose),
- Wiederherstellung des Korrosionsschutzes der Bewehrungen.

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

Hinsichtlich neuer und bestehender Wasserbauwerke ist die Frage zu beantworten, inwieweit in bislang als vermeintlich unkritisch angesehenen Bauwerksbereichen standsicherheitsrelevante Korrosionsprozesse auftreten können bzw. ggf. bereits aufgetreten sind. Im Hinblick auf neu zu errichtende bzw. instand zu setzende Verkehrswasserbauwerke sind bislang als bewährt erachtete Bauweisen kritisch zu hinterfragen.

## 3 Untersuchungsmethoden

Es werden theoretische Grundlagen für die Korrosionsgefährdung von Bewehrungen in Rissen bzw. Verbundebenen in Abhängigkeit unterschiedlicher wasserbauspezifischer Bauwerksituationen unter besonderer Berücksichtigung der Phasen „Depassivierung“ und „Verlauf des Korrosionsprozesses nach erfolgter Depassivierung“ erarbeitet, welche durch Laborversuche und Bauwerksuntersuchungen verifiziert werden. Es werden Untersuchungsmethoden zur Prognose bzw. Detektierung von Schadenspotentialen bzw. Schäden ausgearbeitet sowie geeignete Instandsetzungsmaßnahmen zur Wiederherstellung des Korrosionsschutzes der Bewehrungen in Abhängigkeit unterschiedlicher Randbedingungen konzipiert. Darüber hinaus werden konzeptionelle bzw. planerische Ansätze zur Vermeidung korrosionskritischer Situationen bei künftigen Neubau- und Instandsetzungsmaßnahmen entwickelt.

## 4 Ergebnisse

Derzeit werden mehrere Bestandsbauwerke im Binnen- und Küstenbereich hinsichtlich ihrer Rissbildung, der Rissheilung, des Bewehrungszustands und der Einwirkungssituation untersucht.

An einer Kaianlage an der Nordsee wurde der Bewehrungszustand im Planiebereich nach etwa 40 Jahren Betrieb untersucht (Rahimi 2018). Dabei wurden Bohrkern aus Bereichen mit ausgeprägten Trennrissen (Rissbreite 0,1 bis >0,5 mm), die sowohl Planie als auch die Stirnfläche des Kajenholms durchquerten, entnommen. An allen Rissflanken auf der Stirnfläche des Kajenholms waren Calciumcarbonat-Aussinterungen sichtbar, was auf Wasseraustausch durch die Risse hindeutet. Nach dem Spalten der entnommenen Bohrkern wurde festgestellt, dass jeweils mindestens ein Bewehrungsstab vom Riss gekreuzt wurde. Alle in den Bohrkernen vorgefundenen Bewehrungsstabstücke wurden freigelegt und ihre Oberfläche auf abtragende Korrosion optisch untersucht. An allen risskreuzenden Bewehrungsstabstücken hatte, stellenweise oder flächig, eine abtragende Korrosion mit relativ geringem Querschnittsverlust stattgefunden (siehe Bild 1). Der geringe Korrosionsfortschritt ist u. a. mit der relativ dicken Betondeckung (60 mm) und ihrer guten Qualität (Hochofenzementbeton) zu begründen. Damit verfügt der Beton über einen relativ hohen Elektrolytwiderstand, was den Korrosionsfortschritt verlangsamt. Bewehrungsstabstücke außerhalb der Rissverläufe wiesen keine Querschnittsverluste infolge abtragender Korrosion auf.

An der Bewehrungsoberfläche wurden am Bauteil in nicht gerissenen Bereichen nur sehr geringe Chloridgehalte gemessen. In gerissenen Bereichen lag der Chloridgehalt in der Größenordnung des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts von 0,5 M.-%/z nach DAfStb (2001) oder darunter.



Bild 1: Flächiger Korrosionsabtrag am risskreuzenden Bewehrungsstab (nach dem Beizen).

### Literatur:

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hg.) (2001): DAfStb-Richtlinie – Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (RL SIB:2001-10) – Teil 1: Allgemeine Regelungen und Planungsgrundsätze.

Rahimi, A. (2018): Significance of Cracks in Durability Design and Assessment of Hydraulic Concrete Structures due to Reinforcement Corrosion. Proceedings of fib Symposium 2018 in Melbourne, Australia.



## Instandsetzungssysteme aus textilbewehrten Mörteln und Betonen für Wasserbauwerke

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Verankerte und bewehrte Vorsatzschalen aus Beton oder Spritzbeton, welche in Dicken von etwa 40 cm (Betonvorsatzschalen) bzw. 15 bis 20 cm (Spritzbetonvorsatzschalen) errichtet werden, bilden die Standardinstandsetzungslösung für die Grundinstandsetzung von vielen Wasserbauwerken, insbesondere Schleusenammerwänden. Bei einigen Bauteilen, beispielsweise Wehrpfeilern, haben jedoch derartige Vorsatzschalen technische und wirtschaftliche Nachteile.

Wehrpfeiler sind oftmals mehrschalig hergestellt worden. Im Randbereich wurde hierzu ein höherwertiger Mörtel oder Beton an der Schalung vorgelegt, wohingegen der anschließend eingebaute Kernbereich oftmals aus einem minderwertigen Füllbeton besteht. Typische Schichtstärken des Randbetons liegen bei etwa 20 cm, wobei die unregelmäßige Schichtdicke durch das Anschütten an die Schalung berücksichtigt werden muss. Die Höhe der einzelnen, bei älteren Anlagen zumeist in Stampfbetonbauweise erstellten Betonierabschnitte liegt zumeist bei etwa 50 bis 80 cm. Ein Abtrag des höherwertigen Randbetons zwecks Einbau einer dicken, verankerten und bewehrten Vorsatzschale bedingt vielfach dessen komplette Entfernung mit den damit einhergehenden Nachteilen und Risiken. Ein Verzicht auf den Betonabtrag ist wegen der Einschränkung des ursprünglichen Lichtraumprofils zumeist nicht möglich. Für derartige Bauteile, aber auch für einschalige Wehrpfeiler und viele weitere Bauteilarten, sind also dünn-schichtige Instandsetzungssysteme aus Mörtel oder Beton in Schichtdicken von etwa 40 bis maximal 60 mm vorzuziehen.

Die BAW hat in der Vergangenheit im Rahmen von zwei FuE-Vorhaben (A39510310238 „Textilbewehrte Vorsatzschalen“ und B3951.03.04.70010 „Textilbewehrte Mörtel für die Instandsetzung von Wasserbauwerken“) die Möglichkeit einer Instandsetzung von Wasserbauwerken mittels Vorsatzschalen aus textilbewehrtem Spritzmörtel und Spritzbeton eruiert (Westendarp et al. 2016). Die Vorteile dieser Systeme gegenüber den derzeit in ZTV-W LB 219, Abschnitte 4 und 5, geregelten verankerten und bewehrten Vorsatzschalen aus Beton und Spritzbeton sind u. a. der Ersatz der korrosionsgefährdeten Bewehrung und die geringen Dicken. Die bishe-

#### Auftragsnummer:

B3951.03.04.70017

#### Auftragsleitung:



Dr. Amir Rahimi  
 amir.rahimi@baw.de

#### Laufzeit:

2017 bis 2021

rigen Untersuchungen ließen Fragen zu verschiedenen Punkten offen, welche im Rahmen dieses Anschlussvorhabens behandelt werden sollen.

Das Ziel des Vorhabens ist es, das neue Instandsetzungssystem „Textilbewehrte Mörtel und Betone“ dahingehend weiterzuentwickeln, dass der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) geeignete, ausschreibungsreife Lösungen für bestimmte Randbedingungen (freibewittert/Wasserwechselbereich; mit/ohne Risswasser- und Porenwasserdruck etc.) zur Verfügung gestellt werden können.

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

Mit dem neuen Instandsetzungssystem aus textilbewehrten Mörteln oder Betonen und durch den Ersatz korrosionskritischer Bewehrung könnte der WSV ein Verfahren zur Verfügung gestellt werden, mit dessen Hilfe sich Instandsetzungen insbesondere an älteren massiven Wasserbauwerken zielsicherer und kostengünstiger als bislang realisieren ließen.

## 3 Untersuchungsmethoden

Es werden Aktivitäten in drei Arbeitspaketen wie folgt durchgeführt:

AP 1: Beteiligung am C<sup>3</sup>-Vorhaben Carbon Composite Concrete, Teilvorhaben „Regelwerksgerechte Instandsetzung von Wasserbauwerken mit C<sup>3</sup>“ mit folgenden Aufgaben:

- 1) Pflichtenheft und Datenanalyse für C<sup>3</sup>-Instandsetzungen
  - Datenanalyse zu Verbund und Dauerhaftigkeit von C<sup>3</sup> im Wasserbau
  - Anforderungen im Wasserbau
- 2) Erprobung der Instandsetzungsverfahren an Bauwerken
  - Auswahl von Referenzobjekten im Wasserbau
  - Fachliche Begleitung der Instandsetzung im Wasserbau
- 3) Bewertung, Planungshilfe und Einbindung in Regelwerke
  - Maßstäbe zur Bewertung der Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit im Wasserbau
  - Konzept zur Anbindung an bestehende Richtlinien im Wasserbau

AP 2: Weiterführende Aktivitäten mit dem Institut für Bauforschung Aachen (ibac) der RWTH Aachen:

- Erstellung eines Merkblatts für das Lastszenario 1 (mit Haftverbund, kein Risswasser- und Porenwasserdruck)
- praktische Untersuchungen für das Lastszenario 2 (kein Haftverbund, konstruktive Verankerung, kein Risswasser- und Porenwasserdruck)
- theoretische und praktische Analysen zum Lastszenario 3 (kein Haftverbund, statische Verankerung, Risswasser- und Porenwasserdruck)

AP 3: Bearbeitung der Fragestellungen zu Spaltwasserdruck, Ansatz Adhäsion, Temperatureinflüsse etc.

## 4 Ergebnisse

Im Rahmen der Aktivitäten zum ersten oben genannten Arbeitspaket (AP 1) wurden die wesentlichen Anforderungen an das Instandsetzungssystem zur Anwendung an Verkehrswasserbauwerken in Abhängigkeit der Beanspruchung aus Umwelt und Untergrund zusammengestellt.

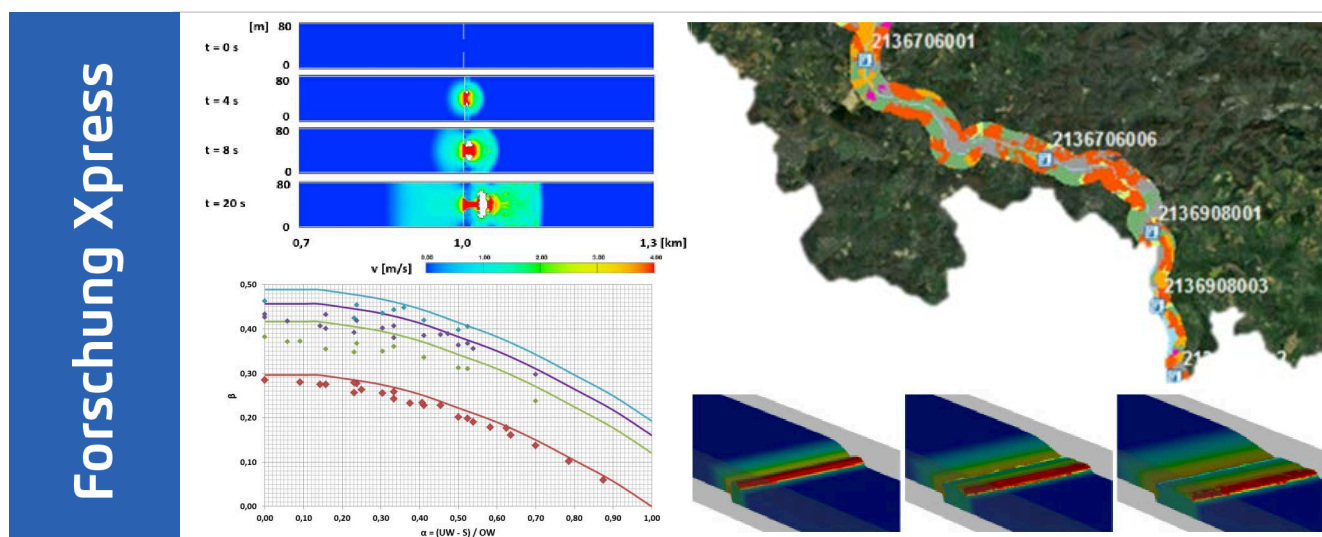
Auf Basis der aus früheren gemeinsamen Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse (Westendarp et al. 2016) wurde im Arbeitspaket 2 (AP 2) in Zusammenarbeit mit dem ibac der Entwurf für ein BAW-Merkblatt erarbeitet. In diesem Merkblatt werden die Anforderungen und Prüfungen für Schichten aus textilbewehrtem Spritzmörtel und -beton für die flächige Instandsetzung gerissener Wasserbauwerke beschrieben, bei denen das Lastszenario 1 (s. o.) gegeben ist.

Damit werden künftig für derartige Instandsetzungssysteme durchgängige Regelungen für die Aspekte Bemessung, Baustoffe und Bauausführung inklusive der entsprechenden Qualitätssicherungserfordernisse verfügbar sein. Auf diese Weise werden die Anwendbarkeit sowie die Wettbewerbsfähigkeit textilbewehrter Spritzmörtel und -betone als eine praxistaugliche und ausschreibungsreife Lösung für Maßnahmen mit bestimmten Randbedingungen sichergestellt. Der Entwurf des Merkblatts wurde nach dem Absolvieren eines Gelbdruckverfahrens der Europäischen Kommission zur Notifizierung eingereicht. Die Stillhaltefrist endete Mitte Februar 2020.

### Literatur:

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hg.) (2017): ZTV-W LB 219: Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken (Zusätzliche technische Vertragsbedingungen – Wasserbau).

Westendarp, A.; Reschke, T.; Fleischer, H. (2016): Abschlussbericht FuE-Vorhaben B3951.03.04.70010. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.



## Risikoklassifikation von Verkehrswasserbauwerken

### Risikobasierte Priorisierung von Wehranlagen

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

In Anbetracht der Anzahl und Vielfalt der Bauwerke an den Bundeswasserstraßen, ihres sich stetig verschlechternden Zustandes sowie der begrenzt verfügbaren Ressourcen ist eine Priorisierung von Infrastrukturinvestitionen ein unabdingbarer Schritt, um die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs auch in Zukunft zu gewährleisten.

Hauptziel des Forschungsvorhabens ist die Erweiterung des Erhaltungsmagementsystems (EMS-WSV) mit einer Risikoklassifikation der Verkehrswasserbauwerke als Grundlage für eine Erhaltungsstrategie. Ziel ist es, die Ergebnisse zu nutzen, um potentielle Risiken auch für eine große Anzahl an Verkehrswasserbauwerken abzuschätzen. Diese Erkenntnisse sollen in ein transparentes und objektives System zur Entscheidungsunterstützung in der Instandhaltungsplanung integriert werden.

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

Eine Integration von Ansätzen aus dem Risikomanagement in das Erhaltungsmagementsystem der WSV (EMS-WSV) dient der langfristigen Sicherstellung der Leistungsfähigkeit der wasserbaulichen Infrastruktur und stellt einen Bewertungsrahmen zur Verfügung, der weit über eine rein technische Beurteilung der Verkehrswasserbauwerke hinausgeht. Um dem Anspruch der Ganzheitlichkeit zu genügen, werden sowohl wirtschaftliche und verkehrsbezogene Interessen als auch mögliche Auswirkungen auf die Bereiche Bevölkerung und Umwelt abgebildet.

Eine Priorisierung der Verkehrswasserbauwerke erfolgt mithilfe eines entwickelten Indikatorensystems, sodass potenzielle Auswirkungen nach einem Bauwerksversagen in den Entscheidungsprozess bei der Instandhaltungsplanung integriert werden. Die zukunftsorientierte Ausrichtung der Entscheidungsunterstützung im Erhaltungsmangement berücksichtigt die begrenzte Ressourcenverfügbarkeit und hat den Abbau des Instandhaltungsrückstaus zum Ziel.

#### Auftragsnummer:

B3951.04.04.70002

#### Auftragsleitung:

Jörg Bödefeld  
joerg.boedefeld@baw.de

#### Auftragsbearbeitung

Heike Schmidt-Bäumler

#### Laufzeit:

2016 bis 2020

### 3 Untersuchungsmethoden

Da die Datenlage bei weitem nicht ausreichend für die Durchführung von klassischen Risikoanalysen ist, wird für die Priorisierung der Verkehrswasserbauwerke ein Indikatorensystem mit Daten aus Ex-ante-Schadensanalysen entwickelt (Thieken 2010). Die Priorisierung im Hinblick auf Versagensfolgen erfolgt am Beispiel der Wehranlagen. Die vergleichende Bewertung aller erfassten Indikatoren erfolgt mit der Methode PROMETHEE (Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluation). Die Analyse und das Ranking der Alternativen beruhen bei dieser Methode auf Paarvergleichen, deren Aggregation im Ergebnis eine Rangfolge aller Wehranlagen im Hinblick auf Versagensfolgen generiert.

Mit dem Ziel, Entscheidungen in der Instandhaltungsplanung zukunftsorientiert zu treffen, wird für alle untersuchten Bauwerke mithilfe der approximierten Funktionen aus dem WSVPruf-Modul „Zustandsprognose“ in Abhängigkeit von der aktuellen Zustandsnote die Restnutzungsdauer berechnet, um für jedes Bauwerk zu ermitteln, in welchem Jahr voraussichtlich eine Instandhaltungsmaßnahme zu erwarten ist. Die Instandhaltungsmaßnahmen werden innerhalb eines jeden Jahres entsprechend ihrem Prioritätswert geordnet und es werden für jedes Bauwerk Umfang und Kosten der Maßnahme prognostiziert, sodass der entstehende Ressourcenbedarf langfristig erkennbar ist. Umfang und Kosten der Instandhaltungsmaßnahmen wurden mithilfe der Analyseergebnisse aus Voruntersuchungen und Realdaten von Neubauprojekten modelliert (Bödefeld und Brockelmann 2019; Kirchner 2019). Szenarioanalysen mit unterschiedlichen Restriktionen im Budget oder mit der Anzahl jährlich durchgeführter Instandhaltungsmaßnahmen zeigen, wie sich der Bauwerksbestand langfristig entwickelt.

### 4 Ergebnisse

Mit dem entwickelten Indikatorensystem und der Priorisierung mit PROMETHEE werden die Ergebnisse der Methode zur Priorisierung von Investitionsprojekten an Bundeswasserstraßen (MPI) verfeinert, und für alle untersuchten Wehranlagen wird eine eindeutige Rangordnung unter Berücksichtigung potenzieller Versagensfolgen erstellt. Die Gewichtungsfaktoren können jeweils an unterschiedliche Zielsetzungen angepasst werden, sodass zusätzlich ein Vergleich der Ergebnisse möglich ist.

Mit den Szenarioanalysen wurde für einen Zeitraum von 150 Jahren untersucht, wie die Höhe des verfügbaren Budgets, die angenommene Lebensdauer der Bauwerke und die Möglichkeit, Instandhaltungsmaßnahmen vorzuziehen, zukünftige Entwicklungen im Bauwerksbestand beeinflussen (siehe Bild 1). Die Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß, dass der Instandhaltungsbedarf in den nächsten Jahrzehnten unter den getroffenen Annahmen deutlich über das derzeitige Niveau hinaus zunehmen wird. Werden jährlich zwei Neubauprojekte abgeschlossen, baut sich bei Zutreffen der Prognosen ein Instandhaltungsrückstau in Höhe von etwa 200 Wehranlagen auf, der innerhalb des Untersuchungszeitraums nicht wieder abgebaut werden kann. Negative Tendenzen zeigen sich bei einem zu geringen Budget (Instandhaltungsrate in % vom Anlagevermögen) und bei kurzen Lebensdauern anfälliger Bauwerke. Einen positiven Einfluss haben die lange Lebensdauer robuster Bauwerke und ein ausreichend hohes Budget. Die Möglichkeit, Instandhaltungsmaßnahmen vorzuziehen, kann entstehende Peaks zusätzlich glätten. Der bestehende Instandhaltungsrückstau bei den Wehranlagen kann gemäß den Ergebnissen der Simulation mit der konsequenten Umsetzung von mindestens vier Instandhaltungsmaßnahmen pro Jahr dauerhaft abgebaut werden.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass mit den verfügbaren Daten ein Konzept zur Verfügung gestellt werden kann, das Elemente des Risikomanagements und des Lebenszyklusmanagements in die Instandhaltungsplanung integriert. Die Ergebnisse geben eine Vorschau auf zu erwartende Instandhaltungsmaßnahmen und können als Einstieg in ein Multi-Projektmanagement verwendet werden.

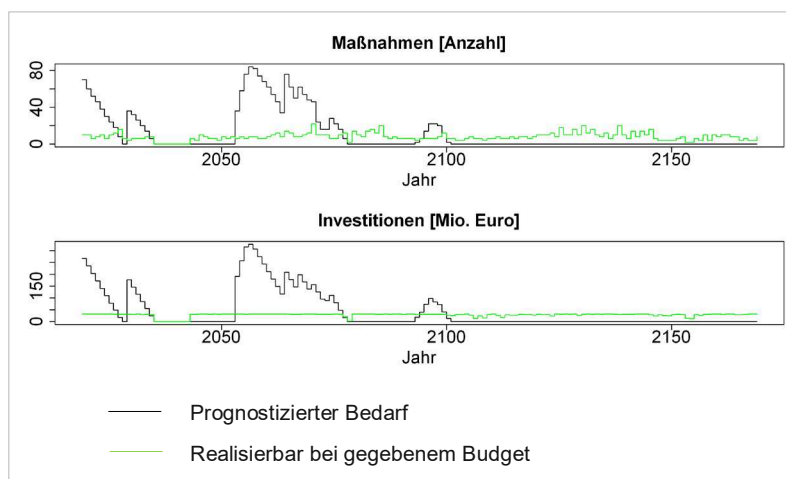


Bild 1: Plot der Simulation zum „Best practice“-Szenario.

#### Literatur:

Bödefeld, J.; Brockelmann, H. (2019): Sachstandsbericht: Instandsetzungs- und Neubaumaßnahmen inkl. deren Kosten. Teil 1: Neubau von Wehranlagen. BAW, Karlsruhe (BAW-Auftragsnummer B3951.04.12.50013).

Kirchner, A. (2019): Ermittlung von Kostenansätzen zum Variantenvergleich von Baumaßnahmen an Wehranlagen. Master-Thesis. Hochschule Karlsruhe, Karlsruhe.

Thieken, A. H. (Hrsg.) (2010): Hochwasserschäden. Erfassung, Abschätzung und Vermeidung, Oekom, München.



## Tragfähigkeitskennzahlen für bestehende Konstruktionen

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Bundeswasserstraßen sind einer der drei Hauptverkehrsträger in Deutschland. Bauwerke an den Wasserstraßen werden daher kontinuierlich überwacht und bei Bedarf instandgesetzt, um die Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs zu gewährleisten. Seit 2008 wird in der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) ein elektronisches Erhaltungsmagementsystem (EMS-WSV) eingesetzt, das die verantwortlichen Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter (WSA) beim systematischen Dokumentieren und Bewerten von Bauwerksschäden unterstützt und die Planung von Instandhaltungsmaßnahmen erleichtert. Die aufgrund der festgestellten Schäden ermittelte Zustandsnote wird dabei als Kenngröße für die allgemeine Dringlichkeit von Instandhaltungsmaßnahmen am jeweiligen Bauwerk verwendet. Durch die Begrenzung der Bewertungsskala auf vier Schadenskategorien (SK) erhält eine Vielzahl an Bauwerken die gleiche Bewertung. Aussagen über die Auswirkungen der Schäden auf die funktionalen Anforderungen an das Bauwerk sind im Benotungssystem des EMS-WSV ebenfalls nicht vorgesehen. Dadurch ist der Informationsgehalt der Zustandsnote für einen aussagekräftigen Vergleich von einer großen Anzahl an Bauwerken zu gering. Die Zielsetzung des Forschungsvorhabens besteht daher darin, durch zusätzliche Kennzahlen die Aussagekraft der bisherigen Zustandsbenotung zu erhöhen. Dabei soll im Besonderen die (Rest-)Tragfähigkeit der Konstruktionen berücksichtigt werden. Dieses FuE-Vorhaben ist Teil des BMVI-Expertenetzwerks, das 2016 durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) initiiert wurde.

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

Die zusätzlichen Kennzahlen berücksichtigen die funktionalen Anforderungen, die an das Bauwerk gestellt werden und erhöhen somit den Informationsgehalt der bisherigen Zustandsbewertung im EMS-WSV. Durch die Erweiterung des Bewertungssystems mit zusätzlichen Kennzahlen lassen sich außerdem in großer Zahl Bauwerke anhand ihres Zustands unterscheiden und vergleichen. Dadurch wird die Datengrundlage für Entscheidungsprozesse in der überregionalen Planung von Instandsetzungsmaßnahmen vergrößert und die Entscheidungsfindung erleichtert.

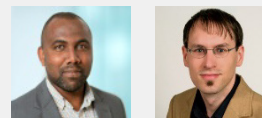
#### Auftragsnummer:

B3951.04.04.70003

#### Auftragsleitung:

François Nyobeu

#### Auftragsbearbeitung:



François Nyobeu

francois.nyobeu@baw.de

Andreas Panenka

andreas.panenka@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2020

### 3 Untersuchungsmethoden

Durch eine detaillierte Analyse der bereits erfassten Daten über Bauwerksschäden werden Ansatzpunkte zu möglichen Verbesserungen des Bewertungsprozesses erarbeitet. Ausgehend von den in WSVPruf verfügbaren Inspektionsergebnissen werden mithilfe einer Fehlermöglichkeiten- und Ausfallanalyse (FMEA) Ursache-Wirkungsketten (UWK) ermittelt, um die Auswirkungen verschiedener Schädigungsmechanismen auf die Nachweisbarkeit der normativ vorgegebenen Grenzzustände von bestehenden Konstruktionen beurteilen zu können. Für die Bewertung der ermittelten Wirkzusammenhänge werden drei Kriterien herangezogen, die neben dem Auftreten und der Abwendbarkeit der Fehlermöglichkeit auch die Konsequenzen beim Eintreten des Fehlers bewerten. Aus den drei Einzelwerten wird als Kenngröße des Bewertungsprozesses die Risikoprioritätszahl (RPZ) berechnet. Dazu stehen unterschiedliche Methoden zur Auswahl (Liu 2016). Für den Einsatz im Rahmen einer Bauwerksbewertung wurde ein Ansatz, der auf Fuzzy Logik basiert, gewählt und weiterentwickelt (vgl. Bowles und Peláez 1995; Panenka und Nyobeu 2018). Die Fuzzy Logik (von engl. fuzzy für unscharf, fusselig) erlaubt das Berücksichtigen von Unsicherheit in einem Bewertungsprozess, der von menschlichen und daher subjektiven Entscheidung geprägt ist.

### 4 Ergebnisse

Obwohl die FMEA ursprünglich für die Qualitätssicherung in der Automobil- und Luftfahrtindustrie entwickelt wurde, erweist sie sich auch als geeignete Methode für eine semi-qualitative Bewertung von Bauwerken. Durch die systematische Analyse von Wirkzusammenhängen und den daraus abgeleiteten UWK, die zu einem Verfehlen von funktionalen Anforderungen an das Bauwerk führen könnten, entsteht ein Kategoriensystem für die bereits erhobenen Daten, das unabhängig von der im EMS-WSV festgelegten Datenstruktur ist. Anhand der unabhängigen Kategorien lassen sich die Daten über die Bauwerksschäden sortieren und anforderungsspezifisch filtern. Die anhand der gefilterten Schäden ermittelten anforderungsspezifischen Zustandsnoten ergänzen die allgemeine Zustandsbewertung mit der bisher nicht zur Verfügung stehenden Information über den maßgeblich betroffenen Grenzzustand der jeweiligen Anforderung (vgl. Bild 1). Diese zusätzlichen Kennzahlen werden angewendet, um z. B. tragfähigkeitsrelevante Schäden leichter zu identifizieren sowie eine differenzierte Reihung einer großen Anzahl an Bauwerken hinsichtlich benötigter Instandsetzungen zu erstellen. Das auf den Wirkzusammenhängen basierende Kategoriensystem dient außerdem zur Validierung der Systematik für die Beschreibung von Bauwerksschäden im EMS-WSV.

Die Bewertung der Ursache-Wirkungsketten anhand der RPZ erweitert das EMS-WSV mit einer zusätzlichen Kennzahl, die neben dem Ausmaß und der Anzahl an Schäden auch die relative Häufigkeit von Schäden je Objekttyp („Auftreten“), die Effektivität von Instandhaltungsmaßnahmen („Erhaltung“) und die Auswirkungen, die die jeweilige UWK auf die Nachweisbarkeit der einzelnen Grenzzustände für das Bauwerk hat („Bedeutung“), berücksichtigt. Die RPZ ist somit nicht nur abhängig vom Zustand sondern auch vom Bauwerkstyp und dessen Konstruktionsweise sowie den bisherigen Instandhaltungsbemühungen. Die Auswertung der Kombination „Auftreten – Bedeutung“ gibt Auskunft über das technische Risiko, das der jeweiligen Konstruktionsweise inhärent ist. Die Robustheit der Nachweisführung gegenüber einer Schädigung lässt sich anhand der gemeinsamen Auswertung der Kriterien „Erhaltung“ und „Bedeutung“ abschätzen. Die Bewertung eines Bauwerks anhand der RPZ wird in einem Risikoprofil zusammengefasst, das als ergänzender Bestandteil eines Prüfberichts verwendet werden kann, um einen Überblick über die am Bauwerk stattfindenden Schädigungsmechanismen zu erhalten.

Basierend auf zusätzlich erhobenem Expertenwissen und dem Austausch mit anderen Beteiligten wird derzeit das durch die FMEA erweiterte Bewertungsverfahren konsolidiert und anhand von Massiv- und Stahlwasserbauten der Bundeswasserstraße validiert. Die Kennzahlen fließen in das FuE-Vorhaben „Risikoklassifikation von Verkehrswasserbauwerken“ ein.

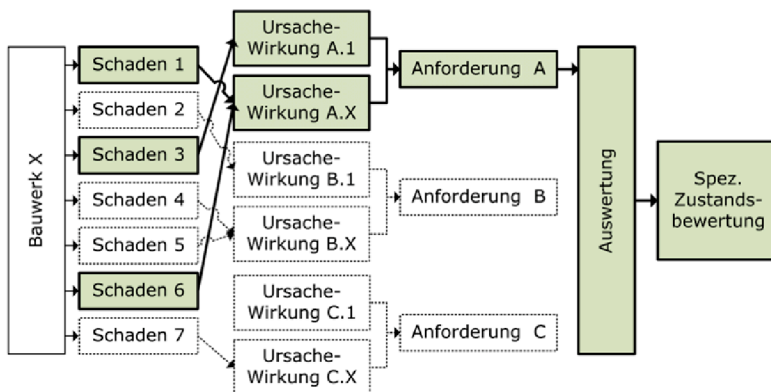


Bild 1: Ermittlung der anforderungsspezifischen Zustandsnote in Abhängigkeit der jeweiligen Ursache-Wirkungsketten.

#### Literatur:

Bowles, J. B.; Peláez, C. E. (1995): Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis. In: Reliability Engineering & System Safety 50 (2), 203–213.

Liu, Hu-Chen (2016): FMEA using uncertainty theories and MCDM methods. Singapore: Springer.

Panenka, A.; Nyobeu, F. (2018): Condition assessment based on results of qualitative risk analyses. In: Proceedings of the 6th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Ghent, Belgium, 3054–3060.



## Digitalisierung im Verkehrswasserbau

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Im Rahmen des Stufenplans „Digitales Planen und Bauen“ (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2015) soll die BIM-Methodik ab 2020 flächendeckend für den Neubau von Infrastrukturbauwerken eingesetzt werden. Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) hat dazu eine Projektgruppe eingerichtet und den Ersatzneubau der Schleusen Lüneburg und Wedtlenstedt als Pilotprojekt ausgewählt. Das wesentliche Ziel dabei ist die Erprobung der BIM-Methode sowie die Vorbereitung der Implementierung von BIM in der WSV. Die bisherigen Arbeiten der Gruppe zeigen jedoch, dass die Implementierung der BIM-Methode in der WSV ein langfristiger Prozess ist. Grund hierfür ist die erforderliche Prozessanalyse als Basis für die nachgeordnete Standardisierung von Informationslieferungen. Eine grundlegende Aufarbeitung der Thematik ist erforderlich. Daher müssen zeitlich überschaubare Bauprojekte herangezogen werden, deren Planungsphasen in einem kurzen Zeitraum abgewickelt werden können.

Das Ziel des FuE-Vorhabens ist es, auf Basis eines überschaubaren Bauprojektes die Prozesse der Planungsphase zu analysieren und darauf aufbauend ein Implementierungskonzept zur Digitalisierung für vergleichbare Vorhaben aufzustellen. Dabei soll die besondere Rolle der WSV ebenso Berücksichtigung finden wie bereits vorhandene IT-Komponenten. Abschließend soll in einer RoadMap dokumentiert werden, wie langfristig und nachhaltig WSV-weit eine Digitalisierung des gesamten Lebenszyklus der Verkehrswasserbauwerke erreicht werden kann.

### 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes

Während der Planungsphase von Baumaßnahmen der WSV interagieren viele Beteiligte, was hohe Anforderungen an Transparenz und Sicherheit bei der Planung stellt. Mit der Digitalisierung wird eine effiziente und bessere Planung von Baumaßnahmen möglich sein. Durch eine konsequente digitale Prozessabbildung können die Prozesse transparent, strukturiert und sicher ablaufen, sodass der Prozessablauf beschleunigt wird und bessere Entscheidungen getroffen werden können. Die Entscheidungen werden auf Basis definierter Austauschforderungen optimal unterstützt.

#### Auftragsnummer:

B3951.04.04.70005

#### Auftragsleitung:

Dr. Zorana Duric  
 zorana.duric@baw.de

#### Laufzeit:

2018 bis 2021



### 3 Untersuchungsmethoden

Im Rahmen des Forschungsvorhabens ist zum einen die Analyse einer überschaubaren Verkehrswasserbaumaßnahme vorgesehen. Die Untersuchung beinhaltet die Betrachtung der Planungsprozesse. Dabei sind beteiligte Rollen, Informationsproduzenten und -konsumenten, Interaktionen und Transaktionen sowie Entscheidungsmomente zu identifizieren und festzuhalten. Für die Dokumentation der Ergebnisse aus der Prozessanalyse soll eine entsprechende standardisierte Form, wie z. B. Business Process Model and Notation, verwendet werden.

Um die identifizierten Informationen nutzerorientiert bereitstellen zu können, ist zu untersuchen, wie für die WSV ein einheitliches Informationsmodell, das relevante Informationen aus verschiedenen IT-Systemen vernetzt, aufgebaut werden kann. Hierfür ist der Blick auf die für die Prozesse Planen, Bauen und Betreiben wesentlichsten IT-Systeme der WSV, wie z. B. die digitale Verwaltung technischer Unterlagen (DVtU), zu richten und deren Metadaten hinsichtlich einer entsprechenden Vernetzung zu analysieren.

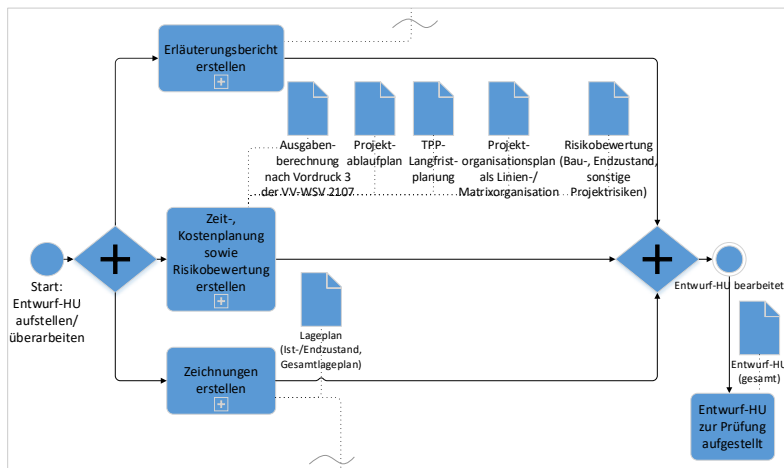
Ferner ist zu erkunden, ob in der WSV bereits Erfahrungen mit der Anwendung digitaler Methoden bei der Umsetzung von Bauprojekten gesammelt werden. Dazu sind im Rahmen von Befragungen die bewährten Methoden bzw. Vorgehensweisen zu erfassen, zu dokumentieren und bei der Entwicklung des Implementierungskonzepts zur Digitalisierung zu beachten. Ebenso sind die durch eine Vernetzung mit Wissenschaft und anderen Infrastrukturbetreibern gewonnenen Erkenntnisse zu berücksichtigen.

### 4 Ergebnisse

Für die Beschreibung von Prozessen in verschiedenen Planungsphasen wurde das Projekt „Instandsetzung Wehr Geesthacht“ herangezogen. Hierbei wurden zunächst sämtliche zum Entwurf-HU gehörenden Dokumente sowie Regelwerke intensiv gesichtet und darauf aufbauend die Aktivitäten, die von verschiedenen Rollen ausgeführt werden, anhand eines Prozessdiagramms in standardisierter Form (s. Bild) modelliert. Derzeit erfolgt zusätzlich die Aufstellung eines dazugehörigen Interaktions- und Transaktionsdiagramms.

Des Weiteren wurden Interviews zu den Projekten „Instandsetzung Hubbrücke Lübeck“, „Instandsetzung Wehr Quitzöbel“ sowie zu dem Projekt „Neubau des Schiffebewerks Niederfinow“ mit den Beteiligten aus dem Wasserstraßen-Neubauamt Magdeburg bzw. Berlin durchgeführt. Die Interviews zeigten, dass die Ämter bereits erfolgreich digitale Methoden zur Bestandserfassung, Visualisierung und virtueller Inbetriebnahme nutzen. Um auch andere Ämter innerhalb der WSV bei der Implementierung von digitalen Methoden zu unterstützen, wurden diese beispielhaften Anwendungsfälle in Form von Steckbriefen beschrieben sowie deren Nutzen und Implementierungsvoraussetzungen erläutert und mit Bildern aus den Projekten belegt.

Im Zuge der Projektbearbeitung zeigt sich, dass die DVtU das zentrale, bautechnische IT-Verfahren der WSV ist, das in allen Lebenszyklusphasen von Bauwerken Daten generiert und verarbeitet. Die DVtU unterstützt bei der Erstellung von Unterlagen der Planung, einschließlich der Prüfung und Genehmigung, und ist gleichzeitig auch das primäre Ablagesystem für Bestandsunterlagen. Allerdings wird aktuell die DVtU nicht flächendeckend einheitlich von allen Nutzern angewendet. Um die Ursachen dafür zu identifizieren und das Potential der DVtU besser auszuschöpfen, wurden zunächst einige Interviews mit den Nutzern des IT-Verfahrens sowie eine Analyse der Metadaten durchgeführt. Darauf aufbauend wurden erste konkrete Maßnahmen zur Optimierung der DVtU herausgearbeitet.



#### Literatur:

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2015): Stufenplan Digitales Planen und Bauen. Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken.

Bild: Auszug aus dem Prozessdiagramm für den Entwurf-HU Wehr Geesthacht (Rolle: Projektleitung).



# Resilienz kritischer Verkehrsinfrastrukturen am Beispiel der Wasserstraßen

## PREVIEW

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Bisherige Instandhaltungsstrategien für Infrastrukturbauwerke fokussieren in der Regel auf den Bauwerkszustand – erst nach dem Auftreten von Schäden werden die Bauwerke instandgesetzt. Aufgrund des großen Investitionsstaus im Bereich der Infrastruktur, des hohen Bauwerksalters und zunehmender Gefährdungsszenarien in Form von extremen Naturereignissen wie Starkregenereignissen, daraus resultierender Hochwasser, Trockenheiten etc. ist zukünftig eine risikobasierte Priorisierung von Instandhaltungsmaßnahmen notwendig. Für eine risikobasierte Instandhaltungsstrategie müssen die Versagenswahrscheinlichkeit und die Versagensfolgen berücksichtigt werden.

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

Im Rahmen des Projekts werden für real existierende Bedrohungsszenarien Lösungen erarbeitet, die sowohl die Sicherheit der Bevölkerung als auch der ansässigen Industrie nachhaltig verbessern werden. Die konsequente Einbindung relevanter Unternehmen und Behörden in das Projekt gewährleistet die Übertragbarkeit der Ergebnisse in die Praxis und untermauert die Anwendungsrelevanz der erarbeiteten Lösungen.

Die BAW ermöglicht aufgrund ihrer fachlichen Expertise und Erfahrungen wissenschaftliche und gleichwohl anwendungsorientierte Forschung auf internationalem Niveau. Sie kann damit einen Beitrag leisten, den Stand der Wissenschaft wie auch den Forschungsstandort Deutschland weiterzuentwickeln.

Der WSV werden Werkzeuge für eine risikoorientierte Instandhaltungsstrategie an die Hand gegeben, sodass Investitionsmaßnahmen bedarfsgerecht priorisiert werden können.

**Auftragsnummer:**

B3951.04.04.70006

**Auftragsleitung:**



Dr. Francesca Marsili  
francesca.marsili@baw.de

**Laufzeit:**

2018 bis 2021

### 3 Untersuchungsmethoden

Das Forschungsprojekt ist interdisziplinär ausgerichtet und erfordert den Einsatz verschiedener Methoden und Daten. Das zugrunde gelegte Konzept des Risikos besteht aus drei verschiedenen Elementen: der Definition eines Ausfallszenarios, der Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit und der Abschätzung des Ausmaßes der Ausfallsfolgen.

Um das Ausfallszenario und das Ausmaß der Folgen zu definieren, werden die in Datenbanken sowie Softwaretools wie DVtU, WADABA, WSVPruf, Zustandsprognose, Elwis und TRAVIS erfassten Daten verwendet. Für die Extraktion relevanter Informationen werden die Daten mit verschiedenen Techniken analysiert. Beispiele sind Ansätze aus der Statistik, Clustering-Methoden oder Ähnlichkeitsanalysen. Zudem kommen GIS-basierte Methoden zum Einsatz, die die Visualisierung der Informationen und die Identifizierung besonderer Umstände, unter denen noch nicht erkannte Ausfallszenarien eintreten können, unterstützen. Zudem werden Auswirkungen auf den Verkehr – sowohl auf lokaler als auch auf Netz-Ebene – berücksichtigt. Um Netzwerk-Performance-Messungen zu entwickeln, werden Ansätze aus der Warteschlangentheorie herangezogen (Marsili et al. 2018), wodurch zeitaufwändige Simulationen vermieden werden können.

Für die Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit bzw. die Beurteilung der Lebensdauer werden stochastische Prozesse wie Gamma-Prozesse betrachtet. Dafür werden Parameter definiert, die Expertenwissen und das Ergebnis aktueller Inspektionen nach dem Bayes-Satz kombinieren. Auf diese Weise werden individuelle Prognosen für jedes Element des Infrastruktursystems oder für Gruppen ähnlicher Elemente entwickelt. Auch Überlegungen zur Robustheit des zu untersuchenden Elements werden in den Ansatz einbezogen. Dies erfolgt insbesondere im Hinblick auf die Definition von tolerierbaren Grenzschäden.

Die oben genannte Analyse ermöglicht es, eine risikobasierte Priorisierung der Instandhaltungsmaßnahmen zu entwickeln (Marsili et al. 2019). Da das Risiko aus der Vernachlässigung der Instandhaltung von mehreren Faktoren abhängt, wird ein aggregiertes Risikomaß entwickelt, das mehrere Indikatoren mit verschiedenen Einheiten berücksichtigt. Dafür werden Multi Criteria Decision Methods wie z. B. das Weighted Sum Model, Promethee oder der Analytical Hierarchy Process verwendet.

Außerdem wird die Resilienz als Eigenschaft des Netzwerks berücksichtigt. Die Resilienz entspricht der Fähigkeit des Netzwerks, sich nach einem Systemausfall anzupassen und den ursprünglichen Zustand mit einer gezielten Auswahl der Reparaturmaßnahmen wieder herzustellen.

### 4 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden in Form einer Risk Map visualisiert und in einem Leitfaden für potentielle Nutzer anwenderbezogen dokumentiert. Die Risk Map veranschaulicht das aus Versagenswahrscheinlichkeit und Versagensfolgen gebildete Risiko im Bereich des Westdeutschen Kanalnetzes. Die Entwicklung erfolgt unter Beteiligung aller Kooperationspartner, wobei die im Bereich dieses Teilvorhabens ermittelten Versagensfolgen um die Folgen für die Bevölkerung und die Verkehrsfunktion ergänzt werden.

Der Leitfaden formuliert für potentielle Anwender die generische Vorgehensweise für eine risikobasierte Instandhaltungsstrategie, wie sie am Beispiel des Westdeutschen Kanalnetzes entwickelt wurde.

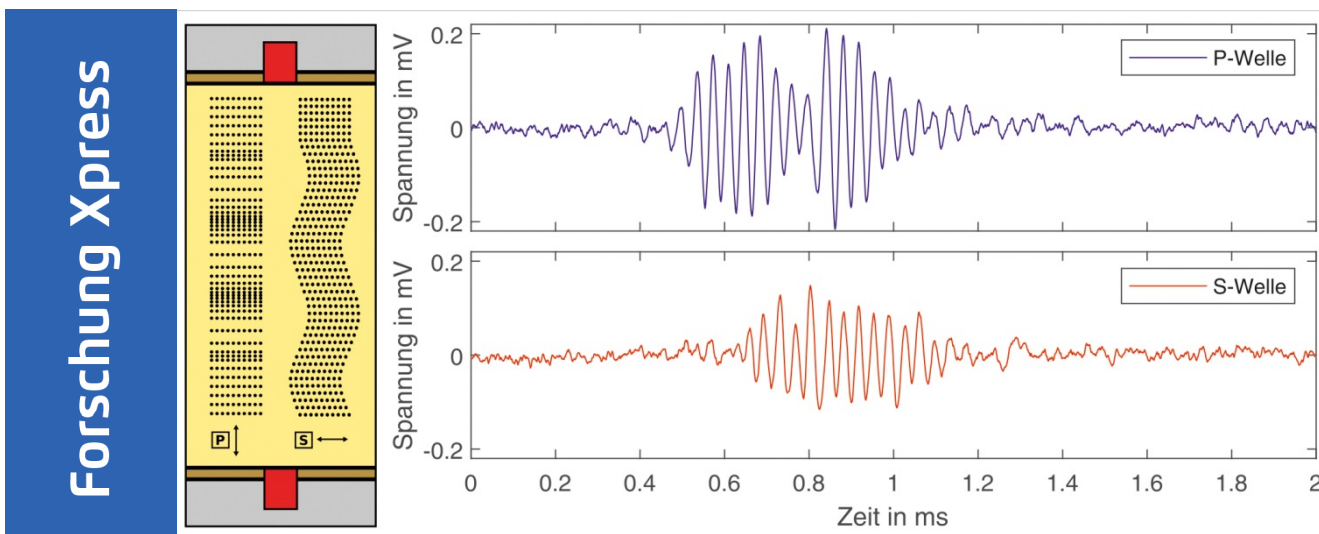
PREVIEW ist ein Verbundprojekt der BAW mit der Hochschule Karlsruhe, dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) sowie antwortING und 4Flow. Weitere Informationen über das Projekt bzw. die Verbundpartner sind auf der Internetseite des Projekts ([www.preview-projekt.de](http://www.preview-projekt.de)) verfügbar.

Das Projekt ist im Bereich der zivilen Sicherheitsforschung angesiedelt. Informationen zum Forschungsprogramm, zu aktuellen Bekanntmachungen, Veranstaltungen sowie anderen Forschungsprojekten mit ähnlichem Kontext sind auf der Internetseite des Bundesministeriums für Bildung und Forschung zur zivilen Sicherheitsforschung ([www.sifo.de](http://www.sifo.de)) zu finden.

#### Literatur:

Marsili, F.; Bödefeld, J.; Daduna, H.; Croce, P. (2019): Risk-based prioritization of urgent maintenance interventions on waterways infrastructures, ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Civil Engineering Systems Part B: Mechanical Engineering (under review).

Marsili, F.; Bödefeld, J.; Daduna, H.; Croce, P. (2018): Applying Queuing Theory for Managing Waterways Systems subject to Service Interruptions, In: Beton- und Stahlbetonbau 113 (S2), S. 129, DOI: 10.1002/best.201800059.



## Ermittlung geotechnischer Parameter aus geophysikalischen Messungen

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Geophysikalische Verfahren können geotechnische Methoden ergänzen, um den Baugrund zu charakterisieren. Dabei finden insbesondere seismische Erkundungsverfahren immer häufiger Anwendung, da die Ausbreitungsgeschwindigkeiten seismischer Wellen (Kompressions- und Scherwellen) in direktem Zusammenhang zu den elastischen Moduln im Bereich kleiner Dehnungen ( $< 10^{-5}$ ) stehen, in dem linear elastisches Materialverhalten angenommen wird. Ein wesentlicher Vorteil seismischer in-situ-Verfahren liegt darin, dass große Bodenvolumina untersucht werden können. Anstatt punktuelle Informationen in bestimmten Tiefen zu erhalten, können Informationen über große Bereiche abgeleitet werden. Um aus den seismischen in-situ-Messungen weitere geotechnische Informationen ableiten zu können, sollen in diesem Forschungsvorhaben die Zusammenhänge zwischen seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeiten und geotechnischen Parametern untersucht werden.

Aus ersten Untersuchungen ist bereits bekannt, dass die Scherwellengeschwindigkeit von dem Umgebungsdruck und der Porenzahl beeinflusst wird (Hardin und Richart 1963), jedoch zeigen sich erhebliche Abweichungen der Ergebnisse untereinander (Hussien und Karray 2016). Um die Ursache dieser Abweichungen beurteilen zu können, muss der Einfluss weiterer Faktoren geprüft werden. Dazu gehören die charakteristischen Eigenschaften der Kornverteilungskurve (mittlerer Korndurchmesser und Ungleichförmigkeitszahl) und der Wassergehalt des untersuchten Bodens. Erste Analysen zeigen bislang keine konsistenten Ergebnisse (Menq 2003, Wichtmann und Triantafyllidis 2009).

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

Die in-situ-Bestimmung von Lagerungsdichte, Porenzahl und Sättigungsgrad von kohäsionslosem Lockergestein ist bislang nur über Korrelationen mit Sondierwiderständen oder gar nicht möglich. Die Angaben werden jedoch

**Auftragsnummer:**

B3952.01.04.70003

**Auftragsleitung:**



Cornelia Kaufmann  
cornelia.kaufmann@baw.de

**Laufzeit:**

2016 bis 2022

zum Teil normativ gefordert, weshalb Verbesserungen dringend erforderlich sind. Gelingt es, Zusammenhänge zwischen der Messung von seismischen Wellengeschwindigkeiten und den genannten Parametern herzustellen, entfallen außerdem Einflüsse aus dem Entnahmeprozess, dem Transport und der Lagerung der Proben.

### 3 Untersuchungsmethoden

Im Fokus des Forschungsvorhabens steht die systematische Untersuchung der Zusammenhänge im Labor. Im Rahmen der Baugrunduntersuchungen verschiedener Baumaßnahmen an Bundeswasserstraßen wurden bisher überwiegend crosshole-seismische in-situ-Messungen zur Ermittlung seismischer Ausbreitungsgeschwindigkeiten eingesetzt. Bei der Crosshole-Seismik werden die seismische Quelle und der Empfänger in zwei benachbarten Bohrungen in die gleiche Tiefe herabgelassen und der dazwischenliegende Untergrund horizontal durchschallt. Aus den gemessenen Laufzeiten werden die seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeiten bestimmt. Um diese Messanordnung bei den Laboruntersuchungen nachzuempfinden, sollen Bodenproben unter bekannten Randbedingungen mit Kompressionswellen (P-Wellen) und Scherwellen (S-Wellen) durchschallt werden.

Unter systematischer Variation der einzelnen Parameter wie Lagerungsdichte, Kornverteilung und Wassergehalt, kann deren Einfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeiten untersucht werden. Im zweiten Schritt sollen die Beobachtungen mit Hilfe empirischer Korrelationsansätze mathematisch formuliert werden.

### 4 Ergebnisse

In einer für das Forschungsvorhaben konzipierten Triaxialzelle (Bild 1) können kohäsionslose Bodenproben in einen definierten Spannungszustand versetzt und durchschallt werden. Um auch an trockenen Proben eine exakte Volumenbestimmung während des Versuchs zu ermöglichen, ist die Triaxialzelle doppelwandig ausgeführt. Es können Bodenproben mit einem Durchmesser von bis zu 100 mm und einer Höhe von maximal 200 mm eingebaut werden.

Die piezoelektrischen Sensoren zur Durchschallung der Bodenprobe sind mittig in die Kopf- und Fußplatte der Triaxialzelle integriert. Die Filterplatten werden in diesem Bereich ausgespart, sodass die Sensoroberfläche direkt an der Bodenprobe anliegt. Bei den in den Sensoren verbauten Piezokristallen handelt es sich um Materialien, die bei Beanspruchung auf Zug oder Druck aufgrund von Ladungsverschiebungen innerhalb des Kristalls eine elektrische Spannung erzeugen. Die Größe der erzeugten Spannung ist dabei direkt proportional zur Kraft, die zur Deformation des Kristalls aufgewendet wird. Im umgekehrten Effekt werden die Kristalle deformiert, wenn eine elektrische Spannung angelegt wird. Die Kristalle sind so in den Sensoren angeordnet, dass sowohl Kompressions- als auch Scherwellen damit erzeugt und erfasst werden können. Die Sensoren arbeiten in einem Frequenzbereich von 20 kHz bis 50 kHz.

Nachdem der Aufbau des Versuchsstandes erfolgreich abgeschlossen wurde, folgen die ersten Untersuchungen. Dabei soll zunächst ein Verfahren für den Einbau von Sandproben in zuverlässig definierbaren Zuständen erarbeitet werden.

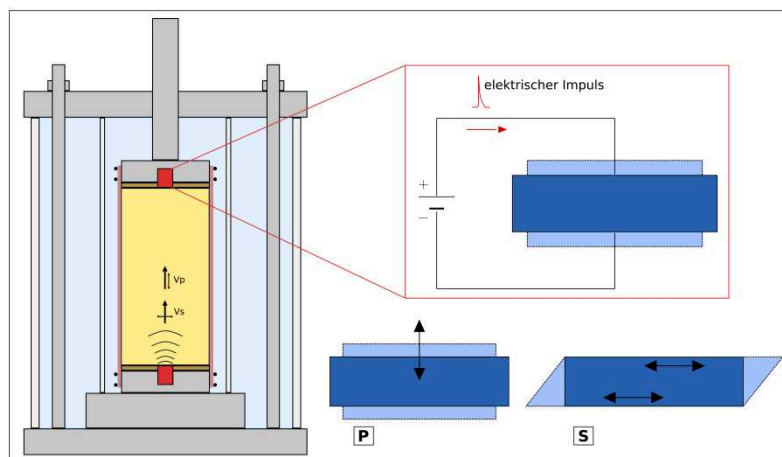


Bild 1: Triaxialdoppelwandzelle mit in die Kopf- und Fußplatte integrierten Sensoren (links) zur Durchschallung von Bodenproben mit P- und S-Wellen; Funktionsprinzip piezoelektrischer Sensoren (rechts).

#### Literatur:

Hardin, B. O.; Richart, F. E. (1963): Elastic Wave Velocities in Granular Soils, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division – Proceedings of the American Society of Civil Engineers.

Hussien, M. N.; Karray, M. (2016): Shear Wave Velocity as a Geotechnical Parameter: an Overview, Canadian Geotechnical Journal.

Menq, F.-Y. (2003): Dynamic Properties of Sandy and Gravelly Soils, Dissertation.

Wichtmann, T.; Triantafyllidis, T. (2009): Influence of the Grain-Size Distribution Curve of Quartz Sand on the Small Strain Shear Modulus, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.

# GeoValML

Geotechnical Value Markup Language

## GeoValML – Das interoperable Austauschformat für boden- und felsmechanische Kennwerte

### Aufbau und Betrieb einer geotechnischen Kennwertdatenbank

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Kenntnis über die geotechnischen Boden- und Felskennwerte ist für jedes Bauvorhaben notwendig. Eine große Anzahl von Behörden und Universitäten unterhalten Datenbanksysteme oder Datensammlungen zu geotechnischen Versuchen. Dieser „Datenschatz“ liegt praktisch dispers verteilt vor. Eine gemeinsame Sammlung sowie der freie Zugang zu geotechnischen Kennwerten zur Validierung eigener Untersuchungen ist bisher nicht vorhanden, da die hierzu notwendige fachwissenschaftliche und IT-Infrastruktur nicht verfügbar ist. Ziel ist die Erstellung eines interoperablen Austauschformates. Dieses zielt auf boden- und felsmechanische Kennwerte und die Aggregation von heterogenen und verteilt vorliegenden geotechnischen Kennwerten in einer gemeinsamen Datenbankstruktur. Weiterhin ist die öffentliche Bereitstellung der Daten sowie die Verknüpfung mit Diensten und Portalen mit fachlich nahem Bezug, wie z. B. BoreholeML oder der Bohrpunktkarte Deutschland, vorgesehen.

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

Durch die Entwicklung der GeoVal kann auch der Bereich Open Data und Open Access entscheidend unterstützt werden. Die systematische Ablage und die offene Bereitstellung von Versuchsergebnissen, Kennwerten und Metadaten gewährleisten den Zugriff im Sinne der Open-Access-Bewegung.

Die geotechnische Kennwertdatenbank kann sich somit zur zeitgemäßen Zugangsform für das boden- und felsmechanische Laborwissen entwickeln. Die zurzeit dispers verteilten Daten von geotechnischen Untersuchungen können nur dann genutzt werden, wenn sie auf einer Plattform aggregiert und auffindbar gemacht werden können. Durch eine kontinuierliche Befüllung der Datenbank aus Projekten der öffentlichen Hand verdichtet sich die räumliche Verteilung der ermittelten Kennwerte entlang der Infrastrukturen (Wasserstraße, Straße, Bahn, Stromtrassen etc.). Dadurch entsteht langfristig eine Datenbasis, die im Falle von Sanierungsarbeiten, Aus- und

#### Auftragsnummer:

B3952.01.04.70004

#### Auftragsleitung:



Eberhard Kunz  
 eberhard.kunz@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Dr. Nebojsa Balic  
 nebojsa.balic@baw.de  
 Eberhard Kunz  
 eberhard.kunz@baw.de

#### Laufzeit:

2017 bis 2020

Neubauten wertvolle Grundlagen liefert. Auch für mögliche Folgen des Klimawandels und für die Abschätzung von Georisiken ist die Kennwertdatensammlung von unschätzbarem Wert, insbesondere dann, wenn die Verknüpfung des Kennwertdatenportals (bzw. die Integration) mit der Bohrpunktkarte Deutschland und dem zugrundeliegenden Bohrdatenaustauschformat BoreholeML erfolgt.

### 3 Methoden

Um eine hohe Akzeptanz der Kennwertdatenbank bei Bund, Ländern, Kommunen, Instituten und auch bei Ingenieurbüros und interessierten Bürgern zu erreichen, ist eine standardisierte Umsetzung von großer Wichtigkeit. Individuelle Datenbankmodelle sind für lokale Anwendungen sicher sinnvoll, verlieren aber ihre Bedeutung, wenn die Austauschfähigkeit zwischen verschiedenen Nutzern bzw. Nutzergruppen erforderlich oder wünschenswert ist. Ein Datenaustausch sollte hier in beide Richtungen möglich sein.

Für die Umsetzung der GeoVal-Datenbank wird auf das generische Schema von "Observations & Measurements" (O&M) zurückgegriffen (Referenz: OGC 10-004r3 Version: 2.0.0). Das Schema wurde in den Standard DIN EN ISO 19156:2013-10 (Geoinformation – Erdbeobachtung und Erdmessung) überführt.

### 4 Ergebnisse

Basierend auf einer ausführlichen Anforderungsanalyse wurde das konzeptionelle Datenmodell entworfen und im Rahmen einer Expertenrunde validiert. Die Ergebnisse aus dieser Expertenrunde sind in das Datenmodell aufgenommen worden, womit die konzeptionelle Phase der Datenmodellierung abgeschlossen ist.

Das Modell bildet folgende Kennwerttypen ab:

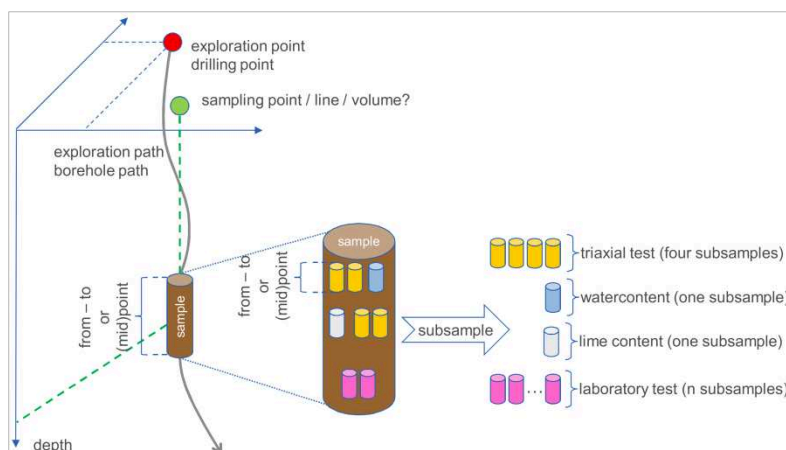
- Klassische geotechnische Kennwerte (z. B. Festigkeiten, Steifigkeiten, Klassifizierungen, ...)
- Derivate klassischer geotechnischer Kennwerte (Kennwerte[bereiche], ...)
- Geotechnische Messungen (Dichte-Log, Scherwellengeschwindigkeit, ...)
- Daten für wissenschaftliche Weiterentwicklungen (z. B. Stoffgesetzentwicklungen, ...)

Die abgebildeten Kennwerte weisen die folgenden geometrischen Formen auf:

- Klassische Punktdaten ([Kenn]Wert an Probe)
- Linienhafte Verteilung (z. B. Logs)
- Flächenhafte Zuordnung (geotechnische Schnitte)
- Volumina (3D-Baugrundmodelle – Building Information Modeling, BIM)

Für den Teilbereich der klassischen geotechnischen Kennwerte wird die Zuordnung der Daten zu Proben und Teilproben berücksichtigt. Eine Visualisierung dieser Zusammenhänge ist in Bild 1 dargestellt.

Darüber hinaus enthält das Datenmodell Informationen über die angewendeten Methoden zur Ermittlung der geotechnischen Kennwerte sowie die administrative Organisation der geotechnischen Untersuchungen.



#### Literatur:

DIN EN ISO 19156 (2013): Geoinformation – Erdbeobachtung und Erdmessung.

Bild 1: Zuordnung der Daten zu Proben und Teilproben.



## Böden unter Stoßbelastung

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Im laufenden Betrieb der Bundeswasserstraßen kommt es auch zu Anfahrungen von Schiffen auf die geböschten Ufer der Wasserstraßen. Die bisher verfügbaren Berechnungsverfahren für die Ermittlung des Bremswegs havarierender Schiffe basieren auf der Annahme eines starren Ufers, z. B. aus Beton. Mit dieser Annahme werden zwar die größtmöglichen Kontaktkräfte zwischen Schiff und Böschung sowie der größtmögliche vertikale Weg (Anhebung) des Schiffes aus dem Wasser berechnet, die im Bereich der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) dokumentierten Schadensfälle zeigen jedoch, dass die Schiffe in das Ufer eindringen, sodass die Annahme der starren Böschung nicht als realitätsnah gelten kann. Aufgrund der im Vergleich zur starren Böschung geringeren Kontaktkräfte wird in der Tendenz bei der Anfahrung an eine verformbare Böschung ein längerer horizontaler Bremsweg erwartet, sodass die vorhandenen Berechnungsverfahren für die Randbedingungen der verformbaren Böschung erweitert werden müssen.

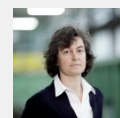
### 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)

Obwohl die Schäden am Schiff und an den Ufern meist ohne längere Unterbrechungen des Betriebs behoben werden können, ist es für die Einschätzung von Gefahrensituationen einerseits und die Dimensionierung von Schutzbauwerken andererseits von zentralem Interesse, die Bremswege und Kontaktkräfte zwischen Schiff und Ufer wirklichkeitsnah prognostizieren zu können. Solche geböschten Schutzbauwerke aus Bodenmaterial haben bisher insbesondere bei temporären Baugruben in Kanälen und Flüssen ihre Anwendung gefunden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird das Eindringverhalten von typischen Binnenschiffen senkrecht zur Böschung untersucht. Es wird weiter von einem Böschungskörper aus nicht kohäsivem Bodenmaterial ausgegangen. Das Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines analytischen Prognoseverfahrens für den Bremsweg und die Kontaktkräfte zwischen Schiff und Boden. Als Eingangsgrößen werden die Schiffparameter Anfahrtschwindigkeit und Tiefgang des Schiffes sowie die Böschungsgeometrie (Neigung und Höhe der Böschung) und die Bodenkennwerte (Wichte und Scherparameter) des Bodenmaterials verwendet.

#### Auftragsnummer:

B3952.02.04.10014

#### Auftragsleitung:



Regina Kauther  
 regina.kauther@baw.de

#### Laufzeit:

2006 bis 2019



### 3 Untersuchungsmethoden

Als Untersuchungsmethodik wird die bodenmechanische Modellversuchstechnik angewandt. Die Versuche wurden in den Modellmaßstäben 1:75, 1:23 und 1:17,8 ausgeführt. Dabei werden in den Versuchen Modelle der für die Binnenwasserstraßen charakteristischen Bugtypen Pontonbug und Spitzbug eingesetzt. Zur Erfassung der Einflüsse aus den hydromechanischen Randbedingungen auf den Stoßvorgang und zur Messung der Porenwasserdrücke im Boden während des Bremsvorgangs wurden zusätzlich drei Naturversuche durchgeführt.

### 4 Ergebnisse

Die Auswertung der Modellversuche zeigt, dass während des Bremsvorgangs im Boden von einer Mobilisierung des Grenzzustandes des passiven Erddrucks vor der Bugwand ausgegangen werden kann. Die Größe des passiven Erddrucks ist von der Größe und der Neigung der Wandfläche, die mit dem Boden in Kontakt ist, sowie von der Lage der Kontaktfläche in der Böschung (Neigung der Böschung oberhalb der Kontaktfläche und Abstand der Kontaktfläche zur Geländeoberkante) beeinflusst. Bild- und Videoaufnahmen von den Modellversuchen belegen, dass die Bruchzustände dabei mehrfach hintereinander auftreten, da das Schiff weiterfährt bis die kinetische Anfangsenergie transformiert ist. Für das Ponton- und das Spitzbugschiff ergeben sich unterschiedlich große Bremswege (siehe Bild 1). Messwerte für die am Schiff gemessenen Beschleunigungen zeigen, dass Trägheitskräfte nur zu Beginn des Bremsvorgangs und nur beim Pontonbugschiff eine relevante Größe besitzen und auf die Länge des Bremswegs nur einen untergeordneten Einfluss haben. Weitere Versuchsergebnisse sind in Kauther und Schuppener (2007) beschrieben. Es genügen deshalb zunächst Modelle, bei denen der Schiffsstoß als quasistatischer Vorgang abgebildet wird.

Das im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelte bodenmechanische Berechnungsmodell beruht auf dem Energieerhaltungssatz der Mechanik und bilanziert die kinetische Energie des Schiffes zu Beginn des Bremsvorgangs mit der Deformationsarbeit längs des Bremswegs und der potentiellen Energie durch die Anhebung des Schiffes (Kauther und Schuppener 2008). Die flächenhaft und in unbekannter Verteilung zwischen Bug und Boden wirkenden Kontaktspannungen werden dafür zu einer resultierenden Kraft zusammengefasst. Der Angriffspunkt der Kraft ändert sich mit der Lage des Schiffes und der Größe der Kontaktfläche. Außer den Kräften aus dem Erdwiderstand wird die Änderung der Auftriebskraft bei der Anhebung des Schiffes berücksichtigt. Da der Verlauf des Bremswegs nicht von vorneherein bekannt ist, wird das Berechnungsverfahren inkrementell formuliert. Das Berechnungsverfahren wurde zunächst für den Pontonbug aufgestellt. Die Validierung erfolgt anhand der Messwerte aus den Modellversuchen. Es kann gezeigt werden, dass der Verlauf des Bremswegs in guter Übereinstimmung mit den Messwerten berechnet werden und dessen Länge auf der sicheren Seite ermittelt werden kann. Für eine Anwendung des Berechnungsverfahrens auf das Spitzbugschiff muss die Geometrie des Bugs näherungsweise erfasst und wegen der erheblich größeren Eindringung des Spitzbugschiffs in die Böschung auch die Sohlreibung als zusätzliche bremsende Kraft im Rechenverfahren berücksichtigt werden. Mit diesem Berechnungsverfahren wurden auch die drei Naturversuche nachgerechnet. Einflüsse, die beim Modellversuch ausgeschlossen waren, wie z. B. das mit dem Schiff mitbewegte Wasserwellensystem und die Elastizität des Schiffes, haben sich auch beim Naturversuch als nicht relevant herausgestellt. Im Ergebnis kann mithilfe des Berechnungsverfahrens gezeigt werden, dass für die verformbare Böschung im Vergleich zur starren Böschung größere horizontale und kleinere vertikale Bremswege und Kontaktkräfte ermittelt werden.

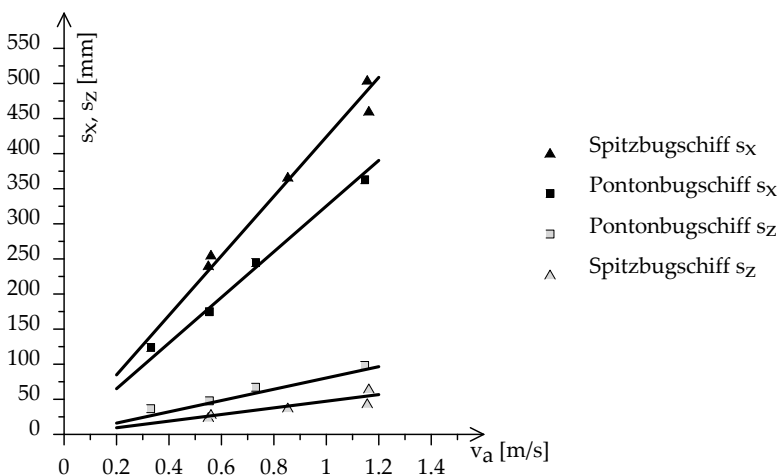
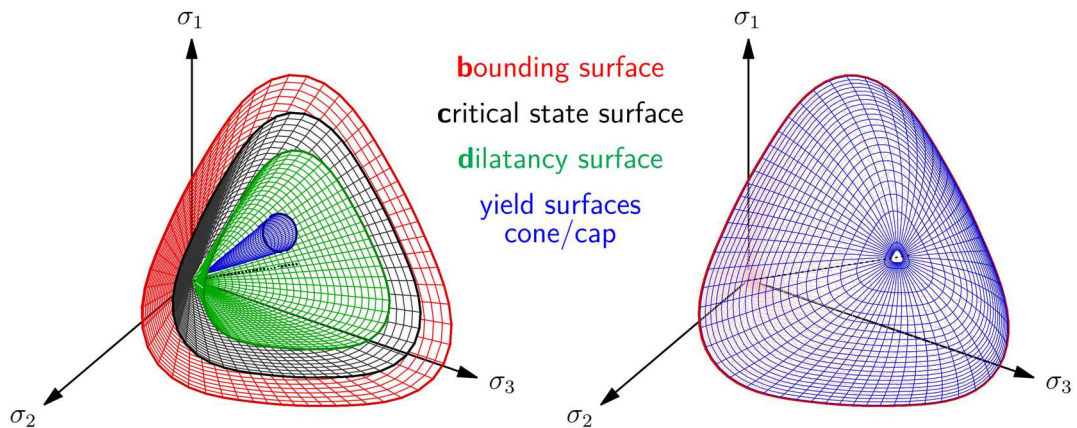


Bild 1: Vergleich des gemessenen Bremswegs für das Ponton- und das Spitzbugschiff.

#### Literatur:

Kauther, R.; Schuppener, B. (2008). Ship Collision with waterway embankments – a proposal for the calculation of the stopping distance and the contact forces, 11<sup>th</sup> Baltic Sea Geotechnical Conference, Danzig, Poland.

Kauther, R.; Schuppener, B. (2007): Physical Modelling of Ship Collisions with Embankments of Waterways, ICCG 2007, Hamburg, Germany.



## Modellierung der Verformung nichtbindiger Böden unter zyklischer Belastungseinwirkung von Schleusenbauwerken

### Stoffgesetzentwicklung im Rahmen der Bounding Surface Plasticity

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Nichtbindige Böden zeigen infolge zyklischer Belastung eine bedeutende Akkumulation plastischer Verformungen. Dies kann sowohl in Laborexperimenten als auch bei Setzungsmessungen wechselbeanspruchter Bauwerke beobachtet werden. Insbesondere bei Schleusen, die in der Regel eine sehr hohe Lastamplitude aufweisen, können beachtliche Langzeitsetzungen verzeichnet werden. Sind diese Verformungen nicht schon in der Planungsphase hinreichend genau bekannt, können sie zu erheblichen Bauwerksschäden führen.

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Stoffgesetzes, das es erlaubt, Langzeitsetzungen von Schleusenbauwerken hinreichend genau zu berechnen. Mit den derzeit verfügbaren elastoplastischen sowie den inkrementell formulierten Stoffgesetzen (z. B. Hypoplastizität) in Verbindung mit der Methode der Finiten Elemente (FEM) ist dies nur unzulänglich möglich. Zudem erfordert eine hohe Anzahl von Lastzyklen bei diesen Modellen eine sehr hohe Rechenleistung, da jeder Lastzyklus einzeln berechnet werden muss. In einem FE-Programm (z. B. PLAXIS) implementiert, soll das Rechenmodell in der Lage sein, das Bodenverhalten entlang sowohl elementarer als auch zusammengesetzter Spannungspfade abzubilden. Letztere umfassen neben komplexen Bauprozessen auch Belastungsszenarien mit einer hohen Anzahl an Lastzyklen, die mit akzeptablem Rechenaufwand und ohne rein empirische Ansätze erfasst werden sollen. Damit soll ein Stoffmodell für baupraktische Anwendungen einschließlich einer umfassenden Dokumentation der Funktionsweise und Einsatzgrenzen bereitgestellt werden.

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

Sowohl zur Vermeidung von Bauwerksschäden als auch für die wirtschaftliche Bemessung einzelner Bauteile ist eine gute Abschätzung der zu erwartenden Langzeitsetzungen unbedingt erforderlich. So ist z. B. die Wahl der einzubauenden Fugenbänder direkt von der Setzungsdifferenz abhängig.

#### Auftragsnummer:

B3952.02.04.10045

#### Auftragsleitung:



Katharina Bergholz  
 katharina.bergholz@baw.de

#### Laufzeit:

2006 bis 2019

### 3 Untersuchungsmethoden

Bei der Entwicklung von Stoffmodellen kommen vorrangig numerische Methoden zum Einsatz. Ein explizit formuliertes Elementversuchsprogramm (constitutive driver) dient der Erarbeitung und Verifizierung des Modells. Dabei wird die Performance des Materialmodells durch den Abgleich mit Ergebnissen aus entsprechenden, in der Literatur dokumentierten Laborversuchen bewertet. Anhand von systematischen Nachrechnungen elementarer und komplexer Spannungspfade werden die Möglichkeiten und Grenzen des Stoffmodells aufgezeigt. Nach der Überführung des Stoffgesetzes in eine Routine mit implizitem Integrationschema für die Anwendung in einer FEM-Software können Randwertprobleme gelöst und im Sinne einer Validierung mit In-situ-Langzeitmessungen verglichen werden.

### 4 Ergebnisse

Das aus der Anfangsphase der Forschungsarbeit resultierende elastoplastische Stoffgesetz aus der Klasse der Bounding-Surface-Modelle (z. B. Manzari und Dafalias 1997, Papadimitriou und Bouckovalas 2002) wurde durch konstitutive Änderungen den Bedürfnissen praktischer Anwendungen angenähert. Die Struktur des implementierten Modells besteht aus den im Titelbild dargestellten Komponenten: den Modellflächen der Bounding Surface Plasticity (b, c, d), einer konischen, kinematisch verfestigenden Fließfläche (cone, links), sowie einer kappenartigen, isotrop verfestigenden Fließfläche (cap, rechts). Ein klarer Vorteil des Modellkonzepts ist die zustandsabhängige Formulierung im Rahmen der Theorie der kritischen Zustände, sodass das Verhalten von Böden unterschiedlicher Ausgangsspannungszustände und Initialporenzahlen mit einem Parametersatz simuliert werden kann (Bild 1). Darüber hinaus erlaubt die kinematische Verfestigung des Konus die Akkumulation von Verformungen (bzw. Porenwasserdrücken) bei zyklischer Scherung. Die in Anlehnung an das Hardening-Soil-Modell implementierte zusätzliche Kappe ermöglicht plastische (irreversible) Deformationen entlang oedometrischer Spannungspfade.

Da die realitätsnahe Abbildung grundlegender Bodeneigenschaften (z. B. Dilatanz, Entfestigung, Barotropie) Voraussetzung für die erfolgreiche Simulation zyklischen Tragverhaltens und anderer baupraktisch relevanter Belastungssituationen ist, wurden zahlreiche Elementversuche simuliert: Anhand von Labordaten wurden Parametersätze für verschiedene Sande kalibriert und sowohl oedometrische/isotrope Kompressionsversuche als auch drainierte/undrainierte Triaxialversuche zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit des Stoffgesetzes nachgerechnet. Alternative Modellierungsansätze für die Dilatanzformulierung und für Verfestigungsmechanismen des Konus wurden im Hinblick auf eine bessere Abbildung experimenteller Daten untersucht und in das neue Modell implementiert. Des Weiteren wurde die Kappe mit einem belastungs- bzw. dehnungsrichtungsabhängigen Verfestigungsmechanismus versehen, um das Zusammenwirken der Fließflächen zu optimieren.

In einem früheren Stadium des Projektes wurde die Bedeutung der erhöhten Steifigkeit bei kleinen Dehnungen herausgearbeitet, die zur Entwicklung der Small-Strain-Erweiterung des Hardening-Soil-Modells geführt hat (Benz 2007). Ein den Verfestigungsmodul skalierender Mechanismus sorgt auf ähnliche Weise auch im neuen Bounding-Surface-basierten Modell für die Berücksichtigung des graduellen Steifigkeitsabfalls mit zunehmender Scherdehnung. Analog wird das Akkumulationsverhalten des Bodens bei fortschreitender zyklischer Scherung ebenfalls durch Anpassung der plastischen Steifigkeit beeinflusst. Die Implementierung eines Algorithmus zum Überspringen und zur Extrapolation von Zyklen zur Bewältigung hoher Zyklenanzahlen für die Prognose von Langzeitsetzungen wurde ansatzweise getestet.

Um die Etablierung des Materialmodells in der Ingenieurspraxis zu erleichtern, wurde ein populationsbasierter Optimierungsalgorithmus erarbeitet und erprobt, der allgemein verwendete bodenmechanische Kenngrößen in einen Teil der im Modell intern verwendeten Parameter konvertiert. Dem Open-Source-Gedanken folgend soll die Materialmodellroutine zudem frei verfügbar sein.

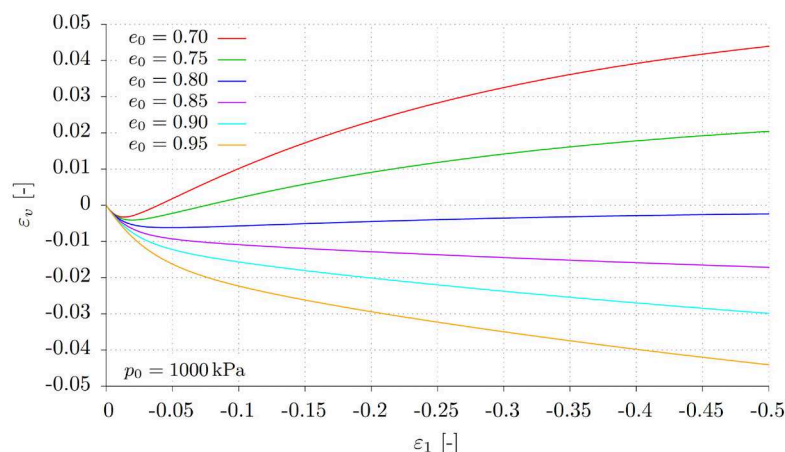


Bild 1: Dilatanz und Barotropie: volumetrisches Verformungsverhalten bei triaxialer Kompression unterschiedlicher Ausgangsdichten.

#### Literatur:

Benz, T. (2007): Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences. Dissertation, Universität Stuttgart.

Manzari, M. T.; Dafalias, Y. F. (1997): A critical state two-surface plasticity model for sands. In: Géotechnique, 47(2), S. 255–272.

Papadimitriou, A. G.; Bouckovalas G. D. (2002): Plasticity model for sand under small and large cyclic strains – a multi-axial formulation. In: Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22(3), S. 191–204.



## Ermittlung charakteristischer Kennwerte veränderlich-fester Gesteine unter Berücksichtigung des Porenwasserdrucks

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Veränderlich-feste Gesteine unterscheiden sich in ihrem geomechanischen Verhalten sowohl von den Lockergesteinen (Boden) als auch von den Festgesteinen (Fels). Es handelt sich um eine Gesteinsgruppe, die bei Exposition gegenüber atmosphärischen Gasen und Flüssigkeiten innerhalb kurzer Zeit Zusammenhalt und Festigkeit verliert. Die Untersuchung nach rein boden- oder felsmechanischen Gesichtspunkten hat sich als nicht zielführend erwiesen. Besonderer Forschungsbedarf besteht nach Kanji (2014) im Bereich der Probenahme und bei der Durchführung von Laborversuchen.

In diesem Forschungsvorhaben wird ein Workflow von der Probenahme bis zur experimentellen Untersuchung und der Auswertung im Labor für veränderlich-feste Gesteine erarbeitet. Dies beinhaltet die Wahl geeigneter Probenahmetechniken und -behandlungen, die zu möglichst ungestörten Proben führen sollen, sowie die Identifikation der Faktoren, welche die Probenahme beeinflussen. Es soll erarbeitet werden, mit welchen Versuchen und in welcher Kombination der Probenahmevarianten charakteristische Festigkeits- und Steifigkeitswerte an gesättigten Proben ermittelt werden können.

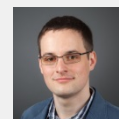
### 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)

Im Rahmen des Neubaus verschiedener Schleusen wie z. B. in Minden, Kriegenbrunn oder Erlangen werden im Untergrund veränderlich-feste Gesteine angetroffen. Eine an das Material angepasste Ermittlung der Festigkeitsparameter ermöglicht eine zuverlässigere Beurteilung von Bauzuständen und der Bauwerk-Boden-Interaktion. Damit werden Ausführungs- und Schadensrisiken minimiert und Kosten eingespart. Zudem können fundiert ermittelte Kennwerte Eingang in numerische Berechnungen finden und deren Qualität verbessern.

#### Auftragsnummer:

B3952.02.04.70005

#### Auftragsleitung:



Christian Ungewitter

christian.ungewitter@baw.de

#### Laufzeit:

2015 bis 2020

### 3 Untersuchungsmethoden

Vorab wurde durch eine Literaturstudie der gegenwärtige Wissensstand erarbeitet und aktuelle Entwicklungstendenzen im Themenbereich veränderlich-feste Gesteine identifiziert sowie maßgebende Zerfallsmechanismen recherchiert. Daraus werden Schlussfolgerungen für die Probenahme, die Laboruntersuchungen und die Auswertung der Versuche gezogen.

Anhand der Erkenntnisse zu den Zerfallsmechanismen wurde eine Probenahmematrix erstellt, die darauf ausgerichtet ist, den In-situ-Zustand des veränderlich-festen Gesteins möglichst zu erhalten. In einem kreidezeitlichen Tonstein wurden vier Seilkernbohrungen abgeteuft, von denen je zwei mit einer Klarwasserspülung und mit einer wasserbasierten Polymerspülung ausgeführt wurden. Nach dem Ziehen der Bohrerkerne wurde jeder zweite Liner mit einer Salzlösung (2,5 g NaCl/l) aufgefüllt. Die Salzlösung soll das Einsetzen der Zerfallsmechanismen verhindern. Daraus ergeben sich insgesamt vier Probenahmevarianten, die hinsichtlich ihres Einflusses auf die effektiven Scherparameter der Tonsteine ausgewertet und untereinander verglichen werden sollen. Zusätzlich wurde ein Schluffstein ebenfalls mit Seilkernbohrungen beprobt. Hier konnte nur mit Wasser als Bohrspülung gearbeitet werden, sodass bei gleicher Kernbehandlung nur zwei Untersuchungsvarianten (konventionelle Lagerung und Lagerung in Salzlösung) möglich waren.

Bei der anschließenden experimentellen Untersuchung im Labor werden ausschließlich Versuche mit Probekörpern möglichst nah am In-situ-Zustand durchgeführt. Um einen Vergleich der Versuchsergebnisse zu ermöglichen, werden die Proben zunächst genau charakterisiert. Dazu dienen Indexversuche wie die Bestimmung des Wassergehalts, der Dichte sowie die Ergebnisse geophysikalischer Feldmessungen. Die anschließende Durchführung von undränierten und dränierten Triaxialversuchen mit Porenwasserdruckmessungen dient zur Bestimmung charakteristischer Festigkeits- und Steifigkeitsparameter. Zusätzliche Mikrostruktur-Untersuchungen mittels spezieller Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahmen sollen Hinweise über den Aufbau des Porenraums sowie die Verteilung des Porenwassers geben.

### 4 Ergebnisse

Vorversuche haben ergeben, dass ein Triaxialversuch mit Tonstein unter bodenmechanischen Gesichtspunkten durchgeführt werden muss (DIN EN ISO 17892-9:2018-07). Für veränderlich-feste Gesteine sind allerdings Modifikationen zu dem in der Norm beschriebenen Vorgehen vorzunehmen.

Berechnungen und die Auswertung von Mikrostrukturaufnahmen zeigen, dass das Gestein in situ vollständig gesättigt ist. So kann die Sättigungsphase begrenzt bzw. ausgelassen werden, da ebenfalls keine Hinweise vorhanden sind, dass durch den aufgebrachtten Gegendruck die Probensättigung erhöht wird. Eine Konsolidierungsphase sollte durchgeführt werden. Bei geringen effektiven Manteldrücken sind dränierte Versuche zu empfehlen. Bei undränierten Versuchen steigt während des Abscherens der Porenwasserdruck möglicherweise so stark an, dass er den effektiven Manteldruck neutralisiert. Alternativ bestünde die Möglichkeit, die Abscherrate stark zu verringern.

Unterschiede zwischen den einzelnen Probenahmevarianten hinsichtlich der ermittelten Festigkeitsparameter sind baupraktisch nicht relevant, was sich einer engen Anordnung aller untersuchten Messwerte um die lineare Ausgleichsfunktion in Bild 1 widerspiegelt. Es ist aber noch zu klären, ob diese Werte dränierte oder undränierte Bedingungen abbilden. Anhand von Untersuchungen an Proben, die zehn Minuten oder sieben Tage in Laborumgebung getrocknet wurden, kann gezeigt werden, dass die Erhaltung des In-situ-Wassergehaltes wichtiger ist als der Einfluss der Bohrspülung oder der Lagerungsvariante. Auffällig ist das von Beginn des Abscherprozesses an nicht-lineare Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Tonsteinproben. Dies sollte entsprechend für numerische Berechnungen berücksichtigt werden.

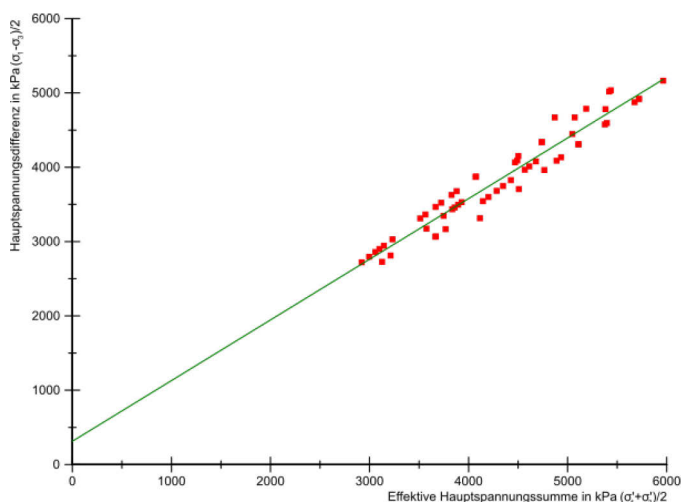


Bild 1: Spitzenfestigkeiten der Proben des Mindener Tonsteins im p-q-Diagramm.

#### Literatur:

Kanji, M. A. (2014): Critical issues in soft rocks. In: Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering (6/3), 186–195.

Norm DIN EN ISO 17892-9: 2018-07. Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 9: Konsolidierte triaxiale Kompressionsversuche an wassergesättigten Böden.



## Chemischer Angriff auf geotechnische Elemente

### Veränderung der Grenztragfähigkeit

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

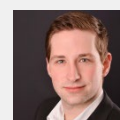
Bei den laufenden Projekten und Baumaßnahmen der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) ergeben sich immer wieder Schwierigkeiten, die Auswirkungen eines chemischen Angriffs auf den Mörtel bzw. Beton bei geotechnischen Elementen wie Verpressankern, Kleinverpresspfählen und Betonpfählen bezüglich der dauerhaften Tragfähigkeit realistisch zu bewerten und angemessene Anforderungen an Baustoffe und Bauweisen festzulegen. Die in der Literatur und teilweise auch im Regelwerk sowie in Zulassungen beschriebenen Lösungsansätze sind zumeist entweder nicht praxistauglich oder aufgrund der gewählten Randbedingungen bei den dokumentierten Modellversuchen nicht ausreichend realitätsnah. Im Rahmen eines in drei Teile gegliederten Gesamtvorhabens (1. Einwirkungen von chemischen Substanzen aus dem Grundwasser, 2. Widerstand des Mörtels bzw. Betons gegenüber dem chemischen Angriff, 3. Veränderung des Tragverhaltens aufgrund der Veränderung des Mörtels bzw. Betons) wird in diesem Teilprojekt 3 die Grenztragfähigkeit der geotechnischen Elemente unter der Einwirkung eines chemischen Angriffs untersucht.

Ein Hauptaspekt des FuE-Vorhabens ist die Untersuchung des kalklösenden Kohlensäureangriffs auf Verpressanker. Zur Tragfähigkeit von Ankern und Verpresspfählen unter Einwirkung von kalklösender Kohlensäure sind bisher nur wenige Versuchsreihen (Manns und Lange 1993; Hof 2004; Triantafyllidis und Schreiner 2007) durchgeführt worden, welche aufgrund der differierenden Versuchsrandbedingungen nur schwer direkt vergleichbar sind. Unterschiede liegen zum Beispiel in der Größe der Ankerkörper und deren Herstellung. In allen Versuchsreihen zeigte sich in den ersten Monaten eine deutlich erkennbare Abnahme der Tragfähigkeit, die sich mit fortschreitender Dauer des chemischen Angriffs verlangsamte. Dabei variierte der Tragfähigkeitsverlust zwischen 20 und 70 Prozent. Diese divergierenden Ergebnisse für die Grenztragfähigkeit der Verpressanker sollen verifiziert und entsprechend der neuen Erkenntnisse angepasst werden.

#### Auftragsnummer:

B3952.02.04.70006

#### Auftragsleitung:



Fabian Heidenreich  
 Fabian.Heidenreich@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2020

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

Der Einsatz von Verpressankern, Kleinverpresspfählen und Betonpfählen findet im Rahmen von Baumaßnahmen der WSV in vielfältiger Weise statt. Verwendungsmöglichkeiten liegen beispielweise bei Auftriebsicherungen von Schleusen- und Wehrsohlen, bei Rückverankerungen von Uferbefestigungen aber auch bei der temporären Sicherung von Baugruben. In den Fällen, wo ein erhöhter chemischer Angriff aus dem Grundwasser oder dem Boden auf den Mörtel bzw. Beton dieser geotechnischen Elemente prognostiziert wird, müssen diese aufgrund nicht ausreichender praxistauglicher Erkenntnisse und Lösungsansätze über die Tragfähigkeitsverluste durch kostenintensivere Konstruktionen wie z. B. Stahlrammpfähle ersetzt werden. Die Konsequenzen sind somit deutliche Kostensteigerungen, höhere Lärmbelastigungen, größere Erschütterungen sowie insgesamt ein gesteigerter Arbeitsaufwand in Verbindung mit einer längeren Bauzeit.

## 3 Untersuchungsmethoden

Im Rahmen dieses Forschungs- und Entwicklungsvorhabens wird zum einen ein umfangreiches Laborprogramm mit Modellankern, bei denen baupraktische Randbedingungen wie In-situ-Spannungszustände und der Verpressvorgang berücksichtigt werden können, durchgeführt. Zum anderen findet parallel die Untersuchung an Verpressankern hinsichtlich ihrer Grenztragfähigkeit bei betroffenen Bauvorhaben der WSV statt.

In Verbindung mit der Ruhr-Universität Bochum erfolgte in der ersten Forschungsphase die Entwicklung eines Versuchsstandes anhand von Vorversuchen. Dieser wurde im Frühjahr 2019 in Betrieb genommen (Bild 1) und in Bezug auf die Reproduzierbarkeit ohne chemischen Angriff geprüft. Im nächsten Schritt sind Prüfungen mit kalklösender Kohlensäure und die Erweiterung des Versuchsstandes mit mindestens fünf weiteren Behältern geplant. Wichtige Aspekte der Laborversuche sind die zeitabhängigen Auswirkungen des chemischen Angriffs auf die Betonoberfläche und daraus resultierende bodenmechanische Einflüsse auf die Grenztragfähigkeit des geotechnischen Elements sowie ein praxisnaher Ansatz zur Bestimmung des Verlustes der Tragfähigkeit in Abhängigkeit von relevanten Bodenparametern.

Zeitgleich zu den Modellversuchen werden bei Baumaßnahmen der WSV Verpressanker und Mikropfähle untersucht, die sich im Bereich von erhöhten Konzentrationen calcitlösenden Grundwassers befinden (siehe Titelbild).

## 4 Ergebnisse

Wiederholte Ankerprüfungen an Einstab- bzw. Litzenankern im Bereich erhöhter Konzentrationen an kalklösender Kohlensäure an den Schleusen Gleesen (2017 und 2018) und Bevergern (2011 und 2018), die am Dortmund-Ems-Kanal liegen, haben bisher keine Hinweise auf eine Abminderung der Tragfähigkeit ergeben.

Erste Versuche mit dem neu konzipierten Versuchsstand ohne eine Einwirkung durch calcitlösendes Wasser zeigen, dass ein Unterschied in der maximalen Ausziehungskraft zwischen verpressten und unverpressten Tragkörpern besteht. Unter gleichen Versuchsrandbedingungen ergibt sich ein größerer Ankerdurchmesser und eine erhöhte Grenztragfähigkeit durch das Verpressen des Zementmörtels, was in der Erhöhung der Radialspannung begründet ist (Domes 2015).



Bild 1: Neuer Versuchsstand auf dem Gelände der BAW zur Untersuchung des chemischen Angriffs auf Verpressanker.

### Literatur:

Domes, X. (2015): Cement grouting during installation of ground anchors in non-cohesive soils. Dissertation. Norwegian University of Science and Technology. Trondheim.

Hof, C. (2004): Über das Verpressankertragverhalten unter kalklösendem Kohlensäureangriff. Dissertation. In: Schriftenreihe des Inst. f. Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum, Heft 35. Bochum.

Manns, W.; Lange, H.-D. (1993): Einfluß aggressiver Wässer und Böden auf das Langzeitverhalten von Verpressankern und Verpresspfählen. Abschlußbericht zu Teil 2. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

Triantafyllidis, T.; Schreiner, V. (2007): Tragverhalten von Verpressankern unter kalklösender CO<sub>2</sub>-Belastung. Abschlussbericht. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.



## Untersuchung des Bodeneintrags in den Frischbeton von Ortbetonbohrpfählen

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Bei der Herstellung von verrohrt gebohrten Bohrpfählen besteht das Risiko eines Bodeneintrags in den Frischbeton beim und nach dem Ziehen der Verrohrung. Im Rahmen verschiedener Bauvorhaben der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) konnte dies bereits beobachtet werden. So wurde z. B. beim Bau einer überschnittenen Bohrpfahlwand in enggestuften Sanden, unterhalb des Grundwasserspiegels Bodenmaterial in die Pfähle eingetragen. Dabei handelte es sich um verkitteten Boden aus dem Bereich des Pfahlfußes, der beim Betonieren an der Verrohrung anhaftete. Dieser Boden kann dann beim Ziehen der Verrohrung verschleppt und teilweise bis an die Oberfläche gefördert werden. Durch die Verschleppung des Bodeneintrags kann es zu einer Verunreinigung des Betons kommen, welche eine Schwächung des Pfahlbetonquerschnittes mit sich bringt.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist, ein besseres Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Frischbeton, Boden und Porenwasser bei der Pfahlherstellung zu erlangen. Dies soll dazu beitragen das Risiko von Ausführungsmängeln bei der Herstellung von Ortbetonpfählen zu reduzieren.

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

Im letzten Jahrzehnt fanden vermehrt gebohrte Ortbetonpfähle bei Bauvorhaben der WSV Verwendung. Überschnittene Bohrpfahlwände wurden z. B. an den Schleusenbaugruben an der Mosel, in Bolzum und in Minden als temporäre Baubehelfe ausgeführt. Des Weiteren wurden sie bei der Schleusenbaugruben Dörwerden oder als Uferwand an der Mosel in das Bauwerk integriert und dienen zur dauerhaften Lastabtragung. Für die nächsten Jahre sind an den Schleusenbaugruben des DEK Nord, in Erlangen und in Kriegenbrunn überschnittene Bohrpfahlwände in der Planung. Hierbei gilt es, Ausführungsmängel wie z. B. die oben beschriebenen zu vermeiden, da deren Sanierung, falls überhaupt möglich, zeit- und kostenintensiv ist.

**Auftragsnummer:**

B3952.02.04.70007

**Auftragsleitung:**

Hanna Nissen  
hanna.nissen@baw.de

**Laufzeit:**

2018 bis 2023



### 3 Untersuchungsmethoden

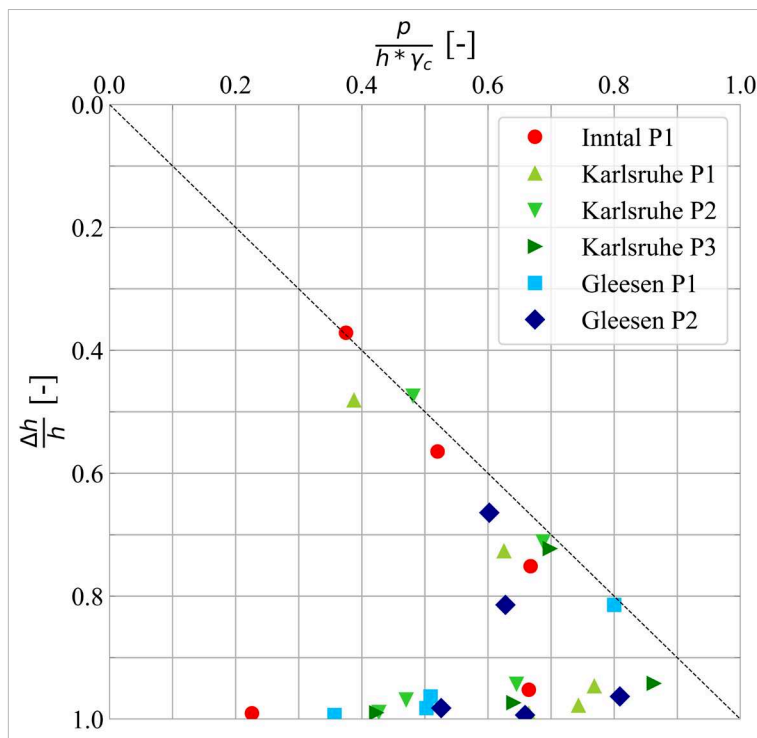
Untersuchungen mithilfe von In-situ-Messungen und Modellversuchen sollen dazu beitragen, die Wechselwirkung beim Herstellungsprozess abzubilden. Zunächst liegt der Fokus auf der Entwicklung des Frischbetondrucks im Bohrpfahl, um erste Ansätze für die Erfassung der Einflüsse des Betoniervorgangs auf den Boden zu erhalten. Die hierfür zunächst im Labor getesteten Drucksensoren dienen den Messungen zur Frischbetondruckentwicklung auf der Baustelle. Auf Grundlage der Messergebnisse erfolgt dann die Planung der Modellversuche. Es ist geplant, die beobachteten Phänomene parallel mit numerischen Methoden zu simulieren. Als Werkzeug steht z. B. OpenFOAM (CFD) zur Verfügung. Im ersten Schritt wurde im Rahmen einer Literaturrecherche der aktuelle Stand der Technik erfasst.

### 4 Ergebnisse

Mithilfe von Messungen auf vier verschiedenen Baustellen sind erste Abschätzungen der Frischbetondruckentwicklung bei verrohrten, im Kontraktorverfahren hergestellten Bohrpfählen möglich. Die Herstellung der Pfähle erfolgte auf den drei Baustellen in Gleesen, Karlsruhe und im Inntal unter Wasserauflast und in Brunsbüttel mit Suspensionsstützung. Die Sensoren sind für die Messung, wie im Titelbild dargestellt, in fünf Tiefenlagen am Bewehrungskorb befestigt. Bei den verwendeten Sensoren handelt es sich um piezoelektrische Druckaufnehmer, die durch einen mit einer 2-Komponenten-Silikonmasse verfüllten Aufsatz geschützt sind. Das autarke Messsystem ist während der Herstellung am Bewehrungskorb befestigt, um alle herstellungsbedingten Einflüsse zu erfassen.

In Bild 1 sind die gemessenen Maximaldrücke der mit Wasserauflast hergestellten Bohrpfähle über die Tiefe dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit ist der gemessene Druck  $p$  normiert in Bezug zum maximal möglichen Druck  $p_{max} = h * \gamma_c$  (mit  $\gamma_c$  = Frischbetonwichte) des jeweiligen Pfahls und die Höhenlage  $\Delta h$  relativ zur Gesamtlänge  $h$  des Pfahls dargestellt. Die Länge der im nichtbindigen Untergrund hergestellten Pfähle liegt zwischen 15,90 m und 21,50 m. Deutlich sichtbar ist, dass die Frischbetondrücke im oberen Bereich annähernd den theoretischen hydrostatischen Frischbetondruck erreichen. Dieser ist in der Grafik als gestrichelte Linie dargestellt. Im Bereich des Pfahlfußes sind die gemessenen Drücke deutlich geringer. Teilweise steigen sie nur geringfügig gegenüber dem hydrostatischen Wasserdruck in der jeweiligen Tiefe. Daraus lässt sich ein Einfluss des Pfahlfußbereichs ableiten, der zu einem frühen Ansteifen und einer Abgabe des Anmachwassers des Betons führt.

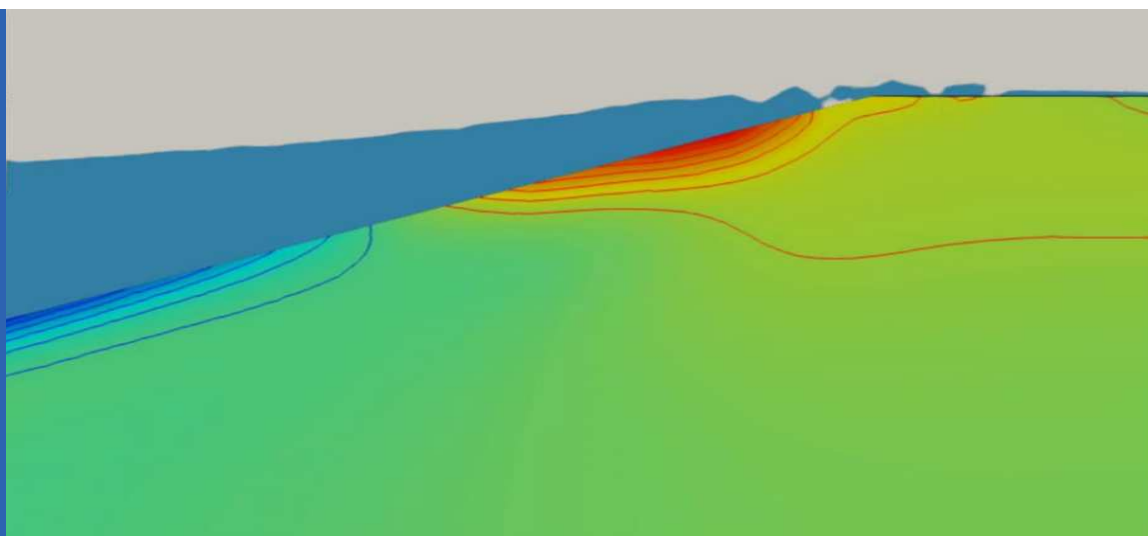
Es hat sich gezeigt, dass die Lage von Verrohrung und Kontraktorrohr einen entscheidenden Einfluss auf die Druckentwicklung bei der Bohrpfahlherstellung haben. Insbesondere bei der Herstellung unter Wasserauflast fallen die Drücke ab, sobald die Sensorebene außerhalb des Einflussbereichs von Verrohrung und Kontraktor liegt. Dies lässt darauf schließen, dass der Beton in der Folge beginnt anzusteifen. Des Weiteren können einzelne Ziehprozesse von Verrohrung und Kontraktorrohr in den verschiedenen Messebenen zu Druckspitzen führen (vgl. Nissen et al. 2020).



#### Literatur:

Nissen, H.; Herten, M.; Pulsfort, M. (2020): Herstellungseinflüsse auf die Druckentwicklung im Frischbeton bei Bohrpfählen in nichtbindigen Böden. In: Moormann, C.; Vogt-Beyer, C. (Hg.): 12. Kolloquium Bauen in Boden und Fels. Fachtagung über aktuelle Herausforderungen der Geotechnik. Tagungshandbuch 2020. Tübingen: expert Verlag GmbH, 357–364.

Bild 1: Normierte Maximaldrücke in Bezug zur Höhenlage, bei Herstellung mit Wasserauflast (Nissen et al. 2020).



## Numerik für Boden-Wasser-Wechselwirkung

Numerische Modellbildung und Simulation der Interaktionen von Porenwasserströmungen und angrenzender Oberflächenwasserströmung

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Strömungen und schnelle Druckänderungen im Gewässer können im angrenzenden porösen Medium (Untergrund, mineralische Schutz- und Filterschichten) Änderungen in Porenwasserdruck und -strömung sowie im Spannungszustand bewirken und im Grenzfall zum Versagen führen. Damit verbunden sind der Verlust der Festigkeit (Geländebruch, Fluidisierung) und/oder Bodentransportvorgänge wie Erosion, Suffusion oder Kolmation, also Prozesse, die große Verformungen des Bodens bewirken. Die Prozesse finden sowohl im maritimen als auch im Binnenbereich statt. Obwohl das Verständnis dieser Vorgänge für Sicherheit, Unterhaltung und Weiterentwicklung von Wasserstraßen grundlegend ist, ist der gegenwärtige Kenntnisstand unbefriedigend. Hierfür kann die nicht hinreichend verknüpfte bodenmechanische und strömungsmechanische Analyse der komplexen Strömungs- und Verformungsprozesse als ursächlich angesehen werden. Zur besseren Beschreibung dieser Vorgänge muss die Wechselwirkung zwischen den Wasserdrücken in Oberflächen-, Grund- und Sickerwasser und den Spannungen im Boden genauer untersucht werden. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, mit geeigneten numerischen Verfahren das Prozessverständnis zu verbessern und letztlich fundierte Bemessungsansätze zu entwickeln.

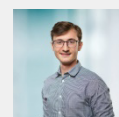
### 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)

Eine fundierte Beratung der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) zu den Auswirkungen der Wechselwirkungen zwischen Oberflächen- und Grundwasser und dem Boden auf Baumaßnahmen an Bundeswasserstraßen erfordert genauere Analysemethoden, die in der Lage sind, die interagierenden Prozesse zwischen Strömung, Bodenverformung und Materialtransport hinreichend zu berücksichtigen. Dies betrifft sowohl Erdbauwerke wie z. B. Dämme, Böschungen, Ufersicherungen und Baugruben, aber auch die Übergangsbereiche zwischen Massivbauwerken oder Baugrubenverbauten und dem anschließenden Baugrund sowie zwischen

#### Auftragsnummer:

B3952.00.04.70001

#### Auftragsleitung:



Denis Maier  
 denis.maier@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2021

dem Boden und Oberflächengewässern. Ein verbessertes Analyseinstrumentarium ermöglicht darüber hinaus ein besseres Monitoring-Design zur Überwachung der Auswirkungen von baulichen Maßnahmen an Bundeswasserstraßen auf den angrenzenden Boden und die Grundwasserströmung.

### 3 Untersuchungsmethoden

Hydraulische und mechanische Wechselwirkungen zwischen Oberflächenwasserströmung und Gewässer-sole einerseits sowie zwischen Porenwasser und Bodenmatrix im Untergrund andererseits können sowohl hydromechanisch als auch bodenmechanisch mit der auf dem Finite-Volumen-Verfahren basierten Toolbox OpenFOAM hinreichend genau numerisch abgebildet werden. Ausgangspunkt für eine gekoppelte Analyse der Strömungs- und Bodenverformungsvorgänge bilden bestehende hydronumerische Modelle sowie auf der Theorie poroelastischer Medien von Biot basierende Erweiterungen dieser Modelle zur Berechnung von Porenwasserströmung und Bodenverformung (z. B. Tang et al. 2015). Für die Untersuchung der bei Baumaßnahmen der WSV relevanten Fragestellungen sollen diese numerischen Verfahren erprobt, angepasst und erweitert werden.

### 4 Ergebnisse

Nachdem im ersten Schritt die Zuverlässigkeit des gekoppelten Modells auf Grundlage verfügbarer analytischer Lösungen zur Beschreibung poroelastischer Bodenverformungen für eine eindimensionale Bodensäule validiert wurde, wurden realitätsnähere Belastungsszenarien untersucht. Hierauf aufbauend wurde eine dynamische Wellenbelastung (beispielsweise infolge schiffsinduzierter Wellen) auf eine Uferböschung untersucht (vgl. Titelbild mit Bereichen höherer und geringerer Porenwasserdrücke). Des Weiteren wurde die Toolbox um komplexere Randbedingungen für die mechanischen Beanspruchungen (weg-, last- und gemischte Steuerungen) erweitert. Aus der Literatur ist bekannt, dass höherwertige Materialmodelle erforderlich sind, um das Spannungs-Verformungsverhalten des Bodens (z. B. Porenwasserdruck-Akkumulation infolge hydraulischer, zyklischer Belastung) realistisch abzubilden. Ein bereits in der Toolbox vorliegendes Stoffmodell der Bounding-Surface-Familie (Dafalias und Manzari 2004) wurde erweitert, sodass die Abhängigkeit der Fluidsteifigkeit vom Porenwasserdruck berücksichtigt werden kann. Simulationen von Triaxialversuchen zeigen, dass die druckabhängigen Spannungspfade im p-q-Diagramm einen etwas höheren Porenwasserdruckanstieg aufweisen als die Pfade mit konstanter Fluidsteifigkeit (vgl. Bild 1). Derzeit wird untersucht, ob bei periodischer, hydraulischer Belastung die Berücksichtigung dieser Porenwasserdruckabhängigkeit Einfluss auf die bruch-induzierende Zyklen-Anzahl hat. Zukünftig sind Erweiterungen des Modells zur (vereinfachten) Berücksichtigung teilgesättigter Bodenbereiche geplant, um die Prozesse im für Fragestellungen des Wasserbaus häufig relevanten Übergangsbereich oberhalb des Grundwasserspiegels besser zu beschreiben. Des Weiteren wird ein Untersuchungsprogramm konzipiert, um die Porenwasserreaktionen auf Wellenbelastung in Uferböschungen systematisch zu untersuchen. Hierbei sollen bislang wenig beachtete Einflussgrößen wie Böschungsgeometrie, Wellenzahl, Wellenanprallwinkel und Wellenamplitude berücksichtigt werden.

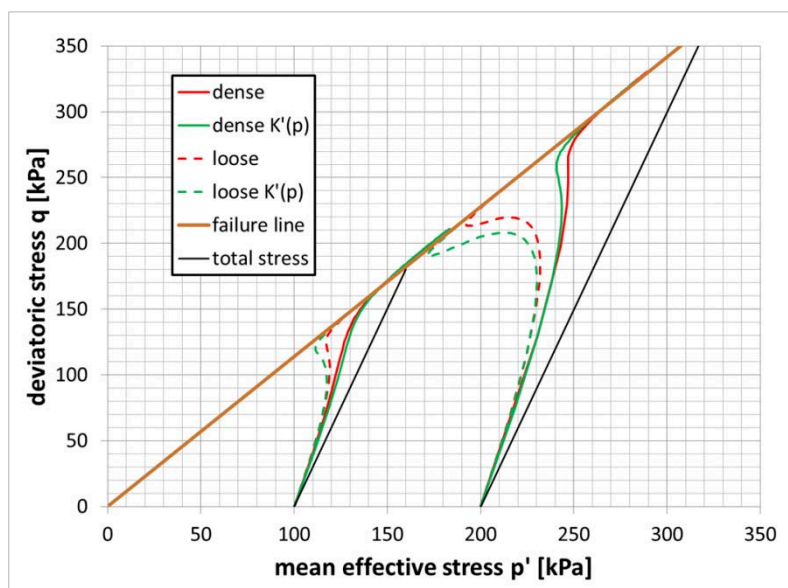


Bild 1: Spannungspfade im p-q-Raum bei Untersuchungen mit dem Manzari-Dafalias-Modell für locker- und dichtgelagerte Böden mit und ohne vom Porenwasserdruck abhängige Fluidsteifigkeit.

#### Literatur:

Tang, T.; Hededal, O.; Cardiff, P. (2015): On finite volume method implementation of poro-elasto-plasticity soil model. In: Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. (39), 1410–1430.

Dafalias, Y. F.; Manzari, M. T. (2004): Simple plasticity sand model accounting for fabric change effects. Journal of Engineering Mechanics, Volume 130, No. 6, 622–634.



## Hydraulische Wechselwirkungen zwischen Grund- und Oberflächenwasser

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Flussauen stellen Ökosysteme dar, die von der hydraulischen Anbindung zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser geprägt sind. Aufgrund des üblicherweise geringen Flurabstandes spielt das Grundwasser für den Wasserhaushalt dieses Ökosystems eine wesentliche Rolle. Änderungen der Abflussverhältnisse und/oder des hydraulischen Anschlusses zwischen Oberflächen- und Grundwasserkörper können sich auf die Grundwasserdynamik und letztlich auf den Wasserhaushalt der Aue auswirken. Grundwasserströmungsmodelle basieren auf vereinfachten Vorstellungen über den Austausch zwischen ober- und unterirdischem Wasserkörper. In Lenzen an der Elbe, wo eine der größten Deichrückverlegungsmaßnahmen Europas umgesetzt wurde, bot sich ein Untersuchungsgebiet an, um den Wirkungszusammenhang zwischen Abfluss- und Grundwasserdynamik in einer Flussaue eingehend zu studieren (siehe Bild 1).

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

Flussbauliche Unterhalts- bzw. Ausbaumaßnahmen können sowohl die Abflusssdynamik als auch die Beschaffenheit der Flusssohle verändern, was den hydraulischen Austausch zwischen den als Wasserstraße genutzten Flüssen, Seen und Kanälen und dem Grundwasser in den Uferbereichen beeinflussen kann. Aufgrund gestiegener Anforderungen an die Belastbarkeit von Prognosen der Auswirkungen wasserbaulicher Unterhalts- und Ausbaumaßnahmen auf den ökologischen Zustand von Flussauen ist ein besseres Verständnis der komplexen Wechselwirkungen zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser erstrebenswert.

### 3 Untersuchungsmethoden

Um die Wechselwirkungen zwischen Abfluss- und Grundwasserdynamik vor, während und nach Überflutungsereignissen zu erfassen, wurden im Untersuchungsgebiet Lenzen acht Messstellen zur Messung der oberflächigen

**Auftragsnummer:**

B3952.03.04.70002

**Auftragsleitung:**



Dr. Héctor Montenegro  
 hector.montenegro@baw.de

**Laufzeit:**

2010 bis 2019

Wasserstände sowie zwölf Messstellen zur Aufzeichnung der Grundwasserstände eingerichtet. Die Oberflächenwassermessstellen sowie das darin befindliche Datenerfassungssystem wurden so ausgelegt, dass sie den hydraulischen und mechanischen (Treibgut) Beanspruchungen während einer Überflutung genügen. Im Überflutungsfall, wenn an manchen Stellen das Gelände mehrere Meter überstaut wird, werden die Messwerte in einem Datenlogger zwischengespeichert und, nach Ablauf der Hochwasserwelle, wenn der Messstellenkopf wieder aus dem Wasser herausragt, per Funk an einen Datenserver übertragen. Im Beobachtungszeitraum kam es mehrfach zur Ein- und Durchströmung in das Deichrückverlegungsgebiet. Das Messsystem konnte diese Ereignisse lückenlos aufzeichnen. Einzelne Überflutungsereignisse wurden numerisch abgebildet und die Zweckmäßigkeit einer HN-GW-Modellkopplung anhand der erhobenen Messdaten untersucht.

#### 4 Ergebnisse

Die Einströmung in das Untersuchungsgebiet wurde mit einem HN-Modell (UNTRIMM2D) berechnet. Es wurde eine Schnittstelle im GW-Modell (FEFLOW) implementiert, über die berechnete Überflutungswasserstände des HN-Modells übergeben werden. Es zeigte sich, dass zahlreiche Details aus der hydronumerischen Berechnung bei der räumlichen Interpolation auf das gröbere Diskretisierungsnetz des GW-Modells verloren gehen. Kleinräumige (z. B. bei Ein- und Ausströmung über die Schlitze) oder großräumige (z. B. Querneigung des Wasserspiegels bei gekrümmter Strömung) Wasserstandsunterschiede spielen für den Austausch der Wasserkörper im Untersuchungsgebiet eine eher untergeordnete Rolle. Deutlich sensitiver ist die Vorgabe realistischer Leakageparameter. Insofern fielen die Unterschiede zwischen einem GW-Modell mit Berücksichtigung hydronumerisch berechneter Überflutungswasserstände und einem GW-Modell, bei dem die Überflutung basierend auf einer linearen Interpolation von Wasserstandsganglinien abgebildet wurde, gering aus.

Der Abschlussbericht wurde inzwischen fertig gestellt und befindet sich derzeit im Prozess der Qualitätssicherung.

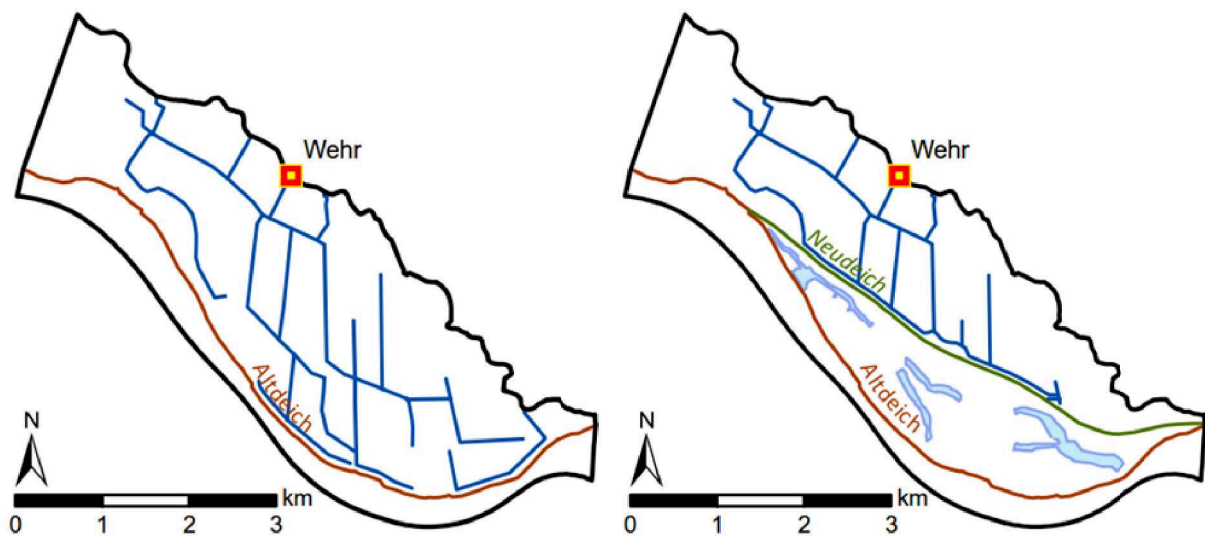


Bild 1: Maßnahmen zur Deichrückverlegung: Schlitzung des Altdeiches, Bau eines neuen Deiches im Hinterland, Anlage von Flutmulden (Merk 2015).

#### Literatur:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2013): Die Deichrückverlegung bei Lenzen an der Elbe. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAWMitteilungen, 97).

Merk, M. (2015): Quantifizierung der Austauschdynamik zwischen Grund- und Oberflächenwasser im Anschluss an eine Deichrückverlegung. Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Angewandte Geologie (Masterthesis, unveröffentlicht).



## Kolmation als Schlüsselgröße der Wechselwirkung Oberflächenwasser – Grundwasser

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Interaktion zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser wird neben den hydrogeologischen Randbedingungen maßgeblich durch die Gewässerstruktur, die Substratzusammensetzung der Gewässersohle und die Ausbildung des Grundwasserleiters beeinflusst (Schälchli 1993). Hierbei sind Kolmationsprozesse an Gewässersohlen, d. h. alle Vorgänge die zu einer Reduktion des Porenvolumens, einer Verfestigung des Filtermediums und einer Durchlässigkeitsabnahme der Gewässersohle führen, als Schlüsselgrößen zu betrachten. Prinzipiell wird zwischen einer äußeren Kolmation, d. h. einer Ablagerung von Wasserinhaltsstoffen auf der Gewässersohle, einer inneren Kolmation, d. h. der Eintrag und die anschließende Ablagerung von Wasserinhaltsstoffen im Sohlsubstrat, sowie einer biologischen und auch physiko-chemischen Kolmation, d. h. einer Förderung der Kolmationsbildung infolge biologischer sowie physiko-chemischer Prozesse unterschieden. Dabei wird die Kolmation von Gewässersohlen von zahlreichen zeitlich und räumlich variablen Einflussfaktoren beeinflusst.

Die komplexen Wirkungszusammenhänge wurden im Zuge von Forschungsaktivitäten unterschiedlicher Institutionen in der Vergangenheit bereits untersucht und in der Fachliteratur beschrieben. Bisher wurden jedoch kaum Untersuchungen unter den besonderen, an Bundeswasserstraßen anzutreffenden Randbedingungen durchgeführt. Dadurch ist eine belastbare Prognose von wasserbaulich induzierten Auswirkungen auf die Wechselwirkung zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser im Bereich der Bundeswasserstraßen nur unzureichend möglich.

Ziel des FuE-Vorhabens ist es, die einzelnen – für die Bundeswasserstraßen relevanten – Wirkungsfaktoren dieser komplexen Wechselwirkungen zu identifizieren und hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Kolmationsprozesse näher zu bewerten. Ein weiteres Ziel des FuE-Vorhabens ist die Bewertung verschiedener hydrogeologischer Methoden hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit und ihrer Anwendungsgrenzen in Bezug auf die Beurteilung von Kolmationsvorgängen.

#### Auftragsnummer:

B3952.03.04.70003

#### Auftragsleitung:



Daniel Straßer  
 daniel.strasser@baw.de



Dr. Hermann-Josef Lensing  
 hermann.lensing@baw.de

#### Laufzeit:

2012 bis 2020

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

Durch Unterhalts-, Ausbau- und Renaturierungsmaßnahmen an Bundeswasserstraßen können die Wechselwirkungen zwischen Fließgewässern und dem angrenzenden Grundwasserkörper maßgeblich verändert werden. In Flussabschnitten mit einer naturnahen Wasserstandsdynamik lassen sich baubedingte Auswirkungen auf die quantitativen und qualitativen Grundwasserverhältnisse derzeit nicht mit der erforderlichen Genauigkeit prognostizieren. Diese Wissensdefizite führen bei verkehrswasserbaulichen Maßnahmen im Einflussbereich von besonders geschützten Ökosystemen sowie im Einflussbereich konkurrierender Wassernutzungen (z. B. Uferfiltrat fördernde Trinkwasserfassungen) zu einem erhöhten wasserwirtschaftlichen Konfliktpotenzial.

## 3 Untersuchungsmethoden

Am Versuchsstandort Potsdam wurden im Zeitraum zwischen September 2012 und März 2013 zwei Transsekte zur kontinuierlichen tiefenorientierten Untergrundtemperaturmessung installiert. Durch die Verwendung der Temperatur als natürlichen Tracer konnten hierdurch bevorzugte Infiltrationszonen in den Untergrund identifiziert und Infiltrationsgeschwindigkeiten sowie Verweilzeiten bestimmt werden. Der Sacrow-Paretzer Kanal wurde hierfür gezielt als Versuchsstandort gewählt, da im Jahr 2013 bei Ausbauarbeiten die Sohle des Kanals vertieft wurde. Hierbei wurde die vorhandene Kolmationsschicht stark gestört und teilweise entfernt. Begleitet wurde die Messung der tiefenorientierten Untergrundtemperatur durch Monitoring der Grundwasserstände und –temperaturen in 13 Grundwassermessstellen des WNA Berlin sowie der Stadtwerke Potsdam. Bereits im Vorfeld der Ausbauarbeiten wurde der „Ist-Zustand“ der Gewässersohle im Dezember 2012 durch eine flächendeckende Beprobung (Freeze-Core, Infiltrationsversuche) dokumentiert. Weitere Probenahmekampagnen wurden begleitend zum Ausbau des Sacrow-Paretzer Kanals durchgeführt um die Veränderung der Gewässersohle, beispielweise die Wiederherstellung einer natürlichen Kolmation, fortlaufend zu dokumentieren (Straßer et al. 2015).

Im April 2019 und im Oktober 2019 wurden in Kooperation mit dem Institut für Umweltwissenschaften und Geographie der Universität Potsdam am Standort Brandenburg an der Havel Markierungsversuche mit dem Fluoreszenzfarbstoff Uranin durchgeführt. Die Versuche dienten zur Quantifizierung des Austausches zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser sowie des Einflusses von baulichen Eingriffen an der Gewässersohle auf diesen Prozess. Die Eingabe erfolgte jeweils im oberen Vorhafen der Schleuse Brandenburg. Unmittelbar vor der Eingabe im Oktober 2019 wurden durch das WSA Brandenburg Unterhaltungsbaggerungen an der Sohle des oberen Vorhafens durchgeführt.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden darüber hinaus Grund- und Oberflächenwasser-Markierungsversuche am Versuchsstandort Hessigheim am Neckar durchgeführt. Die Ausführung erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Geowissenschaften des Karlsruher Instituts für Technologie (Straßer et al. 2017).

## 4 Ergebnisse

Im Zuge des Vorhabens wurde bisher ein neuer Ansatz zur geohydraulischen Untersuchung und Charakterisierung von Sohl-sedimenten entwickelt. Hierdurch kann die hydraulische Durchlässigkeit und die Anisotropie von Gewässersohlen räumlich hochaufgelöst bestimmt werden (Straßer et al. 2015). Die Ergebnisse der Bodentemperaturmessungen im Bereich des Nedlitzer Durchstichs zeigen deutlich eine vorhabenbedingte Veränderung der Infiltration von Oberflächenwasser in den Grundwasserleiter.

Im Rahmen der am Standort Brandenburg an der Havel durchgeführten Markierungsversuche konnte eine weitere Methode zur Quantifizierung der geohydraulischen Auswirkungen der Unterhaltungsmaßnahmen angewandt und erprobt werden. Erste Ergebnisse zeigen eine Veränderung der Austauschprozesse am Standort. Gegebenenfalls kann nach einiger Zeit die natürliche Wiederherstellung des Ausgangszustandes durch die erneute Durchführung eines Markierungsversuchs erkundet und dokumentiert werden.

Zusätzlich wurden die Austauschströme zwischen Oberflächen- und Grundwasser am Standort Hessigheim am Neckar durch umfangreiche Feldversuche, u. a. Markierungsversuche und weitere hydraulische Versuche quantifiziert und bewertet (Straßer et al. 2017).

### Literatur:

Straßer, D.; Lensing, H.-J.; Nuber, T.; Richter, D.; Frank, S.; Goepfert, N.; Goldscheider, N. (2015): Improved geohydraulic characterization of river bed sediments based on freeze-core sampling – Development and evaluation of a new measurement approach. In: Journal of Hydrology (527), 133–141.

Straßer, D.; Montenegro, H.; Blechschmidt, L.; Liesch, T.; Goldscheider, N. (2017): Multi-tracer approach to characterize hydraulically induced sulfate rock dissolution processes below a weir lock. In: Journal of Applied Water Engineering and Research (5(2)), 142–157.



## Interaktion Oberflächenwasser – Grundwasser in den tidebeeinflussten Gebieten der deutschen Nordsee-Ästuar

### Fokus Grundwasser

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Wechselwirkungen zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser werden grundsätzlich von den hydrologischen und hydrogeologischen Randbedingungen beeinflusst. Des Weiteren spielen auch die Gewässerstruktur, die Substratzusammensetzung der Gewässersohle und die Stratigraphie des angeschnittenen Grundwasserleiters eine wichtige Rolle. In den tidebeeinflussten Ästuaren der deutschen Nordseeküste werden die Grundwasser-Verhältnisse zusätzlich durch insbesondere die Tidedynamik, die Salzgehaltsentwicklung sowie den Schwebstoff- und Sedimenthaushalt geprägt.

Die tideinduzierten Wasserstandsänderungen im Ästuar führen zu einem stark instationären Grundwasserströmungsfeld, dessen Ausdehnung auf Uferseite einige hundert Meter betragen kann. Dabei findet ein ständiger Wechsel zwischen infiltrierenden und exfiltrierenden Grundwasserverhältnissen statt (Führböter 2004).

Ein Ziel des Forschungsvorhabens ist die Verbesserung des grundlegenden Verständnisses dieses komplexen Systems und die Identifizierung relevanter Parameter für den Austausch zwischen Ästuar und Grundwasserkörper. Die Auswirkungen von z. B. Änderungen der Tidedynamik, anthropogenen Eingriffen in den Wasserhaushalt oder durch den Klimawandel hervorgerufenen Veränderungen der hydrologischen Randbedingungen auf das Grundwasserströmungsregime und die Beschaffenheit im Ästuarbereich können so besser prognostiziert werden. Es werden hierzu Methoden und Ansätze entwickelt, die Einblicke in die Austauschvorgänge im Gewässerbett geben und helfen, bestehende Ansätze zur Folgenabschätzung zu verbessern.

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

Erfahrungen bei WSV-Projekten an Ems, Weser und Elbe zeigen sowohl im Zusammenhang mit den Genehmigungsverfahren als auch bei der Ausführung der Vorhaben die hohe Bedeutung der Thematik Wechselwirkungen

##### Auftragsnummer:

B3952.03.04.70004

##### Auftragsleitung:

Dr. Sebastian Rudnick  
 sebastian.rudnick@baw.de

##### Auftragsbearbeitung:

Dr. Hermann-J. Lensing  
 hermann.lensing@baw.de

Dr. Thomas Nuber  
 thomas.nuber@baw.de

Karsten Otte  
 karsten.otte@baw.de

##### Laufzeit:

2015 bis 2022



zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser für die naturschutzfachliche und wasserwirtschaftliche Bewertung der Maßnahmen. Insbesondere durch maßnahmenbedingte Veränderungen der Tidedynamik und durch Eingriffe in den Schwebstoff- und Sedimenthaushalt der Ästuarie können Änderungen der Grundwasserströmungssituation und der Grundwasserbeschaffenheit in den Ästuargebieten nicht ausgeschlossen werden.

Aufgrund der komplexen Wechselwirkungen zwischen Oberflächengewässern und dem Grundwasser in den Ästuarbereichen lassen sich die Folgewirkungen von verkehrswasserbaulichen Ausbau- und Unterhaltsmaßnahmen auf die quantitativen und qualitativen Grundwasserverhältnisse derzeit nur eingeschränkt prognostizieren und bewerten. Das FuE-Vorhaben soll eine wissenschaftlich fundierte Grundlage bilden, um zukünftig belastbarere Prognosen zu ermöglichen und somit die Genehmigungsverfahren hinsichtlich der erforderlichen Aussagen zum Grundwasser gezielt zu unterstützen. Außerdem ist zu erwarten, dass auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse die Beweissicherungskonzepte wirtschaftlicher und zielführender gestaltet werden können.

### 3 Untersuchungsmethoden

Die Interaktion zwischen Ems und Grundwasserkörper wird an drei Standorten entlang der Unterems untersucht. Neben der Erfassung der Grundwasserganglinien (Nuber et al. 2017) werden Grundwasserproben bezüglich der gelösten Inhaltsstoffe und der Isotopenzusammensetzung der Wassermoleküle untersucht. Dabei werden die Verhältnisse der schwereren Isotope von Sauerstoff ( $^{18}\text{O}$ ) und Wasserstoff ( $^2\text{H}$ ) jeweils zu den leichteren Isotopen  $^{16}\text{O}$  und  $^1\text{H}$  bestimmt, die sogenannten  $\delta^{18}\text{O}$ - und  $\delta^2\text{H}$ -Werte. Diese Isotopensignaturen erlauben Rückschlüsse auf die Bildungsbedingungen des Grundwassers (Etcheverry & Vennemann 2009).

Auf Grundlage der Tritium-Helium-Methode werden des Weiteren die durchschnittlichen Verweilzeiten des Wassers im Untergrund seit der Versickerung als Niederschlag bestimmt. Diese kombinierte Untersuchung physikalischer und chemischer Parameter erlaubt die Erarbeitung eines konzeptionellen Modells der chemisch-hydraulischen Mechanismen, das die rezenten Grundwasserverhältnisse erklärt. Der Vergleich der so gewonnenen Vorstellung mit Ergebnissen, die im Rahmen vorhergehender Studien gewonnen wurden, liefert weitere Hinweise auf die dominierenden Einflussgrößen in der Interaktion Oberflächenwasser – Grundwasser.

### 4 Ergebnisse

Erste Ergebnisse zeigen, dass sich die Grundwässer der verschiedenen Untersuchungsstandorte in ihren chemischen Zusammensetzungen deutlich voneinander unterscheiden. In Bild 1 werden die ermittelten Konzentrationen von Chlorid in den verschiedenen Messstellen gegenüber dem  $\delta^{18}\text{O}$ -Wert des Grundwassers dargestellt.

Die Konzentration von Chlorid ist ein Indikator für den Grad der Versalzung. In Bild 1 wird deutlich, dass sich die Messstellen der einzelnen Standorte mittels einer Kombination aus Chloridgehalt und  $\delta^{18}\text{O}$  gruppieren lassen. Die Interpretation der kombinierten Ergebnisse der Untersuchungen liefert so weitere Bausteine für das Verständnis der Unterschiede zwischen den Untersuchungsstandorten.

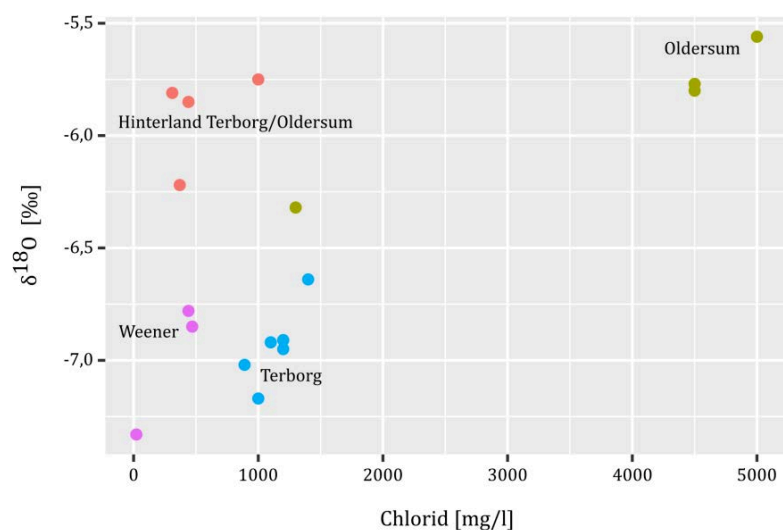


Bild 1: Darstellung der Chloridgehalte im Grundwasser gegenüber  $\delta^{18}\text{O}$ .

#### Literatur:

Etcheverry, D; Vennemann, T. (2009): Isotope im Grundwasser. Methoden zur Anwendung in der hydrogeologischen Praxis. Bern: Bundesamt für Umwelt BAFU (Umwelt-Wissen, 0930).

Führböter, J. F. (2004): Salz-Süßwasserdynamik im Grundwasser des Ems-Ästuars. Braunschweiger Geowissenschaftliche Arbeiten, Bd. 28.

Nuber, T.; Rudnick, S.; Lensing, H.-J.; Siebenborn, G.; Roeloffzen, F.; Otte, K. (2017): Bau von Grundwasser- und Porenwasserdruckmessstellen zur Grundwasserbeweissicherung an der Unterems. In: 68. Deutsche Brunnenbauertage und BAW-Baugrundkolloquium in Bad Zwischenahn, S. 175–180.



## Chemischer Angriff auf geotechnische Elemente

### In situ Aktivität betonaggressiver Wasserinhaltsstoffe

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Aktuell gibt es bei den laufenden Projekten der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) immer wieder Schwierigkeiten, die Auswirkungen eines chemischen Angriffs auf den Mörtel bzw. Beton bei geotechnischen Elementen wie Verpressankern, Kleinverpresspfählen und Betonpfählen bezüglich deren dauerhafter Tragfähigkeit realistisch zu bewerten und angemessene Anforderungen an Baustoffe und Bauweisen festzulegen. Exemplarisch seien hier nur die Einwirkungen infolge von Ammonium bei der 5. Schleuse Brunsbüttel, infolge von kalklösender Kohlensäure an der Dortmund-Ems-Kanal (DEK)-Nordstrecke und an der Stadtstrecke Oldenburg sowie infolge von Sulfat an den Staustufen Besigheim und Hessigheim aufgeführt.

Die in der Literatur und teilweise auch im Regelwerk und in Zulassungen beschriebenen Lösungsansätze sind zumeist entweder nicht praxistauglich oder aufgrund der gewählten Randbedingungen bei den dokumentierten Modellversuchen nicht ausreichend realitätsnah. Im Rahmen eines in drei Teile gegliederten Gesamtvorhabens wird folgenden Fragestellungen nachgegangen:

##### 1. Einwirkungen:

Entwicklung geeigneter Untersuchungsmethoden zur Erfassung der dauerhaften In-situ-Aktivität betonaggressiver Wasserinhaltsstoffe aus Böden und Wässern auf geotechnische Elemente, Konzeption physikochemischer Schutzmechanismen bei der Herstellung (Bearbeitung: K5, G3)

##### 2. Widerstand:

Wie verhalten sich Mörtel bzw. Beton der geotechnischen Elemente bei unterschiedlichen Einwirkungen? Wie kann der Widerstand zielsicher und dauerhaft beeinflusst werden? (Bearbeitung: B3, B2)

##### 3. Tragverhalten:

Welche Auswirkungen auf das Tragverhalten haben Veränderungen am Mörtel bzw. Beton geotechnischer Elemente als Folge eines chemischen Angriffs? (Bearbeitung: G2)

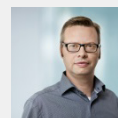
#### Auftragsnummer:

B3952.03.04.70005

#### Auftragsleitung:



Dr. Hermann Josef Lensing  
 hoerby.lensing@baw.de



Dr. Thomas Nuber  
 thomas.nuber@baw.de

#### Laufzeit:

2017 bis 2020

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

Bei Bauvorhaben an Bundeswasserstraßen werden geotechnische Elemente wie Verpressanker, Kleinverpresspfähle und Betonpfähle aufgrund ihrer kostengünstigen und technisch ausgereiften Herstellung häufig eingesetzt. Typische Einsatzgebiete bilden dabei die Auftriebssicherung von Schleusen- und Wehrsohlen und die Rückverankerung von Ufereinfassungen sowie die temporäre Sicherung von Baugruben. Liegen erhöhte Gehalte betonaggressiver Substanzen in Grundwasser und Boden vor, können die vorgenannten geotechnische Elemente hingegen häufig nicht als dauerhafte Bauteile eingesetzt werden. In diesen Fällen ist man gezwungen, auf meist kosten- und platzintensivere Lösungen wie beispielsweise Stahlrammpfähle oder Ankertafeln und -wände zurückzugreifen. Infolgedessen ergeben sich für die zu erstellenden Bauwerke teils deutliche Kostensteigerungen, höhere Lärmbelastigungen, größere Erschütterungen und längere Bauzeiten.

## 3 Untersuchungsmethoden

Im Rahmen der Bearbeitung stehen zwei Fragestellungen im Vordergrund. Die erste Fragestellung umfasst die physikochemischen Randbedingungen für die Wirksamkeit betonaggressiver Wasserinhaltsstoffe, die unter Feldbedingungen untersucht werden. Zudem sind hierfür geeignete Bewertungsverfahren zu entwickeln. Die zweite Fragestellung beinhaltet die Entwicklung von physikochemischen Schutzkonzepten, um die Funktion der geotechnischen Elemente auch auf ungünstige Randbedingungen zu erweitern.

Da die geotechnischen Verankerungselemente über sehr lange Zeiträume wirksam sein müssen, soll das Untersuchungsprogramm Modellversuche umfassen, die auf der Basis vergleichsweise kurzfristiger Untersuchungen langfristige Prognosen ermöglichen. Zur besseren Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse werden bei der Auswertung numerische Modellierungstechniken eingesetzt.

In ersten Feldversuchen werden derzeit in Zusammenarbeit mit dem Forschungsvorhaben „Interaktion Grundwasser – Oberflächenwasser in den tidebeeinflussten Bereichen deutscher Nordseeästuare“ Messverfahren zur integrativen Erfassung der hydraulischen Belastung sowie zur Messung des chemischen Angriffs auf die geotechnischen Elemente im Untergrund entwickelt. Einen zweiten Arbeitsschwerpunkt werden die physikochemischen Veränderungen der Bodeneigenschaften im Nahfeld der geotechnischen Verankerungselemente bei ihrer Herstellung bilden. Diese Untersuchungen werden in enger Abstimmung mit dem Teilprojekt 3 „Veränderung der Grenztragfähigkeit“ durchgeführt, in dem derzeit der Versuchstand für die realitätsnahen Laborversuche entwickelt wird.

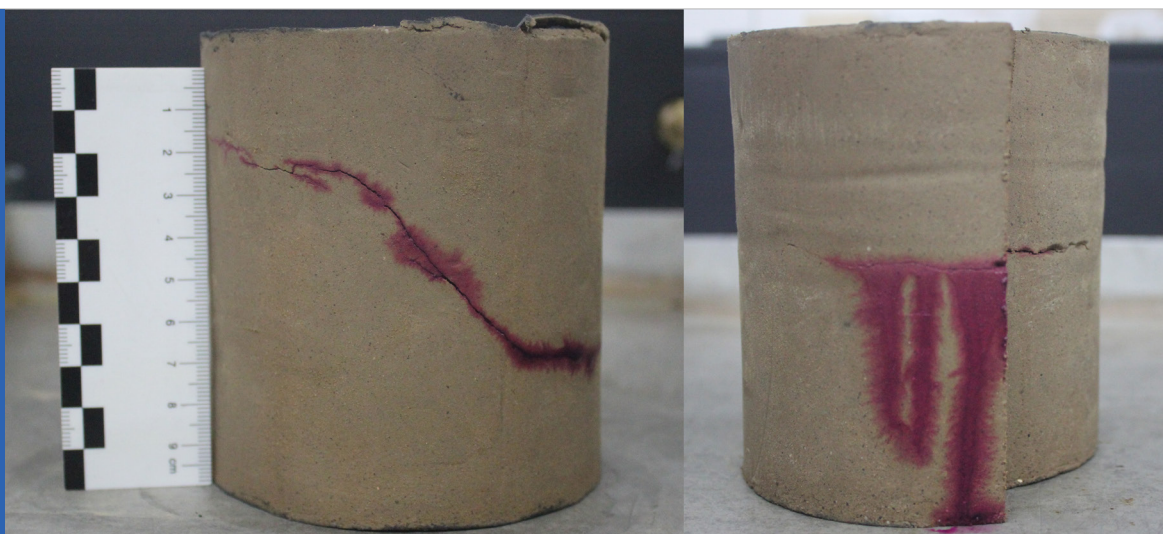
Im Falle der Betonaggressivität durch aggressive Kohlensäure besteht derzeit die messtechnische Schwierigkeit, den Gehalt an aggressiver Kohlensäure sicher zu quantifizieren und vor dem Hintergrund der bestehenden Vorschriften belastbar zu bewerten. Da diese Fragestellung derzeit an verschiedenen Standorten relevant ist (DEK-Nordstrecke, Schleuse Erlangen), soll das Forschungsvorhaben hier ebenfalls Grundlagen für die Bewertung liefern.

Im Zuge des Neubaus der Schleuse Gleesen sind 2016 Sonderanker zur Ermittlung des Einflusses der kalklösenden Kohlensäure auf die Grenztragfähigkeit hergestellt worden. In diesem Zusammenhang findet eine regelmäßige Überwachung der Boden- und Grundwasserverhältnisse hinsichtlich der Aktivität betonaggressiver Wasserinhaltsstoffe statt.

## 4 Ergebnisse

Die ersten Feldversuche zur integrativen Erfassung der hydraulischen Belastung von geotechnischen Elementen im Untergrund liefern positive Signale. Notwendige Folgeuntersuchungen zur Weiterentwicklung des Messverfahrens und zur Reproduzierbarkeit der Messergebnisse an weiteren Standorten stehen allerdings noch aus.

Darüber hinaus wird aktuell eine Expositionsklassenkarte der Betonaggressivität konzipiert. Grundlage bilden dabei verschiedene von der BGR veröffentlichte Karten, welche die hydrogeologischen Basisinformationen umfassen. Basierend auf der Charakterisierung der geogenen Grundwasserbeschaffenheit lassen sich die zu erwartenden Expositionsklassen abschätzen. Anhand der bei einzelnen Bauprojekten gewonnenen Laboranalysen kann der Detaillierungsgrad und die Genauigkeit zukünftig schrittweise gesteigert werden. Langfristig bietet die Karte die Möglichkeit im Vorfeld sowohl eine grobe Ersteinschätzung der zu erwartenden Betonaggressivität zu treffen als auch aktuelle Laboranalysen auf ihre Plausibilität hin zu prüfen.



## Hydraulischer Widerstand feinkörniger Böden

Fracking-Versuche an konsolidierten Schluffproben im Triaxialgerät

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Hydraulisch induzierte Rissbildung ist in vielen Bereichen der Geotechnik wie der Injektionstechnik, der Erdöl- und Erdgasförderung sowie der In-situ-Bestimmung von Bodendurchlässigkeiten oder Spannungsverhältnissen von Interesse. Seit den Untersuchungen zum Versagen des Teton-Staudammes (Idaho, 1976) ist bekannt, dass Risse auch beim hydraulischen Versagen in bindigen Böden eine wichtige Rolle spielen. Die in Kooperation mit der Bauhaus-Universität Weimar im Rahmen des FuE-Projektes „Hydraulischer Grundbruch in bindigem Baugrund“ durchgeführten Laborversuche zeigten, dass das Versagen in tiefen Baugruben in bindigen Böden durch Rissentstehung am Wandfuß eingeleitet wird (Wudtke 2014).

Um diese Rissbildung unter variablen Anfangs- und Randbedingungen im feinkörnigen Boden zu untersuchen, wurde ein modifizierter Triaxialversuch entwickelt, bei dem über eine Kanüle der Porenwasserdruck in der Probenmitte bis zum Aufreißen des Bodens gesteigert werden kann. Dadurch wird in einer Laborstudie mittels Variation verschiedener Einflussgrößen der Widerstand feinkörniger Böden gegen eine hydraulisch induzierte Rissbildung untersucht. Ziel dieser Studie ist die Entwicklung eines geeigneten Nachweises gegen hydraulisches Versagen in bindigen Böden, durch den die physikalischen Gegebenheiten ausreichend berücksichtigt werden.

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

Für Baugruben im Grundwasser und unterströmte Bauwerke ist nach DIN EN 1997-1 (Eurocode 7) stets der Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch, der jedoch auf dem Versagensbild von nichtbindigem Boden beruht, zu erbringen. Da in feinkörnigem Baugrund unter hydraulischer Belastung andere Versagensmechanismen maßgebend werden, führt diese Nachweisführung teilweise zu einer deutlichen Überdimensionierung der Bauwerke. Für eine wirtschaftliche und sichere Bemessung der Baumaßnahmen der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) ist daher eine Anpassung des Nachweiskonzeptes für feinkörnige Böden unerlässlich.

#### Auftragsnummer:

B3952.03.04.70006

#### Auftragsleitung:



Helen Machacek  
 helen.machacek@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2021

### 3 Untersuchungsmethoden

Zur Quantifizierung des Widerstands feinkörniger Böden gegen hydraulisch induzierte Risse werden Versuchsreihen in dem modifizierten Triaxialgerät durchgeführt. Die Rissentstehung beginnt an einer lokalen Fehlstelle, wo aufgrund der hohen Beanspruchung und einer Inhomogenität der Widerstand des Materials überschritten wird. Von dort breitet der Riss sich entsprechend der Spannungsverteilung und weiterer Schwachstellen in der Probe bis zum Erreichen eines Grenzgleichgewichtes aus. Um verschiedene Einflussgrößen auf den Risswiderstand zu quantifizieren, sind möglichst homogene, künstlich konsolidierte Probekörper erforderlich. Durch CT-Aufnahmen und Quecksilberporosimetrie konnte gezeigt werden, dass durch die gewählte Probenpräparation kaum Störstellen im Korngerüst vorhanden sind (Günther 2019).

In den Versuchsreihen werden Probenmaterial (Schluff, Kaolin und Bentonit), Überkonsolidierungsgrad  $OCR=p'_c/p'$ , Spannungsverhältnis  $K=\sigma'_h/\sigma'_v$  und Drainagebedingungen (drainierte bis undrainierte Belastung) variiert. Zunächst erfolgen analog zu einem gewöhnlichen Triaxialversuch eine Sättigungsphase und eine Konsolidierung der Probe. Anschließend wird die Probendurchlässigkeit bei konstantem Druckgradienten bestimmt. Die danach durchgeführte Belastung entspricht der eines Fracking-Versuchs: Während der Zeldruck und die Porenwasserdrücke an Kopf- und Fußplatte konstant gehalten werden, wird der Porenwasserdruck in der Mitte der Probe über die Kanüle bis zum Aufreißen der Probe gesteigert. Die Entstehung von hydraulisch induzierten Rissen ist durch eine Zunahme des Volumenstroms und einen plötzlichen Druckabfall an der Kanüle gekennzeichnet. Zur Untersuchung des Rissbildes sind als zerstörungsfreie Methode Scans an ausgebauten Proben im nano-CT durchgeführt worden (Günther 2019). Eine schnellere und kostengünstigere Variante ist das Einspritzen einer violetten Kaliumpermanganat-Lösung nach Probenausbau, die das vorhandene Rissbild einfärbt.

### 4 Ergebnisse

Die ersten Versuche mit Variation von  $K$  und  $OCR$  wurden an Schluff durchgeführt. In Bild 1 sind links die gemessenen effektiven Aufreißdrücke  $p'_{fr}=p_{fr}-p_{w0}$  aus insgesamt 23 Einzelversuchen über dem mittleren effektiven Druck  $p'=(\sigma'_v+2\sigma'_h)/3$  aufgetragen, wobei  $p_{w0}$  dem initialen Porenwasserdruck und  $p'$  der Ausgangsspannung vor der hydraulischen Belastung entsprechen. Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Fracking-Versuche wurde jeder Einzelversuch zwei- bis viermal wiederholt. Die relativ geringen Abweichungen zwischen den ermittelten Aufreißdrücken sind anhand der grauen Balken zu erkennen. Zur Bestimmung eines Widerstands gegen die hydraulische Beanspruchung wird die effektive Zugfestigkeit  $\sigma'_t=p'_{fr}-p'$  eingeführt, die wiederum durch die Normalisierung  $\sigma'_t/p'$  eine Vergleichbarkeit der Versuche mit unterschiedlicher mittlerer Ausgangsspannung  $p'$  ermöglicht. Dadurch kann im Diagramm rechts in Bild 1 ein Anstieg des hydraulischen Widerstands mit dem Überkonsolidierungsgrad gezeigt werden.

Die Intensität der Rissausbildung, die nach Ausbau der Schluffproben durch Einfärben festgestellt wurde, variiert im Gegensatz zu den reproduzierbaren Aufreißdrücken stark. Grundsätzlich wurden jedoch bei normalkonsolidierten Proben ( $OCR=1,0$ ) horizontale Risse beobachtet, während der Riss bei überkonsolidierten Proben ( $OCR>1,0$ ) sich diagonal ausbreitet. Eine rein vertikale Rissausbreitung wurde nur bei den Versuchen mit  $\sigma'_v>\sigma'_h$  beobachtet (Machacek 2019). Im Titelbild sind beispielhaft besonders deutliche Rissbilder von Proben mit  $OCR=1$  und  $OCR=4$  dargestellt.

Der eindeutige Einfluss von  $p'$  und  $OCR$  auf den Aufreißdruck und gleichzeitig die große Varianz in den Rissbildern zeigen die Komplexität der Rissausbreitung in feinkörnigen Böden. Zur zukünftigen Ermittlung geeigneter Versagenskriterien wird daher der Fokus auf die initiale Rissentstehung gelegt.

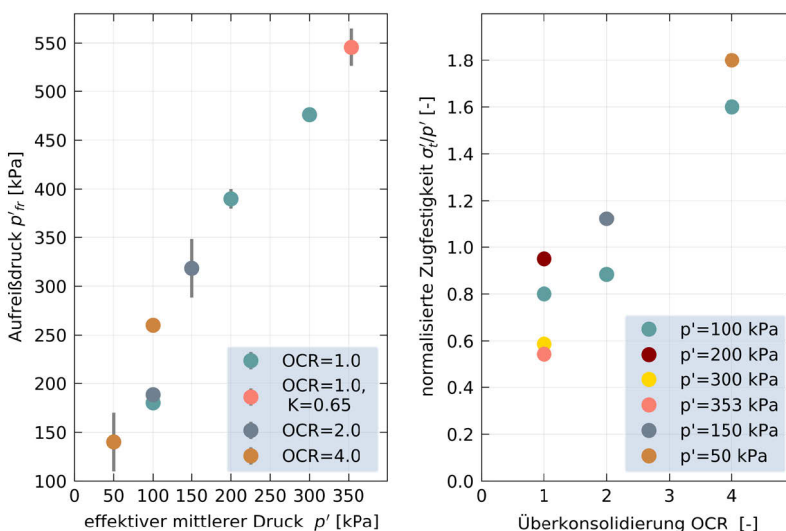


Bild 1: Anstieg des gemessenen Aufreißdruckes bei Rissentstehung mit der Ausgangsspannung  $p'$  (links); Zunahme der Zugfestigkeit mit  $OCR$ .

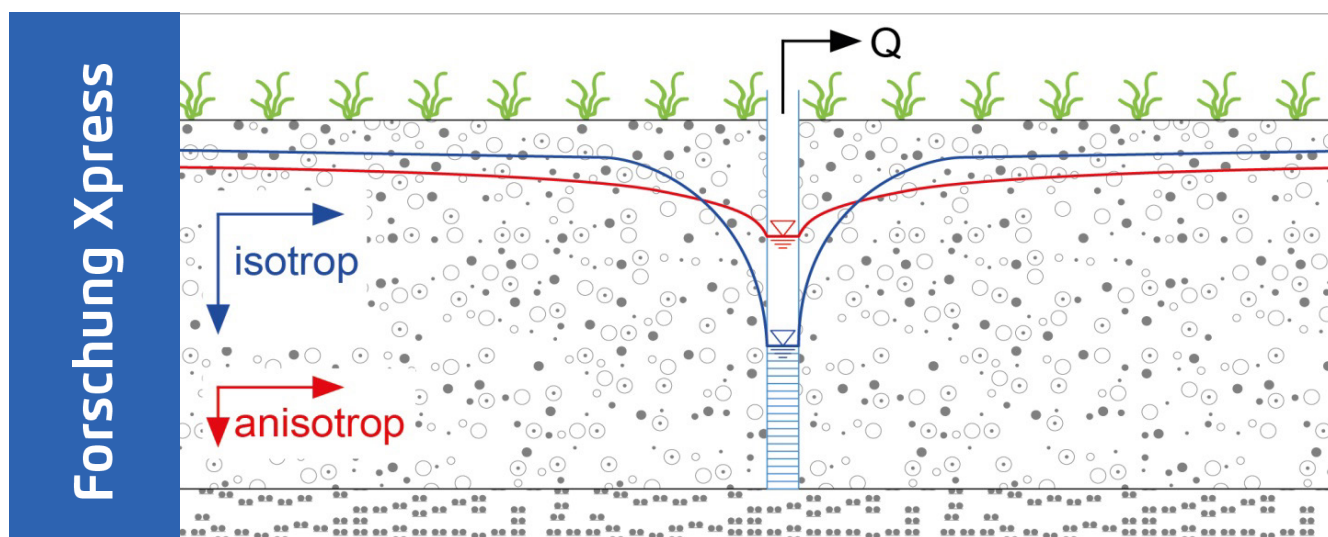
#### Literatur:

DIN EN 1997-1:2009-09 (Eurocode 7): Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allg. Regeln. Berlin: Beuth-Verlag.

Günther, H. (2019): Development of a triaxial test for hydraulic loading of fine-grained soil. In: Proceedings of the XVII ECSMGE-2019. Reykjavik.

Machacek, H. (2019): Experimentelle Untersuchung zur hydraulischen Rissentstehung in feinkörnigen Böden. In: DGGT (Hg.): Fachsektionstage Geotechnik 2019. Würzburg.

Wudtke, R.-B. (2014): Hydraulischer Grundbruch im bindigen Baugrund. Weimar: Bauhaus-Universitätsverlag.



## Geohydraulische Anisotropie des Untergrunds

Ein neuer Ansatz: Kopplung experimenteller und numerischer Untersuchungsmethoden

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Geohydraulische Berechnungen basieren zumeist auf der Annahme bereichsweise homogener und isotroper Grundwasserleiter und -geringleiter. Dies bedeutet, dass die hydraulische Durchlässigkeit innerhalb einer geologischen Formation als konstant und richtungsunabhängig angenommen wird. Da die einzelnen Kornpartikel einer geologischen Formation jedoch zumeist nicht gleichförmig abgelagert werden und selten kugelförmig sind, orientieren sie sich zumeist während der Ablagerungsprozesse und bilden Lagen aus Feinsedimenten. Kornanalytisch kann hier zwar eine Homogenität nachgewiesen werden, in Bezug auf die hydraulische Durchlässigkeit trifft dies jedoch nicht zu. In den meisten Fällen ist die hydraulische Durchlässigkeit eines Sedimentkörpers in horizontaler Richtung wesentlich größer als in vertikaler Richtung. Dieses Phänomen wird als Anisotropie bezeichnet.

Speziell in größeren Skalen wirkt sich die Anisotropie des Untergrunds maßgeblich auf dessen effektive Durchlässigkeit aus, wodurch beispielsweise die räumliche Ausbreitung von Absenktrichtern bei Wasserhaltungsmaßnahmen nachhaltig beeinflusst werden kann. Für die Planung und Dimensionierung von Wasserhaltungsmaßnahmen liegt jedoch meist keine ausreichende Kenntnis über die Anisotropie des Untergrunds vor. Oftmals wird deshalb auf Literaturangaben zurückgegriffen, in denen das Anisotropieverhältnis von horizontaler und vertikaler hydraulischer Durchlässigkeit von natürlich abgelagerten Sedimenten mit Werten zwischen 2 und 10 beschrieben wird. Je nach Standort kann der Wert der tatsächlich vorliegenden Anisotropie teilweise jedoch noch deutlich von diesen Größen abweichen bzw. räumlich stark variieren. Hierdurch entstehen bei der Planung von Wasserhaltungsmaßnahmen große Unsicherheiten, woraus ggf. ein erhöhter Aufwand mit entsprechenden Kosten resultiert.

Geohydraulische Standarduntersuchungsmethoden eignen sich nur in geringem Maß, um Informationen über die hydraulische Anisotropie von Sedimentkörpern zu erhalten. Durch die meisten dieser Verfahren kann nur die horizontale, selten auch nur die vertikale Durchlässigkeit des Untergrunds bestimmt werden (Bagarello et al. 2009). Durch Pumpversuche kann in

#### Auftragsnummer:

B3952.03.04.70007

#### Auftragsleitung:



Daniel Straßer  
 daniel.strasser@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Universität Tübingen,  
 Zentrum für Angewandte  
 Geowissenschaften

Dr. Carsten Leven-Pfister  
 carsten.leven-pfister@uni-  
 tuebingen.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2020

bedingtem Maß ein Rückschluss auf die Anisotropie des Untergrunds gezogen werden (Neumann 1975). Die hierbei ermittelten Werte basieren jedoch meist auf einer an wenigen Beobachtungspunkten erhobenen Datengrundlage. Die Auswertung erfolgt dabei auf Grundlage analytischer Lösungen für stark vereinfachte Modellannahmen. Die Zuverlässigkeit der ermittelten Werte ist deshalb zum einen von der Datengrundlage und zum anderen von der Eignung des Berechnungsansatzes für die jeweils vorliegenden Randbedingungen abhängig. Prognostizierte Grundwasserspiegeländerungen mittels numerischer Modelle, die auf einer geringen Datengrundlage erstellt wurden, korrelieren oftmals nicht mit tatsächlichen Beobachtungen.

Aus diesem Grund ist es erforderlich, geeignete Methoden zu entwickeln, um die Erkundungsergebnisse zu verbessern und dadurch die Prognosefähigkeit deutlich zu steigern.

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

Durch ein verbessertes Prozessverständnis, jedoch vor allem durch die Verfügbarkeit verbesserter Werkzeuge zur Bestimmung der Anisotropie von Sedimentkörpern, wird eine effizientere Beratung im Vorfeld von Baumaßnahmen an Bundeswasserstraßen ermöglicht. Planung und Dimensionierung von Wasserhaltungsmaßnahmen können effizienter erfolgen. Außerdem kann die Prognose der Auswirkungen von baulichen Maßnahmen an Bundeswasserstraßen auf den angrenzenden Grundwasserleiter verbessert werden.

## 3 Untersuchungsmethoden

### Feldversuche

In Abstimmung mit dem Regierungspräsidium Freiburg wurde zur Durchführung der Feldversuche ein geeigneter Standort im Nahbereich des Oberrheins gefunden. Hier soll ein leistungsstarker Grundwasserentnahmehrungen für die Versuchsdurchführung hergestellt werden. Außerdem soll in hoher räumlicher Auflösung (vertikal und horizontal) geeignete Messtechnik zur Bestimmung von Porenwasserdruck und Temperatur im Untergrund installiert werden. Die anzuwendenden Methoden sollen durch eine vorhergehende Literaturstudie identifiziert werden. Die Veränderung von Druckverhältnissen und Temperaturverteilung im Untergrund soll während mehrerer durchgeführter Pumpversuche mit ausreichend hohen und/oder stufenweise gesteigerten Entnahmeraten erfasst werden.

### Numerische Methoden

Durch eine inverse Parameterschätzung auf Grundlage von numerischen Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodellen sollen die geohydraulische Anisotropie sowie Informationen über deren räumliche Varianz ermittelt werden.

Ziel der Arbeiten ist die Entwicklung und Evaluierung eines Versuchs-Setups (Kombination von Feldversuchen und numerischen Methoden), das später an anderen Standorten angewendet werden kann.

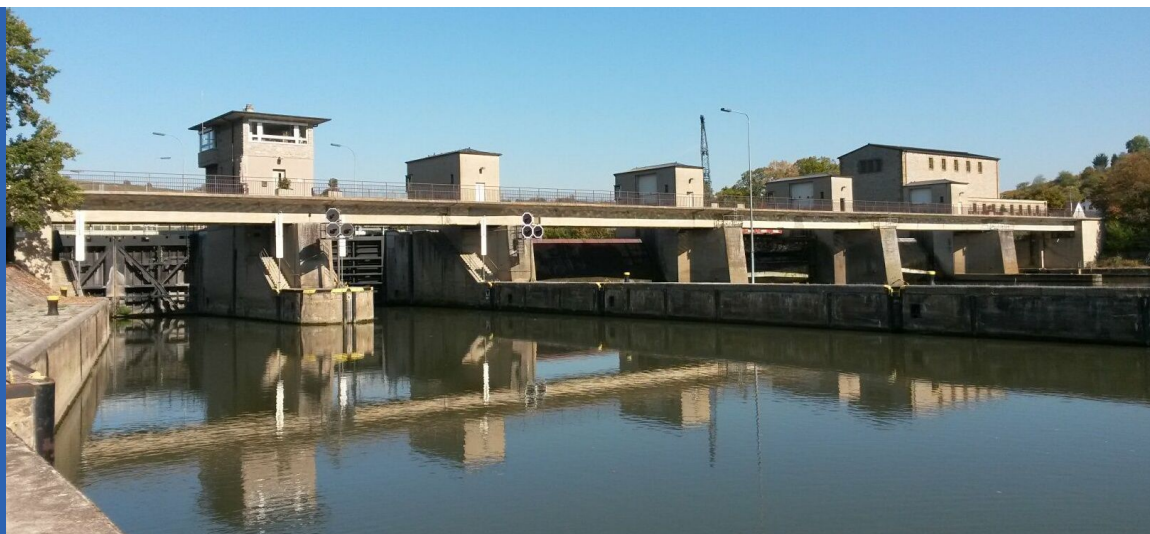
## 4 Ergebnisse

Im Zuge des bisherigen Projektverlaufs wurden ein Kooperationsvertrag sowie ein Forschungsvertrag mit dem Zentrum für Angewandte Geowissenschaften der Universität Tübingen geschlossen. Die zukünftige Bearbeitung des Projekts erfolgt nun gemeinsam mit dem universitären Partner. Aktuell wird der Großbrunnen auf dem Versuchsfeld im südlichen Oberrheingraben hergestellt. In der ersten Jahreshälfte 2019 wurden in Ergänzung zu den bereits bestehenden Grundwassermessstellen neun zusätzliche Grundwassermessstellen hergestellt sowie eine Erkundungsbohrung am geplanten Standort des Großbohrbrunnens abgeteuft. Die Ergebnisse der Vorerkundung wurden zur Dimensionierung sowie zur finalen Festlegung der Ausbauparameter des Brunnens herangezogen. Nach der Herstellung des Großbohrbrunnens sollen im Sommer 2019 umfangreiche Versuche im Messfeld durchgeführt werden.

### Literatur:

Bagarello, V.; Sferlazza, S. and Sgroi, A. (2009): Testing laboratory methods to determine the anisotropy of saturated hydraulic conductivity in a sandy-loam soil. In: *Geoderma* 154(1), S. 52–58.

Neumann, S. P. (1975): Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response. In: *Water Resources Research* 11(2), S. 329–342.



## Geohydraulik Schleuse Hessigheim

Die Wechselwirkungen zwischen Bauwerk,  
Grundwasserströmung und Gips im Baugrund

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Im Untergrund der Staustufe Hessigheim am Neckar stehen gipsführende Gesteine des mittleren Muschelkalkes an. Grundwasserinduzierte Lösungsprozesse in diesen Gesteinsschichten verursachen Setzungen und Dolinen an den Bauwerken und im umliegenden Gelände. Durch umfassende Zementinjektionen wurden in den 1980er und 1990er Jahren Hohlräume verfüllt und ein Dichtungsschleier oberwasserseitig der Wehranlage mit Verlängerung nach Westen hergestellt. Damit wurde eine Stabilisierung der Bauwerke erreicht und eine Unterströmung weitgehend verhindert. Baugrundaufschlüsse und geodätische Vermessungen zeigen jedoch, dass die Auslaugungen im Untergrund sowie die Verformungen an den Bauwerken maßgeblich an den unterirdisch umströmten Rändern der abgedichteten Bereiche weiter voranschreiten.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, zu einem vertieften Prozessverständnis über die Wechselwirkungen zwischen Bauwerken, Untergrund und Grundwasser zu gelangen. Folgende Themen sind Untersuchungsgegenstand:

- Gipslösung, -ausspülung und Bildung von Residualsedimenten
- Grundwasserströmungsverhältnisse mit hydraulischen Durchlässigkeiten, Gradienten, Geschwindigkeiten und Fließwegen
- Auswirkungen der bisherigen Sanierungsmaßnahmen in Bezug auf Abdichtung und Umströmung
- Transport und Anreicherung von Sulfat im Grundwasser

Darauf aufbauend sind Empfehlungen für nachhaltige Sanierungsmaßnahmen zu entwickeln. Das im Referat G3 Grundwasser bearbeitete Forschungsvorhaben fokussiert die geohydraulischen Aspekte der Fragestellung und wird in enger Zusammenarbeit mit dem Referat G2 Grundbau durchgeführt.

#### Auftragsnummer:

B3952.03.04.70008

#### Auftragsleitung:



Dr. Cindy Giersch  
 cindy.giersch@baw.de

#### Laufzeit:

2018 bis 2021



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

An einer Staustufe auf lösungsempfindlichem Untergrund treten besondere Fragestellungen auf. Detailkenntnisse über die Wirkungszusammenhänge im Untergrund sind dabei Voraussetzung für eine langfristige Bauwerkssicherung. Am Beispiel der Staustufe Hessigheim werden die Auslaugungsvorgänge in sulfathaltigem Gestein untersucht, um eine verbesserte Planungsgrundlage für die Unterhaltung der Anlagen zu schaffen.

## 3 Untersuchungsmethoden

Vorab wurde durch eine umfassende Literatursichtung der gegenwärtige Wissensstand bezüglich grundlegender Fragen zur Gipslösung und der regionalen Geologie erarbeitet. Parallel dazu erfolgten im Bereich der Staustufe Hessigheim Messungen des Sulfatgehaltes im Grundwasser, um im Vergleich mit früheren Messungen mögliche Veränderungen im Untergrund festzustellen. Darüber hinaus wurde eine Intensivierung der Grundwasserstandsüberwachung durch Automatisierung der Messungen in einem großen Teil der Grundwassermessstellen umgesetzt.

Den Schwerpunkt der derzeitigen Arbeiten bildet die messtechnische Begleitung zweier Testfelder zur Baugrundverbesserung im Bereich landseitig der Schleusen. Hier werden Ende 2019 Verdichtungsinjektionen ausgeführt, die u. a. mit Hilfe der Überwachung von Porenwasserdrücken optimiert werden sollen. Zu den besonderen Anforderungen an die Porenwasserdruckmessstellen gehört, dass in den gleichen Bohrungen jeweils vor und nach den Verdichtungsinjektionen seismische Messungen erfolgen sollen und dass die Bohrungen schräg bis in eine Tiefe von 40 m verlaufen. Aufgrund dieser Rahmenbedingungen wurden die Porenwasserdruckgeber abweichend vom klassischen Ausbau mit Sandfilter direkt in einen Zement-Bentonit-Dämmer eingebaut ('fully grouted' Ausbau, siehe Contreras et al. 2008). Pro Bohrloch wurde eine Messkette mit jeweils vier Porenwasserdruckgebern installiert (s. Bild 1). Zusätzlich enthalten die Messstellen je ein Leerrohr für die seismischen Messungen. Im Vorfeld des Messstellenausbaus fanden Laborversuche statt, um die Eigenschaften des Dämmermaterials sowie Genauigkeit und Ansprechzeit der Porenwasserdruckmessungen zu untersuchen.

In einem weiteren Schritt ist geplant, die geohydraulischen und gegebenenfalls auch die hydrochemischen Prozesse im Untergrund der Staustufe Hessigheim im numerischen Grundwassermodell abzubilden. So sollen zum einen die fortschreitende Auslaugung dargestellt werden und zum anderen die Auswirkungen geplanter Sanierungsmaßnahmen auf die geohydraulischen Verhältnisse anhand entsprechender Szenarien untersucht werden.

## 4 Ergebnisse

Die Auswertungen der bisherigen geohydraulischen Untersuchungen bestätigen, dass im Bereich der Staustufe Hessigheim sehr komplexe Grundwasserströmungsverhältnisse vorherrschen. Das obere Grundwasserstockwerk im Neckarkies ist gut durchlässig, während das untere Stockwerk im teilweise ausgelaugten Festgestein sehr heterogene Eigenschaften aufweist. Im Bereich des linken Neckarufers wird die unterirdisch abgedichtete Staustufe im Festgestein umströmt. Erhöhte Fließgeschwindigkeiten führen hier zu fortschreitender Auslaugung der gipsführenden Schichten. Der Bereich des rechten Neckarufers wird neben der unterirdischen Umströmung maßgeblich auch durch den Aufstieg angestauten Festgesteinsgrundwassers in den Neckarkies beeinflusst. Hier ist als Sanierungsmaßnahme neben einer Bodenverbesserung die Herstellung einer Drainage vorgesehen, welche den kontrollierten Aufstieg des Festgesteinsgrundwassers und den schadlosen Abstrom innerhalb der Neckarkiese ermöglicht.



Bild 1: Einbau der Messkette in die Porenwasserdruckmessstelle.

### Literatur:

Contreras, I. A.; Grosser, A. T.; Ver Strate, R. H. (2008): The Use of the Fully-grouted Method for Piezometer Installation, Part 1. In: Geotechnical Instrumentation News, 31–37.



## Bestandsaufnahme vorhandener Deckwerke

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die derzeitige Dimensionierung von technischen Schüttsteindeckwerken aus losen oder teil- bzw. vollvergossenen Wasserbausteinen erfolgt im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) für Standardfälle nach dem „Merkblatt zur Anwendung der Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen“ (MAR), ansonsten auf Basis der „Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Wasserstraßen“ (GGB). Diese beinhalten die theoretischen Bemessungsgrundlagen nach dem derzeitigen Stand der Technik. Die überwiegend auf Erfahrungen beruhenden, parameterbehafteten Bemessungsansätze müssen jedoch weiter präzisiert werden. Dazu ist es erforderlich, verstärkt praktische Erfahrungen mit bestehenden Deckwerken zu sammeln, zu dokumentieren und systematisch auszuwerten, um auf dieser Grundlage die Bemessungsansätze zu validieren und kontinuierlich bedarfsgerecht weiterzuentwickeln.

Aus diesem Grund wurde vor einigen Jahren mit einer umfassenden, langfristig angelegten Bestandsaufnahme vorhandener Deckwerke in der WSV begonnen. Dabei werden unterschiedliche Wasserstraßenabschnitte hinsichtlich des Aufbaus und des Erhaltungszustandes der Deckwerke und des bisher erforderlichen Unterhaltungsaufwandes unter Berücksichtigung der jeweils gegebenen Randbedingungen, insbesondere der hydraulischen Belastungen, begutachtet. Zur Bewertung werden parallel die nach GGB theoretisch erforderlichen Deckwerksabmessungen ermittelt. Das Ziel besteht letztendlich darin, die technischen Deckwerksbauweisen, die an Binnenwasserstraßen mit hohen schiffsinduzierten Belastungen erforderlich sind, durch Präzisierung der theoretischen Grundlagen weiter zu optimieren.

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

Aufgrund des großen Investitionsvolumens der Ufersicherungen in der WSV kommt einer hinsichtlich Standsicherheit und kostenoptimierten Bemessung der Deckwerke ein hoher Stellenwert zu.

#### Auftragsnummer:

B3952.04.04.10006

#### Auftragsleitung:

Petra Fleischer  
 petra.fleischer@baw.de

#### Laufzeit:

2006 bis 2020

### 3 Untersuchungsmethoden

Im Rahmen der Bestandsaufnahme der zu untersuchenden Deckwerke werden zunächst der Aufbau und Erhaltungszustand der Deckwerke und die technischen Randbedingungen (z. B. Geometrie, Baugrund) in situ sowie der Unterhaltungsaufwand in ausgewählten Wasserstraßenabschnitten erfasst. Unter Wasser werden Untersuchungen mit dem Tauchschacht der WSV durchgeführt. Zur Ermittlung der hydraulischen Uferbelastungen infolge von Schifffahrt werden Naturmessungen in ausgewählten Wasserstraßenabschnitten durchgeführt. Im nächsten Schritt sind Berechnungen zur Ermittlung der unter den ermittelten Randbedingungen erforderlichen Deckwerksabmessungen unter Verwendung der Software GBBSOft+ durchzuführen. Auf dieser Grundlage erfolgt für jeden Untersuchungsabschnitt eine vergleichende Dokumentation des ermittelten Soll- und Istzustandes der Deckwerke. Es werden Zustandsanalysen unter Berücksichtigung der konkreten geometrischen, geotechnischen und hydraulischen Randbedingungen sowie umfassende Schadensanalysen durchgeführt. Am Ende sind Empfehlungen für eine optimale Bemessung und Ausführung von Deckwerken zu formulieren.

Parallel werden neue Möglichkeiten zur Erfassung des Zustandes des Deckwerks über und unter Wasser erforscht.

### 4 Ergebnisse

Bisher wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens Deckwerke in acht unterschiedlichen Abschnitten folgender Wasserstraßen begutachtet: Süd- und Nordstrecke des Dortmund-Ems-Kanals, Wesel-Datteln-Kanal, Main-Donau-Kanal, Mittellandkanal und Untere-Havel-Wasserstraße. Dabei handelt es sich um durchlässige Deckwerke überwiegend aus losen Wasserbausteinen, nur am Mittellandkanal wurden auch Deckwerke aus teil- und vollvergossenen Wasserbausteinen untersucht. Die Ergebnisse wurden ausgewertet und in Teilberichten dargestellt, und bildeten u. a. die Grundlage für eine Optimierung der Bemessungsansätze des GBB. 2011 konnte eine überarbeitete Fassung des GBB veröffentlicht werden.

Die bisherigen Untersuchungen haben auch gezeigt, dass Echolot-Verkehrssicherungspeilungen, die bisher schwerpunktmäßig in Bezug auf Untiefen als Gefahr für die Schifffahrt ausgewertet werden, sehr gut zur Beurteilung der Deckwerksoberfläche unter Wasser hinsichtlich eines qualitätsgerechten Einbaus, aber auch langfristig hinsichtlich der Deckwerksschäden herangezogen werden können. Das Merkblatt zur Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen MAR (2008) empfiehlt deshalb zum Nachweis einer qualitätsgerechten Deckwerksherstellung zusätzlich die Durchführung von Flächenpeilungen. Außerdem sollten die Verkehrssicherungspeilungen zukünftig insbesondere in Dichtungsstrecken regelmäßig auch hinsichtlich des Zustandes der Deckschichten ausgewertet werden, um Fehlstellen und eine mögliche Gefährdung der Dichtung rechtzeitig zu erkennen.

Das Forschungsprojekt wird voraussichtlich Ende 2020 mit einer Gesamtauswertung abgeschlossen. Spezielle Fragestellungen zur Standsicherheit, Langzeitbeständigkeit und Wirtschaftlichkeit von Deckwerken werden seit 2016 in einem gesonderten Forschungsvorhaben (B3952.04.04.70009) weiter bearbeitet. Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, ein wahrscheinlichkeitsbasiertes, zum GBB ergänzendes Bemessungsverfahren für lose Schüttsteindeckwerke zu entwickeln, in dem Unsicherheiten im Berechnungsmodell und in den Eingangsparametern berücksichtigt werden können.



Bild 1: Beispiel für einen Deckwerksschaden infolge des Schraubenstrahls eines manövrierenden Schiffes am DEK, Los2b (2006).

#### Literatur:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2010): Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien).

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2008): Merkblatt Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (MAR). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien).

Fleischer, P.; Kayser, J. (2010): Experience with revetments for inland waterways in Germany. In: PIANC (Hg.): 32nd PIANC International Navigation Congress 2010. 547–560.



## Technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen

### Quantifizierung ihrer Belastbarkeit und Möglichkeiten ihrer Anwendung an Binnenwasserstraßen

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die überwiegend geböschten Ufer der Binnenwasserstraßen sind bisher in der Regel mit Schüttsteindeckwerken gesichert. Ziel sind stabile Ufer zur Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt und zum Schutz des angrenzenden Geländes. Seit Einführung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (2000) sind zunehmend ökologische Aspekte zu berücksichtigen, um eine vielfältige Uferstruktur und mehr Lebensraum für Tiere und Pflanzen zu schaffen. Möglichkeiten für ökologische Aufwertungen im Uferbereich sind der Rückbau der vorhandenen Schüttsteindeckwerke oder deren Ersatz durch umweltfreundlichere technisch-biologische Uferschutzmaßnahmen. Dazu muss geprüft werden, wo gegebenenfalls ganz auf Ufersicherungen verzichtet werden kann bzw. welche naturnäheren Schutzmaßnahmen das Ufer sichern können. Hierfür werden gegenwärtig von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) im Rahmen des Forschungsprojektes Untersuchungen zur Anwendbarkeit und ökologischen Wirksamkeit technisch-biologischer Ufersicherungen durchgeführt.

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

Mit den Untersuchungsergebnissen werden dem planenden Ingenieur der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) fundierte Grundlagen zur Bemessung und Ausführung von technisch-biologischen Ufersicherungen und damit wichtige Entscheidungshilfen für zukünftige Uferumgestaltungen zur Verfügung gestellt, wie sie u. a. im Rahmen des Bundesprogramms „Blaues Band Deutschland“ vorgesehen sind.

Im Projekt arbeiten die Referate Erdbau und Uferschutz (G4, federführend) und Schifffahrt (W4) der BAW sowie die Referate Landschaftspflege/Vegetationskunde (U3) und Tierökologie (U4) der BfG zusammen. Dadurch können sowohl die technischen als auch die biologischen und ökologischen Aspekte in gleicher Weise berücksichtigt werden.

#### Auftragsnummer:

B3952.04.04.10151

#### Auftragsleitung:

Petra Fleischer  
 petra.fleischer@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Volker Schlüter  
 volker.schlueter@baw.de

Carolin Gesing  
 carolin.gesing@baw.de

#### Laufzeit:

2006 bis 2021

### 3 Untersuchungsmethoden

Da es sich bei den Pflanzen um lebende Baustoffe handelt, sind wesentlich mehr Einflussfaktoren hinsichtlich der Stabilität der Ufersicherungsmaßnahmen zu berücksichtigen als bei einer Steinschüttung. Bereits vorhandene praktische Erfahrungen werden als Grundlage für weiterführende Untersuchungen ausgewertet. Zu speziellen Fragestellungen werden Labor- und Modellversuche durchgeführt. Von besonderer Bedeutung sind Naturversuche zum Testen von Ufersicherungsmaßnahmen mit Pflanzen unter realen Wasserstraßenbedingungen. Dabei werden Naturmessungen zur Ermittlung der hydraulischen Uferwirkungen und der dadurch im Boden entstehenden Porenwasserüberdrücke durchgeführt. Mit Begutachtungen vor Ort werden der Zustand und die langfristige Entwicklung der Maßnahmen aus technischer und ökologischer Sicht bewertet. Durch Aufgrabungen wird die stabilisierende Wirkung der Wurzeln verschiedener Pflanzen untersucht. Unterhaltungsstrategien werden getestet. Letztendlich werden Anwendungsempfehlungen und Bemessungskonzepte erarbeitet.

### 4 Ergebnisse

Alle bisher vorliegenden Ergebnisse sind auf dem zu dieser Thematik eingerichteten Internet-Fachportal der BAW und BfG veröffentlicht (<http://ufersicherung.baw.de/de>). Einen Schwerpunkt bildet derzeit der Naturversuch am rechten Rheinufer von km 440,6 bis km 441,6, bei dem in Zusammenarbeit mit dem Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt (WSA) Oberrhein seit 2011 neun verschiedene technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen unter Wasserstraßenbedingungen getestet werden. In vier Versuchsfeldern wurde die bisher vorhandene Steinschüttung zwischen Mittelwasser und Böschungsoberkante durch Weidenspreitlagen, vorkultivierte Pflanzmatten und Röhrichtgabionen sowie Steinmatratzen ersetzt. In einem Abschnitt blieb das Ufer weitestgehend ungesichert. In vier Feldern wurde die Steinschüttung durch verschiedene Maßnahmen ökologisch aufgewertet, z. B. durch Begrünung mit Weidensetzstangen, Busch- und Heckenlagen, durch Strukturverbesserung mittels Kies, großen Einzelsteinen und Tothholzfaschinen und durch Schaffung geschützter Bereiche durch einen der Böschung vorgelagerten Steinwall. Seit 2011 wird ein technisches und ökologisches Monitoring von BAW, BfG und WSA durchgeführt.

Als maßgebende Belastung am Rhein haben sich die großen Wasserspiegelschwankungen bei gleichzeitigen schiffsinduzierten Einwirkungen erwiesen. Erwartungsgemäß ist der Anfangszustand nach Einbau, wenn sich Wurzeln und Sprosse erst bilden müssen, der kritische Zustand. Zur Gewährleistung der Stabilität sind häufig temporäre Hilfsmittel wie entsprechende Befestigungen oder biologisch abbaubare Geotextilfilter erforderlich (siehe Forschungsprojekt B3952.04.04.70011). Insgesamt lässt sich feststellen, dass die getesteten Maßnahmen prinzipiell an Binnenwasserstraßen anwendbar sind – jedoch konnten nicht alle Maßnahmen unter allen Randbedingungen, Einschränkungen und Anwendungsgrenzen ermittelt werden. Wurzelaufrabungen im Bereich der Weidenspreitlagen haben gezeigt, dass sich sechs Jahre nach Einbau ausreichend dichte und lange Wurzeln für den Uferschutz am Rhein gebildet haben. Bei den Pflanzmatten konnte im oberen, selten eingestauten Böschungsbereich durch Aufgrabungen nachgewiesen werden, dass auch die Gräser und Röhrichte ein dichtes Wurzelwerk gebildet haben und dass das verwendete Kunststoffgeotextil gut durchwurzelbar ist. Auch die Röhrichtgabionen können das Ufer gut schützen, wobei von den zum Test eingebauten Pflanzenarten nur verschiedene Seggenarten den hydraulischen Belastungen im unteren, häufig eingestauten Bereich standhalten konnten. Ökologisch hat sich für alle getesteten Maßnahmen eine Aufwertung gegenüber dem normalen Schüttsteindeckwerk gezeigt. Je nach Maßnahmen werden unterschiedliche Tiergruppen bzw. Pflanzenarten gefördert.

Die Monitoring-Ergebnisse wurden bereits 2018 im Rahmen eines BAW/BfG-Kolloquiums in Worms einem breiten Fachpublikum vorgestellt. Der Kolloquiumsband und die einzelnen Vorträge sind auf dem Internetportal abrufbar (<http://ufersicherung.baw.de/de/veranstaltungen/kolloquium-2018>). Die Ergebnisse werden derzeit in einem schriftlichen Bericht zusammengestellt. Das Monitoring wird fortgesetzt, um u. a. verschiedene Unterhaltungsstrategien zu testen und Langzeiterfahrungen zu sammeln.

Auf der Grundlage der bisherigen Erkenntnisse wurden Kennblätter zu verschiedenen Ufersicherungsarten unter Verwendung von Pflanzen für die Planung und Ausführung der Maßnahmen erarbeitet (<https://ufersicherung.baw.de/de/arbeitshilfen/kennblaetter>). Mit dem Merkblatt DWA-M519 „Technisch-biologische Ufersicherungen an großen und schiffbaren Gewässern“, in das maßgebende Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt eingeflossen sind, steht ein erstes Bemessungskonzept für technisch-biologische Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen zur Verfügung, das auch bereits in der Software GBBSOFT+ umgesetzt wurde. Die Arbeitshilfen werden derzeit bei der Planung und Ausführung der Pilotprojekte zum „Blauen Band Deutschland“, bei den Renaturierungen an der Unteren-Havel-Wasserstraße und bei verschiedenen Sanierungsprojekten angewendet. Die Forschungen werden fortgesetzt. Die Erarbeitung von weiteren Regelwerken für die WSV ist ab 2020 geplant.

#### Literatur:

Fleischer, Petra (2018): Umweltfreundliche Alternativen zum Schüttsteindeckwerk an Binnenwasserstraßen. In: Tagungsband. 48. Internationales Wasserbau-Symposium Aachen (IWASA). 01/2018.

Söhngen, Bernhard; Fleischer, Petra; Liebenstein, Hubert (2018): German Guidelines for Designing Alternative Bank Protection Measures. In: Journal of Applied Water Engineering and Research. 08/2018. <https://doi.org/10.1080/23249676.2018.1514281>



## Filterstabilität grober Gesteinskörnungen

### Modellversuche und Messungen

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Eine Standardbauweise zur Sicherung der Böschungsufer an den Bundeswasserstraßen ist die Schüttung loser Wasserbausteine auf einem Kornfilter. Zur Gewährleistung der Deckwerksstabilität muss die Körnungslinie des Filters auf die Wasserbausteine abgestimmt sein. Das Deckwerk muss der hydrodynamischen Belastung der Schifffahrt widerstehen. Die hydraulischen und mechanischen Vorgänge bei der Durchströmung von Deckschicht und Kornfilter sind weitestgehend unbekannt. Mit Modellversuchen wird die Durchströmung nachgebildet. Die Strömungsgeschwindigkeiten, die Porenwasserdrücke und die Verformungen werden gemessen. Mithilfe der Erkenntnisse sollen bekannte Filterregeln, die überwiegend für feinkörnige Böden formuliert sind, auf grobe Körnungen übertragen und auf die Bemessung für Deckwerke angewendet werden.

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

Die Deckwerke bilden einen erheblichen Anteil des Anlagevermögens der WSV. Mit Unterstützung dieses FuE-Vorhabens sollen die Bemessungen optimiert und die Unterhaltungsaufwendungen minimiert werden. Mit den Modelluntersuchungen werden die Einflüsse der Schifffahrt auf die Deckwerke genauer quantifizierbar. Eine Optimierung der Filterregeln für grobe Gesteinskörnungen führt zu einer sicheren sowie wirtschaftlicheren Durchführung von Baumaßnahmen an den Bundeswasserstraßen.

#### 3 Untersuchungsmethoden

Zur Erfassung der komplexen Strömungsverhältnisse und der daraus resultierenden Verformungen werden naturähnliche Modellversuche auf dem BAW-Gelände in Karlsruhe durchgeführt. Dafür wird ein Deckwerk in einen Probekasten mit einer Grundfläche von 1,5 x 1,5 m<sup>2</sup> eingebaut. Der Deckwerksaufbau entspricht einer Standardbauweise nach dem BAWMerkblatt MAR. Der Probekasten wird in einem Bassin zyklisch auf- und abbewegt und durchströmt. Als Filter werden sowohl filterstabile als auch instabile Körnun-

#### Auftragsnummer:

B3952.04.04.70001

#### Auftragsleitung:



Dr. Jürgen Stein  
 juergen.stein@baw.de

#### Laufzeit:

2011 bis 2020

gen untersucht. Die Drücke und Strömungsgeschwindigkeiten werden in mehreren Ebenen kontinuierlich von elektrischen Aufnehmern aufgezeichnet. Die Oberflächenverformungen werden durch photogrammetrische Scans bestimmt. Die Kornumlagerungen bzw. der Filtrationsvorgang an der Schichtgrenze von Filter zu Wasserbausteinen werden mithilfe von Sichtfenstern beobachtet und fotografiert.

#### 4 Ergebnisse

Es wurden die drei Filterkörnungen Feinsplitt 2/16 mm, Grobsplitt 16/32 mm und Kies 2/63 mm untersucht. Das Deckwerk hatte eine Gesamthöhe von 70 cm, wobei die Schichtdicke des Filters eine Höhe von 30 cm und die Deckschicht aus Wasserbausteinen CP<sub>90/250</sub> eine Höhe von 40 cm aufwies. Der Nachweis auf Kontakterosion nach dem Filterkriterium nach Myogahara (1993) entsprechend dem BAWMerklblatt Materialtransport im Boden MMB (2013) ist für alle drei Materialien erfüllt. Für jeden Versuch wurde der Kasten 100-mal eingetaucht. Ein Zyklus besteht aus der Eintauchphase, einer Beruhigungsphase bei vollständig eingetauchtem Deckwerk und der Auftauchphase.

Die Kontakterosion ist für jede Filterkörnung unterschiedlich ausgeprägt. Der feinkörnige Splitt 2/16 mm war nicht filterstabil. Das Deckwerk kollabierte, indem der Splitt mit steigender Zyklenzahl in die Matrix der Wasserbausteine filtrierte und gleichzeitig die Wasserbausteine bis auf den Kastenboden absanken. Der Grobsplitt 16/32 und der weitgestufte Kies 2/63 zeigten einen geringen Materialeintrag und waren stabil. Beim Deckwerksausbau wurden jeweils aus unterschiedlichen Tiefenlagen Proben zur Bestimmung von Änderungen in der Kornverteilung entnommen. An der Kontaktgrenze lagerte sich feinkörnigeres Material an.

Die Deckwerksverformungen wurden nach festgelegten Intervallen bestimmt. Mithilfe von Tauchwägungen wurden die Änderungen der Lagerungsdichte, durch 3D-Oberflächenscans die Setzungen und anhand von Fotos die Eindringtiefe des Filtermaterials in die Deckschicht ermittelt. Alle Messungen wurden ausgewertet und grafisch dargestellt. Alle Versuche zeigten deutliche Oberflächenverformungen.

In Bild 1 sind beispielhaft sechs Messzyklen mit jeweils Eintauch-, Ruhe- und Auftauchphasen mit den zugehörigen Strömungsgeschwindigkeiten in der Deckschicht überlagert. Die Strömungsgeschwindigkeiten wurden mit magnetisch induktiven Delft-Sonden gemessen. Für die weiteren Betrachtungen wurden aus den einzelnen Messzyklen die Maximalwerte ausgelesen. Über die ermittelten Porositäten wurden die Filtergeschwindigkeiten berechnet und aus bekannten Ansätzen die Reynolds-Zahlen zur Beschreibung des Strömungsverhaltens bestimmt. Die Messwerte wurden durch Geschwindigkeitsmessungen mit Flügelradanemometern und die aus Porenwasserdruckmessungen berechneten Wasseranstiegsgeschwindigkeiten verifiziert. Die Druckgradienten wurden anhand der Porenwasserdrücke ermittelt und die Strömungscharakteristik mittels bekannter rechnerischer Ansätze entsprechend Darcy, Forchheimer oder Ergun verglichen.

Mithilfe der hydrodynamischen Messergebnisse und der Korrelation mit den Verformungsbeobachtungen wurde ein Erosionskriterium erstellt. Dafür wurden Kennwerte in Anlehnung an das Shields-Diagramm (1936) bestimmt und ein Kriterium für den Beginn der Kontakterosion abgeschätzt. Im Rahmen dieses FuE-Vorhabens wird ein Vorschlag für einen Bemessungsansatz gegeben. Für die weitere Plausibilisierung und Anwendung in der Praxis sind weitere Untersuchungen mit zusätzlichen Filterkörnungen erforderlich.

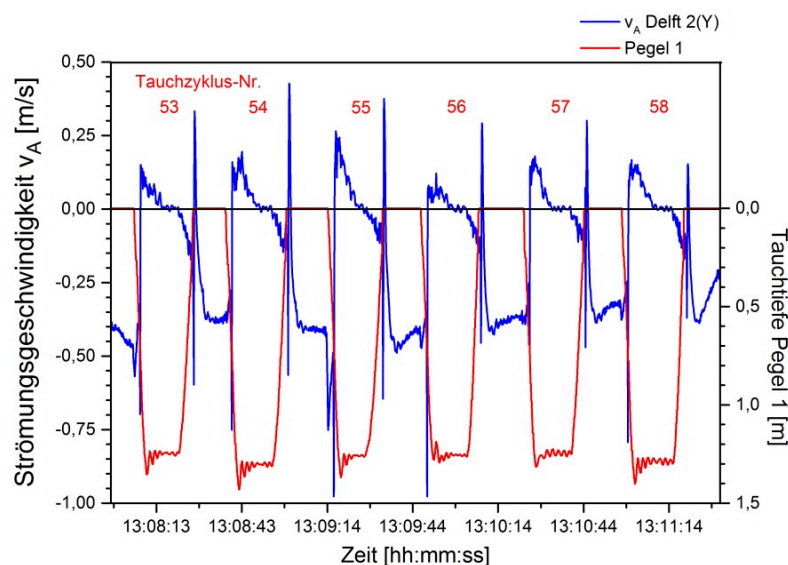


Bild 1: Strömungsgeschwindigkeit  $v_A$  (blaue Linie) in der Deckschicht und Tauchtiefe (rote Linie) des Deckwerks über 6 Zyklen mit Kornfilter Splitt 16/32 mm.

#### Literatur:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2008): BAWMerklblatt Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (MAR). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2013): BAWMerklblatt Materialtransport im Boden (MMB). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

Myogahara et al. (1993): Piping stability in the filter of rock-fill dams. In: Proceedings Filters in Geotechnical Engineering. Hg: Brauns, Heibaum, Schuler, Balkema, Rotterdam, S. 107-111.

Shields, A. (1936): Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Preußische Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau Berlin.



## Wellen-induzierte Porenströmungen im Gewässerbett und ihre Auswirkungen auf den Erosionsbeginn

Modellversuche mit dem Gewässerbett-Simulator

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Uferböschungen und Sohlen an Binnenwasserstraßen unterliegen hydraulischen Einwirkungen. Dazu gehören natürliche und schiffserzeugte Wellen sowie die freie Strömung und Sickerströmungen im Boden. Das Forschungsprojekt behandelt Prozesse und Wechselwirkungen, die durch diese Einwirkungen am Gewässerbett auftreten. Der Begriff Gewässerbett bezeichnet hier den drei-phasigen Bodenkörper, bestehend aus Korngerüst, Porenwasser und im Porenraum eingeschlossenen Gasblasen, an dessen Oberfläche frei fließendes Wasser angrenzt. Dieser Bodenkörper ist durchlässig und verformbar und interagiert mit der freien Strömung. Durch die hydraulischen Einwirkungen kann es am Gewässerbett zu Erosionsprozessen kommen; gleichzeitig treten im Gewässerbett Porenströmungen auf, die den Spannungszustand im Boden ändern. Wie sich diese Mechanismen gegenseitig beeinflussen, ist nicht vollständig bekannt und soll mit Modellversuchen analysiert werden.

Zunächst werden die Bodenprozesse aufgrund von Welleneinwirkung untersucht. Vor allem bei feinsandigen Böden mit einem geringen Anteil an Luft im Porenraum kann es zur Verflüssigung einer oberflächennahen Schicht und damit zum vollständigen Verlust der Scherfestigkeit und effektiven Spannungen kommen. Bei Überströmung treten Wechselwirkungen zwischen Porenströmung, freier Strömung und Verflüssigungsprozessen auf, die sich auf den Erosionsprozess auswirken. In Modellversuchen können die Randbedingungen gezielt und reproduzierbar erzeugt und die Bodenreaktionen beobachtet werden.

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

In den Bemessungsgrundlagen für Böschungs- und Sohlensicherungen (GBB 2010) werden durch Schiffswellen induzierte Porenwasserüberdrücke im Gewässerbett im Hinblick auf die Böschungstabilität berücksichtigt. Die geotechnische Bemessung basiert auf halb-empirischen Ansätzen, deren

#### Auftragsnummer:

B3952.04.04.70008

#### Auftragsleitung:



Jeanne Ewers  
 jeanne.ewers@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2020



Genauigkeit mit den Laborversuchen überprüft wird. Bei 7.300 km Binnenwasserstraßen in Deutschland kann eine Optimierung der Bemessung einen Beitrag zur Sicherheit und Wirtschaftlichkeit der Binnenwasserstraßen leisten, was in diesem FuE-Vorhaben in Verbindung mit weiteren laufenden Forschungsprojekten der BAW angestrebt wird.

An technisch-biologischen Ufersicherungen wurde beobachtet, dass trotz geringer Strömungsgeschwindigkeiten Erosion auftritt. Ob sich entstehende Porenwasserüberdrücke oder Verflüssigung auf den Erosionsprozess auswirken, ist bisher nicht eindeutig geklärt. Ein vertieftes Prozessverständnis kann somit zu verbesserten Lösungsansätzen und einer technisch zuverlässigen Ausführung der naturnahen Ufersicherungen beitragen.

### 3 Untersuchungsmethoden

In 2018 wurde der neu entwickelte Gewässerbett-Simulator (GeSi) fertiggestellt. Mit dieser Versuchsanlage werden Bodenproben überströmt, während gleichzeitig fluktuierende Wasserdrücke zur Simulation von Wellen auf die Probe aufgebracht werden. Damit können bei definierten hydraulischen Randbedingungen im Naturmaßstab die bodenmechanischen Reaktionen, der Erosionsbeginn und die mittlere Strömungsgeschwindigkeit analysiert werden.

In einem ersten Versuch am Gewässerbett-Simulator wurden unterschiedliche Prozesse mittels Messtechnik und Bildanalyseverfahren erfasst, um wichtige Reaktionen der Bodenprobe quantifizieren zu können:

- Hochpräzise Messungen der Differenzdrücke zur Bestimmung der Porenwasserüberdrücke im oberflächennahen Bereich der Sandprobe und Ableitung von hydraulischen Gradienten und Verflüssigungszuständen.
- Sickergeschwindigkeit und instationäre Sicker Mengen an der Sandprobenoberfläche.
- Messung des Durchflusses im Strömungskreislauf und Ableitung der mittleren Fließgeschwindigkeit im Untersuchungsbereich der Probe.
- Videoanalyse der vertikalen und horizontalen Verschiebungen der Bodenprobe im oberflächennahen Bereich während der Aufbringung von Überströmung und Druckschwankungen.
- Videoanalyse der Änderung des Erosionsprozesses während der Aufbringung von Überströmung und Druckschwankungen.

### 4 Ergebnisse

Erste Ergebnisse zeigen, dass der Erosionsprozess von instationären Wasserdruckänderungen beeinflusst wird. Im Versuch wurden lineare Wasserdruckänderungen aufgebracht. An der untersuchten Sandprobe traten bei relativ schneller Wasserdruckabsenkung Porenwasserüberdrücke bis hin zu Verflüssigung auf. Diese Prozesse konnten bereits in Ewers (2018) gezeigt werden.

Bei Überströmung der Probe mit gleichzeitiger Wasserdruckabsenkung wird das Gewässerbett destabilisiert. Die Bildanalyse zeigt, dass währenddessen eine höhere Erosionsrate der Bodenpartikel an der Probenoberfläche auftritt. Bei Wasserdruckerhöhung und daraus resultierender Stabilisierung der Probenoberfläche, konnte keine Änderung der Erosionsrate beobachtet werden.

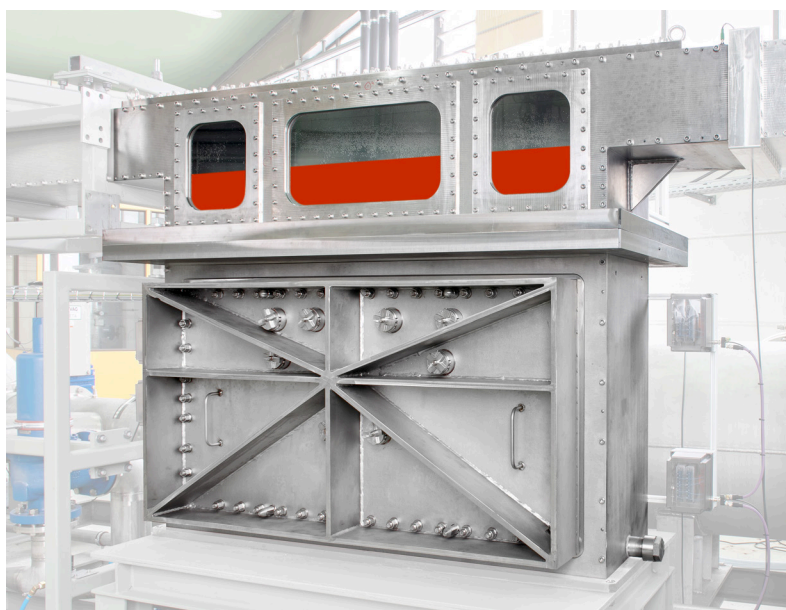


Bild 1: Untersuchungsbereich des Gewässerbett-Simulators mit rot markierter Bodenprobe.

#### Literatur:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2011): BAWMerkblatt Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlsicherungen an Binnenwasserstraßen (GGB). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

Ewers, J. (2018): Laboratory tests on the effects of wave action on cohesionless soil and their influence on incipient sediment motion. In: Keh-Chia, Y. (Ed.). Scour and Erosion IX. London: CRC Press.



## Zuverlässigkeitsbasierte Deckwerksbemessung

Erweiterung des bestehenden Bemessungskonzepts um Elemente der Probabilistik zur Berücksichtigung der beobachteten Verkehrsbelastungen

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Zur Förderung der Binnenschifffahrt in Deutschland ist es zweckmäßig, eine möglichst weitgehende Befahrbarkeit des Wasserstraßennetzes mit möglichst großen Binnenschiffen zu ermöglichen. Aus ökologischen und/oder wirtschaftlichen Gründen ist ein umfänglicher Ausbau der Wasserstraßen unter Berücksichtigung der derzeit gültigen Standards jedoch nicht in allen Fällen sinnvoll. Vielmehr muss eine ganzheitliche Betrachtung der technischen Ufersicherungen über den gesamten Lebenszyklus erfolgen.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist es, ein zuverlässigkeitsbasiertes, zum GBB (2010) ergänzendes Bemessungsverfahren für lose Schüttsteindeckwerke zu entwickeln. Dieses soll eine Prognose der Standsicherheit, der Langzeitbeständigkeit und der Wirtschaftlichkeit von Böschungs- und Sohlsicherungen projektspezifisch – unter der tatsächlichen Verkehrsbelastung und an das jeweilige Sicherheitsbedürfnis angepasst – ermöglichen.

Das FuE-Vorhaben „Zuverlässigkeitsbasierte Deckwerksbemessung“ ist Teil des BMVI-Expertennetzwerks, das 2016 durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) initiiert wurde. Sieben Ressortforschungseinrichtungen und Fachbehörden des BMVI greifen gemeinsam drängende Probleme der Verkehrsinfrastrukturen durch Innovationen bei ihrer Anpassung an den Klimawandel, ihrer umweltgerechten Gestaltung sowie zur Erhöhung ihrer Zuverlässigkeit auf.

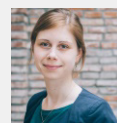
### 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)

Die Verwendung der Ressourcen der WSV für Ufersicherungen soll sich zukünftig an der Netzkategorisierung orientieren. Das bedeutet, dass für das Rand- und Nebennetz der Wasserstraßen geringere Mittel für die Unterhaltung verwendet werden sollen. Zunehmend sind auch naturschutzfachliche Anforderungen bei der Planung von Unterhaltungsmaßnahmen zu beachten. Dabei stehen jedoch die Grenzen der Sicherheit oder eine Veränderung der Gefährdungslage nicht zur Disposition.

#### Auftragsnummer:

B3952.04.04.70009

#### Auftragsleitung:



Julia Sorgatz  
 julia.sorgatz@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2020

Um der WSV unter diesen Randbedingungen einen optimalen Einsatz der Ressourcen zu ermöglichen, ist ein Bemessungskonzept erforderlich, das sich mehr an den tatsächlichen Verkehrsbelastungen sowie dem jeweiligen Sicherheitsbedürfnis und weniger an einzelnen Extrembelastungen orientiert.

### 3 Untersuchungsmethoden

Im Forschungsvorhaben wird ein Mixed-Methods-Ansatz verwendet. Qualitative und quantitative Methoden der Datenerhebung werden miteinander kombiniert. In Experteninterviews werden qualitative Informationen zu Schadensursachen, Schadensbildern und Schadensentwicklung am Deckwerk ermittelt. Daraus resultierende Hypothesen werden in ausgewählten großmaßstäblichen Modell- und Naturuntersuchungen überprüft. Versuche in einer Wellengrube sollen vor allem vertiefende Erkenntnisse zur Schadensentwicklung liefern. Aus den Naturuntersuchungen soll eine mindestens erforderliche Messdauer ermittelt werden, die statistisch aussagekräftige Daten zu den Einwirkungen an der Wasserstraße liefert. Dies dient der besseren Planung zukünftiger Messkampagnen hinsichtlich Repräsentativität und Wirtschaftlichkeit der Messkampagne. Weiterhin werden auf Basis der Naturuntersuchungen Kennwerte und Verteilungen der für eine Bemessung relevanten Eingangsparameter beschrieben. Darauf aufbauend wird unter Verwendung gängiger Methoden der Zuverlässigkeit (Monte-Carlo-Simulation, FORM) ein zum GBB (2010) ergänzendes Bemessungsverfahren entwickelt.

### 4 Ergebnisse

Experteninterviews für Wasserstraßen unterschiedlicher Netzkategorien und Ausbauzustände ergaben, dass vor allem hydraulische Einwirkungen (Wellen, Strömungen) zu Steinverlagerungen an der Wasserstraße führen. Böschungsrutschungen, resultierend aus Porenwasserüberdrücken, werden hingegen selten beobachtet. Aus kleineren Schädigungen (Steinverlagerungen) an der Deckwerksoberfläche entwickeln sich mit der Zeit größere Schadstellen (Sorgatz, Kayser und Schüttrumpf 2018).

Basierend auf diesen Ergebnissen wird derzeit ein großmaßstäblicher Modellversuch auf dem BAW-Gelände durchgeführt. In einer Wellengrube wird eine Böschung, bestehend aus einem Feinsand, einem zweistufigen Kornfilter und einer losen Deckschicht aus Wasserbausteinen, mit Wellen belastet. Eine Unterdimensionierung der Steingröße bezogen auf bestehende Bemessungsregeln erlaubt es, Steinverlagerungen bei Wellenbelastung zu beobachten. Erste Ergebnisse zeigen ein typisches Schadensbild. Die Deckwerkssteine aus dem Wasserwechselbereich verlagern sich zum Böschungsfuß hin. Die Oberkante der Böschung steilt sich leicht auf. Es entsteht ein S-Profil (vgl. Bild 1). Bis Ende des Jahres 2019 sind weitere Versuche geplant, um diese Beobachtungen zu verifizieren.

Das entwickelte Konzept zur Anwendung zuverlässigkeitsbasierter Methoden auf die Deckwerksbemessung beschränkt sich derzeit auf die Prognose von Steinverlagerungen. Eine Zuverlässigkeitsanalyse wird mit einem Markov-Ketten-Ansatz kombiniert. Dies erlaubt eine Interpretation der Versagenswahrscheinlichkeit als Wahrscheinlichkeit eines Initialschadens bezogen auf den Verkehr oder die Zeit. Zukünftig könnte dieses Verfahren bei der Definition von Grenzzuverlässigkeiten unterstützen. Darüber hinaus lassen die Ergebnisse aber vermuten, dass homogene Markov-Ketten mit der darin implizierten exponentiell fortschreitenden Schadensentwicklung für eine langfristige Schadensprognose ungeeignet sind. Die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse hingegen verdeutlichen die Notwendigkeit einer repräsentativen Datenerhebung. Die Dauer der Messkampagnen muss geprüft und Beobachtungsmethoden standardisiert werden (Sorgatz, Kayser und Schüttrumpf 2019). Derzeit wird daher zusammen mit dem WSA Rheine und dem Außenbezirk Münster am Dortmund-Ems-Kanal ein Konzept für eine Dauermessstelle getestet.

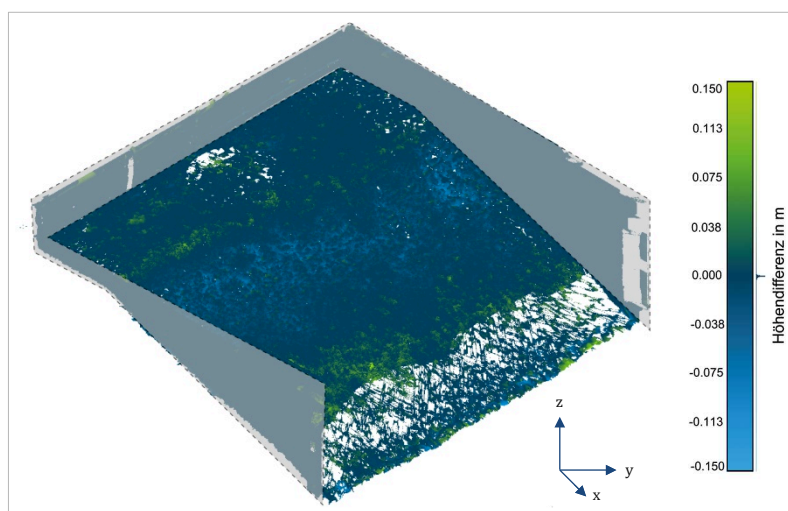


Bild 1: Höhendifferenzen in z-Richtung nach 250 regelmäßigen Wellen (grün=Auftrag, hellblau=Abtrag), ausgewertet mit CloudCompare.

#### Literatur:

Sorgatz, J.; Kayser, J. und Schüttrumpf, H. (2019): Armor stone displacements at German inland waterways: An approach to schedule inspections coupling reliability analysis with Markov chains. 7th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk, Taipei (accepted).

Sorgatz, J.; Kayser, J. und Schüttrumpf, H. (2018): Expert interviews in long-term damage analysis for bottom and bank revetments along German inland waterways. In: Caspele, R.; Taerwe, L. und Frangopol, D. M. (Ed.): Life Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision, London, Taylor & Francis Group, S. 749-756.



## Entwicklung definiert abbaubarer Geotextilien zur Anwendung als temporäre Filter in technisch-biologischen Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Mit Einführung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) sind an Binnenwasserstraßen neben den technischen Anforderungen verstärkt ökologische Aspekte zu berücksichtigen. Aus diesem Grund sollen zukünftig naturnähere Ufersicherungen unter Verwendung von Pflanzen angewendet werden, wenn die hydraulischen Einwirkungen dies erlauben. Die Anwendbarkeit an Binnenwasserstraßen sowie die Belastbarkeit und ökologische Wirksamkeit dieser alternativen Ufersicherungen werden gegenwärtig in einem gemeinsamen Forschungsprojekt der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) untersucht (Auftragsnummer B3952.04.04.10151 – <http://ufersicherung.baw.de/de>). Aus diesem Projekt hat sich die Fragestellung für das vorliegende Forschungsvorhaben ergeben. Auch bei Ufersicherungen unter Verwendung von Pflanzen werden zur Gewährleistung der Filterstabilität in der Regel Filter benötigt. Kornfilter sind hier nicht immer anwendbar. Im Gegensatz zu den in technischen Deckwerken üblichen Geotextil-Kunststofffiltern sollen biologisch abbaubare Materialien zur Anwendung kommen, da die Filter nur temporär für die kritische Anfangsphase benötigt werden. Bisherige Erfahrungen zeigen, dass die gegenwärtig auf dem Markt angebotenen Geotextilien aus natürlichen Materialien, z. B. aus Schafwolle oder Kokosfasern, unter Wasserstraßenbedingungen nicht ausreichend stabil sind und sich zu schnell biologisch abbauen. Benötigt werden temporäre Filtervliese, bis die Pflanzenwurzeln ausreichend gewachsen sind und die Filterfunktion übernehmen können. Im Forschungsprojekt sollen entsprechende Geotextilien entwickelt und getestet werden, die die erforderlichen technischen Eigenschaften für drei Jahre gewährleisten und sich danach vollständig biologisch abbauen.

Das Vorhaben ist ein von der Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR) gefördertes Kooperationsprojekt mit dem Fraunhofer Institut UMSICHT Oberhausen und den Firmen BNP Brinkmann GmbH, FKUR Kunststoff GmbH und Trivera GmbH. Die BAW beteiligt sich als assoziierter Partner.

#### Auftragsnummer:

B3952.04.04.70011

#### Auftragsleitung:

Petra Fleischer  
 petra.fleischer@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2021

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

Mit den definiert abbaubaren Geotextilfiltern werden die Möglichkeiten erweitert, naturnahe Ufersicherungen unter Verwendung von Pflanzen anzuwenden, die den Uferschutz gewährleisten und gleichzeitig den ökologischen Zustand an Binnenwasserstraßen verbessern können. Das ist insbesondere für die Uferumgestaltungen von Bedeutung, die in den nächsten Jahren im Rahmen des Bundesprogramms „Blaues Band Deutschland“ zur Renaturierung von Bundeswasserstraßen vorgesehen sind.

## 3 Untersuchungsmethoden

Nach Definition des Anforderungsprofils der zu entwickelnden Geotextilfilter (BAW) sind Labor-, Modell- und Naturversuche zum Nachweis der Eignung der neuen Materialien als Filter in technisch-biologischen Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen durchzuführen. Die Laborversuche dienen der Auswahl geeigneter Fasern (Fraunhofer Institut UMSICHT, FKUR Kunststoff GmbH, Trivera GmbH) und der Beurteilung des biologischen Abbaus (Fraunhofer Institut UMSICHT), der technischen Eigenschaften (BAW) und der Durchwurzelbarkeit (BAW). Ergänzend wird ein Naturversuch am Rhein durchgeführt, um die neu entwickelten Geotextilfilter als Teil technisch-biologischer Ufersicherungen unter Wasserstraßenbedingungen zu testen (BAW, WSA Mannheim).

## 4 Ergebnisse

Das Vorhaben startete im Juli 2016. Von der BAW wurden im ersten Schritt die technischen Anforderungen an die zu entwickelnden Geotextilvliese definiert. Aufgrund der zu erwartenden Belastungen beim Einbau und im Betrieb wurden Mindestwerte für die Zugfestigkeit und den Durchdrückwiderstand sowie für die Gewährleistung der Filterstabilität (Öffnungsweite und Durchlässigkeit) festgelegt. Diese Anforderungen müssen unter Berücksichtigung des biologischen Abbaus in den ersten drei Jahren nach Einbau erfüllt werden. Wichtig ist außerdem, dass der Filter leicht und gut durchwurzelbar ist. Für diese Randbedingungen hat das Fraunhofer Institut UMSICHT in Zusammenarbeit mit dem FKUR Kunststoff GmbH und der Trivera GmbH anwendbare Fasermaterialien entwickelt. Die Firma Brinkmann GmbH hat aus diesen Fasermischungen drei verschiedene Geotextilvlies-Prototypen hergestellt, die in der BAW hinsichtlich der technischen Eigenschaften geprüft wurden.

Von Mai bis November 2018 wurden in der BAW Versuche zur Durchwurzelbarkeit des ersten Geotextilprototyps durchgeführt. In mit kiesigem Sand gefüllten Versuchskästen wurden Geotextilproben und darüber Äste der Purpurweide verlegt und übererdet, in drei Kästen erfolgte zum Vergleich der Einbau ohne Geotextil. Die Wurzel- und Sprossentwicklung wurde nach einer Vegetationsperiode begutachtet. Im Ergebnis ist festzustellen, dass das Geotextil prinzipiell durchwurzelbar ist. Allerdings wurden in den Kästen mit Geotextil im Vergleich zu den Kästen ohne Geotextil weniger und kürzere Wurzeln und Sprosse gebildet. Bild 1 zeigt die Versuchskästen sowie das durchwurzelte Geotextil von der Unterseite nach dem Freispülen der Wurzeln. Seit Frühjahr 2019 werden Versuche mit dem zweiten Geotextilprototyp durchgeführt.

Für die Durchführung des Freilandversuchs am Rhein (km 441,155 bis km 441,195) wurde 2019 von der BAW in Abstimmung mit dem WSA Mannheim ein Konzept erstellt. Die Geotextilprototypen werden auf einem 30 m langen Uferabschnitt unter Steinmatratzen in verschiedenen Höhen auf der Böschung eingebaut und damit unterschiedlichen hydraulischen Uferbelastungen ausgesetzt. Nach dem Einbau werden in verschiedenen Zeitabständen Proben entnommen und geprüft. Ziel ist der Nachweis des Abbauprozesses des Geotextils in Abhängigkeit von der Zeit unter Wasserstraßenbedingungen. Parallel soll die Entwicklung von Weidenspreitlagen, eingebaut auf den neu entwickelten Geotextilien, getestet werden.

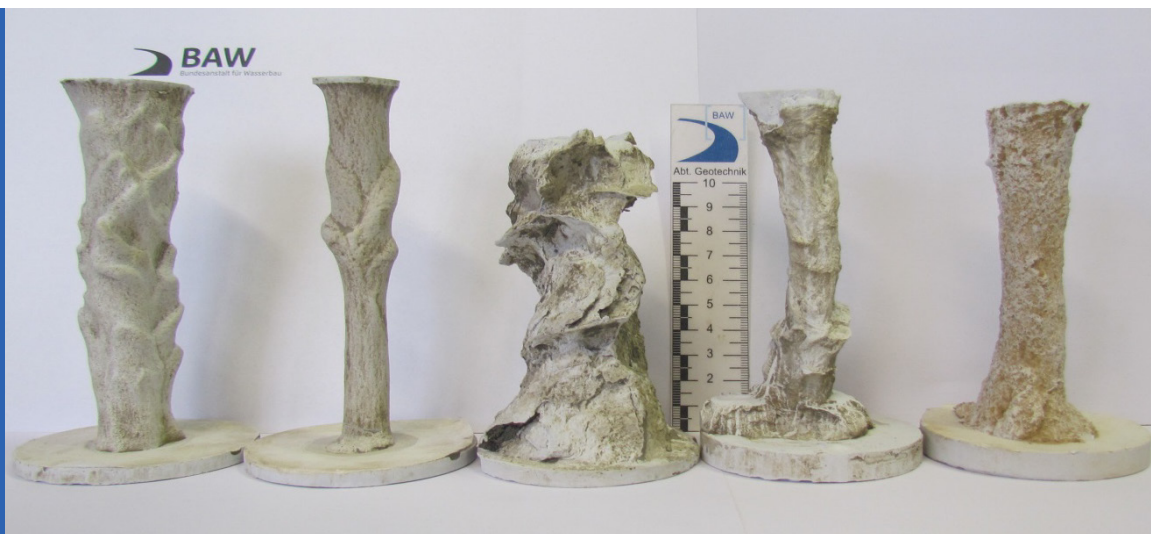
Die neu entwickelten Geotextilfiltervliese können als temporäre Filter in verschiedenen technisch-biologischen Ufersicherungsmaßnahmen wie z. B. Röhrichtgabionen, Pflanzmatten und Weidenspreitlagen angewendet werden und zur Stabilität im kritischen Anfangszustand beitragen.



Bild 1: Testen der Durchwurzelbarkeit des abbaubaren Geotextils.

### Literatur:

Fleischer, P. (2018): Umweltfreundliche Alternativen zum Schüttsteindeckwerk an Binnenwasserstraßen. In: Tagungsband des 48. IWASA Internationales Wasserbausymposium Aachen „D3 – Deckwerke, Deiche, Dämme“, 18./19.01.2018. abrufbar unter [http://www.iww.rwth-aachen.de/index.php?lang=de&cat=symposium&sec=previous\\_iwasa&page=previous\\_iwasa](http://www.iww.rwth-aachen.de/index.php?lang=de&cat=symposium&sec=previous_iwasa&page=previous_iwasa)



## Erosion bindiger Böden

### Bestimmung der Erosionseigenschaften von Dichtungstonen

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Anders als bei natürlichen Flüssen werden Kanalhaltungen nicht dauerhaft mit Wasser nachspeist. Zur ständigen Gewährleistung der Schiffbarkeit müssen oberhalb des Grundwassers liegende Kanäle daher abgedichtet werden, um Wasserverlust in den Untergrund zu vermeiden. Aufgrund der geringen Durchlässigkeit, guten Verfügbarkeit und Einbaubarkeit unter Wasser, bieten sich natürliche feinkörnige Böden als Dichtmaterial an. Um eine Erosion der Dichtschicht zu vermeiden, wird diese mit einer Deckschicht geschützt. Kommt es durch Deckwerksschäden jedoch zu einer Freilegung der Tondichtung, so ist diese einem direkten Strömungsangriff z. B. durch Schraubstrahl ausgesetzt. Ebenso kann es zu einer lokalen Durchströmung kommen, wenn die Tondichtung z. B. infolge einer Durchwurzelung vorgeschädigt ist. Für diesen Fall muss die Erosionsstabilität des Dichtungstones gewährleistet sein, um ein Versagen der Dichtung zu vermeiden.

Die Prüfung von Erdstoffen zur Eignung als Dichtungston erfolgt nach der BAW-Richtlinie „Prüfung von mineralischen Weichdichtungen und deren Einbauverfahren im Verkehrswasserbau“ (RPW 2015). Aktuell sieht die RPW einen modifizierten Pinhole-Versuch mit einer maximalen Aufweitung des Strömungskanals um 100 % nach 200 h Durchströmung vor. Um fortan quantitativ auswertbare Ergebnisse zu erhalten soll der Pinhole-Versuch weiterentwickelt und optimiert werden.

Die mit dem neuen Versuchsaufbau gewonnen bodenspezifischen Erosionsparameter können dann zur Klassifizierung eines potentiellen Dichtungstones, im Rahmen einer Grundprüfung, aber auch als Widerstandsparameter in einem Bemessungskonzept verwendet werden.

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

Ein reproduzierbarer und quantitativ auswertbarer Erosionsversuch ermöglicht eine sichere und belastbare Beurteilung von potentiellen Dichtungstonen und damit gegebenenfalls eine kosteneffizientere Abdichtung von Kanälen durch ein größeres Spektrum nutzbarer Böden.

#### Auftragsnummer:

B3952.04.04.70012

#### Auftragsleitung:



Dr. Bahaeldeen Zaid  
 bahaeldeen.zaid@baw.de

#### Laufzeit:

2018 bis 2022

Des Weiteren kommt es an vielen Kanälen zu einer Erhöhung der Beanspruchung (z. B. durch größere Schiffe bei gleichbleibendem Kanalquerschnitt) sodass u. U. die Notwendigkeit der nachträglichen Überprüfung der Erosionsbeständigkeit von bereits vorhandenen Dichtungstonen besteht.

### 3 Untersuchungsmethoden

Zur Verbesserung des derzeitigen Erosionstests wurde der aktuelle Versuchsstand nach RPW anhand von Erfahrungen anderer Institutionen zum Hole Erosion Test (HET) abgeändert und weiterentwickelt. Der HET entspricht vom Grundkonzept her dem derzeitigen Versuch (konzentrierte Durchströmung einer vorgeschädigten Probe), ist allerdings quantitativ auswertbar und hat präziser gefasste und variable Randbedingungen. In Bild 1 ist links der Querschnitt einer geprüften Probe eines Dichtungstones und rechts die Prü fzelle des HET zu sehen. Das Titelbild zeigt Abgüsse von Strömungskanälen verschiedener Proben.

Im HET wird die zu einer bestimmten Schubspannung gehörende Erosionsrate aus der zeitlichen Änderung des durchströmten Querschnittes ermittelt. Um die so gewonnenen Erosionsparameter (kritische Schubspannung und schubspannungsabhängige Erosionsrate) plausibilisieren zu können, wurden Referenzversuche in der SETEG Erosionsrinne der Universität Stuttgart (Kern et. al. 1999) durchgeführt. Dort sind die wirksamen Schubspannungen durch präzise Geschwindigkeitsmessungen an der Probenoberfläche gut ermittelbar und die Erosionsraten können über eine laserbasierte Messmethode erfasst werden.

### 4 Ergebnisse

Die Analyse der bis jetzt verwendeten Auswertverfahren des HET hat gezeigt, dass vor allem die Vernachlässigung von Ein- und Ausgangsverlusten zu fehlerhaften Berechnungen der wirksamen Schubspannungen führt. Anhand von Messungen an nicht erodierbaren Proben konnten geometrie- und geschwindigkeitsabhängige Ein- und Ausgangsverlustbeiwerte bestimmt werden und eine Berechnungsmethode für den, tatsächlich in Wandschubspannung übergelenden, hydraulischen Verlust entwickelt werden (Hark 2018). Dabei wurde festgestellt, dass die örtlichen Verluste nicht nur vom Durchmesser des Durchströmungskanals abhängen, sondern auch in erheblichem Maße von der Geometrie bzw. dem Krümmungsradius im Ein- bzw. Auslaufbereich der Probe.

Der Vergleich der Ergebnisse aus dem HET und den SETEG Versuchen hat gezeigt, dass die Erosionsraten-Schubspannungs-Beziehung, die im HET unter Einbezug der lokalen Verluste ermittelt wurde, gut mit den Ergebnissen aus den SETEG Untersuchungen übereinstimmt.

Aufgrund eines Bearbeiterwechsels wurde das Projekt im Zeitraum von Januar bis August 2019 nicht bearbeitet. Herr Dr.-Ing. Bahaelden Zaid ist seit September 2019 neuer Projektleiter.

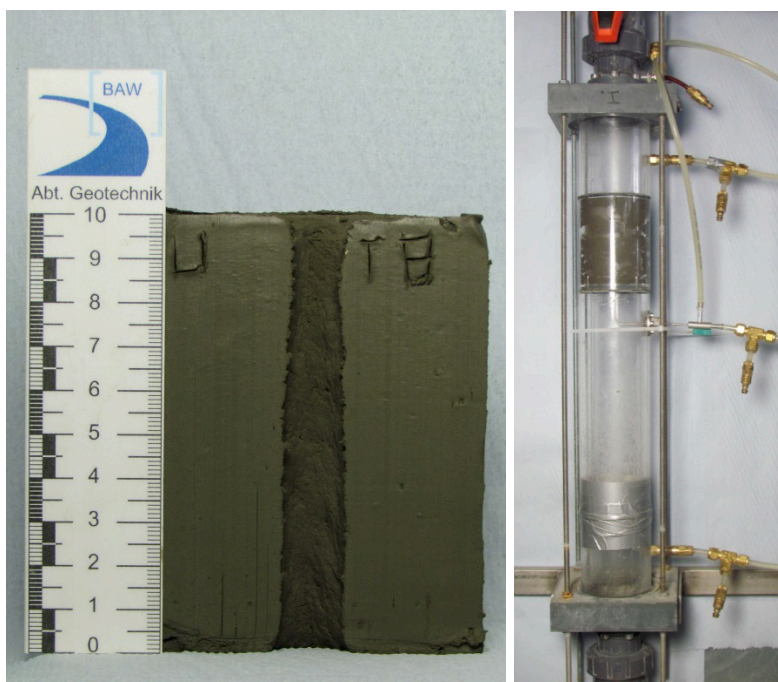


Bild 1: Querschnitt eines im Hole Erosion Test erodierten Dichtungstons (links) und Prü fzelle des Hole Erosion Test der BAW (rechts).

#### Literatur:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2015): BAWRichtlinie Prüfung von mineralischen Weichdichtungen und deren Einbauverfahren im Verkehrswasserbau (RPW). Karlsruhe: BAW (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien).

Hark, M. (2018): A modified Hole-Erosion-Test on high plastic clay with different soil structure. In: Yeh, K.-C. (Hg.): Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Scour and Erosion, Taipei. London: Tylor and Francis.

Kern, U.; Haag, I.; Schürlein, V.; Holzwarth, M.; Westrich, B. (1999): Ein Strömungskanal zur Ermittlung der tiefenabhängigen Erosionsstabilität von Gewässersedimenten: das SETEG-System. In: Wasserwirtschaft (89), S. 72–77.

Wan, C. F.; Fell, R. (2002): Investigation of internal erosion and pippings of soils in embankment dams by the slot erosion test and the hole erosion test. University of New South Wales.



## Hydraulische Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen

### Zur Durchfluss-Fließtiefen-Relation in Schlitzpässen

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Der in Deutschland und vermutlich weltweit am häufigsten eingesetzte Bautyp einer Fischaufstiegsanlage ist der Schlitzpass. Das Prinzip beruht darauf, dem Fisch über eine Aneinanderreihung von Becken die Überwindung eines großen Höhenunterschieds zu ermöglichen. Die Becken sind durch Schlitze miteinander verbunden, an denen sich kleine, für den Fisch überwindbare Wasserspiegeldifferenzen einstellen.

Mit dem Merkblatt DWA-M 509 erschien 2014 ein Standardwerk für die Bemessung von Fischaufstiegsanlagen. Auch wenn sich das Merkblatt in der Praxis in weiten Teilen bewährt hat, gibt es nach wie vor eine Anzahl offener Fragen, die nationale und internationale Forschungsaktivitäten insbesondere auch zur Hydraulik eines Schlitzpasses zur Folge haben. Das vorliegende Forschungsprojekt hat zum Ziel, einige dieser offenen Fragen zu beantworten und so eine verbesserte Grundlage für die Dimensionierung von Schlitzpässen zu erarbeiten. Neben einer Reihe weiterer Themen, wie dem Strömungsmuster und der Fließgeschwindigkeit (z. B. Höger et al. 2014, 2015), wurde die Durchfluss-Fließtiefen-Relation in Schlitzpässen untersucht. Die Resultate werden im vorliegenden Beitrag präsentiert.

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

Seit der Novellierung des Wasserhaushaltsgesetzes zum 1. März 2010 ist die Erhaltung bzw. Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit, soweit dies zur Erreichung der einschlägigen Bewirtschaftungsziele erforderlich ist, gesetzlicher Auftrag der WSV. Im Hinblick auf die Dringlichkeit der Maßnahmen und der großen Zahl von ca. 250 durchgängig zu gestaltenden Stauanlagen besteht ein großer Bedarf an belastbaren Bemessungskriterien, der angesichts des noch unzureichenden Wissens auf diesem Gebiet einen entsprechenden Forschungsbedarf begründet. Der Betriebsdurchfluss und die Fließtiefe sind fundamentale Größen für die Bemessung einer Fischaufstiegsanlage. Aufgrund der oft beengten Platzverhältnisse wird an vielen Standorten der WSV ein Schlitzpass zum Einsatz kommen. Vertiefte Kenntnisse über dessen hydraulische Dimensionierung sind deshalb von wesentlicher Relevanz.

#### Auftragsnummer:

B3953.01.04.70002

#### Auftragsleitung:



Dr. Roman Weichert  
 roman.weichert@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Frederik Prinz  
 frederik.prinz@baw.de

#### Laufzeit:

2010 bis 2020



### 3 Untersuchungsmethoden

Die Untersuchungen zum Projekt wurden in Kooperation mit dem Institut für Wasser und Gewässerentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) auf Basis von gegenständlichen Modelluntersuchungen am KIT und an der BAW durchgeführt.

Grundsätzlich wurde darauf geachtet, dass die Untersuchungen den im Merkblatt DWA-M 509 (2014) beschriebenen Parameterbereich abdecken. Eine wesentliche Unterscheidung der beiden Versuchsreihen liegt in der unterschiedlichen Gestaltung der Schlitze. Während in den Untersuchungen an der KIT-Rinne ein scharfkantiger Schlitz zum Einsatz kam, sind die Schlitze in der BAW-Rinne abgerundet. Des Weiteren wurden die Versuche in der KIT-Rinne ohne Sohlrauheit durchgeführt, wohingegen an der BAW drei unterschiedliche Bedingungen vorlagen: ohne Sohlrauheit (glatt), mit einer idealisierten Sohlrauheit in Form von Halbkugeln und mit Granitschotter.

### 4 Ergebnisse

Die Untersuchungen am KIT und an der BAW bestätigen den linearen Zusammenhang zwischen Durchfluss und Fließtiefe in einem Schlitzpass. Basierend auf den KIT/BAW-Daten wurde eine lineare Gleichung zur Beschreibung dieses Zusammenhangs entwickelt, die auch der Prüfung unabhängiger Rinnendaten standhielt (siehe Bild 1). Der Gültigkeitsbereich der Gleichung bezieht sich dabei auf den Anwendungsbereich des Merkblattes DWA-M 509 (2014) hinsichtlich der dort empfohlenen Geometrien, Mindestfließtiefen und Gefällebereiche für die Kaulbarsch-Flunder-, Brachsen- und Barbenregion.

Der Vergleich der KIT/BAW-Daten mit dem Ansatz im Merkblatt DWA-M 509 ist unterschiedlich zu beurteilen. Die DWA-Gleichung für das stabile Strömungsmuster führt nicht zu brauchbaren Ergebnissen, wohingegen die Gleichung für das dissipierende Strömungsmuster grundsätzlich gute Resultate liefert – unabhängig davon, welches Strömungsmuster vorhanden ist. Ein direkter Vergleich des entwickelten linearen Ansatzes mit dem DWA-Ansatz für strömungsdissipierende Verhältnisse zeigt, dass Abweichungen existieren, grundsätzlich jedoch ähnliche Ergebnisse produziert werden. Der Vorteil des entwickelten linearen Ansatzes ist eine im Vergleich zum DWA-Ansatz vereinfachte Berechnung für rückgestaute Verhältnisse. Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass die Durchfluss-Fließtiefen-Relation in Schlitzpässen unabhängig von der Sohlrauheit ist.

Im Gegensatz zu den vorgestellten Untersuchungen an geraden Versuchsrinnen kommen in realisierten Schlitzpässen häufig auch andersartige Becken zum Einsatz, wie etwa Wendebecken, kanalartige Abschnitte oder geknickte Becken. Für eine entsprechende Weiterentwicklung ist somit die Validierung des Berechnungsansatzes mit Naturdaten ein wichtiger nächster Schritt.

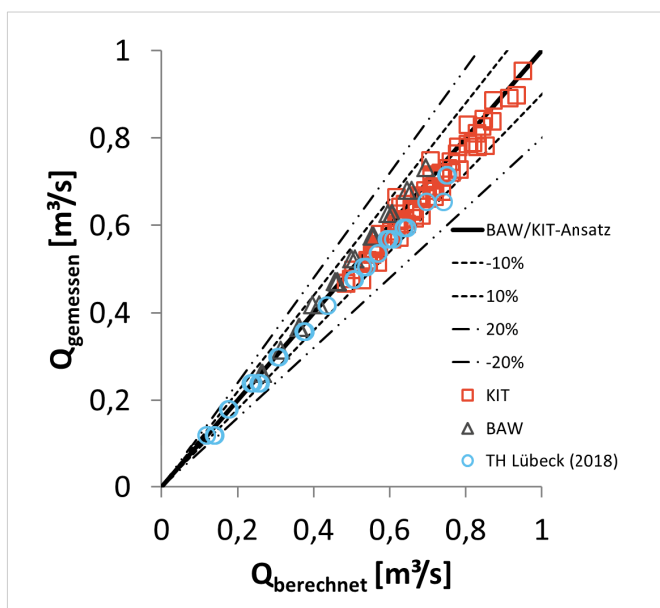


Bild 1: Vergleich der im Modell gemessenen Durchflüsse mit den nach dem linearen Ansatz berechneten Durchflüssen. Zusätzlich Vergleich mit an der TH Lübeck erhobenen Daten (z. B. Klein und Oertel 2018).

#### Literatur:

DWA (2014): Merkblatt DWA-M 509 der Deutschen Vereinigung für Wasser und Abfall.

Höger V.; Henning, M.; Nestmann, F. (2014): Experimental study on the influence of pool geometry on flow patterns in vertical-slot fishways. In: Proceedings of the 10th International Symposium on Ecohydraulics, Trondheim, Norway.

Höger, V.; Henning, M.; Nestmann, F. (2015): Experimental study on flow patterns in vertical slot fishways. In: Proceedings of Fish Passage, Groningen.

Klein, J.; Oertel, M. (2018): Influence of Inflow and Outflow Boundary Conditions on Flow Situation in Vertical Slot Fishways. In: Bung D., Tullis, B.: 7th IAHR, Aachen, Germany, 15–18 May 2018.

Sokoray-Varga, B.; Weichert, R.; Nestmann, F. (2015): Untersuchungen zu hydraulischen Berechnungsansätzen von Schlitzpässen, WasserWirtschaft 7-8 2015, 61–66.



## Ethohydraulische Versuche zur Passierbarkeit des Einstiegs von Fischaufstiegsanlagen

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Funktionsfähigkeit von Fischaufstiegsanlagen hängt im Wesentlichen von der Auffindbarkeit und der Passierbarkeit ab. Letztere bewirkt, dass Fische die gesamte Anlage durchschwimmen können. Neben regulären Becken, für deren Anordnung und Dimensionierung bereits Bemessungsgrundlagen vorhanden sind, beinhalten fast alle Fischaufstiegsanlagen an Bundeswasserstraßen Sonderbauwerke, für die keine Grundlagen existieren. Gemeinsam mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) wurde daher das FuE-Vorhaben „Passierbarkeit von Sonderbauwerken in Fischaufstiegsanlagen“ mit dem Ziel initiiert, Bemessungsgrundlagen zu erarbeiten, die es den planenden Ingenieuren ermöglichen, funktionsfähige Anlagen zu dimensionieren.

Die ethohydraulischen Versuche sind Teil dieses FuE-Vorhabens (z. B. Schütz und Czerny 2018). Aufbauend auf den Versuchen von 2017/18 befassen sich die laufenden Versuche ebenfalls mit dem Einstiegsbecken einer Fischaufstiegsanlage. Der Einstiegsschlitz bildet den Schnittpunkt zwischen Auffindbarkeit und Passierbarkeit: Er muss einerseits, z. B. durch eine hohe Fließgeschwindigkeit, eine für Fische gut wahrnehmbare Leitströmung im Unterwasser generieren, aber andererseits auch für leistungsschwache Fische passierbar sein. Dabei wird für Fische mit geringer Schwimmleistung angenommen, dass sie die Eigenschaften einer rauen Sohle bei der Schlitzpassage nutzen, wenngleich die sohnahen Fließgeschwindigkeiten durch die Sohlrauheit, anders als in der Gerinnehydraulik, nicht merklich reduziert werden. Im aktuellen Projekt wird untersucht, ob sich die Passagewahrscheinlichkeit für kleine schwimmschwache Fische durch eine raue Sohle im Vergleich zu einer glatten Sohle verbessert. Die Ergebnisse werden für die Berücksichtigung der Sohlrauheit bei der Auslegung der Bemessungsgeschwindigkeit von FAA benötigt.

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

Seit der Novellierung des Wasserhaushaltsgesetzes zum 1. März 2010 ist die Erhaltung bzw. Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit, soweit dies zur Erreichung der einschlägigen Bewirtschaftungsziele erforderlich ist,

#### Auftragsnummer:

B3953.01.04.70006

#### Auftragsleitung:



Dr. Martin Henning  
 martin.henning@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Veronica Wiering  
 veronica.wiering@baw.de

#### Auftragsbearbeitung BfG:

Dr. Martina Heynen  
 heynen@bafg.de

#### Laufzeit:

2015 bis 2021

gesetzlicher Auftrag der WSV. Im Hinblick auf die Dringlichkeit der Maßnahmen, der großen Zahl von circa 250 durchgängig zu gestaltenden Stauanlagen und der dort zumeist beengten Platzverhältnisse besteht ein großer Bedarf an belastbaren Bemessungskriterien, der angesichts des noch unzureichenden Wissens auf diesem Gebiet einen entsprechenden Forschungsbedarf begründet. Ethohydraulische Untersuchungen werden eingesetzt, um grundlegende Erkenntnisse im Zusammenhang von Fischverhalten und Hydraulik zu erzielen.

### 3 Untersuchungsmethoden

In einer 2,5 m breiten Rinne wurde ein gegenständliches Modell (Maßstab 1:1) eines Einstiegsschlitzes aufgebaut (Bild 1). Die Schlitzgeometrie orientiert sich an gängigen Maßen sowie an Erkenntnissen aus hydraulischen Voruntersuchungen. Der Rinnenboden ist entweder als raue Sohle oder als glatte Sohle ausgebildet. Während der Teilversuche wird zwischen den Sohlstrukturen (rau/glatt) gewechselt. Die Fließgeschwindigkeit im Schlitzquerschnitt bleibt konstant und die Wasserstände der Teilversuche werden dementsprechend angepasst. Das Modell wird mit Wildfischen besetzt, wobei pro Einzelversuch je drei Individuen der gleichen Art getestet werden. Die Versuche im Frühjahr 2020 sind mit den Fischarten Gründling und Rotauge geplant.

Die Fische werden in einem strömungsberuhigten Startbereich eingesetzt und ihr Schwimmverhalten wird mittels Zeitmessung und durch manuelle Protokollierung dokumentiert. Es wird identifiziert, wie viele Fische, gemessen am Überschwimmen einer definierten Ziellinie, den Einstieg passieren (Erfolg/Nichterfolg). Die Versuche werden außerdem mit einem Videosystem aufgezeichnet, das aus acht synchron betriebenen Industriekameras besteht. Mit den Videosequenzen kann im Nachgang ein numerisches Fishtracking-System betrieben und so Fischbewegungen im 3D-Raum analysiert werden. Die Hydraulik des Ober- und Unterwassers sowie im Besonderen des Schlitzes wird separat mittels Acoustic Doppler Velocimetry (ADV) vermessen. Die Durchführung und Auswertung der Fischversuche obliegt der BfG, während die BAW die hydraulischen Untersuchungen vornimmt.

### 4 Ergebnisse

Im Rahmen der hydraulischen Vermessung des Vorversuchs mit einer rauen Sohle wurde bereits festgestellt, dass es im Einstiegsschlitz zu keiner messbaren Veränderung der Fließgeschwindigkeit gegenüber dem Versuch mit glatter Sohle kommt und die Geschwindigkeiten über die Tiefe konstant sind (s. Bild 1). Allerdings bildet sich im Unterwasser des Schlitzes eine Schicht reduzierter Geschwindigkeit oberhalb der Sohle aus. Die Fischversuche sind, unter Berücksichtigung der Wanderperioden der jeweiligen Fischart, von Ende März 2020 bis Ende Juni 2020 angesetzt. Bis dahin wird die Hydraulik der finalen Sohlen (rau/glatt) vermessen und das Videosystem wird kalibriert.

#### Literatur:

Schütz, C.; Czerny, R. 2018: Adding auxiliary discharge into the entrance pool of a fishway: influence of pool design on the fish passage; Fish Passage 2018.

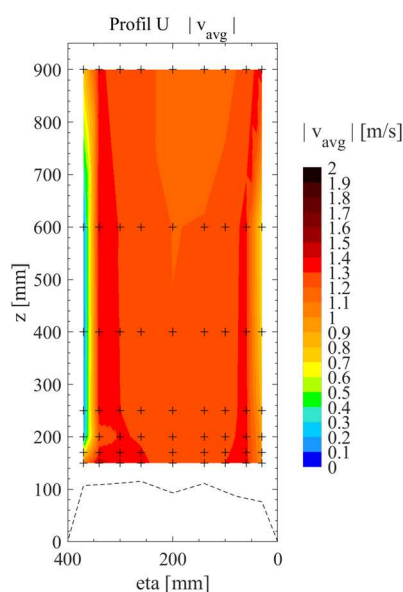
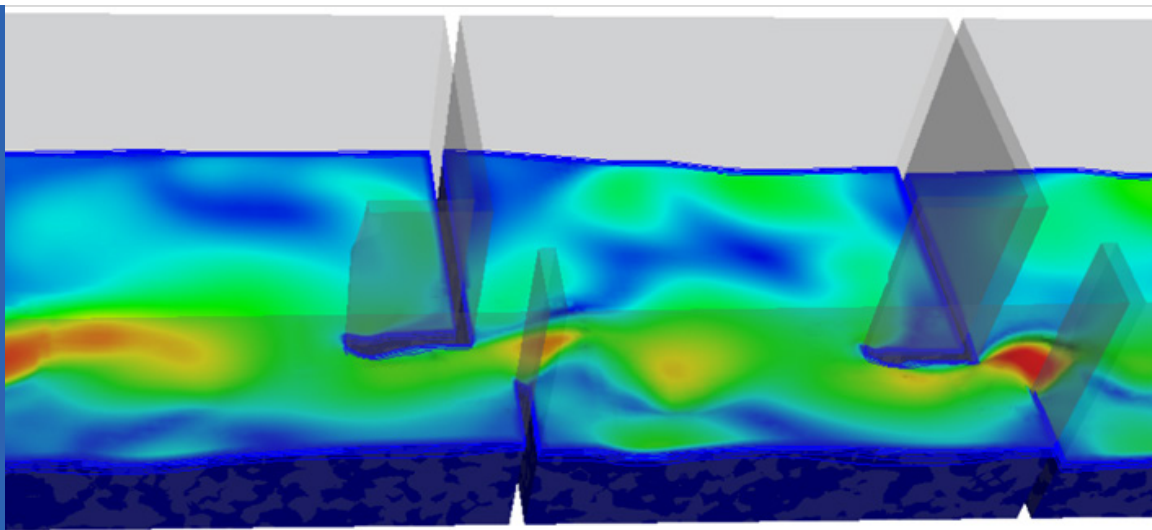


Bild 1: Interpolation der gemessenen Fließgeschwindigkeit im Vertikalprofil bei rauer Sohle mit Blick in Fließrichtung (links), raue Sohle im Aufbau (rechts).



## Berücksichtigung zeitabhängiger Strömungsprozesse bei der Beurteilung der Hydraulik von Fischaufstiegsanlagen

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Um die Hydraulik von Fischaufstiegsanlagen (FAA) zu erfassen, betreibt die BAW gegenständliche und numerische Modelle. Momentan werden zur Beurteilung der Hydraulik für Fische überwiegend zeitliche Mittelwerte der Strömungsgeschwindigkeiten genutzt. Es besteht jedoch Übereinstimmung mit Biologen, dass im turbulenten hydraulischen Umfeld in und an Fischaufstiegsanlagen die Schwankung und Struktur und somit die zeitliche Auflösung der Strömungsfelder eine große Rolle für die Wahrnehmung der Strömung durch Fische spielt. Allerdings gibt es kaum Wissen über das Fischverhalten in turbulenter Strömung und auch keine anerkannten Berechnungsverfahren zur Beschreibung zeitabhängiger Strömungsprozesse. Im vorliegenden Forschungsprojekt werden solche Verfahren anhand hochaufgelöster Labormessungen (Particle Image Velocimetry, PIV) und numerischer Simulationen (Large Eddy Simulation, LES) entwickelt. Das gewonnene Wissen soll genutzt werden, um Ergebnisse aus Fischverhaltensuntersuchungen zu interpretieren. Langfristig sollen die Projektergebnisse dazu dienen, allgemeingültige Zusammenhänge zwischen zeitabhängigen Strömungsprozessen und dem Fischverhalten zu formulieren.

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

Im Zuge der Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie und der Änderung des Wasserhaushaltsgesetzes fällt die Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit und insbesondere des Fischaufstieges in den gesetzlichen Auftrag der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Im Hinblick auf die Dringlichkeit der Maßnahmen und die große Zahl von circa 250 durchgängig zu gestaltenden Stauanlagen besteht ein großer Bedarf an neuen Erkenntnissen und daraus abgeleiteten Bemessungskriterien für Fischaufstiegsanlagen an Bundeswasserstraßen. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts sollen Verfahren zur Parametrisierung zeitlich aufgelöster Strömungsfelder entwickelt werden, anhand derer die Fischbewegung interpretiert und vorhergesagt werden kann. Somit werden die Ergebnisse des Forschungsvorhabens an der zentralen Schnittstelle der BAW mit der

#### Auftragsnummer:

B3953.01.04.70008

#### Auftragsleitung:



Dr. Béla Sokoray-Varga  
 bela.sokoray-varga@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2022

Bundesanstalt für Gewässerkunde benötigt. Sie dienen der Vorbereitung und Auswertung der Versuche an den WSV-Pilotanlagen und in ethohydraulischen Modellen sowie der Entwicklung von Prognosemodellen, Bewertungsverfahren und Bemessungsgrundlagen für die Dimensionierung verschiedener FAA-Bauwerksteile.

### 3 Untersuchungsmethoden

Zur Beschreibung zeitabhängiger Strömungsprozesse müssen Daten in der für die Fische relevanten Skala gewonnen werden. Dazu werden maßstäbliche Versuche durchgeführt, in denen komplexe Strömungsmuster mittels PIV in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung vermessen werden. Mit den Ergebnissen wird, aufbauend auf bisherigen Untersuchungen (Sokoray-Varga 2016), die Parametrisierung zeitabhängiger Strömungsprozesse weiterentwickelt. Um unabhängig von aufwändigen gegenständlichen Versuchen zu sein, werden anhand der Messergebnisse numerische Methoden zur Vorhersage zeitabhängiger Strömungsprozesse, beispielsweise mittels LES, weiterentwickelt. Somit wird eine Übertragung der im Versuch gewonnenen Erkenntnisse auf weitere, komplexe Strömungssituationen, wie z. B. auf das Unterwasser von Wehr- bzw. Wasserkraftanlagen, ermöglicht. Zur Entwicklung von Thesen bezüglich des Zusammenhanges von Hydraulik und Fischverhalten sind Untersuchungen mit lebenden Fischen notwendig, in denen die Fischbewegung in Abhängigkeit von zeitabhängigen Strömungsprozessen erfasst werden kann. Langfristig dienen die Ergebnisse der Entwicklung von Vorhersage- und Verhaltensmodellen (z. B. Gisen 2018) und der Formulierung allgemeiner Zusammenhänge zwischen kohärenten, zeitlich aufgelösten Strömungsprozessen und dem Fischverhalten.

### 4 Ergebnisse

Für die Untersuchungen wurde ein PIV-Versuchsstand der BAW für Maßstabsmodelle umgebaut. Ethohydraulische Versuche zum Verhalten von Fischen beim Einstieg in die FAA (Bild 1), die durch Biologen der Bundesanstalt für Gewässerkunde an der BAW durchgeführt werden, sind momentan in der Auswertung. Die Ergebnisse werden genutzt, um anhand einfach zu messender hydraulischer Summenparameter, wie bspw. der Schwankung des Wasserspiegels, eine Abschätzung des Zusammenhanges von Strömungsschwankung und Fischverhalten vorzunehmen. Aufbauend auf dieser Auswertung werden Fischversuche geplant, während derer eine detaillierte Strömungserfassung erfolgen soll. Die Untersuchungen werden durch PIV-Messungen im Maßstabsmodell begleitet.

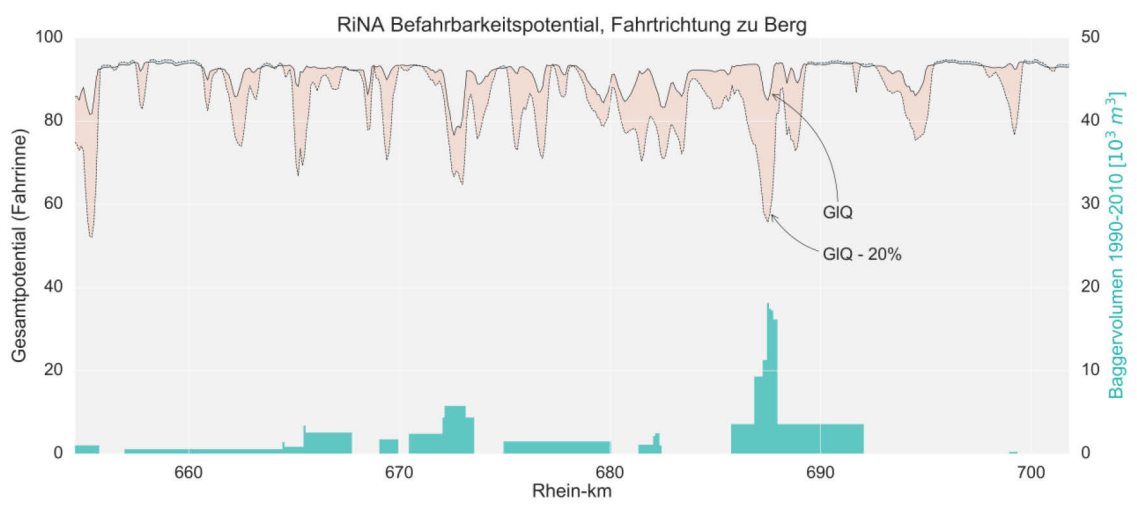


Bild 1: Aufbau des ethohydraulischen Versuchs zur Untersuchung von Fischen bei der Passage eines Schlitzes.

#### Literatur:

Gisen, D. C. (2018): Modeling upstream fish migration in small-scale using the Eulerian-Lagrangian-agent method (ELAM). Dissertation an der Universität der Bundeswehr München.

Sokoray-Varga, B. (2016): Detecting flow events in turbulent flow of vertical-slot fish passes. Dissertation am KIT, Karlsruhe.



## Betroffenheitsanalyse und Anpassungsoptionen für Binnenwasserstraßen zur Aufrechterhaltung eines wirtschaftlichen und konkurrenzfähigen Verkehrsträgers

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Bedingt durch den Klimawandel wird allgemein mit einer Zunahme extremer Witterungs- und Wettererscheinungen gerechnet. Damit einhergehend sind ausgeprägtere Niedrigwasserperioden, aber auch häufigere Starkregenereignisse und damit eventuell Flusshochwasser mit untypischen Verläufen zu erwarten. Beide Extrema haben direkte Folgen für die Binnenschifffahrt. Im Rahmen des Themenfelds 1 „Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen“ des BMVI-Expertennetzwerks wird das Projekt im Referat „Flussbau“ bearbeitet und setzt das Vorgängerprojekt KLIWAS – auch räumlich – fort. Dabei wird auf den Niederrhein aufgrund seiner verkehrlichen Bedeutung innerhalb des TEN-T-Korridors „Rhein-Alpen“ und seiner Ballungsräume mit Industriestandorten besonderes Augenmerk gelegt. Die Betroffenheit des Niederrheins in seiner Funktion als Wasserstraße durch den Klimawandel soll im Rahmen dieses Vorhabens beurteilt und durch entsprechende flussbauliche und/oder bewirtschaftende Maßnahmen minimiert werden.

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

Die potenziellen Folgen des Klimawandels haben direkte Auswirkungen auf die Nutzbarkeit sowie die Unterhaltung der Wasserstraßen und somit auf mittel- und langfristige Planungen der WSV. Mit den Arbeiten des Expertennetzwerks werden Methoden zur Einschätzung der klimawandelbedingten Gefährdung der Schifffahrt und die Ableitung von Anpassungsoptionen erarbeitet und pilothaft angewendet.

### 3 Untersuchungsmethoden

Ausgehend von Klimamodellen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) wird über Wasserhaushaltsmodelle der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) ein Ensemble an projizierten Ganglinien und Pegelkennwerten (GIQ, MQ, MHQ) bestimmt. Diese dienen als Randbedingungen für ein zweidimensionales

#### Auftragsnummer:

B3953.02.04.70006

#### Auftragsleitung:



Dr. Regina Patzwahl  
regina.patzwahl@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Linda Bergmann  
linda.bergmann@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2019

hydrodynamisch-numerisches Modell (Telemac-2D, Rhein-km 654,4 bis 852,0), welches räumlich differenzierte Aussagen über Wassertiefen zulässt und ein eindimensionales Feststofftransportmodell (1D-FTM, HEC-6T, Rhein-km 640,0 bis 867,0), das Abschätzungen über die langfristige und großräumige Sohlentwicklung erlaubt. Ergänzt werden die Berechnungen durch Einsatz des Befahrbarkeitsanalyse-Werkzeugs RiNA (Harlacher, 2016), das relevante hydraulische und weitere Parameter in ein integriertes Eigenschaftspotenzial überführt (siehe Titelbild).

Nach erfolgter Sensitivitätsanalyse bezüglich der Niedrigwasserabflüsse schließen sich Untersuchungen von besonders betroffenen Streckenabschnitten an. Ein prominentes Beispiel einer Fehlstelle, die schon heute zur Abladeeinschränkung und zu vermehrten Havarien führt, ist die Deutzer Platte (Rhein-km 687–688), eine immer wiederkehrende Mittelgrundbildung, verursacht durch Querschnittsaufweitung an zwei Hafeneinfahrten. Es fallen beträchtliche Baggermengen an (siehe Titelbild). Es ist wahrscheinlich, dass sich die Beeinträchtigungen durch die Fehlstelle in Zukunft verschärfen.

Für die instationären Untersuchungen mit dem Feststofftransportmodell und die Berechnung der Sohlentwicklung liegen derzeit vorläufige prognostizierte Ganglinien für eine „Nahe Zukunft“ und eine „Ferne Zukunft“ vor. Unterhaltungsbaggerungen werden im Modell zwischen Rhein-km 687 und 688 berücksichtigt. Die im Modell berechnete Sohldifferenz zwischen Start- und Endzeitpunkt wird in das 2D-HN-Modell eingebracht. Im Anschluss daran werden die hydraulischen Untersuchungen zur Ermittlung der Betroffenheit wiederholt. Die Bandbreite der möglichen Entwicklungen des Abflussgeschehens wird bei den Untersuchungen berücksichtigt, indem mit dem 2D-HN-Modell stationäre Simulationen mit unterschiedlichen Werten für den GIQ (von +5% bis –30% Änderung zum Zustand heute) durchgeführt werden.

#### 4 Ergebnisse

Bild 1 zeigt das Resultat des oben beschriebenen Arbeitsgangs. Links außen sieht man die berechnete Wassertiefe für den Istzustand. Mittig ist das Resultat für einen Modellzustand abgebildet, welcher die berechnete Sohlentwicklung für eine projizierte „Nahe Zukunft“ (30 Jahre) berücksichtigt. In der Berechnung rechts wurden zusätzlich zur Sohlentwicklung Unterhaltungsbaggerungen auf Fahrrinnensolltiefe, bezogen auf ein angepasstes Bezugsniveau (Rhein-km 687–688), durchgeführt. Die stationären hydraulischen Berechnungen wurden mit einem gegenüber dem  $GIQ_{20,2012}$  um 5% verringerten Abfluss durchgeführt.

Die Sohle im Bereich der Deutzer Platte höht sich unter Berücksichtigung der Sohlentwicklung gegenüber dem heutigen Zustand (Bild 1, links) auf, und die Fehlstelle ist sowohl in der Höhe als auch ihrer Ausdehnung nach ober- und unterstrom vergrößert (Bild 1, Mitte). Werden Unterhaltungsbaggerungen durchgeführt, ist die Situation nach unterstrom verbessert (Bild 1, rechts). Im Baggerbereich verfällt der Wasserspiegel im Modell um mehr als 10 cm, und dieser Verfall wirkt bis 10 km nach oberstrom. Nur durch Baggern ist der Fehlstelle im projizierten Zustand und mit reduziertem Abfluss nicht entgegenzuwirken. Baggern ist dann geeignet, wenn es der Beseitigung lokaler Fehlstellen dient und damit nicht relevant für die Entwicklung der Wasserspiegellagen ist. Weitere, den Querschnitt seitlich regulierende Maßnahmen sind erforderlich, um einen langfristigen Erhalt der Fahrrinntiefe zu ermöglichen.

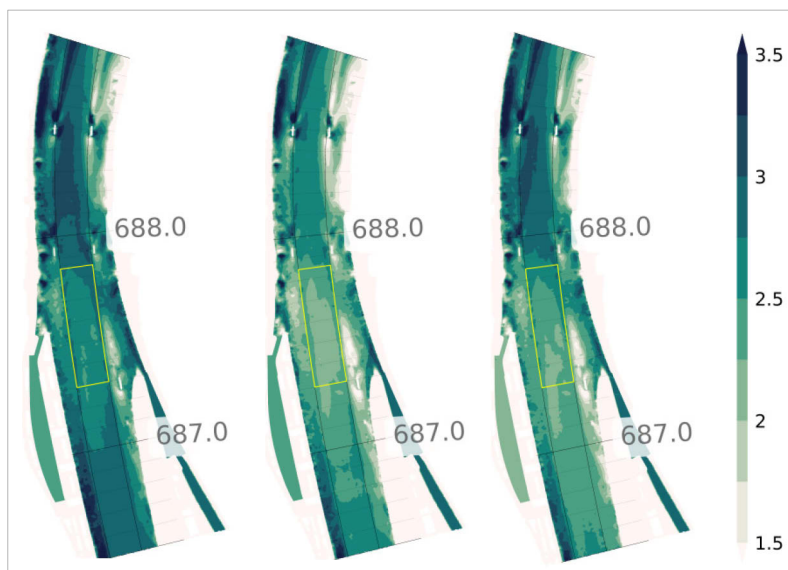


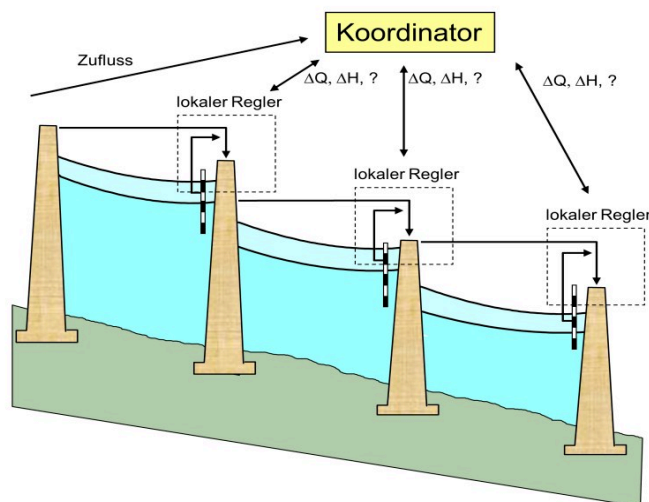
Bild 1: Vergleich der berechneten Wassertiefen für den Bereich der Deutzer Platte mit der Geometrie des heutigen Zustands und berechneter Sohlentwicklung (Modellkette 16, Quelle: BfG), Fließrichtung von unten nach oben. Links: Istzustand, Mitte: Projizierter Zustand ohne Baggern. Rechts: Projizierter Zustand mit Baggern.

#### Literatur:

Harlacher, D. (2016): Beurteilung, Bewertung und flächige Visualisierung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen. Dissertation, Universität Duisburg-Essen.

Roberts, M.; Promny, M. und Vollmer, S. (2014): Verkehrswasserbauliche Regelungs- und Anpassungsoptionen an klimabedingte Veränderungen des Abflussregimes. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.02. KLIWAS-44/2014. BfG, Koblenz.

Schröder, M. und Wurms, S. (2014): Verkehrswasserbauliche Regelungs- und Anpassungsoptionen an klimabedingte Veränderungen des Abflussregimes. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.03. KLIWAS-45/2014. BAW/BfG, Koblenz.



## Koordinierte Bewirtschaftung von Staustufenketten

### Modellierung und Betrieb

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die lokale OW/Q-Regelung einer einzelnen Stauhaltung ist Stand der Technik und arbeitet in der Regel zuverlässig. Diese Regelung ist im Rahmen des FuE-Vorhabens "Optimierungsverfahren für die Parametrisierung von Reglern der automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung (ASR)" analysiert worden. Die Ergebnisse wurden in den BAWMitteilungen 96 dokumentiert.

Das aktuelle FuE-Projekt konzentriert sich auf eine Kette von Stauhaltungen, deren Betrieb gegenüber einer rein lokalen Regelung dann verbessert werden kann, wenn die lokalen Regler in vorgegebenen Grenzen „richtig (vor)gesteuert“ werden. Der BAW ist kein allgemeingültiges Verfahren bekannt, mit dem Ketten von Staustufen koordiniert bewirtschaftet werden können.

Die Verbesserung der Bewirtschaftung einer Stauhaltungskette erfordert Eingriffe auch auf der Ebene der lokalen OW/Q-Regelung. Daraus resultieren die Fragen, wie sicher diese Algorithmen auf eine echtzeitfähige Zielplattform einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) übertragen werden können und mit welchem Aufwand dies verbunden ist.

Ziele sind die Entwicklung eines allgemeingültigen Ansatzes einer koordinierten Bewirtschaftung von Stauhaltungsketten, die Portierung des Ansatzes auf eine SPS und die Implementierung vor Ort.

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

Die Entwicklung eines Verfahrens zur standardisierten und optimierten Bewirtschaftung von Stauhaltungsketten bietet zahlreiche Vorteile für den Betrieb von staugeregelten Wasserstraßen, da der zunächst am Beispiel der Mosel entwickelte Ansatz auf andere Stauketten übertragen werden kann. Vorteile einer koordinierten Bewirtschaftung sind eine Abflussvergleichmäßigung, ein Ausgleich von Defiziten und Störungen, beispielsweise durch Pumpspeicherbetrieb oder Mischwassereinleitungen, und eine bessere Beherrschung extremer Wetterereignisse. Im Hinblick auf eine zukünftige

#### Projekt-Nr.:

B3953.03.04.70003

#### Auftragsleitung:



Dr. Peter Schmitt-Heiderich  
 peter.schmitt-  
 heiderich@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Dr. Eckhard Arnold  
 eckhard.arnold@isys.uni-  
 stuttgart.de

#### Laufzeit:

10/2012 bis 12/2019



Zentralwarte, die eine Stauhaltungskette mit einem begrenzten personellen Aufwand führen soll, stellt eine koordinierte Bewirtschaftung die dafür notwendigen Informationen bereit.

### 3 Untersuchungsmethoden

Die Umsetzung der koordinierten Bewirtschaftung ist an der Mosel und zu einem späteren Zeitpunkt an Neckar und Saar vorgesehen. Die Bearbeitung erfordert ein vertieftes Wissen zu partiellen Differentialgleichungen im Zusammenspiel mit der Regelung und der Optimierung gekoppelter Systeme. Die Regelungstechnik spricht bei Regelstrecken, deren Verhalten durch partielle Differentialgleichungen beschrieben wird, von Strecken mit verteilten Parametern. Die Regelung von Strecken mit verteilten Parametern ist ein aktuelles Forschungsgebiet an den Universitäten. Das dafür notwendige Spezialwissen ist am Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart (Prof. Sawodny) vorhanden. Das Institut wurde über einen FuE-Kooperationsvertrag mit der Entwicklung eines allgemeingültigen Algorithmus zur koordinierten Bewirtschaftung von Stauhaltungsketten beauftragt.

### 4 Ergebnisse

Die theoretischen Untersuchungen der Universität Stuttgart zeigen, dass mit einer modell-prädiktiven Regelung (MPC) die Wasserstände gut geführt und die Abflüsse über die nutzbaren Speicherlamellen gleichmäßig abgegeben werden. Eine MPC setzt sich aus einem linearisierten Modell der Stauhaltung und einem Optimierungsalgorithmus zusammen. Diese Regelung kann innerhalb der Staustufenkette für eine einzelne Stauhaltung zentral oder dezentral implementiert werden. Eine dezentrale Implementierung der MPC erfordert für die Prognoserechnungen einen Datenaustausch mit den benachbarten Stauhaltungen. Die technischen Voraussetzungen hierfür sind gegeben. Daher wird an der Mosel der MPC-Softwareteil des Koordinators dezentral, d. h. auf jeder Staustufe, vorgehalten.

Neben der Verteilung der Rechenlast ergeben sich damit einige Vorteile. Beispielsweise ist die Inbetriebnahme für einzelne Stauhaltungen möglich und eine Stauhaltungskette kann schrittweise zu einer koordinierten Bewirtschaftung überführt werden. Dies erhöht die Sicherheit des Betriebs der koordinierten Bewirtschaftung im Zusammenspiel mit der lokalen OW/Q-Regelung. Die Vergleichmäßigung des Abflusses erfolgt dann nur in den Stauhaltungen, deren MPC aktiv ist. Außerdem stehen die Parameter des Koordinators, vorrangig die der MPC, im Bezug zur Stauhaltung, die koordiniert bewirtschaftet wird. Durch die lokale Implementierung der MPC reduzieren sich die Gefahren einer Verwechslung von Parametersätzen und einer Fehlbedienung. Schließlich betrifft der Ausfall einer MPC nur eine einzelne Stauhaltung. Die Abflussprognose der betroffenen Stauhaltung ist dann in geeigneter Weise durch zeitversetzte Prognoserechnung oberhalb liegender Staustufen zu ersetzen, da die Prognose von der nachfolgenden, koordiniert bewirtschafteten Staustufe benötigt wird.

Die Umsetzung vor Ort erfolgt für einen Testbetrieb an der Moselstaustufe in Detzem. Der MPC-Softwareteil ist implementiert und läuft in Echtzeit mit. Erste Funktionstests verliefen erfolgreich. Die Softwarekomponenten der MPC liegen der BAW vor und werden bereits genutzt, um für die Mosel die MPC zu entwickeln und anzupassen. Für die fünf Stauhaltungen der Mosel von Palzem bis Zeltingen zeigt die rote Linie in Bild 1 die deutlich dämpfende Wirkung der MPC gegenüber der OW/Q-Regelung (Pranner et al. 2019).

Das FuE-Vorhaben soll mit Vorlage der Dissertation von U. Amann zum Jahresende 2019 abgeschlossen werden.

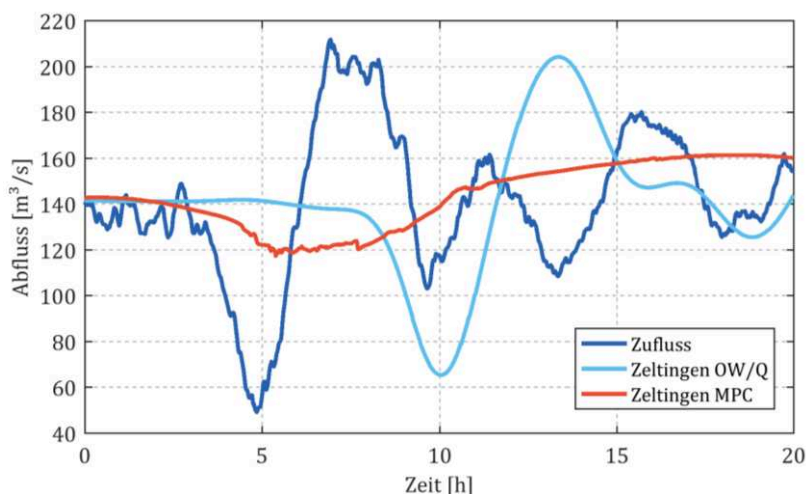
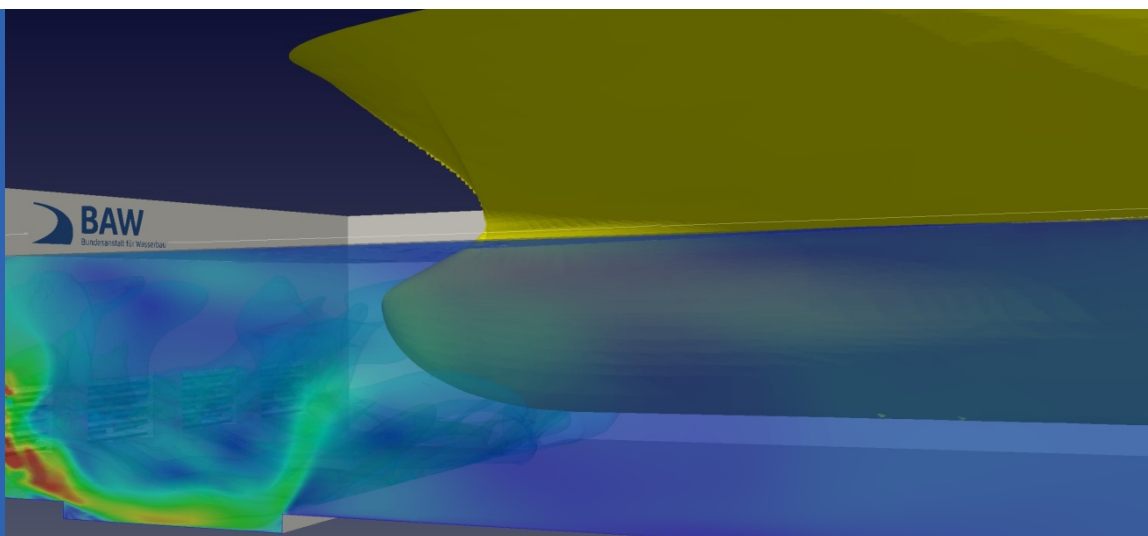


Bild 1: Vergleich von OW/Q-Regelung und MPC für die obere Mosel von Palzem bis Zeltingen.

#### Literatur:

Pranner, G.; Simons, F.; Schmitt-Heiderich, P.; Amann, K.-U. (2019): Verwendung moderner Regelungsmethoden in der Bewirtschaftung von Stauhaltungsketten am Beispiel der Mosel. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Hydraulik der Wasserbauwerke – Neues aus Praxis und Forschung. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 79–84.



## Entwicklung von Verfahrensweisen zur Simulation bewegter Objekte mit OpenFOAM®

### 3D-numerische Simulation von Schleusungsprozessen

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die numerische Simulation, insbesondere unter Verwendung dreidimensionaler Verfahren, ist ein wertvolles Werkzeug, das detaillierte Einblicke in Strömungsvorgänge und strömungsmechanische Wechselwirkungen im Bauwerksnahfeld ermöglicht. Im Rahmen der Auftragsarbeit treten immer wieder Fragestellungen auf, bei denen bewegte Objekte eine wesentliche Rolle spielen und signifikanten Einfluss auf das Simulationsergebnis haben.

Die Simulation der Schleusung eines Schiffes ist ein Beispiel, das stellvertretend für die Schwierigkeiten bei der Modellierung bewegter Objekte steht. Der große Bewegungsumfang des schwimmenden Schiffes bei gleichzeitig sehr geringem Abstand zu statischen Umrandungen und die Querschnittsfreigabe an Verschlüssen erweisen sich als Herausforderungen des Modellierungsprozesses. Aus diesem Grund werden zur Berücksichtigung wasserbaulich relevanter Objektbewegungen individuelle Modellierungskonzepte benötigt.

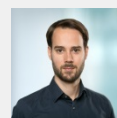
#### 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)

Beim Entwurf von Schleusen werden kurze Schleusungszeiten bei gleichzeitig geringen hydraulischen Krafteinwirkungen auf das zu schleusende Schiff durch eine optimierte Füllstrategie erreicht. Bislang wurden entsprechende Schützfahrpläne sowie die resultierenden Schiffskräfte meist mit gegenständlichen Modellen ermittelt. Der Modellaufbau setzt dabei einen hohen zeitlichen und personellen Aufwand voraus, während die Durchführung der eigentlichen Messkampagne vergleichsweise wenig Zeit in Anspruch nimmt. Die Entwicklung geeigneter numerischer Methoden soll es mittelfristig ermöglichen, derartige Problemstellungen auch mit numerischen Modellen zu bearbeiten. Der Aufwand für den Modellaufbau und der Aufwand für die Durchführung der Berechnungen verhalten sich hierbei entgegengesetzt. Ein großer Vorteil besteht bei den numerischen Modellen in der leichten Auswertbarkeit der Strömungsdaten an beliebigen Stellen des Modells. Dies ist, wenn überhaupt, bei gegenständlichen Modellen nur mit sehr großen Messanstrengungen zu realisieren. Numerische und gegenständliche Modelle

#### Auftragsnummer:

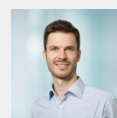
B3953.03.04.70004

#### Auftragsleitung:



Fabian Belzner  
fabian.belzner@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Torsten Hartung  
torsten.hartung@baw.de

#### Laufzeit:

2014 bis 2021

können dann entweder zeitgleich, z. B. für hybride Modellierungsansätze, oder unabhängig voneinander genutzt werden. Der Auftragsbearbeiter wird dadurch in die Lage versetzt, für jede Fragestellung und zu jedem Zeitpunkt die geeignetste Untersuchungsmethode zu wählen, wodurch die Effizienz und Qualität der Gesamtbearbeitung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) gesteigert werden.

### 3 Untersuchungsmethoden

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) verwendet das Open-Source-Verfahren OpenFOAM® für die dreidimensionale numerische Strömungssimulation. Die Open-Source-Umgebung ermöglicht die Anpassung der auf der Finiten-Volumen-Methode basierenden Löser an die individuellen Anforderungen des Anwenders. Die Abbildung der freien Oberfläche wird mit dem Volume-of-Fluid-Ansatz realisiert. Zur Berücksichtigung von Starrkörperbewegungen existieren unterschiedliche Methoden, die sich einerseits in Bezug auf die Komplexität, andererseits hinsichtlich des realisierbaren Bewegungsumfangs unterscheiden und jeweils individuelle Vor- und Nachteile aufweisen. Für die Modellierung eines Schleusungsprozesses wurde in diesem Vorhaben zunächst die Deforming-Mesh-Methode herangezogen und im Verlauf mit zwei weiteren Werkzeugen der dynamischen Gitterbehandlung kombiniert. Weiterhin werden auch konkurrierende Ansätze wie die Overset-Mesh- und die Immersed-Boundary-Methode betrachtet. Diese ermöglichen hinsichtlich der Objektbewegung eine größere Flexibilität, weisen jedoch Einschränkungen in der Genauigkeit auf. Zur Validierung der numerischen Ergebnisse werden gegenständliche Modelle genutzt, wobei der Fokus auf der Bestimmung der Füllvolumenströme und der resultierenden Schiffskräfte liegt.

### 4 Ergebnisse

Alle oben genannten Methoden wurden im Hinblick auf ihre Eignung für die Auftragsarbeit der BAW getestet. Dabei lagen die Schwerpunkte auf der Simulation von Schleusenfüllprozessen und auf der Betrachtung von abstrahierten Funktionsmodellen, um die generelle Funktionsweise der einzelnen Methoden beurteilen zu können. Es zeigte sich, dass die Deforming-Mesh-Methode zur Simulation von Schleusenfüllprozessen bei kleinen Hubhöhen geeignet ist. Der entwickelte Workflow ermöglicht es dem Auftragsbearbeiter, solche Simulationen durchzuführen. Das Einfügen ganzer Zellschichten während der Laufzeit im Zusammenspiel mit einem Sliding Interface erweitert die Anwendbarkeit der Deforming-Mesh-Methode auch für Schleusen mit großer Hubhöhe. Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen zeigten jedoch, dass diese methodische Erweiterung aufgrund des deutlich erhöhten Komplexitätsgrades sehr fehleranfällig und damit für die Auftragsarbeit ungeeignet ist. Weiterhin wurde die Overset-Mesh-Methode betrachtet, bei der das bewegte Objekt mit einem eigenen, körperangepassten Gitter diskretisiert wird, das sich relativ zu einem Hintergrundgitter bewegen kann. Tests zeigten, dass die Simulation bewegter Objekte mit dieser Methode zwar möglich, die Methode in der verwendeten OpenFOAM-Implementierung aber nicht massenkonservativ ist. Bei der Immersed-Boundary-Methode werden diejenigen Zellen des Berechnungsgitters, die von (sich bewegenden) Festkörpern blockiert werden, mit einer Randbedingung versehen, sodass keine Durchströmung dieser Zellen mehr möglich ist. Erste Tests dieser Methode verdeutlichten, dass Entwicklungsbedarf im Hinblick auf die Massenerhaltung, die automatische Gitterverfeinerung im Bereich der Geometrie und die dynamische Verteilung der Rechenlast (Load Balancing) besteht. Diese Entwicklungen wurden zusammen mit der Firma WIKKI Ltd. durchgeführt und sind weitgehend abgeschlossen. Momentan wird mit ausgewählten Testbeispielen die Funktionsfähigkeit der Entwicklung im Hinblick auf spezifische Fragestellungen geprüft. Die Güte der Immersed-Boundary-Methode soll anschließend durch einen Vergleich der errechneten Schiffskräfte mit den in einem hierfür erstellten Labormodell ermittelten Schiffskräften beurteilt werden.

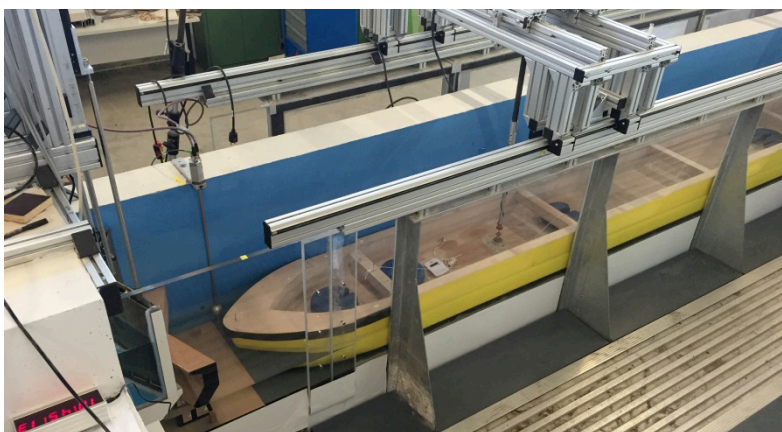


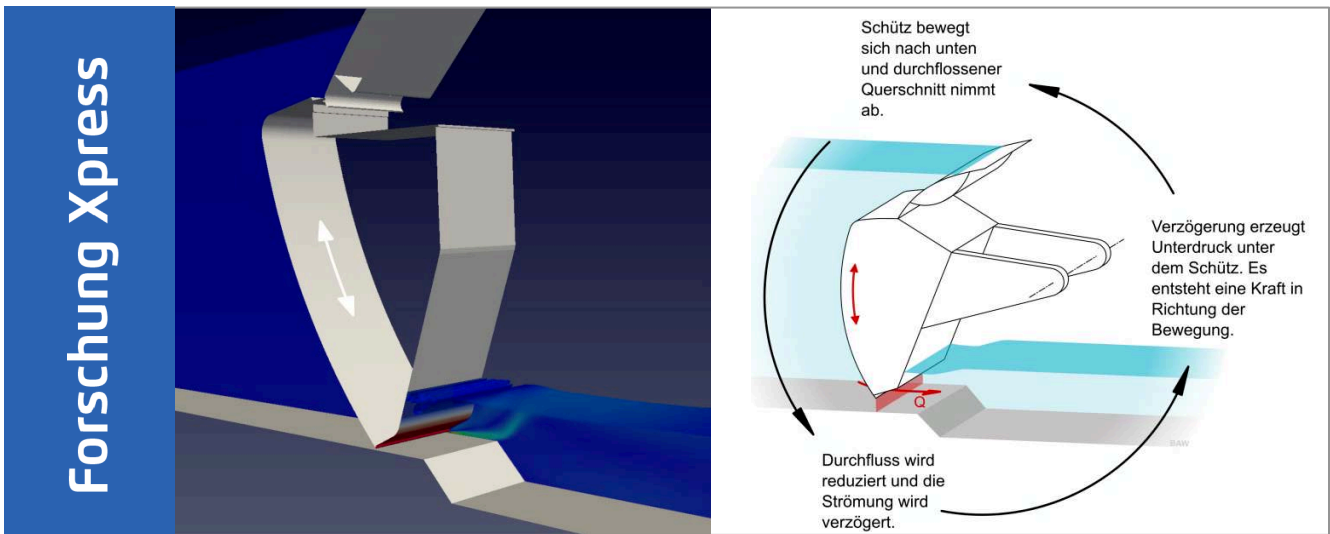
Bild 1: Gegenständliches Schleusenmodell zur Validierung numerischer Simulationsergebnisse.

#### Literatur:

Thorenz, C.; Belzner, F.; Hartung, T.; Schulze, L. (2017): Numerische Methoden zur Simulation von Schleusenfüllprozessen. In: BAW (Hg.): BAWMitteilungen 100. Karlsruhe: BAW, S. 91–108.

Hartung, T.; Schulze, L.; Belzner, F.; Thorenz, C. (2017): Einbindung bewegter Objekte in die dreidimensionale numerische Modellierung von Schleusenprozessen. In: Jensen, J. (Hg.): Mitteilungen des Forschungsinstituts Wasser und Umwelt der Universität Siegen. 19. Treffen junger WissenschaftlerInnen deutschsprachiger Wasserbauinstitute. Siegen: fwu, S. 57–60.

Jasak, Hrvoje (2018): Immersed Boundary Surface Method foam-extend. In: BAW (Hg.): BAW-Workshop OpenFOAM® in Hydraulic Engineering. Karlsruhe: BAW. S. 9–10.



## Fluid-Struktur-Wechselwirkung im Stahlwasserbau

### Ursachen, Auswirkungen und Abhilfemaßnahmen bei strömungsinduzierten Schwingungen

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Strömungsinduzierte Schwingungen treten dann auf, wenn elastische oder elastisch gelagerte Körper derart umströmt werden, dass zeitliche oder örtliche Druckschwankungen in der Strömung anfachende Kräfte verursachen. Dabei können Dichtungen oder Teile von Verschlussorganen an Wehren und Schleusen betroffen sein. Im ungünstigsten Fall wird das gesamte Verschlussorgan zu Schwingungen angeregt. Das Forschungsvorhaben wird von Experten aus den Bereichen Stahlwasserbau, Strömungs- und Strukturmechanik sowie aus der Messtechnik bearbeitet. Ziel ist es, Ursachen und Mechanismen der strömungsinduzierten Schwingungen besser zu verstehen, bekannte Abhilfemaßnahmen zu prüfen und wo erforderlich, neue Konstruktionsempfehlungen zu entwickeln. Dabei kommen insbesondere In-Situ-Messmethoden und numerische Werkzeuge zur Simulation von Fluid-Struktur-Wechselwirkung zum Einsatz.

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

Durch die Vielfalt an Verschlüssen und Wasserbauwerken an den deutschen Wasserstraßen sind auch die Schwingungserscheinungen entsprechend unterschiedlich. Betroffen sind Wehranlagen und Verschlüsse an Schleusen, wobei Schwingungen sowohl im Bestand wie auch an Neubauten auftreten. Im Bestand werden häufig individuelle betriebliche Lösungen angewendet. Ein Beispiel dafür sind Schützfahrpläne, in denen vorgegeben ist, welche kritischen Öffnungsweiten zu meiden und entsprechend zu durchfahren sind. Derartige Schützfahrpläne können auch bei automatisierten Anlagen umgesetzt werden. Daher ist es wichtig, die Betriebszustände zu kennen, in denen Schwingungen auftreten können. Idealerweise wird durch geometrische Veränderungen oder konstruktive Maßnahmen sichergestellt, dass in keinem Betriebszustand Schwingungen auftreten.

#### Auftragsnummer:

B3953.03.04.70006

#### Auftragsleitung:



Dr. Michael Gebhardt  
 michael.gebhardt@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Georg Göbel  
 georg.goebel@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2022

### 3 Untersuchungsmethoden

Mittels In-Situ-Messungen können charakteristische Größen einer Schwingung wie Amplitude und Frequenz, aber auch relevante Betriebszustände wie Öffnungsweite, Abfluss und Wasserstände bestimmt werden. Die Schwingungssignale geben Aufschluss über die mechanische Schwingung, allerdings sind die Ursachen vor Ort nur sehr schwer zu identifizieren. Druckänderungen können zwar mit entsprechenden Sensoren gemessen, schwankende Abflüsse und transiente Fließgeschwindigkeiten aber nicht bestimmt werden. Mit den Messdaten können jedoch numerische Modelle kalibriert werden, um diese für weitere Untersuchungen zu verwenden.

Hierbei werden mit der Software OpenFOAM die Strömung mit freiem Wasserspiegel und die Festkörperbewegung des Schützes gekoppelt simuliert. Damit können das transiente Strömungsverhalten im Nahfeld von schwingenden Wehren analysiert und schwingungsanregende Mechanismen erkannt werden. Die Berücksichtigung der Festkörperbewegung ist entscheidend bei der Untersuchung von sogenannten selbsterregten Schwingungen, wie sie im Wasserbau häufig vorkommen. Eine Untersuchung mit statischer Berandung gibt nicht ausreichend Auskunft über den anregenden Mechanismus. Zur Reduzierung des immensen Rechenaufwandes, der bei voller numerischer Kopplung von Strömung und Festkörperbewegung auftritt, wird die Untersuchung dahingehend vereinfacht, dass die Bewegung des Festkörpers mit bekannter Amplitude und Frequenz vorgeschrieben wird. Zur Quantifizierung des Schwingungsrisikos werden dann die schwingungsanregenden Kräfte in der Strömung ausgewertet und die Arbeit bestimmt, die dabei verrichtet wird.

### 4 Ergebnisse

Die Methode wurde an einer Wehranlage mit unterströmten Segmentschützen an der französischen Mosel sowie am Weserwehr in Dörverden angewendet. Da die Bestimmung der verrichteten Arbeit am Prototyp praktisch unmöglich ist, wurde zur Verifizierung des numerischen Modells der Druck unter dem Hohlkasten verwendet. Bild 1 zeigt eine gute Übereinstimmung des Druckes am Prototyp und im numerischen Modell.

Die Methode wurde bisher erfolgreich bei der Bewertung der Schwingungsgefahr von bestehenden Wehrverschlüssen eingesetzt. So konnte für ein Hubschütz an der Weser gezeigt werden, dass im Regelbetrieb keine Schwingungen auftreten, sondern nur bei niedrigen Abflüssen und kleinen Öffnungsweiten. Niedrige Abflüsse werden im Regelbetrieb über die Klappen abgeführt und das Schütz nur bei Hochwasser gezogen.

Für ein neu in Betrieb genommenes Drucksegment an der französischen Mosel, welches bei kleinen Öffnungsweiten über ein breites Abflussspektrum starke Schwingungen aufwies, konnte eine neue Konstruktion der Schützunterkante getestet werden, welche in der Simulation über das gesamte Abfluss- und Öffnungsspektrum schwingungsfrei war.

Die Simulationen werden in der Regel durch umfangreiche Messkampagnen am Prototyp ergänzt, um einerseits die erforderlichen Eingangsgrößen für das numerische Modell zu ermitteln und andererseits die Simulationsergebnisse zu validieren. Neben den Untersuchungen am Prototyp ist perspektivisch geplant, die Methode bereits in der Entwurfsphase anzuwenden, um die Konstruktion unter den späteren Randbedingungen des Standortes bewerten und gegebenenfalls verbessern zu können.

Neben Schwingungen von Wehrverschlüssen am Neckar und an der Mosel wurden mehrere Dichtungsschwingungen untersucht und analysiert. Diese Problematik ist meist auf veraltete Dichtungssysteme, mangelnde Ausführung oder Unterhaltung zurückzuführen.

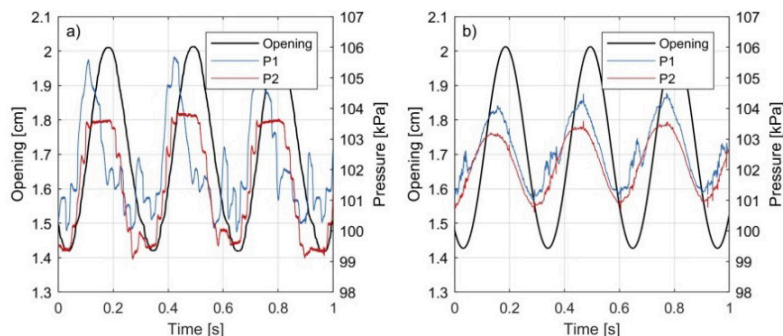


Bild 1: Druckschwankung unter dem Hohlkasten eines schwingenden Segmentschützes – Ergebnisse der Naturmessung (links) und der Simulation (rechts).

#### Literatur:

Göbel, G.; Gebhardt, M.; Deutscher, M.; Metz, W. (2019): Untersuchung strömungsinduzierter Schwingungen am Beispiel eines unterströmten Segment-schützes. In: BAW (Hg.): Hydraulik der Wasserbauwerke – Neues aus Praxis und Forschung. Karlsruhe: BAW. S. 91–96.

Göbel, G.; Gebhardt, M.; Deutscher, M.; Metz, W.; Thorenz, C. (2019): Numerical simulation of flow-induced vibrations on gates with underflow. Artikel in Vorbereitung.

Göbel, G.; Gebhardt, M.; Deutscher, M.; Metz, W.; Thorenz, C. (2018): Numerical and Physical Study on Seal Vibrations at Hydraulic Gates. In: Proceedings of the 7th International Symposium on Hydraulic Structures. Aachen, 15–18 May, 2018.

Göbel, G.; Gebhardt, M.; Metz, W.; Deutscher, M. (2017): Numerische Modellierung zur Untersuchung strömungsinduzierter Schwingungen im Stahlwasserbau. In: BAW (Hg.): Wasserbauliche Herausforderungen an den Binnenschiffahrtsstraßen. Karlsruhe: BAW. S. 17–22.



## Aktualisierung der Kriterien für die hydraulische Bemessung von Schleusen

### Analyse und Optimierung von Schleusen

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die heute angewandten Kriterien für die hydraulische Bemessung und den Betrieb von Schleusen im Binnen- und Seebereich basieren größtenteils auf jahrzehntealten Erfahrungswerten (z. B. zusammengefasst in Partenscky 1986). Für diese Bemessungskriterien fehlt oftmals eine aktuelle wissenschaftliche Basis oder die maßgebenden Rahmenbedingungen haben sich geändert. Durch den Austausch im internationalen Umfeld (s. a. PIANC-Report 155) zeigte sich bereits, dass sich die Bemessungskriterien der BAW und der an Deutschland angrenzenden Staaten trotz grenzüberschreitenden Schiffsverkehrs unterscheiden. Mit den Wirtschaftlichkeits- und Standardisierungsbemühungen in der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) erfolgt ein Paradigmenwechsel, der von sehr leistungsfähigen, aber aufwändigen Füllsystemen zu deutlich vereinfachten Füllsystemen führt. Die Standardisierungslösung sieht beispielsweise für Schleusen von bis zu 10 m Hubhöhe ein reines Vorkopffüllsystem vor, während hierfür früher oftmals ein Längskanalsystem gewählt wurde. Eine Verringerung der Leistungsfähigkeit wird dabei in Kauf genommen, um die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt weiterhin garantieren zu können.

Jüngste Untersuchungen der Schleusen am Nord-Ostsee-Kanal und am Neckar zeigen, dass durch minimale bauliche Anpassungen oder eine optimierte Füllstrategie auch Schleusen mit stark vereinfachten Füllsystemen sicher und ausreichend schnell betrieben werden können. Oftmals ist jedoch nicht klar, welche Bemessungskriterien maßgebend sind und in welchen Bewertungskontext diese zueinander zu bringen sind, um den Anforderungen an die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt in ausreichendem Maße gerecht zu werden. So muss bspw. beim Schleusen-Nothalt abgewogen werden, ob hohe Schiffskräfte durch einen schnellen Schleusenhalt oder eine hohe Restwasserspiegeländerung durch einen langsameren Schleusenhalt in Kauf genommen werden sollten. Welcher Effekt die größere Gefährdung darstellt und damit primär vermieden werden muss, ist bisher nicht definiert. Weiterhin bestehen maschinenbauliche, stahlwasserbauliche und steuerungstechnische Zwangsbedingungen, die in diesem Kontext bislang kaum

#### Auftragsnummer:

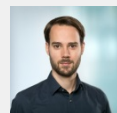
B3953.03.04.70007

#### Auftragsleitung:



Dr. Lydia Schulze  
 lydia.schulze@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Fabian Belzner  
 fabian.belzner@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2020

berücksichtigt wurden. So können bspw. für den Füllprozess optimierte Schützfahrpläne ungünstig sein, wenn dabei Schwingungen an den Schützen auftreten, die den Stahlwasserbau langfristig schädigen oder wenn Schützgeschwindigkeiten gefordert werden, die in der Antriebstechnik nicht umsetzbar sind.

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

Die Überprüfung und Aktualisierung der hydraulischen Bemessungskriterien für Schleusen führen zu einer fundierten fachwissenschaftlichen Grundlage für künftige Planungen. Die geplante Strategie ermöglicht eine einheitliche Bewertung und Risikoabschätzung, mit deren Hilfe in Zukunft vereinfachte Füllsysteme geplant, optimiert und effizient betrieben werden können. Auch bestehende Bauwerke können überprüft und gegebenenfalls durch Anpassung der Betriebsfahrpläne effizienter betrieben werden. Durch die planmäßige Vermeidung kritischer Systemzustände wird die Zuverlässigkeit und Sicherheit in bestehenden und geplanten Schleusen erhöht.

## 3 Untersuchungsmethoden

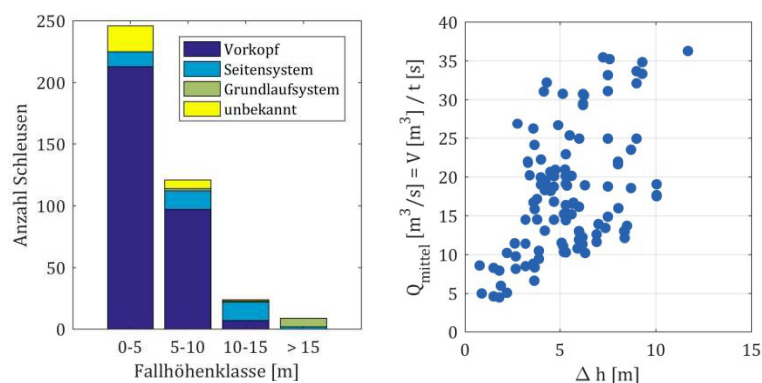
Zunächst wird mit statistischen und empirischen Methoden der Ist-Zustand an den Bundeswasserstraßen erfasst. Dabei werden bislang nicht systematisch erfasste Daten gewonnen und daraus bestehende Optimierungspotentiale bezüglich der Sicherheit und Leistungsfähigkeit der Bauwerke abgeleitet. Eine vergleichende statistische Auswertung der technischen Daten bestehender Bauwerke zeigt Unterschiede in der Betriebsweise ähnlicher Schleusen auf. Damit werden schon heute sehr effiziente Bauwerke identifiziert, die als Prototyp für die Optimierung zukünftiger Bauvorhaben dienen können.

Mit ein- und mehrdimensionalen Modellen können die Füllzeit und die wirkenden Schiffskräfte während des Füllvorgangs abgeschätzt und gegebenenfalls vorausgesagt werden. In Kombination mit zu entwickelnden Optimierungsverfahren kann der Schleusungsvorgang in Abhängigkeit volatiler externer Randbedingungen, wie z. B. zu schleusendem Schiffstyp oder aktueller Hubhöhe, sicherer und effizienter gestaltet werden. Ebenso könnte bei Bedarf ein erhöhtes Sicherheitsniveau geschaffen werden, um den besonderen Anforderungen von z. B. Gefahrguttransporten gerecht zu werden.

## 4 Ergebnisse

Heute verfügen etwa 73 % der Schleusen an den Bundeswasserstraßen über ein Vorkopf-Füllsystem (siehe Bild 1 links). Ein direkter Vergleich der Zuflussvolumenströme zeigt, dass auch Schleusen unter ähnlichen Randbedingungen unterschiedlich schnell befüllt werden. Die mittleren Zuflussvolumenströme von Schleusen ähnlicher Bauart und gleicher Fallhöhe unterscheiden sich teilweise um den Faktor drei. Schleusen, deren Füllprozess stark von der Norm abweicht, konnten so identifiziert werden (siehe Bild 1, rechts).

Aus den Schleusen an den Bundeswasserstraßen wurden diejenigen identifiziert, die innerhalb ihrer Fallhöhenklasse durch vergleichsweise schnelle oder langsame Befüllzeiten herausstechen. Für diese werden gegenwärtig Interviews mit den Schichtleitungen durchgeführt, um herauszufinden, warum diese Schleusen vom Durchschnitt abweichen. Erste Ergebnisse zeigen, dass auch an Schleusen mit besonders kurzen Füllzeiten in der Vergangenheit keine Unfälle während des Befüllvorgangs zu verzeichnen waren. Selten auftretende Trossenbrüche werden meist durch Fehlbenutzung der Trosse beim Festmachen vor dem Füllvorgang verursacht. Eine Betrachtung der aktuellen Normung zeigt, dass die Bemessungsvorschriften für Festmachtetrossen im Sinne eines semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts neu betrachtet werden müssen.



### Literatur:

InCom Working Group 155 (2015): Ship Behaviour in Locks and Lock Approaches. PIANC Report 155. PIANC Brussels.

Partenscky (1986): Binnenverkehrswasserbau Schleusenanlagen. Heidelberg: Springer.

Bild 1: links: An den Bundeswasserstraßen vorhandene Fallhöhen und Füllsysteme, rechts: Mittlere Zuflussvolumenströme der Schleusen mit Vorkopf-Füllsystem in Abhängigkeit der Fallhöhe.



## Einwirkung des Propellerstrahls auf die Gewässersohle

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Schiffspropeller erzeugen hochturbulente Strahlen, die zu einer starken Beanspruchung der Gewässersohle und des Ufers von Wasserstraßen und zu Erosionserscheinungen führen können. Die durch den Schraubenstrahl induzierte Sohlenbelastung ist ein sehr komplexer Vorgang. Eine analytische Berechnung von Schraubenkolken bzw. Sohlensicherungen für den Erosionsschutz setzt hinreichend genaue Kenntnisse über die Strahlausbreitung und deren Wechselwirkung mit dem Sohl sediment voraus. Unsicherheiten bei der Anwendung vorhandener Verfahren zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen bei Propulsionsströmungen gaben Anlass dazu, den vorhandenen Kenntnisstand grundlegend aufzuarbeiten. Die Analyse führte zu neuen Berechnungsansätzen für die zeitliche Entwicklung lokaler Schraubenkolke und die Endkolkentiefe, mit denen die maximalen Kolk-tiefen mit einer höheren Genauigkeit und in einem größeren Gültigkeitsbereich als mit bisherigen Ansätzen prognostiziert werden können. Forschungsbedarf zeigte sich allerdings bei der Berücksichtigung des Einflusses von Schiffsantrieb, Heckform und Rudergestaltung auf die Strahlausbreitung, die sohn-nahen Strömungsgeschwindigkeiten und die zeitliche Kolkentwicklung in unterschiedlichen Sohlenmaterialien. Die bestehenden Unsicherheiten sollten durch systematische hydraulische Laboruntersuchungen minimiert werden.

Die Durchführung der experimentellen Untersuchungen zur Kolkbildung und Schraubenstrahlhydraulik erfolgte im Rahmen eines FuE-Vertrages durch das Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI) der TU Braunschweig mit dem Modell eines modernen und stark motorisierten Großmotorgüterschiffs (GMS) im Maßstab 1:16. Da die größten Auswirkungen des Propellerstrahls bei Manövern und Beschleunigungsvorgängen von Schiffen zu erwarten sind, berücksichtigten die Untersuchungen diese Fahrtzustände. Durch die Projektbearbeitung sollen die vorhandenen analytischen Berechnungsansätze für die schraubenstrahlinduzierte Sohlenerosion und die Bemessung von Deckwerken unter Berücksichtigung der Propeller- und Ruderanordnung überprüft und verifiziert oder verbessert bzw. neue geeignete Berechnungsansätze entwickelt werden.

#### Auftragsnummer:

B3953.04.04.10038

#### Auftragsleitung:



Detlef Spitzer

detlef.spitzer@baw.de

#### Laufzeit:

2006 bis 2020



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

Die Untersuchungen tragen dazu bei, die Zuverlässigkeit von bestehenden Berechnungsverfahren zum Einfluss von Schraubenstrahlen auf die Sohlenerosion zu erhöhen und dadurch die Bewertung der Erosionssicherheit von Gewässersohlen zu erleichtern. Die Ergebnisse finden Eingang in die von der BAW herausgegebenen und fortwährend aktualisierten "Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen" (GBB) sowie in die darauf aufbauende Software GBBSoft+, die 2008 im Geschäftsbereich der WSV eingeführt wurde.

## 3 Untersuchungsmethoden

Der Schwerpunkt der Bearbeitung lag auf der Durchführung von experimentellen Untersuchungen im LWI. Zuvor wurden in der Literatur verfügbare Messdaten aus Modell- und Naturversuchen für vergleichende Untersuchungen in einer Datenbank zusammengetragen und auf Plausibilität geprüft. Im Weiteren wurden allgemein anwendbare empirische Zusammenhänge für das Ausbreitungs- und Erosionsverhalten von Propellerstrahlen und zur verbesserten Prognose der Endkolkentiefe sowie der zeitlichen Entwicklung von Propellerkolken analysiert. Die experimentellen Untersuchungen beinhalteten drei Themenkomplexe: Strömungsfeld im Schraubenstrahl über fester Sohle, Kolkversuche in der Manöversituation und Kolkversuche infolge kurzzeitiger Belastungen beim Anfahren. Zur Anwendung gelangte ein GMS-Hinterschiffsmodell (Gesamtabmessungen in der Natur: 110 m Länge, 11,45 m Breite) mit zwei Grundvarianten für den Schraubenantrieb (Kaplanpropeller in Düse und nicht ummantelter Wageningen-Propeller) sowie zwei Ruderausführungen (Zentralruder und Doppelruder). Für die messtechnische Ermittlung der zeitlichen Kolkiefen sowie der Strahlausbreitung hinter dem Propeller und an der Gewässersohle wurden mehrere Verfahren angewendet bzw. getestet (Ultraschallsonden, Laser-Triangulationssensor, Stechpegel, 3D-Scanner mit Auswertesoftware für die Kolkiefenmessung; Particle-Image-Velocimetry (PIV), ADV-Sonden, Mikroflügel sowie ein Prandtl-Rohr für Geschwindigkeitsmessungen im Schraubenstrahl).

## 4 Ergebnisse

2019 wurde vom LWI der Endbericht zu den experimentellen Untersuchungen zur Schraubenstrahlhydraulik und Kolkbildung durch Propellerstrahlen angefertigt. Im Ergebnis wurden drei zuvor entwickelte Berechnungsansätze für die zeitliche Ausbildung lokaler Schraubenkolke und Endkolkiefen anhand der Modellversuchsergebnisse kalibriert, womit eine Prognose der Kolkiefenentwicklung für variable Randbedingungen genauer und in einem größeren Gültigkeitsbereich möglich ist. Die in LWI (2008a) entwickelte Kolkformel lehnt an eine Formel zur Berechnung von Brückenpfeilerkolken an. In LWI (2008b) wurde eine Kolkformel über die Integration einer Differentialgleichung hergeleitet, die die zeitliche Änderung des Kolkvolumens zur erodierten Sedimentmenge in Beziehung setzt. Die dritte, in LWI (2010) hergeleitete Formel, basiert auf der gleichen Differentialgleichung wie in LWI (2008b); allerdings wird die Differentialgleichung nicht integriert, sondern für diskrete Zeitschritte rekursiv gelöst. In Bild 1 werden die Berechnungsergebnisse der 2019 neu kalibrierten Kolkformel aus LWI (2008b) dem Ergebnis von insgesamt 703 Kolkiefenmessungen für den Kaplanpropeller mit und ohne Düse und den Wageningen-Propeller (jeweils ohne Ruder und mit dem Einzel- und Doppelruder sowie mit und ohne Schiff) bei Variation des Schiffstiefgangs und der Wassertiefen gegenübergestellt. Die Kolkversuche erfolgten mit vier Sedimenten (S1–S4,  $D_{50} = 0,85/3,5/4,0/18,8$  mm im Modellmaßstab 1:16), worin die Dauer der Belastung durch den Schraubstrahl zwischen 0,5 s und 79 Stunden variierte. Analog zu den beiden anderen Ansätzen zeigt die Darstellung für die LWI-Formel (2008b) in Bild 1, dass für (S1–S3) realistische Kolkiefen und Kolkiefenentwicklungen bei einer großen Bandbreite an Randbedingungen prognostiziert werden können, die Kolke im groberen Sohlmaterial (S4) hingegen nicht.

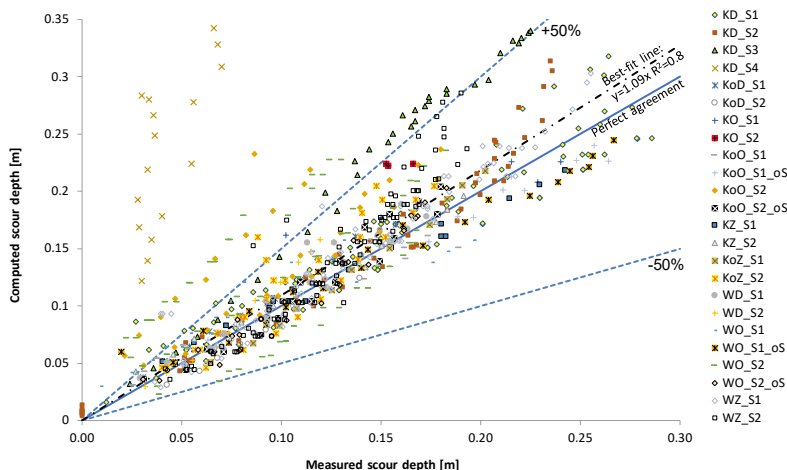


Bild 1: Gegenüberstellung der gemessenen Kolkiefen mit der 2019 neu kalibrierten Kolkformel von aus LWI (2008b)

### Literatur:

LWI (2008a): Ableitung einer Formel zur Bestimmung von Kolkiefen infolge instationärer Belastungen durch Schraubenstrahlen. TU Braunschweig, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Bericht Nr. 956.

LWI (2008b): Analyse der Kolkbildung infolge eines Schraubenstrahlangriffs – Formulierung einer Differentialgleichung. Ebenda, Bericht Nr. 977.

LWI (2010): Analyse der Kolkbildung infolge eines Schraubenstrahlangriffs – Zeitabhängige Berechnungen. Ebenda, Bericht Nr. 997.



## Binnenschiffsführungssimulation

### Referenzbinnenschiff und Referenzschubverband

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Ende 2010 wurde durch die Bundesanstalt für Wasserbau für den Bereich Binnenschiffahrt der Schiffsführungssimulator ANS5000 beschafft. Im Jahr 2017 erhielt der Schiffsführungssimulator ein Upgrade auf ANS6000. Zentrales Ziel des Forschungsvorhabens ist es, den Simulator, der seitens der implementierten Modellverfahren für die Ausbildung des nautischen Personals auf Seeschiffen ausgelegt ist, in Betrieb zu nehmen und an die Anforderungen der BAW für den Bereich Binnenschiffahrt anzupassen. Dafür werden die in der BAW entwickelten Modellverfahren für die fahrdynamische Begutachtung von Wasserstraßen implementiert und Schnittstellen zu den flussbaulichen HN-Modellen eingerichtet. Neben der Implementierung der BAW-Modelle müssen zusätzlich verifizierte Schiffsmodelle inklusive der Parametersätze, die die fahrdynamischen Eigenschaften eines Schiffes bestimmen, für den ANS6000 erstellt werden.

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

Aus dem Trend, dass immer größere Schiffe in den vorhandenen Wasserstraßen fahren (überlange Verbände auf dem Rhein, überlange Großmotorgüterschiffe (üGMS) auf dem Neckar), gewinnen Fragestellungen wie z. B. nach dem Einfluss von Querströmungen auf die Fahrt eines Binnenschiffes, nach der Wechselwirkung Schiff/Schiff bzw. Schiff/Wasserstraße, nach dem Verkehrsflächenbedarf in der Manöverfahrt und nach Squat und Bankeffekt immer mehr an Bedeutung. Viele dieser Fragen lassen sich nur noch durch komplexe Simulationen der Schiffsbewegung beantworten, in denen das Schiff durch einen Bahnregler oder durch Schiffsführer nach Sicht gesteuert wird. Die Bedeutung wird umso deutlicher, als schon heute und zukünftig verstärkt die wirtschaftliche Ausnutzung der vorhandenen oder dann angepassten Infrastruktur Wasserstraße im Vordergrund steht und damit eine kontinuierliche Weiterentwicklung der modularen Simulationssoftware für die Aufgaben der WSV erforderlich ist.

#### Auftragsnummer:

B3953.04.04.70003

#### Auftragsleitung:



Thorsten Dettmann  
 thorsten.dettmann@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Lahbib Zentari  
 lahbib.zentari@baw.de

#### Laufzeit:

2010 bis 2020

### 3 Untersuchungsmethoden

Die Modellierung der fahrdynamischen Eigenschaften eines Binnenschiffes ist von besonderer Bedeutung, da sie für die Qualität der späteren Simulationsergebnisse entscheidend ist. Die ursprünglich entwickelte Methode beruht auf der Einmessung von fahrenden Binnenschiffen und der Aufzeichnung aller Maschinen- und Ruderkommandos. Auf der Grundlage dieser Messdaten wurden die Koeffizienten für die Maschinen- und für die fahrdynamischen Modelle abgeleitet. Das Problem bei dieser Methode besteht darin, dass dabei nur die Koeffizienten für den gemessenen Tiefgang bestimmt werden konnten.

Inzwischen wird diese Methode durch numerische Berechnungen unter Nutzung von Messdaten aus Schleppversuchen und Planar motion mechanism (PMM) bzw. Computerized Planar Motion Carriage Versuchen, vorerst für ein 135 m langes Motorgüterbinnenschiff, ergänzt. Die Entwicklung von Algorithmen zur Bestimmung der fahrdynamischen Modellkoeffizienten für ein 135 m langes Binnenschiff basierend auf der numerischen Ermittlung der Kräfte auf das Unterwasserschiff für verschiedenste Manöversituationen ist abgeschlossen. Gegenwärtig laufen die Berechnungen zur Identifikation der fahrdynamischen Koeffizienten für ein derartiges Schiff für einen kompletten Fächer von Tiefgängen und Wassertiefen/Tiefgangsverhältnissen. Eine Reihe von Veröffentlichungen der Ergebnisse aus den Modellversuchen für das 135 m lange Referenzschiff ist in Arbeit.

### 4 Ergebnisse

Die beschriebene Methode zur numerischen Identifikation der Schiffskoeffizienten wird derzeit auf andere Schiffstypen erweitert und angewandt. Schubverbände unterscheiden sich in ihrer Geometrie deutlich von Binnenschiffen. In der Folge können Erfahrungswerte aus der Fahrdynamik von Binnenschiffen nicht ohne weiteres auf die Fahrdynamik von Schubverbänden übertragen werden. Modelle von Schubverbänden werden aber dringend für die verkehrswasserbaulichen Untersuchungen am Schiffsführungssimulator benötigt. Aus diesem Grund wird gegenwärtig ein Referenzschubverband entwickelt

Der Entwurf und Bau des Modells für den Schubverband in einem Maßstab von 1:16 ist abgeschlossen. Das Modell besteht aus einem Schubschiff und vier Leichtern, die in unterschiedlichen Formationen geschleppt werden können. Die geplante Serie von Schleppversuchen und Computerized Planar Motion Carriage Versuchen in tiefem Wasser und die entsprechenden Versuche im Flachwasser für unterschiedliche Wassertiefen wurde für 4 Verbandsformationen abgearbeitet. Die Aufbereitung der Messdaten steht kurz vor dem Abschluss. Parallel dazu erfolgt die Entwicklung von CFD-Berechnungsmethoden für Schubverbände in Tief- und Flachwasser unter Berücksichtigung der Relativbewegung zwischen Leichter und Schubschiff sowie der Wirkung der Spaltströmung für unterschiedliche Kopplungsvarianten der Leichter (Bild 1).

In den kommenden Monaten werden die ersten Koeffizientensätze für ein 135 m langes Binnenschiff aus den CFD-Berechnungen generiert. Für ein derartiges Schiff liegen in der Natur eingemessene Daten von unterschiedlichen gefahrenen Manövern und die zugehörigen Aufzeichnung aller Maschinen- und Ruderkommandos vor. Mit den neu generierten Koeffizienten werden diese Manöver auf dem Simulator nachgefahren und die Ergebnisse aus den Simulationen mit den entsprechenden Naturdaten verglichen.

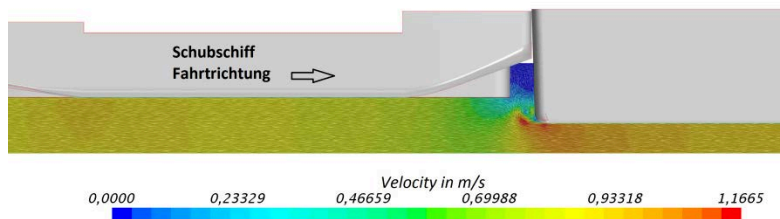


Bild 1: CFD-Rechnungen für einen Schubverband zur Untersuchung der Spaltströmung zwischen Leichter und Schubschiff.

#### Literatur:

Mucha, P. (2017): On Simulation-based Ship Maneuvering Prediction in Deep and Shallow Water. Institut für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme (ISMT); Universität Duisburg-Essen.

Mucha, P.; Ould el Moctar, B; Dettmann, T.; Ferrari, V. (2018): Experimental Investigation of Free-Running Ship Manoeuvres Under Extreme Shallow Water Conditions. Applied Ocean Research.



## EU-Vorhaben PROMINENT

Automatisierte Erfassung von Sohlenhöhen und Strömungsgeschwindigkeiten im laufenden Schiffsbetrieb

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Im Rahmen des europäischen Forschungs- und Innovationsprogramms Horizon 2020 beteiligt sich die BAW am Vorhaben PROMINENT (Promoting Innovation in the Inland waterways transport sector; <http://www.prominent-iwt.eu>). Das Vorhaben hat zum Ziel, den Treibstoffbedarf und die Luftschadstoffemissionen der Binnenschiffe durch technische Maßnahmen und energieeffiziente Navigation zu reduzieren.

Im Rahmen des Vorhabens soll u. a. ein Assistenzsystem entwickelt werden, das dem Schiffsführer Hinweise geben soll, wie er seinen Zielhafen treibstoffsparend und termingerechtere erreichen kann. Dafür werden neben Motor- und Verbrauchsdaten von Schiffen auch Informationen zur Wassertiefe, Strömungsgeschwindigkeit und Wasserspiegellage für den zu befahrenden Flussabschnitt benötigt. Da präzise Peildaten und mehrdimensionale numerische Modelle nicht flächendeckend für alle Wasserstraßen innerhalb der EU verfügbar sind, besteht die Aufgabe der BAW darin, Binnenschiffe mit Sensortechnik zur Erfassung von Position, Tiefe und Strömung sowie von Motor- und Verbrauchsdaten auszurüsten, die Messdaten im laufenden Schiffsbetrieb zu erheben und an einen zentralen Server zu übermitteln.

Ziel der BAW-Untersuchungen ist daher die Entwicklung möglichst effizienter Methoden zur Erhebung, Übertragung und Validierung von Tiefen-, Strömungs- und Motordaten im laufenden Schiffsbetrieb sowie die Bewertung des Aufwandes für Installation und Betrieb.

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

Durch die Erhebung von hydrografischen Daten im laufenden Betrieb von Binnenschiffen wird die Möglichkeit eröffnet, der Binnenschifffahrt hochaktuelle Peildaten der Wasserstraße zur Verfügung zu stellen. Bereiche mit signifikanten Sohlveränderungen im Fahrwasser werden zeitnah erkannt und Kontroll- oder Verkehrssicherungspeilungen der WSV können gezielt in diesen Bereichen durchgeführt werden.

#### Auftragsnummer:

B3953.04.04.70007

#### Auftragsleitung:



Andreas Orlovius  
[andreas.orlovius@baw.de](mailto:andreas.orlovius@baw.de)

#### Laufzeit:

2015 bis 2020

Darüber hinaus besteht ein großer Nutzen für das Binnenschiffahrtsgewerbe durch die Möglichkeit zur besseren Ausnutzung des nautisch nutzbaren Fahrwassers bzw. zur optimalen Wahl der Abladetiefe. Die Kenntnis aktueller Fahrwasserinformation erhöht die Sicherheit und Verlässlichkeit im Schiffsverkehr und eröffnet die Möglichkeit zur weiteren Optimierung des Schiffsverkehrs.

### 3 Untersuchungsmethoden

Die BAW hat ein Messkonzept erarbeitet und in den Jahren 2015 bis 2017 auf drei Schiffen (einem Fahrgastschiff, zwei Frachtschiffen) umgesetzt, um hydrografische Daten des Gewässers und Informationen über den aktuellen Betriebszustand der Antriebsmotoren im laufenden Schiffsbetrieb zu erfassen und zu übertragen.

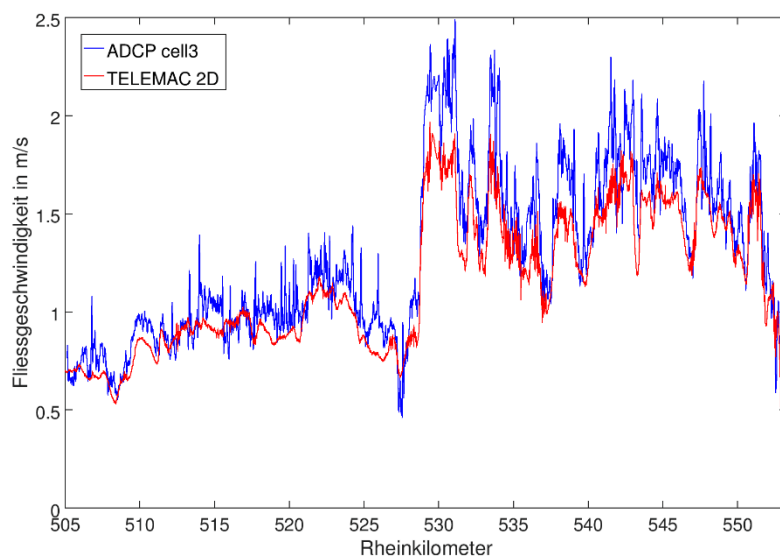
### 4 Ergebnisse

Das EU-Vorhaben PROMINENT wurde offiziell Ende 2017 beendet. Die Messtechnik an Bord der im Rahmen des Vorhabens ausgerüsteten Schiffe *GMS Monika Deymann* und *GMS Baden-Württemberg* wird aber weiterhin von der BAW betrieben und die aufgezeichneten Daten für vielfältige Fragestellungen genutzt.

Mittlerweile liegen Messdaten von circa 250 Fahrten des *GMS Monika Deymann* vor. Im Jahr 2019 erfolgte die Validierung der Messdaten des an Bord installierten 1D-Horizontal-ADCPs anhand eines TELEMAC-2D-Modells ([opentelemac.org](http://opentelemac.org)). Der 1D-ADCP ist rund 0,90 m oberhalb des Schiffsbodens im Bugstrahlkanal angeordnet und ermittelt die Strömungsgeschwindigkeiten in einem Bereich von 10 m bis 40 m vor dem Bug des Schiffes. Im Rahmen der Validierung wurden die bei unterschiedlichen Abflüssen und Tiefgängen des Schiffes aufgezeichneten Strömungsdaten mit Modelldaten im Bereich des Mittelrheins (Rhein-km 500 bis Rhein-km 560) verglichen. Den Vergleich von an Bord gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten mit den Modelldaten bei einer Talfahrt bei GIW zeigt beispielhaft Bild 1.

Die Auswertungen haben gezeigt, dass die Übereinstimmung zwischen Modell- und Naturdaten und die Qualität der Messdaten insbesondere vom Verhältnis der Wassertiefe zur Abladetiefe sowie von der Geschwindigkeit des Schiffes gegenüber Wasser abhängt. Die besten Messergebnisse werden demnach erzielt, wenn das Messvolumen weit vor dem Bug liegt, die Abladetiefe im Verhältnis zur Wassertiefe klein und die Geschwindigkeit gegenüber Wasser gering ist. Je näher das Messvolumen am Schiff liegt, desto mehr werden die Messergebnisse durch die Umströmung des Schiffes beeinflusst, die mit abnehmendem Verhältnis von der Wassertiefe zur Abladetiefe und der Geschwindigkeit gegenüber Wasser zunimmt. Bei kleinen Wassertiefen kann die Reichweite des installierten Horizontal-ADCPs zudem durch die Sohle begrenzt werden. Gleiches gilt bei sehr geringen Abladetiefen, bei denen die Schallkeule des ADCPs an der Wasseroberfläche reflektiert werden kann.

Die Validierung hat gezeigt, dass die Messung von ungestörten Strömungsgeschwindigkeiten von Binnenschiffen aus grundsätzlich möglich ist. Zwar ist der Aufwand für die Installation und den Betrieb größer als bei einer konventionellen bootgestützten ADCP-Messung, dafür werden aber die Strömungsgeschwindigkeiten in den schiffahrtrelevanten Bereichen bei unterschiedlichen Randbedingungen erfasst. Diese Daten können zukünftig auch weiteren Schiffen zur Verfügung gestellt werden und bieten damit die Möglichkeit, den Schiffsbetrieb hinsichtlich einer treibstoffsparenden und emissionsarmen Fahrt zu optimieren.



#### Literatur:

Orlovius, A.; Schulz, A.-C. (2017): Mit Sensoren für eine saubere Fahrweise. In: BAWAktuell (01/2017), S. 6–8.

Orlovius, A.; Schulz, A.-C. (2017): Das Binnenschiff als Messplattform. In: Hydrographische Nachrichten (106), S. 14–19.

Bild 1: Vergleich gemessener Strömungsgeschwindigkeiten mit tiefengemittelten Werten aus einem Telemac-2D-Modell (Wert am Pegel Kaub: Natur: 72 cm, Modell: 71 cm).



## Fast-Time-Simulation von Binnenschiffen mit FaRAO

Weiterentwicklung des fahrdynamischen Berechnungsverfahrens zur Ermittlung des Verkehrsflächenbedarfs und für Befahrbarkeitsbewertungen

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Im Referat W4 Schifffahrt werden Fragestellungen der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) zum Verkehrsflächenbedarf der Schiffe auf den Binnenwasserstraßen sowie im Bereich von Schleusen und Häfen bearbeitet, wobei die Befahrbarkeit hinsichtlich Sicherheit und Leichtigkeit betrachtet wird. Für diese Aufgaben werden verschiedene fahrdynamische Verfahren mit unterschiedlicher Ausprägung eingesetzt. Für die hochgenaue Simulation von Manöversituationen kommt im Allgemeinen ein Schiffsführungssimulator zum Einsatz, während eine Fahrrinnentrassierung in Binnenschiffahrtskanälen auch mit deutlich geringerem Aufwand mit dem WSV-Verfahren Trasse durchgeführt werden kann.

Für viele Fragestellungen ist der Einsatz des Schiffsführungssimulators aufgrund der zeitlichen und personellen Anforderungen nicht möglich und auch das Trassierungsverfahren wird aufgrund der eingeschränkten Gültigkeit der Methodik (Kanalfahrten bei sehr geringen Strömungsgeschwindigkeiten) den Anforderungen oftmals nicht gerecht. In diesen Fällen wird die sogenannte Fast-Time-Simulation eingesetzt, deren Entwicklung 2006 mit dem Verfahren PeTra2D begonnen wurde (Kolarov 2006). Mit diesem experimentellen Verfahren wurde die grundsätzliche Eignung der Fast-Time-Simulation für unterschiedliche Aufgaben der BAW belegt. PeTra2D erwies sich aber hinsichtlich der Rechenzeiten und der Möglichkeiten, die erforderlichen Weiterentwicklungen umzusetzen, als sehr unflexibel. Aus diesem Grund wurde das Verfahren 2014 einem vollständigen Reengineering in der Programmiersprache C++ unterzogen. Der nun seit 2016 im Einsatz befindliche Fast-Time-Simulator FaRAO (**F**ahrdynamische **R**outen**A**nalyse und **O**ptimierung) wird im Rahmen dieses FuE-Projektes sukzessive verbessert und weiterentwickelt, wobei Qualität und Rechengeschwindigkeit des Verfahrens bei der auftragsbezogenen Anwendung sowohl für Fragestellungen der WSV als auch im Forschungsbereich im Vordergrund stehen.

#### Projekt-Nr.:

B3953.04.04.70008

#### Projektleiter:



Dr. Michael Schröder  
 michael.schroeder@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2020

Die geplanten und teilweise bereits umgesetzten Weiterentwicklungen und Verbesserungen betreffen:

- Entwicklung von verbesserten Bahnführungsalgorithmen, die zum Beispiel mithilfe von Methoden der nichtlinearen Optimierung das simulierte Binnenschiff einer vorgegebenen Leitlinie folgen lassen.
- Weiterentwicklung der semi-empirischen Gleichungen zur Ermittlung der Kräfte in der fahrdynamischen Simulation von Binnenschiffen auf tiefen- und breitenbeschränktem Fahrwasser.
- Weiterentwicklung der Ansätze zur Berücksichtigung der Interaktion zwischen Schiff und umgebender Strömung, wie zum Beispiel Berechnung des hydrodynamischen Einsinkens (squat) und von Rückströmungsgeschwindigkeiten.
- Implementierung des Simulationsverfahrens auf den Hochleistungsrechnern der BAW.
- Entwicklung von geeigneten grafischen Benutzerschnittstellen für das Pre- und Postprocessing.

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

Mit dem Fast-Time-Simulator FaRAO können viele Fragestellungen der WSV im Zusammenhang mit der Bewertung von wasserbaulichen Neu- oder Ausbaumaßnahmen hinsichtlich der Befahrbarkeit, des Verkehrsflächenbedarfs und der Sicherheit und Leichtigkeit effizient und zuverlässig bearbeitet werden. Darüber hinaus wird das Simulationsverfahren in Forschungsprojekten des BMVI-Expertenetzwerks sowie im „Pilotprojekt Klima und Wasser - Projektionsdienst für Wasserstraßen und Schifffahrt (ProWaS)“ eingesetzt und weiterentwickelt.

## 3 Untersuchungsmethoden

Der Fast-Time-Simulator FaRAO wird als flexible Programmbibliothek entwickelt, mit der Befahrbarkeitsanalysen für Wasserstraßen durchgeführt werden können. Dazu wird eine modulare Softwarestruktur implementiert, welche ein einfaches Austauschen einzelner Komponenten erlaubt und somit zum Beispiel die Implementierung von verschiedenen fahrdynamischen Berechnungsansätzen ohne eine Änderung der Programmstruktur ermöglicht.

## 4 Ergebnisse

Das Reengineering von PeTra2D war zwar zu Beginn des Projekts abgeschlossen. In den ersten Anwendungen der Methodik auf fahrdynamische Fragestellungen bei wasserbaulichen Projekten der WSV wurde die Stabilität und Qualität des Fast-Time-Simulators FaRAO aber noch einmal deutlich verbessert. Zudem wurde ein Optimierungsalgorithmus auf der Grundlage der offenen Bibliothek IPOPT implementiert, mit dem bei einer Voraussicht von 10 bis 50 Sekunden eine ausgezeichnete Bahnführung realisiert wurde (Linke 2016). Der Quellcode wurde auf die Hochleistungsrechner der BAW übertragen und steht dort nun für umfangreichere Analysen zur Verfügung; die konzeptionellen Arbeiten für eine Parallelisierung des Programms sowie deren Umsetzung stehen allerdings noch aus.

Darüber hinaus wird FaRAO derzeit in mehreren WSV-Aufträgen erfolgreich eingesetzt. In Bild 1 ist zum Beispiel die Simulation einer Schleusenausfahrt aus der Neckar-Schleuse Besigheim dargestellt, für die ein Ausbau der rechten Kammer für 135 m lange Großmotorgüterschiffe (GMS) geplant ist. Im Bild ist die Validierung der Simulation mit einer eingemessenen Schiffsfahrt eines GMS dargestellt.

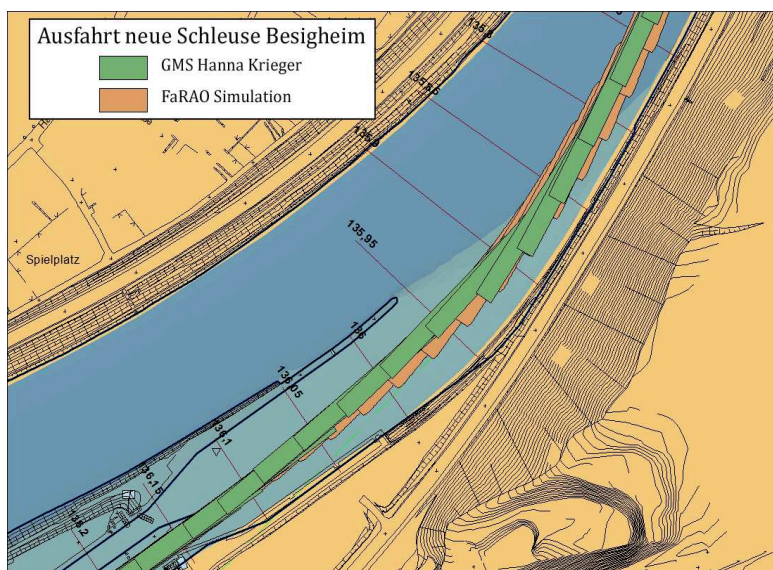
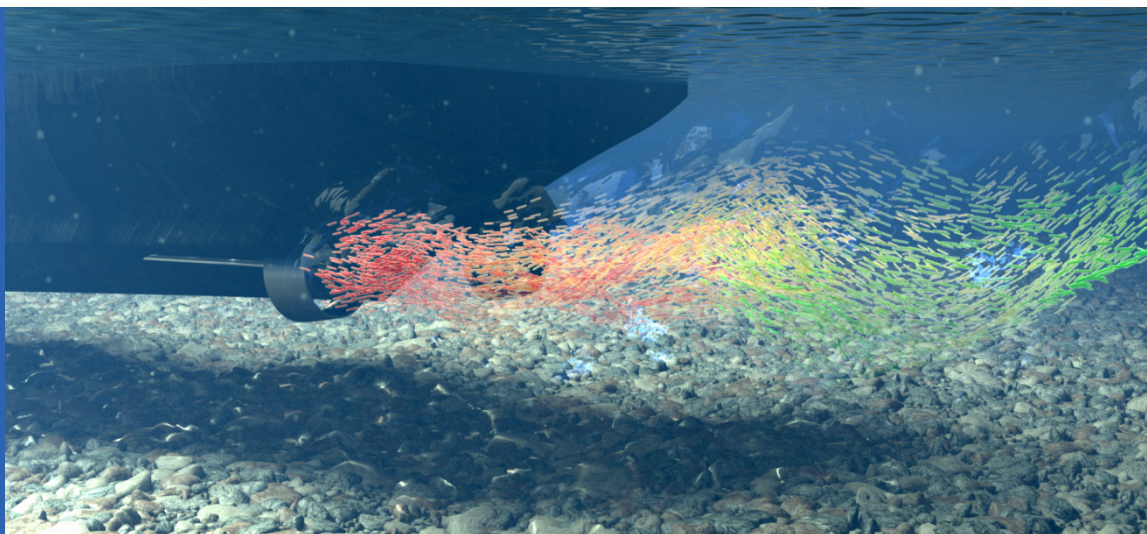


Bild 1: Validierung der fahrdynamischen Simulation mit FaRAO anhand der Ausfahrt des GMS Hanna Krieger aus der Neckar-Schleuse Besigheim ins Unterwasser.

### Literatur:

Kolarov, P. (2006): Simulation von Schiffsbewegungen in Fließgewässern. Dissertation, Universität Rostock.

Linke, T.; Rauscher, D.; Söhngen, B. (2015): Recent developments in the application of shallow water ship hydrodynamics in inland waterway design. Smart Rivers Conference 2015. Buenos Aires. Paper 23.



## HN-Modellierung von Binnenschiffsbelastungen auf Ufer und Sohle

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Infolge immer größerer und stärker motorisierter Fahrzeuge nimmt die Belastung von Gewässersohle und -ufer durch Propulsionsorgane auf vielen Bundeswasserstraßen zu und kann die Bemessung von Deckwerken maßgeblich bestimmen. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge zwischen den Schiffparametern (z. B. Schiffsgeschwindigkeit, Schraubstrahl- und Bugstrahlaustrittsgeschwindigkeit, Rudereinstellungen, Propellergeometrie) und den Böschungsparametern (z. B. Steingröße und Böschungsneigung) besteht zusätzlicher Forschungsbedarf insbesondere in den folgenden Bereichen (Spitzer et al. 2012):

- Einwirkung des Hauptantriebs auf Böschung und Sohle,
- Strahlentwicklung und -überlagerung bei Mehrschraubern,
- Rudereinfluss auf den Schraubstrahl und
- Identifikation der Druck- und Sogbelastungsbereiche an der Sohle.

Zur detaillierten Analyse der genannten Punkte sollen weitere Parameterstudien und Untersuchungen zum Einfluss der Propulsionsorgane auf Sohle und Ufer durchgeführt werden. Zudem sind HN-Simulationen mit unterschiedlichen Propellergeometrien und für Mehrschrauber geplant, um einerseits die Überlagerungsphänomene zu analysieren und andererseits deren Einfluss auf die Sohle zu betrachten. Wesentliche Ziele dieses Forschungsvorhabens sind:

- Erprobung und Validierung zur 3D-HN-Modellierung des Schraubstrahls,
- Studien zum Einfluss von Schiffs-, Böschungs- und Sohlparametern auf die Strahlausbreitung und Sohl-/Böschungbelastung,
- Erprobung und Adaption von Methoden zur Kopplung der 3D-HN-Modellierung des Schraubstrahls mit der diskreten Partikelsimulation im Bereich von Böschung und Sohle.

#### Auftragsnummer:

B3953.04.04.70009

#### Auftragsleitung:

Tarek Beck  
tarek.beck@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2023



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

Die Untersuchungen führen zu einer Verbesserung und Erweiterung der verfügbaren Ansätze zur parametrischen Abschätzung der Einwirkung des Schraubstrahls. Diese Kenntnisse finden unter anderem Eingang in die von der BAW für die Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen entwickelte Software GBBSoft+.

## 3 Untersuchungsmethoden

Die weiterführenden Analysen zur Interaktion zwischen Schiff, Böschung und Sohle werden mit der OpenSource-Software OpenFOAM durchgeführt. Der frei zugängliche Programmcode erlaubt individuelle Anpassungen und bietet eine numerische Bibliothek mit einer Vielzahl verschiedener Lösungsmethoden. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollen die bereits in OpenFOAM enthaltenen Simulationsmöglichkeiten analysiert, getestet und gegebenenfalls weiterentwickelt werden. Im Detail soll die Eignung der in OpenFOAM enthaltenen Möglichkeit zur Gitteranpassung während der numerischen Simulation (overset mesh) im Hinblick auf die Abbildung eines fahrenden Schiffes über einer realen Flusssohle überprüft werden. Zudem besteht die Möglichkeit, durch eine kombinierte Strömungs- und Partikelsimulation (Discrete Particle Modelling (DPM)) den Zusammenhang zwischen den wesentlichen Schiffsparmetern und dem Bewegungsbeginn der Böschungsbefestigung zu analysieren. Neben dieser Betrachtung sollen Belastungen von verschiedenen Schrauben-Ruder-Kombinationen auf die Böschung und Sohle untersucht werden.

## 4 Ergebnisse

In der vorherigen Ausgabe von ForschungXpress (Beck 2019) wurden Vergleichsanalysen zur induzierten Propellergeschwindigkeit zwischen experimentellen und numerischen Ergebnissen dargestellt. Zur Erweiterung dieser Analysen auf das Propellerfernfeld wurden in den Versuchsanlagen des Entwicklungszentrums für Schiffstechnik und Transportsysteme (DST) und des Instituts für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme der Universität Duisburg-Essen (ISMT) umfangreiche Strömungsmessungen im Propellerstrahl durchgeführt.

Hierbei kamen zwei verschiedene laserbasierte Methoden zum Einsatz. 2D3C Particle Image Velocimetry (PIV) ist eine nicht-invasive Methode zur Messung von Fließgeschwindigkeiten. Bei diesem Verfahren werden alle drei Geschwindigkeitskomponenten gleichzeitig in einem dünnen Lichtschnitt gemessen. Besonders für das tiefere Verständnis transienter 3D-Strömungen ist es wünschenswert, nicht nur in einer Ebene, sondern in einem Volumen zu messen. Hierfür wurde ein neuartiges System basierend auf dem Tracking-Algorithmus Shake-the-Box genutzt.

Gemessen wurde die Strömung im Nah- und Fernfeld an unterschiedlichen Messpositionen für verschiedene Antriebsorgane von Ein- oder Zweischraubern. Sämtliche Messungen wurden bei mehreren Drehraten und keiner Anströmung des Propellers (Fortschrittsgrad  $J=0$ ) durchgeführt. Im weiteren Verlauf des Vorhabens ist geplant die detaillierten Ergebnisse der PIV-Messungen mit numerischen Ergebnissen aus OpenFOAM zu vergleichen.

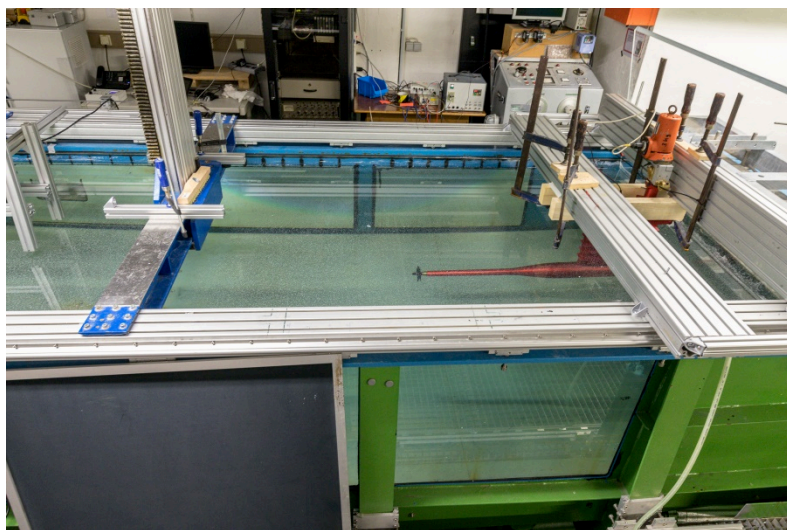


Bild 1: Versuchsanlage der PIV-Messungen.

### Literatur:

Beck, T. (2019): HN-Modellierung von Binnenschiffsbelastungen auf Ufer und Sohle. In: ForschungXpress 36/2019. Hrsg. von der Bundesanstalt für Wasserbau.

Spitzer, D.; Söhngen, B.; Aberle, J.; Geisenhainer, P. (2012): Belastung der Gewässersohle durch Propellerstrahlen, Teil 1: Untersuchungen bis zum zweiten Weltkrieg, KW – Korrespondenz Wasserwirtschaft, 4/2012, 202–209.



## Betroffenheitsanalyse und Anpassungsoptionen für Binnenwasserstraßen zur Aufrechterhaltung eines wirtschaftlichen und konkurrenzfähigen Verkehrsträgers

Im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerkes „Wissen – Können – Handeln“

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Das FuE-Vorhaben „Betroffenheitsanalyse und Anpassungsoptionen für Binnenwasserstraßen zur Aufrechterhaltung eines wirtschaftlichen und konkurrenzfähigen Verkehrsträgers“ ist Teil des BMVI-Expertennetzwerkes, das 2016 durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastrukturen (BMVI) initiiert wurde. Drängende Probleme der Verkehrsinfrastrukturen wie ihre Anpassung an den Klimawandel, ihre umweltgerechte Gestaltung sowie die Erhöhung ihrer Zuverlässigkeit werden gemeinsam von sieben Ressortforschungseinrichtungen und Fachbehörden des BMVI aufgegriffen. Das vorliegende FuE-Vorhaben ist im Themenfeld 1 „Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen“ angesiedelt.

Infolge des Klimawandels sind veränderte Bedingungen zu erwarten, die auch vor den Bundeswasserstraßen und der Schifffahrt nicht haltmachen. Diese Auswirkungen auf die Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit werden im Schwerpunktthema 106 im Rahmen einer Modell- und Verfahrenskette untersucht, die von Klimamodellen über hydrologische und hydrodynamische Modelle zu den fahrdynamischen Modellen der BAW reicht. Mit letzteren wird pilothaft die Betroffenheit der Binnenschifffahrt an Mittel- und Niederrhein hinsichtlich Befahrbarkeit und Wirtschaftlichkeit durch Gütertransportmengen untersucht. Die dazu entwickelte Methodik wird auch für die Bewertung von (flussbaulichen) Anpassungsmaßnahmen verwendet, mit denen die Resilienz des Verkehrsträgers „Binnenschifffahrt“ gesteigert werden soll.

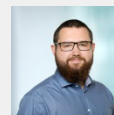
### 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)

Im Projekt können Breiten- und Tiefenengstellen identifiziert werden, die unter den veränderten hydrologischen Bedingungen auftreten können. Um in diesen Bereichen Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs auf-

#### Auftragsnummer:

B3953.04.04.70010

#### Auftragsleitung:



Hauke Stachel  
 hauke.stachel@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2020

rechterhalten zu können, werden verschiedene zum Beispiel flussbauliche Anpassungsoptionen entwickelt und modelltechnisch untersucht. Zielführende Maßnahmen werden dann fahrdynamisch hinsichtlich der Auswirkungen auf die Befahrbarkeit sowie hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit bewertet. Damit erhält die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes frühzeitig Informationen über potentielle Anpassungsmaßnahmen, die geeignet sind, die Sicherheit, Leichtigkeit und Wirtschaftlichkeit der Binnenschifffahrt auch unter veränderten klimatisch-hydrologischen Bedingungen zu fördern.

### 3 Untersuchungsmethoden

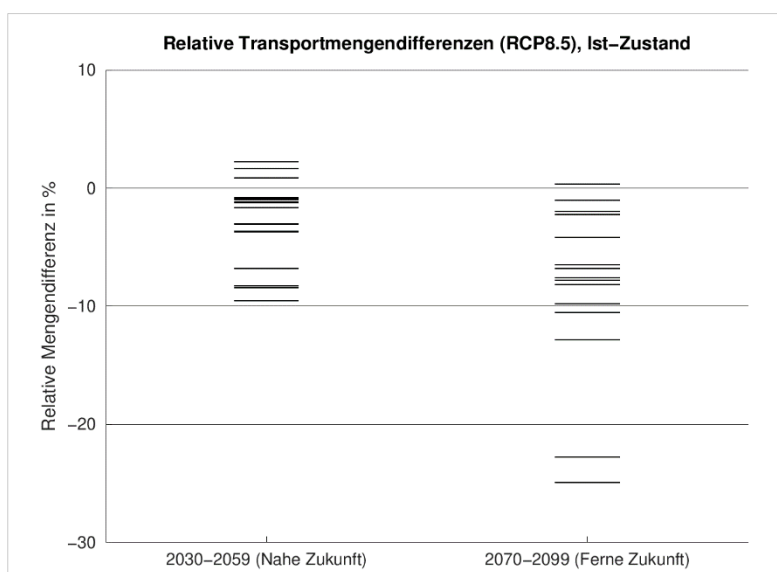
Durch den Klimawandel ergeben sich Veränderungen des Abflusses, der Gewässersohle und damit auch der Strömungsgeschwindigkeiten und Fließstiefen in einer Wasserstraße. Die Änderungen wirken sich auch auf die Fahrdynamik der Binnenschiffe aus. Das in der BAW entwickelte Simulationsprogramm FaRAO (Fahrdynamische Routenanalyse und Optimierung) wird für die Ermittlung der (geänderten) Schiffsgeschwindigkeit, der Fahrspurbreiten, der möglichen Abladetiefen und des hydrodynamischen Einsinkens (squat) genutzt (Linke 2015). Durch den im Programm integrierten Regler wird das Schiff auf einem vorher definierten Kurs gehalten, der aus eingemessenen Trajektorien von Binnenschiffen abgeleitet wird. Mit dieser Methodik wird eine Sensitivitätsstudie bei veränderten Abflüssen durchgeführt. Dadurch kann eine Klimawirkungsanalyse auf mögliche Abladetiefen und Transportzeiten erstellt werden.

Für die Berechnung der Transportmengen wurde eine vereinfachte Methode entwickelt, für die die sogenannten Abladeregeln genutzt werden. Abladeregeln sind von der Schifffahrt angewandte Zuschläge auf die Pegelwerte der Hauptpegel (z. B. Mittelrhein bei Niedrigwasser: Pegel Kaub +1,0 m). Mit Pegelwert und Abladeregel lässt sich so die maximal mögliche Abladetiefe eines Schiffes bestimmen, das auf dem jeweiligen Abschnitt fährt.

Zur Kalibrierung des Modells wurden die Verkehrsverflechtungsanalysen des Bundesverkehrswegeplans (BVWP) genutzt. Mit den Schiffszahlen und Transportmengen des BVWPs sowie den Pegelständen für das Jahr 2010 können für das Modell u. a. die Teilabladungen von Schiffen kalibriert werden (Nilson et al. 2019). Für die Anwendung des Modells auf den Klimawandel werden die Projektionen der Pegelwerte genutzt. Die nötigen Abflussberechnungen werden im Rahmen des Expertennetzwerkes von der Bundesanstalt für Gewässerkunde auf Basis der Klimamodellierungen des Deutschen Wetterdienstes durchgeführt.

### 4 Ergebnisse

Im Schwerpunktthema 106 wird eine Klimawirkungsanalyse durchgeführt, durch die u. a. die Auswirkungen auf die Binnenschifffahrt durch den Klimawandel untersucht werden. Es wurden für den Mittelrheinabschnitt zwischen Mainz und St. Goar die Transportmengen nach oben genannter Methodik berechnet. Es werden nur Klimamodelle der RCP 8.5-Szenarien verwendet, die sehr hohe Emissionen annehmen (IPCC 2014). Die Ergebnisse für den jetzigen Sohlzustand (Ist-Zustand) werden für die nahe Zukunft (2030 bis 2059) und ferne Zukunft (2070 bis 2099) im relativen Vergleich zur Referenzperiode von 1970 bis 1999 präsentiert (Bild 1). Für die nahe Zukunft zeigt das Ergebnisband eine moderate Verringerung der Transportmengen von 10 % bis +2 %. Für die Periode 2070 bis 2099 ist am unteren Band eine deutliche Verringerung von bis zu 25 % errechnet worden. Die Bandbreite ist hier aufgrund der Unsicherheiten der Klimaprojektionen sehr groß, der Maximalwert liegt bei 0,3 %.



#### Literatur:

IPCC (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Genf.

Linke, T. et al. (2015): Recent developments in the application of shallow water ship hydrodynamics in inland waterway design. SMART RIVERS Conference. Buenos Aires.

Nilson, E. et al. (2019): Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge.

Bild 1: Berechnete relative Transportmengendifferenz für den Ist-Zustand für die Zeitperioden 2030-2059 (nahe Zukunft) und 2070-2099 (ferne Zukunft), Referenzpunkt ist die Periode 1970-1999.



## Minderung verkehrsbedingter stofflicher Belastungen in Luft, Wasser und Boden – Betriebliche und technische Optimierungen in der Binnenschifffahrt

Im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerkes „Wissen – Können – Handeln“

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Dieses FuE-Vorhaben ist Teil des BMVI-Expertennetzwerkes, welches 2016 durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) initiiert wurde. Durch Forschungsarbeiten zur Anpassung an den Klimawandel, zur umweltgerechten Gestaltung sowie zur Erhöhung der Zuverlässigkeit greifen sieben Ressortforschungseinrichtungen und Fachbehörden des BMVI gemeinsam drängende Probleme der Verkehrsinfrastrukturen auf.

Das Themenfeld 2 des BMVI-Expertennetzwerkes hat das Ziel, den Verkehr resilient und umweltgerecht zu gestalten. In einem Schwerpunktthema sollen die stofflichen Belastungen durch die einzelnen Verkehrsträger (Straße, Schiene, Wasserstraße und Luft) in Luft, Wasser und Boden erfasst und mögliche Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen untersucht werden. Für das hier beschriebene FuE-Vorhaben ergibt sich daraus zum einen die Erfassung des Treibstoffverbrauchs und des Schadstoffausstoßes in die Luft der aktuellen Binnenschiffsflotte im Fokusgebiet Duisburg. Zum anderen soll aufgezeigt werden, in welchem Umfang Treibstoffbedarf und Emissionen durch eine optimierte Fahrweise sowie schiffbauliche Innovationen bei Aufrechterhaltung der Wirtschaftlichkeit minimiert werden können.

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

Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), das Verkehrsministerium und die schifffahrtstreibende Wirtschaft werden Informationen über die Luftschadstoffemissionen einzelner Binnenschiffe sowie eine Abschätzung für die Flotte erhalten. Es werden Empfehlungen für technische und betriebliche Maßnahmen gegeben, die geeignet sind, zu einer Verminderung des Treibstoffbedarfs und der Emissionen beizutragen. Auf dieser Grundlage lassen sich die wirtschaftlichen Auswirkungen einzelner Maßnahmen auf den Verkehrsträger Binnenschifffahrt hinsichtlich seiner Wettbewerbsfähigkeit bewerten.

**Auftragsnummer:**

B3953.04.04.70011

**Auftragsleitung:**Carolin Walz  
carolin.walz@baw.de**Laufzeit:**

2016 bis 2019

### 3 Untersuchungsmethoden

Die Simulation der Schiffsbewegung im strömenden Gewässer entlang einer vorgegebenen Route ist mithilfe des Programms FaRAO (kurz für „**F**ahrdynamische **R**outen**a**nalyse und **O**ptimierung“) möglich. In dem FuE-Vorhaben wird FaRAO um die Ausgabe von Treibstoffverbrauch und Emissionsausstoß eines Binnenschiffs erweitert. Durch diese Kopplung wird es möglich sein, den Treibstoffverbrauch und die emittierten Schadstoffe von einzelnen Schiffen zu berechnen. Diese Modellierung erfordert Kalibrierungs- und Validierungsdaten, die das Emissionsverhalten von Binnenschiffsmotoren in Abhängigkeit von den realen Betriebsbedingungen und äußeren Randbedingungen wiedergeben. Die Emissionsdaten, sogenannte Real Driving Emissions, werden durch temporäre Onboard-Messungen auf einem Schiff gewonnen. Gleichzeitig erfolgt die Aufzeichnung von Parametern wie Drehzahl, Motorlast und Kraftstoffverbrauch über das bord-eigene Motor-Bussystem der Antriebsmotoren. Um Daten von verschiedenen Schiffsklassen und Motortypen (z. B. Leistung, Baujahr, mit und ohne Abgasnachbehandlung) sowie unter unterschiedlichen Randbedingungen (z. B. Abflussbedingungen, Berg- und Talfahrt) bei der Modellierung berücksichtigen zu können, sind mehrere Messkampagnen geplant. Unter Einbeziehung von Flotteninformationen ist eine Hochrechnung für die Binnenschiffsflotte im Fokusgebiet des Niederrheins möglich. Darüber hinaus ermöglicht die Methodik eine Bewertung verschiedener technischer und betrieblicher Optimierungen zur Verminderung des Treibstoffbedarfs und der resultierenden Schadstoffemissionen für einen Einzelfahrer.

Eine andere Vorgehensweise zur Berechnung der Flottenemissionen basiert auf der Grundlage von AIS-Daten („Automatic Identification System“) und Emissionsfaktoren. AIS-Daten ermöglichen statistische Auswertungen des Schiffverkehrs, wie z. B. Flottenstruktur und Schiffsgeschwindigkeiten. Diese Auswertungen werden zur Modellierung der Emissionen der Binnenschiffsflotte in den Rheinabschnitten sowohl um Voerde als auch um Düsseldorf verwendet. Der Modellierung liegen für eine erste Abschätzung sowohl der Berechnungsansatz als auch die Emissionsfaktoren des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV 2016) sowie gemittelte Auswertungen von AIS-Daten zugrunde. Ein differenziertes Vorgehen ist anschließend auf der Basis einzelner Schiffsfahrten und unter Berücksichtigung der Strömungsgeschwindigkeiten vorgesehen.

### 4 Ergebnisse

Im Frühjahr 2018 wurden im Auftrag der BAW Real Driving Emissions am Antriebsmotor eines Großmotorgüterschiffs (GMS) durchgeführt. Der maximale Ausstoß von Stickstoffoxiden (NO, NO<sub>2</sub>), Kohlenstoffmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoffen (HC) findet jeweils in den niedrigeren Lastbereichen dieses Motors statt; der jeweils minimale Ausstoß in den höheren Lastbereichen (siehe Bild 1). Diese Aussage trifft für die Massenkonzentration von Partikeln, welche durch Probenahmen erfasst werden, gleichermaßen zu. Die von der Europäischen Union (2016, S. L252/105) vorgegebenen Grenzwerte für Binnenschiffsmotoren gelten für diesen Motor (Baujahr 2008) zwar nicht, dennoch ist zu beobachten, dass sowohl die Grenzwerte für Kohlenstoffmonoxid und für Kohlenwasserstoffe als auch für die Partikelanzahl deutlich unterschritten werden. Auswertungen der Messdaten ergeben außerdem, dass ca. 87 % der Partikelmasse in den Motorlastbereichen von 30–100 % aus Ruß besteht, wohingegen der Rußanteil im Lastbereich von 20–27 % nur 26 % der Partikelmasse ausmacht.

Die nächsten Schritte umfassen Auswertungen von AIS-Daten als Grundlage für eine Abschätzung des Emissionsausstoßes der Rheinflotte um Voerde und Düsseldorf.

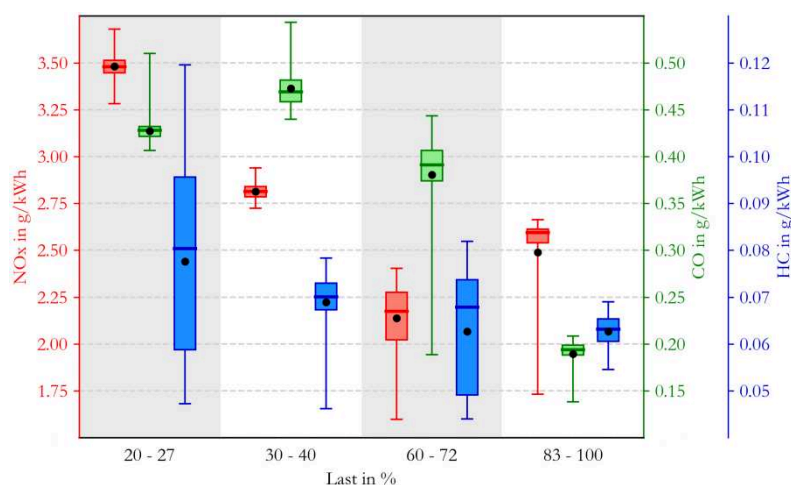
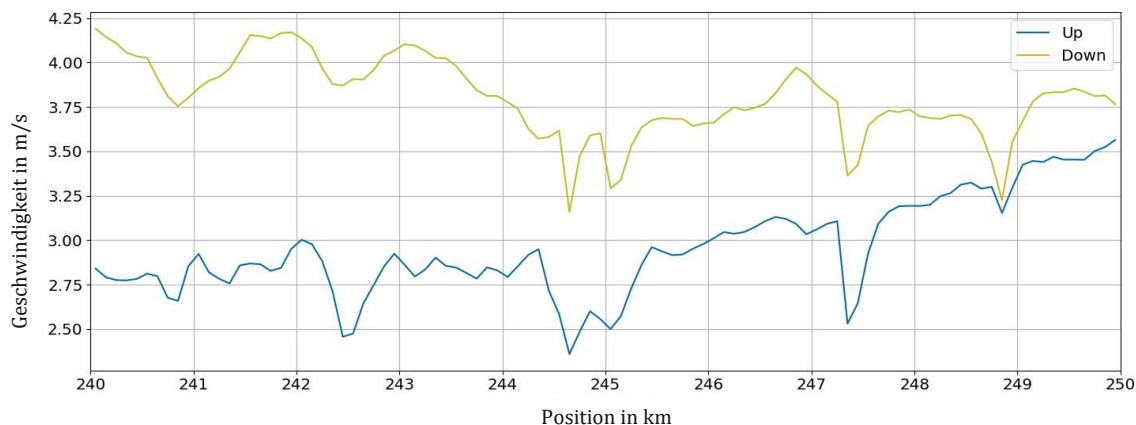


Bild 1: Statistische Auswertung von *Real Driving Emissions* eines GMS nach Maximum, oberem Quartil, Median, Mittelwert, unterem Quartil und Minimum von NO<sub>x</sub>, CO und HC.

#### Literatur:

Europäische Union (2016): Verordnung (EU) 2016/1628 über die Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte für gasförmige Schadstoffe und luftverunreinigende Partikel und die Typgenehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte. Straßburg.

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hg.): Emissionskataster für den Schiffsverkehr in NRW 2012 – LANUV-Fachbericht 67. Online verfügbar unter [https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3\\_fachberichte/fabe67.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/fabe67.pdf), zuletzt geprüft am 29.05.2019.



## AIS-basierte Bewertung des Schiffsverkehrs

### Datenerfassung – Mustererkennung – Bewertung

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Ziel der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen ist, den Schiffsführer in schwierigen Verkehrssituationen zu entlasten, wodurch sich die Leichtigkeit und Sicherheit in der Binnenschifffahrt erhöht. Darüber hinaus verbessert eine energieeffiziente Fahrweise durch die Optimierung von Fahrroute und Fahrgeschwindigkeit die Wirtschaftlichkeit und Konkurrenzfähigkeit des Verkehrsträgers. Eine wesentliche Voraussetzung bei der Entwicklung derartiger Fahrerassistenzsysteme ist die verlässliche Erfassung und Analyse der aktuellen Verkehrssituation. Diese zu erkennen und zu bewerten ist für den Menschen eine einfach zu leistende Aufgabe, stellt aber für ein Computersystem eine äußerst anspruchsvolle Aufgabe dar, was an der Vielzahl der Forschungsarbeiten auf diesem Teilgebiet der Informatik zu erkennen ist.

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Systems zur automatischen Identifizierung charakteristischer Verkehrssituationen aus AIS-Daten und deren Bewertung hinsichtlich ihrer Leichtigkeit und Sicherheit. Das Projekt gliedert sich in die folgenden Abschnitte:

- Aufbau einer geeigneten Infrastruktur (Datenbank) zum Import und zur Speicherung von AIS-Daten
- Entwicklung automatisierter Auswerterroutinen zur statistisch basierten statischen und dynamischen Analyse der AIS-Daten
- Entwicklung von Algorithmen zur Mustererkennung für die Identifizierung charakteristischer Verkehrssituationen aus vorliegenden AIS-Daten
- Automatisierte Bewertung der Leichtigkeit und Sicherheit des Schiffsverkehrs

#### 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV)

Mit der geplanten zentralen Datenbank erhalten das BMVI, die Oberbehörden sowie die Dienststellen der WSV einen einfachen Zugang zu AIS-Daten und den daraus abgeleiteten Informationen, die für vielfältige wasserbauliche

#### Auftragsnummer:

B3953.04.04.70012

#### Auftragsleitung:

Tarek Beck  
tarek.Beck@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Dirk Hünninger  
dirk.huenniger@uni-due.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2020

und verkehrstechnische Fragestellungen genutzt werden können. Neben dem Einsatz der Software zur adressierten, automatischen Erkennung und Bewertung von Verkehrssituationen oder den bereits in früheren Projekten behandelten Fragestellungen, wie die Ermittlung von Flottenstruktur, Liegestellennutzung und Uferabständen, wurde aktuell mit einer neu entwickelten Methode zur Auswertung der Empfangsabdeckung gezielt auf die Anforderungen der Fachstelle für Verkehrstechniken (FVT) in Koblenz als Infrastrukturbetreiber eingegangen.

### 3 Untersuchungsmethoden

Zur Umsetzung der einzelnen Projektabschnitte wird in Kooperation mit dem Institut für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme (ISMT) der Universität Duisburg-Essen eine Software entwickelt, mit der eine automatisierte, statistisch basierte, statische und dynamische Analyse erfolgen soll. Die Datengrundlage bilden die von der FVT über die BAW bereitgestellten AIS-Daten.

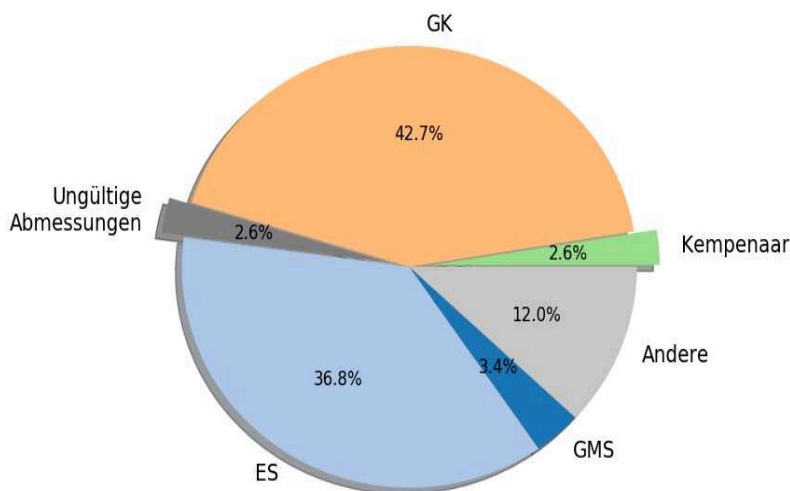
Zur Erweiterung der AIS-Daten werden neben Pegelinformationen über WISKI die von der WSV online bereitgestellten Transformationstools wie beispielsweise GnTrans oder der Bundeswasserstraßen-Locator eingesetzt. Die Mustererkennung sowie die Bewertung der Sicherheit und Leichtigkeit soll mit der Unterstützung von KI-Modellen ermöglicht werden. Anhand einer direkten Datenbankschnittstelle und projektspezifischen Auswertungen wird somit ein Werkzeug entwickelt, mit welchem sich neben einfachen statistisch basierten Auswertungen zudem eine Mustererkennung sowie die Bewertung von Sicherheit und Leichtigkeit durchführen lassen.

### 4 Ergebnisse

Bild 1 zeigt eine exemplarische, statistisch basierte Auswertung auf der Grundlage von Testdaten. Neben diesen ersten Entwicklungen wurde parallel der Bestand von AIS-Daten stetig erweitert. Neben typischen nutzerspezifischen Anpassungen zur besseren Handhabung der Software wurde im Zuge von projektspezifischen Anfragen die Software um zusätzliche Auswertungen erweitert.

Dies umfasste die Erstellung von detaillierten Filtern, um beispielsweise schiffsspezifische Auswertungen zu bestimmen Zeiträumen und Ortslagen durchführen zu können. Das Titelbild zeigt die Anwendung dieses Filters in Kombination mit einer dynamischen Analyse. Dargestellt sind mittlere Schiffsgeschwindigkeiten der Europaschiffsklasse über zehn Kilometer. Des Weiteren wurden Abstandsberechnungen zwischen mehreren Schiffen untereinander zu einer vorgegebenen Polylinie sowie die Berechnung des Abstandes zu einem Fixpunkt implementiert. Mit diesen Funktionalitäten lassen sich statistische Aussagen über Abstände zu Liegeplätzen, zum Fahrinnenrand sowie zu einzelnen Dalben berechnen.

Neben einer permanenten Erweiterung der Datengrundlage sind erste Testauswertungen bezüglich einer Mustererkennung geplant. Zudem soll die Möglichkeit, mehrere Schiffspfade zu exportieren, implementiert werden. Die Schiffspfade dienen einerseits als Grundlage zur Identifizierung charakteristischer Verkehrssituationen, andererseits kann ein aus Naturdaten berechneter Breitenbedarf ermittelt werden.



#### Literatur:

Feierfeil, T.; Hungershöfer, C.; Söhngen, B.; Orlovius, A. (2015): AIS-Messung auf Bundeswasserstraßen. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): 38. Dresdner Wasserbaukolloquium.

Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (2015): Ausrüstungsverpflichtung mit Inland-AIS-Geräten und Inland-ECDIS-Geräten. Online verfügbar unter [https://www.ccr-zkr.org/files/documents/ris/brochureAIS\\_de.pdf](https://www.ccr-zkr.org/files/documents/ris/brochureAIS_de.pdf), zuletzt geprüft: 07.08.2019.

Bild 1: Beispielhafte statistische Auswertung der AIS-Daten anhand der Schiffsklasse.



## Langfristsimulation in Fließgewässern

Entwicklung eines voll impliziten Verfahrens zur Simulation der langfristigen und großräumigen Sohlentwicklung in Fließgewässern

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die zuverlässige Langfristsimulation der Hydro- und Morphodynamik in Fließgewässern setzt neben einem robusten und zuverlässigen numerischen Verfahren die Berücksichtigung der Modellunsicherheiten voraus. Modellunsicherheiten haben unterschiedliche Ursachen. Ein klassisches Beispiel sind fehlerhafte oder ungenügende Eingangsdaten. In der Praxis muss zum Beispiel die räumliche Sedimentverteilung aus wenigen punktuellen Messungen geschätzt werden. Eine wesentliche Unsicherheit bei der Langfristsimulation stellen die hydraulischen Randbedingungen (Zuflussganglinien) dar, die für die Simulation der zukünftigen Sohlentwicklung angesetzt werden. Die zukünftigen hydraulischen Randbedingungen sind unbekannt und müssen daher künstlich erzeugt werden. Selbst bei einer perfekten Beschreibung des Anfangszustands hängt der Endzustand entscheidend von der verwendeten Zuflussganglinie ab. Für belastbare Aussagen über die langfristige Sohlentwicklung reicht es daher nicht aus, eine einzelne Simulation mit lediglich einer Ganglinie durchzuführen. Belastbare Prognosen sind nur möglich, wenn die Variabilität der hydraulischen Randbedingungen berücksichtigt wird. Dieser Variabilität kann durch Ensemble-Rechnungen Rechnung getragen werden, auf deren Grundlage die Prognoseunsicherheit abgeschätzt werden kann.

Ziel des FuE-Vorhabens ist es, ein zweidimensionales voll implizites numerisches Verfahren zu entwickeln, mit dem die langfristige und großräumige Sohlentwicklung in Fließgewässern simuliert werden kann. Es soll bei angemessener Genauigkeit größere Zeitschrittweiten als bisherige Verfahren erlauben um die Rechengeschwindigkeit soweit zu steigern, dass Ensemble-Rechnungen möglich werden. Die langen Rechenzeiten aktueller Verfahren verhindern bislang die Durchführung von Ensemble-Rechnungen.

**Auftragsnummer:**

B3953.05.04.70004

**Auftragsleitung:**

Dr. Leopold Stadler

leopold.stadler@baw.de

**Laufzeit:**

2016 bis 2021



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

Fragestellungen der WSV, die eine langfristige und großräumige Prognose der Entwicklung der Gewässersohle erfordern, könnten in Zukunft mithilfe impliziter numerischer Verfahren beantwortet werden. Durch die verkürzten Rechenzeiten lassen sich längere Zeiträume modellieren und Unsicherheiten, wie sie etwa in den Anfangs- und Randbedingungen vorliegen, mithilfe statistischer Methoden untersuchen. Die Möglichkeit, sogenannte Ensemble-Rechnungen durchzuführen, würde die Belastbarkeit der Modellaussagen erheblich steigern.

## 3 Untersuchungsmethoden

Für die Untersuchungen wurden in der BAW ein voll implizites und ein explizites 2D-Finite-Volumen-Verfahren für die Simulation der Hydrodynamik entwickelt. Beide Verfahren verfügen über eine MPI-Parallelisierung und können somit auf den BAW-eigenen Hochleistungsrechnern eingesetzt werden. Als Basis für die Verfahrensentwicklung dient die numerische Toolbox Dune (Blatt et al. 2016), durch deren Nutzung die Entwicklungszeit drastisch reduziert werden konnte. Dune beinhaltet neben fertigen Modulen für die räumliche und zeitliche Diskretisierung auch die notwendigen linearen und nichtlinearen Gleichungslöser.

Vor der Implementierung des morphodynamischen Modells muss zunächst geklärt werden, ob die voll implizite Diskretisierung zu einer Steigerung der numerischen Effizienz führt und ob bei den erforderlichen großen Zeitschrittweiten die Qualität der Ergebnisse dennoch mit den Ergebnissen eines expliziten Modells vergleichbar bleibt. Um die Effizienz und Qualität des entwickelten impliziten Verfahrens zu bewerten, bedarf es eines Vergleichs der Ergebnisse in der Hydrodynamik zwischen dem voll impliziten Verfahren, dem expliziten Verfahren sowie den aktuell in der Abteilung W eingesetzten Verfahren.

Der Vergleich wird anhand einer Reihe von Standardtestfällen durchgeführt. Zusätzlich erfolgt eine Validierung an einem Teilabschnitt des WSV-Auftrags „Geschiebezugabe mittlerer Niederrhein“. Dabei wird unter anderem untersucht, wie groß die Zeitschrittweiten für das implizite Verfahren an für die Fragestellung typischen Bundeswasserstraßen gewählt werden können. Im letzten Schritt soll die Wirksamkeit von Ensemble-Rechnungen für die Prognose und Sensitivitätsanalyse untersucht werden.

## 4 Ergebnisse

Im vorliegenden FuE-Projekt wurde erfolgreich ein neues, voll implizites Verfahren für die zweidimensionale hydrodynamisch-numerische Simulation (HN-Modell) entwickelt. Das HN-Modell konnte erfolgreich an Flussabschnitten von Rhein, Donau und Elbe eingesetzt werden. Dazu wurden die Rauheitswerte der Flusssohle in jedem Streckenabschnitt mithilfe von Wasserspiegeldaten kalibriert. In Abhängigkeit der Modellgröße und Gitterauflösung lassen sich mit dem voll impliziten HN-Verfahren an einem Tag über 2500 Tage Abflussgeschehen simulieren. In bisherigen Tests hat sich gezeigt, dass das neu entwickelte Verfahren mehr als dreimal so schnell wie das bislang eingesetzte Verfahren sein kann. Es ist noch zu prüfen, ob diese Rechengeschwindigkeit auch bei einer zusätzlichen Simulation der morphodynamischen Prozesse erreicht werden kann.

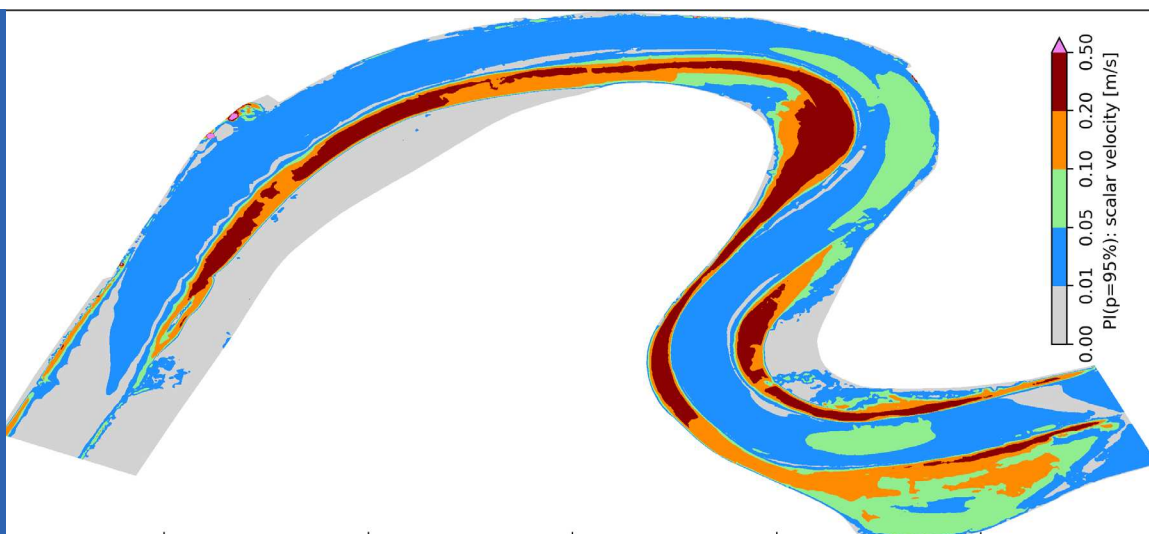
Um eine kontinuierliche Weiterentwicklung und Verfügbarkeit zu gewährleisten, wurde im letzten Jahr damit begonnen, die bisherigen Entwicklungen in das Dune-Modul DuMu<sup>x</sup> ([www.dumux.org](http://www.dumux.org)) zu überführen. Das Dune-Modul DuMu<sup>x</sup> wird hauptsächlich von den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung am Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart entwickelt. Nach der Überführung der bisherigen Arbeit in DuMu<sup>x</sup> soll im Rahmen des FuE-Vorhabens „Implementierung numerischer Verfahren für flussbauliche Fragestellungen in der Entwicklungsumgebung DUNE“ die Erweiterung für die morphodynamische Modellierung erfolgen.

Die Zusammenarbeit mit den Entwicklern von DuMu<sup>x</sup> gewährleistet einen engen wissenschaftlichen Austausch, insbesondere auch im Hinblick auf aktuelle und geplante Arbeiten. Die professionalisierte Softwareentwicklung im Rahmen des Open-Source-Projekts DuMu<sup>x</sup> führt gleichzeitig zu einer deutlichen Verbesserung der Qualität, Dokumentation und Wartbarkeit des Quellcodes.

Das an der BAW entwickelte HN-Verfahren wird künftig über DuMu<sup>x</sup> einer breiten Öffentlichkeit zur Anwendung zur Verfügung stehen. Wie in jedem Open-Source-Projekt können sich Interessierte aus der Praxis und Forschung an der Weiterentwicklung der Software beteiligen.

### Literatur:

Blatt, M.; Burchardt, A.; Dedner, A.; Engwer, C.; Fahlke, J.; Flemisch, B.; Gersbacher, C.; Gräser, C.; Gruber, F.; Grüninger, C.; Kempf, D.; Klöforn, R.; Malkmus, T.; Müthing, S.; Nolte, M.; Piatkowski, M. und Sander, O. (2016): The Distributed and Unified Numerics Environment, Version 2.4. Archive of Numerical Software, 4 (100), S. 13–29.



## Integration von Zuverlässigkeitsanalysen in die hydro- und morphodynamische Modellierung von Binnenwasserstraßen

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Für Untersuchungen zur Wirkungsweise flussbaulicher Maßnahmen ist die hydro- und morphodynamische numerische Modellierung inzwischen ein etabliertes Werkzeug. Dabei werden Modellparameter und Eingangsdaten verwendet, die durch natürliche Variabilität, ungenaue Messungen oder aber wegen der ungenügenden Beschreibung der physikalischen Prozesse zum Teil erheblichen Schwankungsbreiten unterliegen. Diese Unsicherheiten können gravierende Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit der Modellergebnisse haben. Mithilfe von Zuverlässigkeitsmethoden kann der Einfluss auf die Modellergebnisse abgeschätzt und als Wahrscheinlichkeitsverteilung, Sensitivität oder Vertrauensintervall dargestellt werden.

Ziel des Projektes ist die Integration von Zuverlässigkeitsanalysen für hydro- und morphodynamische Modellierung in den Projektalltag der BAW. In einem Vorläuferprojekt wurde die Methodik erarbeitet und auf Prinzipmodelle angewendet. In diesem Projekt liegt der Schwerpunkt auf dem erfolgreichen und effizienten Einsatz der Methoden für Flussmodelle. Zu diesem Zweck müssen für typische Fragestellungen des Flussbaus weitere Erfahrungen in der Anwendung der Zuverlässigkeitsanalyse gesammelt werden. Diese münden dann in Benutzerleitfäden und Softwareprodukte, die den Projektbearbeitern eine erfolgreiche und qualitätsgesicherte Anwendung der Methoden ermöglichen.

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

Der Einsatz von prognosesicheren, auf die Fragestellungen der WSV zugeschnittenen, mehrdimensionalen numerischen Modellen sichert die effiziente und qualitativ hochwertige Bearbeitung von Projekten mit morphodynamischen Fragestellungen. Gerade bei Langzeitprognosen, die eine erhebliche Unschärfe aufgrund der langen Vorhersagezeiträume und der komplexen Prozesse aufweisen, sind Zuverlässigkeitsanalysen und die Quantifizierung der Unsicherheiten hilfreich und tragen zur Verbesserung der Bewertung flussbaulicher Maßnahmen bei.

#### Auftragsnummer:

B3953.05.04.70005

#### Auftragsleitung:

Dr. Rebekka Kopmann  
 rebekka.kopmann@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2020

### 3 Untersuchungsmethoden

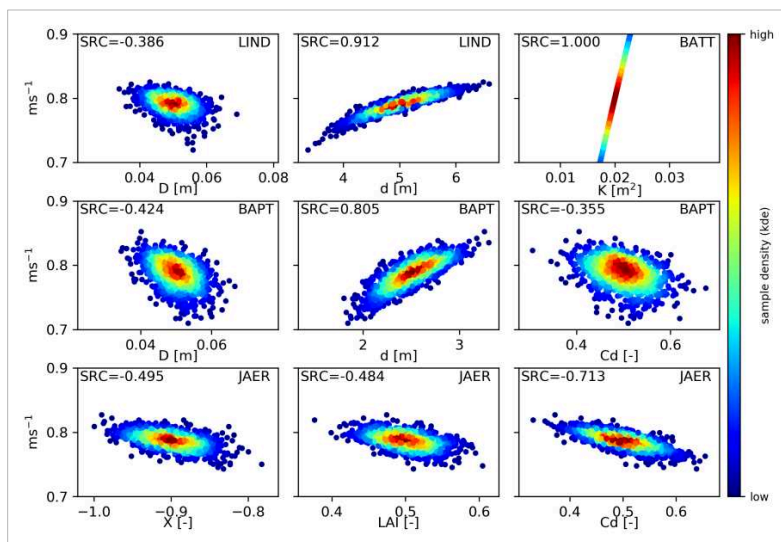
Um die Unsicherheiten hydrodynamischer Modelle auf dem Vorland abschätzen zu können, wurde die Rauheitsberechnung von Vorlandvegetation hinsichtlich der Sensitivität der Eingangsparameter untersucht (Dalledonne et. al. 2019). Für diese Studie wurden vier Vegetationsansätze verglichen: Lindner und Pasche (LIND), Baptist (BAPT), Järvelä (JAER), und Battiato und Rubol (BATT). Es wurden drei verschiedene Methoden aus der Zuverlässigkeitsanalyse verwendet: Die klassische Monte-Carlo-Methode (MC), die First-Order-Second-Moment-Methode (FOSM) und die Metamodellierung. Die Untersuchung erfolgte mit einem zweidimensionalen hydrodynamischen Modell eines 10 km langen Streckabschnitts des Rheins. Dieses wurde für stationäre Strömungszustände kalibriert und die Sensitivitäten wurden hinsichtlich der Strömungsgeschwindigkeiten analysiert.

Die Analyse untersucht, welche Größenordnung die maximalen Abweichungen der Simulationsergebnisse annehmen, wenn Unsicherheiten für die Eingangsgrößen der betrachteten Vegetationsansätze berücksichtigt werden. Dafür muss zunächst jedem Eingangsparameter ein Fehler bzw. eine Abweichung z. B. in Form einer Standardabweichung zugewiesen werden. Diese Abweichung sollte klein genug sein, um noch als Fehler zu gelten, aber groß genug, um die tatsächliche Parameterunsicherheit zu erfassen. Es gibt keine allgemeingültige Regel für die Auswahl eines geeigneten Werts, da verschiedene Aspekte dazu beitragen können, beispielsweise die Messgenauigkeit, mit der der Parameter bestimmt wurde, räumliche/zeitliche Abweichungen und die mathematische Formulierung des Prozesses. Deswegen muss diese Auswahl normalerweise auf Grundlage von verfügbaren Studien (Literatur) und fachlicher Erfahrung getroffen werden. Drei Vegetationsparameter wurden entsprechend den Angaben in Aberle und Järvelä (2013) und Västilä und Järvelä (2014) variiert. Für weitere vier Parameter wurde eine Standardabweichung von 10 % des kalibrierten Wertes angenommen ( $\sigma = 0,1\mu$ ).

### 4 Ergebnisse

Ein wesentliches Resultat der Analyse ist das Prognoseintervall, d. h. das Intervall, in dem sich die Ergebnisse (z. B. Strömungsgeschwindigkeiten, siehe Titelbild) mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit befinden. Für alle untersuchten Berechnungsansätze ergeben sich qualitativ ähnliche Ergebnisse. Bei durchströmter Vegetation berechnen BAPT und BATT, im Gegensatz zu LIND und JAER, größere Geschwindigkeitsvarianzen. Bei überströmter Vegetation führen alle Ansätze zu größeren Unsicherheiten als bei durchströmter Vegetation, da die Vegetationshöhe als zusätzlicher unsicherer Parameter berücksichtigt wird. Zusammenfassend zeigt der JAER-Ansatz im Durchschnitt die kleinsten Prognoseintervalle, was diesen Ansatz für den Praxiseinsatz empfiehlt. Es ist wichtig zu beachten, dass die Ergebnisse der Analyse nicht nur von den definierten Standardabweichungen der Eingabeparameter abhängen, sondern auch von der Anzahl der in der Analyse berücksichtigten Parameter. In diesem Sinne ist der BATT-Ansatz mit nur einem einzigen Parameter ebenfalls für den Projekteinsatz attraktiv.

Mithilfe von Scatterplots (erzeugt aus MC-Ergebnissen) und dem standardisierten Regressionskoeffizienten (SRC) wurde u. a. festgestellt, dass die Vegetationsparameter Permeabilitätskoeffizient  $K$  (BATT), Vegetationsabstand  $d$  (LIND, BAPT) und Widerstandskoeffizient  $C_D$  (JAER) einen stärkeren linearen Zusammenhang mit der Strömungsgeschwindigkeit zeigen ( $|SRC|$  strebt gegen 1,0) als Vegetationsdurchmesser  $D$  (LIND, BAPT), Widerstandskoeffizient  $C_D$  (BAPT), Vogelparameter  $\chi$  (JAER) und Blattflächenindex LAI (JAER) (Bild 1). Diese Kenntnis der Wirkungsweise der Vegetationsparameter kann den Kalibrierungsprozess numerischer Modelle wesentlich unterstützen.



#### Literatur:

Aberle, J.; Järvelä, J. (2013): Flow resistance of emergent rigid and flexible floodplain vegetation, *J. Hydraul. Res.*, 51, 33–45.

Dalledonne, G. L.; Kopmann, R.; Brudy-Zippelius, T. (2019): Uncertainty quantification of floodplain friction in hydrodynamic models, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 3373–3385.

Västilä, K.; Järvelä, J. (2014): Modeling the flow resistance of woody vegetation using physically based properties of the foliage and stem, *Water Resour. Res.*, 50, 229–245.

Bild 1: Scatterplot: Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit bezüglich verschiedener Vegetationsparameter an einem repräsentativen Berechnungsknoten auf dem Vorland.

1	0	0	0	0	0	1	0	0
0	1	0	0	0	0	0	1	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	1	0
0	1	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	1	0
0	0	0	0	0	1	0	1	0

## Implementierung numerischer Verfahren für flussbauliche Fragestellungen in der Entwicklungsumgebung DUNE

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Hydro- und morphodynamische numerische Modelle sind wichtige Werkzeuge bei der Bearbeitung flussbaulicher Projekte der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) im Bereich der Binnenschiffahrtsstraßen. In den letzten Jahren sind die Komplexität der Fragestellungen und die Anforderungen an die Genauigkeit und Belastbarkeit der Modellergebnisse stetig gestiegen. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, ist eine kontinuierliche Weiterentwicklung der eingesetzten numerischen Simulationssoftware notwendig. Ziel dieses FuE-Vorhabens ist es deshalb, aktuelle – in der Wissenschaft etablierte – hydro- und morphodynamische numerische Methoden für die Bearbeitung flussbaulicher Projekte verfügbar zu machen. Der Schwerpunkt liegt auf der Weiterentwicklung schneller numerischer Methoden für die Langfristsimulation von Sedimenttransport im Bereich der Binnenschiffahrtsstraßen.

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

Durch Weiterentwicklung und Anwendung moderner numerischer Methoden wird die fachliche Unterstützung der WSV im Bereich der flussbaulichen Projekte verbessert, um auch in Zukunft eine Beratung auf dem Stand der Wissenschaft und Technik gewährleisten zu können.

### 3 Untersuchungsmethoden

Dieses Forschungsvorhaben verwendet die modulare Open-Source-Entwicklungsumgebung DUNE. Diese wurde bereits im FuE-Vorhaben „Langfristsimulation in Fließgewässern“ eingesetzt, um ein eigenes BAW-Modul (DUNE-SWF) für die zweidimensionale hydronumerische Simulation zu entwickeln. Aufgrund der vielfältigen Funktionalitäten, die in dieser Entwicklungsumgebung bereitgestellt werden (z. B. MPI-Parallelisierung und Diskretisierungsverfahren), und ihrer modernen Softwarearchitektur eignet sie sich hervorragend, um darauf aufbauend moderne und robuste numeri-

**Auftragsnummer:**

B3953.05.04.70006

**Auftragsleitung:**

Dr. Leopold Stadler  
 leopold.stadler@baw.de

**Auftragsbearbeitung:**

Martin Utz  
 martin.utz@baw.de

**Laufzeit:**

2018 bis 2021

sche Verfahren zu implementieren. Das bestehende Modul wird im Rahmen dieses Forschungsvorhabens weiterentwickelt und um den Sedimenttransport ergänzt, sodass abschließend ein Verfahren zur Verfügung steht, das gezielt auf die Belange der BAW im Bereich der Binnenschiffahrtsstraßen zugeschnitten ist. Durch den fachlichen Austausch mit der Entwicklergemeinschaft von DUNE und einer Zusammenarbeit mit dem Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart hat dieses Projekt Partner, deren Forschungsschwerpunkte und Kompetenzen (Numerik, Softwareentwicklung) die anwendungsorientierten Ziele der BAW sehr gut ergänzen.

In einem ersten Schritt wird untersucht, inwieweit DUNE-SWF den Praxisanforderungen der BAW gerecht wird. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse bilden eine wichtige Grundlage für die Weiterentwicklung des Verfahrens. Bei der Implementierung des Sedimenttransports sind verschiedene Ansätze möglich. Neben den klassischen sind für die Langfristsimulation auch vereinfachte Ansätze denkbar, um die Rechenzeit zu verkürzen. Der Fokus liegt dabei stets auf einer stabilen und leistungsfähigen Numerik, mit der auch lange Zeiträume in akzeptabler Rechenzeit simuliert werden können. Aus diesem Grund wird eine implizite Zeitdiskretisierung verwendet, die es erlaubt mit deutlich größeren Zeitschritten als im expliziten Fall zu rechnen. Den Abschluss des Projekts bilden eine Validierung des neuen Verfahrens anhand von Testfällen aus der Wissenschaft und die Überprüfung der Eignung an typischen flussbaulichen WSV-Projekten.

#### 4 Ergebnisse

Im Jahr 2018 wurde das bestehende hydronumerischen Verfahrens (DUNE-SWF) an einem Abschnitt der Elbe zwischen Torgau und Wittenberg erfolgreich getestet. Sowohl die Erstellung des Modells als auch die Kalibrierung anhand der Sohlrauheit haben sich problemlos mit DUNE-SWF durchführen lassen. Die Simulationsergebnisse stimmen gut mit den vorhandenen Messwerten überein.

Im Jahr 2019 wurden die Ansätze aus dem hydronumerischen Verfahren DUNE-SWF in DuMu<sup>x</sup> (Koch et al. 2019) integriert, das ebenfalls auf Dune basiert. DuMu<sup>x</sup> erlaubt es, mit geringem Aufwand bestehende DuMu<sup>x</sup>-Module miteinander zu koppeln, ohne dabei die Kernkomponenten verändern zu müssen. Darüber hinaus stellt es verschiedene Hilfen für die numerische Lösung von partiellen Differentialgleichungen bereit. Zudem wurde das Modul DuMu<sup>x</sup>-Shallowwater erstellt. Dieses greift auf die in DuMu<sup>x</sup> implementierten hydronumerischen Verfahren zu und ergänzt diese um weitere Komponenten wie die Ein- und Ausgabe. Mit DuMu<sup>x</sup>-Shallowwater steht somit ein anwenderfreundliches Programm zur Simulation der Flachwassergleichungen zur Verfügung.

Für den Sedimenttransport wird aktuell das Modul DuMu<sup>x</sup>-Sediment erstellt. Dieses enthält alle für die Sedimenttransportsimulation benötigten Komponenten. Hierzu zählen insbesondere die Sedimenttransportformeln sowie das Untergrundmodell. Der Vorteil der Erstellung zweier unabhängiger Module besteht darin, dass DuMu<sup>x</sup>-Shallowwater und DuMu<sup>x</sup>-Sediment unabhängig voneinander entwickelt und eingesetzt werden können. Mithilfe des sogenannten Coupling manager (Bild 1) lassen sich beide Module mit geringem Aufwand miteinander verbinden. Der Coupling manager regelt nicht nur den Austausch von einzelnen Variablen (z. B. Wasserstand), sondern erstellt vollautomatisch ein gekoppeltes Gleichungssystem zur Lösung des numerischen Gesamtproblems. Durch die Nutzung von DuMu<sup>x</sup> können bei Bedarf die dort bereits vorhandenen Modelle für die ungesättigte und gesättigte Bodenzone mit den Flachwassergleichungen gekoppelt werden, um den Austausch von Oberflächengewässern mit dem Untergrund zu modellieren.

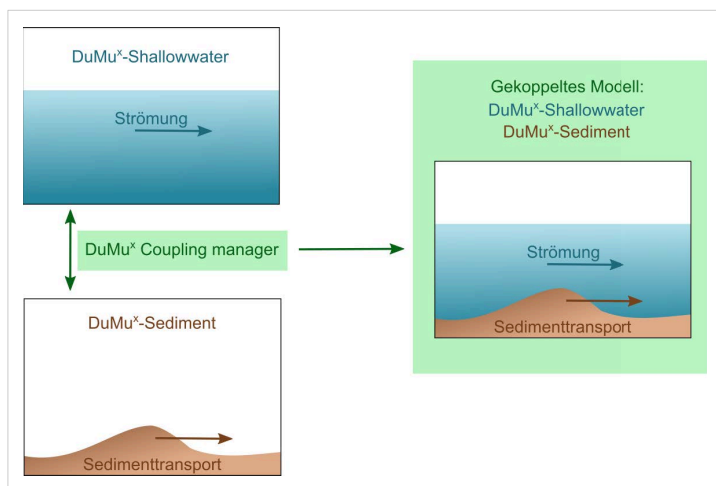


Bild 1: Kopplung zwischen den beiden Modulen DuMu<sup>x</sup>-Shallowwater und DuMu<sup>x</sup>-Sediment.

#### Literatur:

Koch, T.; Gläser, D.; Weishaupt, K.; Ackermann, S.; Beck, M.; Becker, B.; Burbulla, S.; Class, H.; Coltman, E.; Emmert, S.; Fetzner, T.; Grüninger, C.; Heck, K.; Hommel, J.; Kurz, T.; Lipp, M.; Mohammadi, F.; Scherrer, S.; Schneider, M.; Seitz, G.; Stadler, L.; Utz, M.; Weinhardt, F.; Flemisch, B. (2019): DuMux 3 -- an open-source simulator for solving flow and transport problems in porous media with a focus on model coupling. Online verfügbar unter <http://arxiv.org/abs/1909.05052>, zuletzt geprüft am 19.03.2020.



Forschung Xpress

## IMMERSE

### Implementing MeasuRes for Sustainable Estuaries, a North Sea Region Programme

#### 1 Objective and Tasks

North Sea Region estuaries are dynamic environments subject to persistent and increasing pressures such as modified tidal ranges, higher sedimentation rates and increased risk of flooding, which impact estuary ecological functioning and services. The implementation of coastal management measures that respond to those pressures have to follow EU-regulations (e. g. Natura 2000 and Water Framework Directive) and demands long planning periods, stakeholder commitment and large investments.

The aim of the project IMMERSE is to accelerate the implementation of such large-scale measures that contribute to a sustainable management of North Sea ecosystems. Research institutions, governmental administrations and enterprises from the North Sea region address different challenges regarding sediment management, flood protection and the creation of intertidal habitats. Areas of interest are the estuaries Elbe, Scheldt, Göta Älv, Tees, Humber, Isefjord/Holbaekfjord and Roskildfjord.

The objective is to improve the design, testing and implementation of estuary management measures by using transnational knowledge and integrating stakeholders. Knowledge-exchange in expert groups will provide different angles of expertise for the development of new solutions and help build a network of estuary managers and experts.

#### 2 Importance for the Federal Waterways and Shipping Administration (WSV)

New solutions and improved designs of river engineering measures will be developed in the project. For tidal amplification, a pressure that affects the sediment transport and thus the maintenance works for navigation, design solutions, pilot projects, as well as hydrodynamic and feasibility assessments will be developed or investigated by different organisations. The know-how of the BAW in best practices to secure navigation, managing the estuaries sustainably will be enhanced by exchanging knowledge and expertise with other experts of the North Sea estuarine community.

**Project Number:**

B3955.00.04.70001

**Project Leader:**



Holger Rahlf  
holger.rahlf@baw.de

**Person in Charge:**



Victoria Ortiz  
victoria.ortiz@baw.de

**Duration:**

2018 until 2021

Within the project, the BAW assesses a long-term river engineering measure in the tidal Elbe using a hydrodynamic-morphodynamic numerical model. The measure consists of reconnecting the anabranch Dove-Elbe, nowadays cut-off from the tidal regime, to the Elbe. This investigation focuses on an adapted sediment management that may improve the maintenance and accessibility of the Elbe estuary fairway. Based on these hydrodynamic-morphodynamic model results, a feasibility study will be conducted within the project to evaluate ecological aspects and stakeholders interests. The transnational cooperation will lead to benefits for the Elbe partners (e. g. WSV, HPA, Forum Tideelbe, Stiftung Lebensraum Elbe) as well as other estuaries in Europe who learn from the experiences made in Germany.

### 3 Research Methods

To assess how adequate it is to reconnect the Dove-Elbe to the tidal Elbe in terms of hydraulic effectivity (e. g. reducing tidal range, upstream sediment transport and tidal intrusion), three-dimensional numerical simulations will be conducted using the coupled hydrodynamic-morphodynamic modelling system UnTrim-SediMorph. The computational domain consists of an unstructured orthogonal grid that extends from the tidal weir at Geesthacht to the mouth of the estuary at the North Sea.

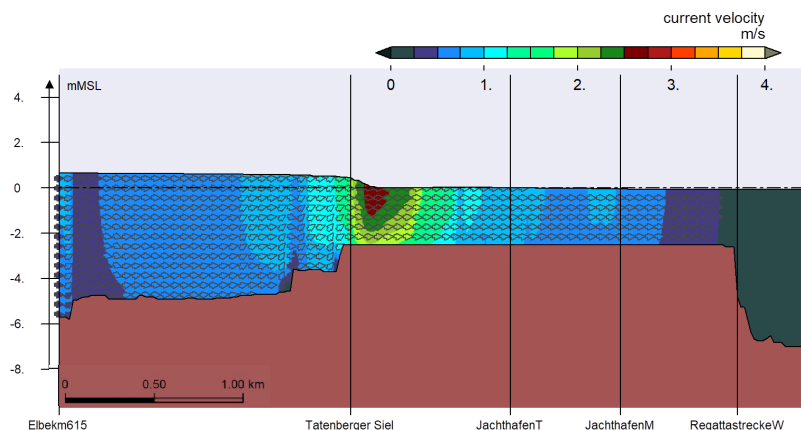
The assessment of the measure together with similar solutions aiming to improve the sediment management in other estuaries will be discussed within the IMMERSE Transnational Estuary Exchange Labs (TEEL). The TEELs are interactive workshops that provide a platform to discuss the development of such solutions between experts of the North Sea estuarine community. Here, the BAW will provide recommendations taken from the numerical model developed for the Elbe estuary on how to adapt and apply these findings in other estuaries.

### 4 Results

The design of the engineering measure in the Dove-Elbe, and the setup of its numerical model advanced. The numerical model started to be adapted to model a flow control structure at the Dove-Elbe inlet into the Elbe. At the same time, the estuarine partnership Forum Tideelbe organized several meetings with residents and stakeholders to take into account their concerns in the final measure design. This final measure layout will be now evaluated through the numerical model.

In June 2019, the first Transnational Exchange Lab took place in Gothenburg. Here, 60 participants met to share practices and progress on the development of solutions related to governance, flood protection and sediment management. In particular innovative methods for treating and re-using contaminated sediment were discussed. One main take-home message of the session was that more knowledge exchange is necessary to better understand the different ways how similar issues are dealt with in other estuaries and how some of these issues like climate change even stretch across borders.

In the next TEEL, sediment management measures and solutions with focus on hydro-morphological effects will be discussed, including preliminary results of the numerical model at the Dove-Elbe. For more information visit the project website <https://northsearegion.eu/immerse>.



#### Literature:

Casulli, V.; Lang, G. (2004): Mathematical Model UnTRIM – Validation Document. Technical Report. Bundesanstalt für Wasserbau: Trento, Hamburg.

Malcherek, A.; Piechotta, F.; Knoch, D. (2005): Mathematical Module SediMorph – Validation Document. Technischer Bericht. Bundesanstalt für Wasserbau: Karlsruhe, Hamburg.

Figure 1: Snapshot of flood current velocity at the Dove-Elbe reconnection, water level gradient due to weir constriction (preliminary simulations).



## Maßstabseffekte im schiffbaulichen Modellversuch

Quantifizierung der zu erwartenden Abweichung bei der Übertragung in die Natur

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Übertragung von experimentell ermittelten Messwerten aus dem Modellmaßstab in den Naturmaßstab ist mit Unsicherheit behaftet. Einzelne Werte aus dem Modellversuch werden in die Wirklichkeit durch Anwendung physikalischer Maßstabsgesetze übertragen. Für eine Kombination aus Messwerten können diese jedoch nicht zugleich erfüllt sein. Prominentes Beispiel aus der Strömungslehre, anzuwenden bei Schiffsmodellversuchen, ist die Unmöglichkeit, gleichzeitig die Ähnlichkeit der Turbulenz und der erzeugten Oberflächenwellen einzustellen. Als Lösungsansatz werden im schiffbaulichen Versuchswesen empirische Korrekturansätze genutzt, beispielsweise die Reibungskennlinie beim Propulsionsversuch. Bei Modellversuchen geht man davon aus, dass die Maßstabseffekte in der Größenordnung des Messfehlers liegen. Dies ist eine praktikable, aber nicht abgesicherte Annahme. Die Schwierigkeit liegt hierbei im Zusammenspiel unterschiedlicher Effekte, die in der Gesamtwirkung schwer abzuschätzen sind. Viele Kräfte und Effekte, die für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) relevant sind, werden schiffbaulich nicht oder nur in sehr geringem Umfang untersucht.

Das Ziel ist die Bestimmung der Größenordnung der Maßstabseffekte bei der Übertragung von Messwerten aus dem Modellversuchswesen auf den Naturmaßstab.

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

Die Absicherung der Genauigkeits- und Gültigkeitsbereiche der Modellversuche bei Übertragung auf den Naturmaßstab (Großausführung) ist bei vielen Aufgaben der WSV nötig. Eine Verfeinerung der bisherigen Abschätzungen bei der Übertragung führt zu präziseren und verlässlicheren Aussagen zur Wechselwirkung Schiff-Schifffahrtsstraße. Zusätzlich kommen die Erkenntnisse aus diesem Projekt der Schiffsführungssimulation bei Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse sowohl im See- als auch im Binnenbereich zugute, da sie die Einsatzmöglichkeit von Modellversuchen für die Kalibrierung von Koeffizienten der Simulation signifikant verbessern.

#### Auftragsnummer:

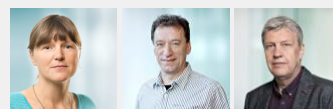
B3955.01.04.70174

#### Auftragsleitung:



Dr. Carl-Uwe Böttner  
 carl-uwe.boettner@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Hanne Jansch  
 hanne.jansch@baw.de  
 Christian Maushake  
 christian.maushake@baw.de  
 Thorsten Dettmann  
 thorsten.dettmann@baw.de

#### Laufzeit:

2015 bis 2020



### 3 Untersuchungsmethoden

Der Übertragungsfehler bei der Auswertung von Modellversuchen soll im direkten Vergleich mit Naturmessungen ermittelt werden. Hierzu sollen Manöver mit einem geeigneten Schiff bei verschiedenen Wassertiefen gefahren und hochpräzise gemessen werden, die dann als Referenz für Modellversuche und Manövriermodele zur Verfügung stehen. Kräfte und weitere fahrdynamische Größen, die in der Naturmessung nicht zugänglich sind, sollen durch numerische Simulationen im Naturmaßstab untersucht werden. Die Modellversuche und die numerischen Modellrechnungen werden in einer Serie verschiedener Maßstäbe durchgeführt, um eine systematische Analyse der Übertragungseffekte zu ermöglichen.

Im Bereich der Binnenschifffahrt erfolgt der Vergleich von Manöverfahrten (wie z. B. Z-Manöver) aus Naturuntersuchungen mit einem 135 m langen Binnenschiff und Modelluntersuchungen mit dem verfügbaren Referenzschiff im Modellmaßstab von 1:16 eines in der Natur 135 m langen Binnenschiffes.

### 4 Ergebnisse

Die Manöverfahrten im Naturmaßstab („sea trials“) mit der GSS MELLUM sind abgeschlossen und werden ausgewertet. Es wurden die IMO-Standardmanöver bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Kielfreiheiten (Bild 1) durchgeführt und mit der höchsten derzeit verfügbaren Präzision vermessen und aufgezeichnet. Dabei wurde auf Vollständigkeit der erfassten Daten und Messgrößen geachtet. So wurden neben den fahrdynamischen Größen Position, Richtung, Fahrt über Grund, Lage im Raum (Krängung, Trimm, Tauschung) auch die lokale Strömung zur genauen Bestimmung der Fahrt durchs Wasser gemessen, die Maschinendaten inklusive Hebelstellungen und Steigungseinstellung des Verstellpropellers und die Ruderbefehle sowie die aktuellen Ruderlagen zeitaufgelöst detektiert und gespeichert.

Die GSS MELLUM hatte kurz vor der Messkampagne einen regulären Werftaufenthalt, dadurch war zum einen ein glattes Unterwasserschiff sichergestellt, zum anderen konnten die Rumpfform und die Anhänge mit einem Laserscanner vermessen und zur Erstellung numerischer Modelle zur Verfügung gestellt werden. Es wurde die Gelegenheit genutzt, die Messkampagne auf einer internationalen Fachkonferenz einem breiten Publikum aus Spezialisten zu präsentieren und zur Diskussion zu stellen (Jansch und Böttner 2019). Die geplante Veröffentlichung in Form eines internationalen Test-Cases (Benchmark) wurde sehr begrüßt.

Die Universität Rostock untersuchte für dieses Projekt den Einfluss der Grenzschichtdicke und der Turbulenz auf die dynamische Schwimmelage und auf den Squat im Flachwasser. Ziel der numerischen Untersuchungen ist, die Bedeutung verschiedener Turbulenzgrade und unterschiedlicher Grenzschichtdicken für hydrodynamische Kräfte wie den Längswiderstand oder den Squat im Flachwasser zu ermitteln. Dazu war es erforderlich, ein dynamisch-adaptives Wandmodell in OpenFOAM zu implementieren (Popovac und Hanjalic 2007). Es treten deutliche Unterschiede in den Ergebnissen mit diesem Wandmodell zu den Standard-Wandmodellen bei der Berechnung der Umströmung eines Rumpfes auf. Dies resultiert aus lokalen Strömungszuständen mit entgegengesetztem Druckgradienten (adverse pressure gradient), wie sie im Bereich des Hinterschiffs vorkommen (Böttner und Shevchuk 2019). Damit konnte der Maßstabseffekt durch unterschiedliche Turbulenzgrade auf Nachstrom und Schwimmelage vergleichend bei zwei Containerschiffen untersucht werden (Shevchuk et al. 2019).

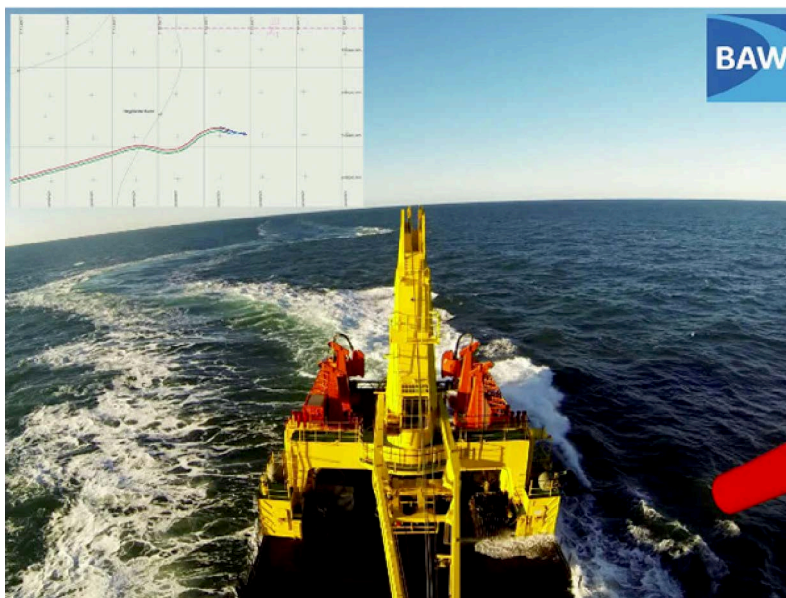


Bild 1: Manöver zur Ermittlung der Fahrdynamik im Tiefwasser.

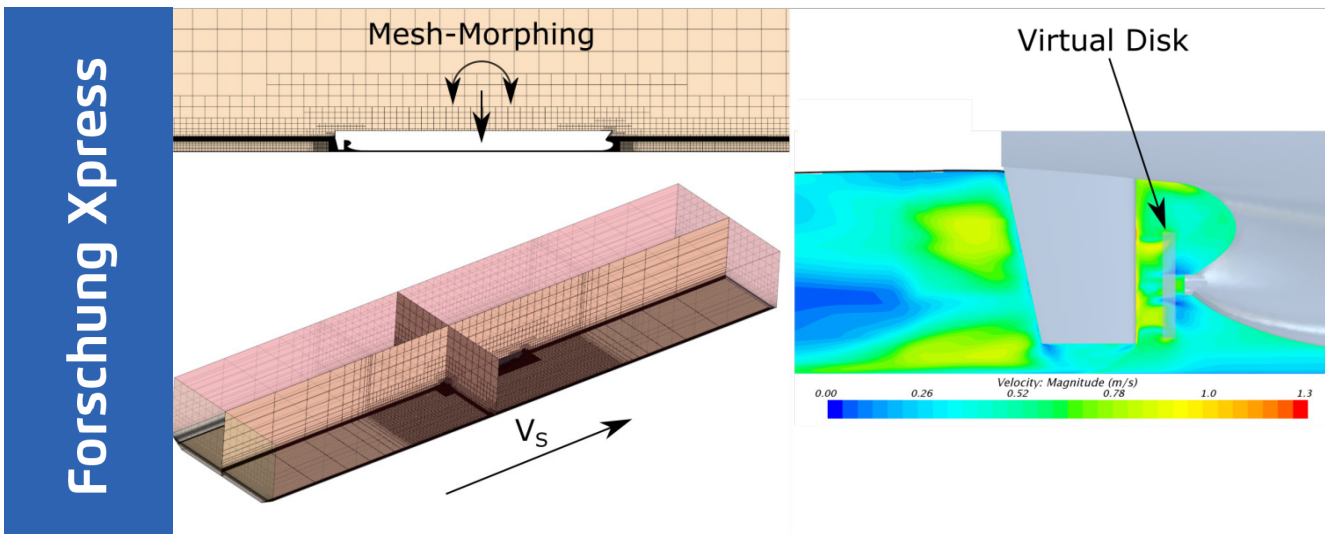
#### Literatur:

Jansch, H.; Böttner, C.-U. (2019): Sea Trials for Determination of Manoeuvring Characteristics in Shallow Water Conditions. In: Proceedings of 5th MASHCON 2019, 187–194.

Böttner, C.-U.; Shevchuk, I. (2019): Disequilibrium Wall Function in RANS-SE Computation applied to Flow Conditions around Ship's Hull. In: Proceedings of MARINE 2019, 491–501.

Popovac, M.; Hanjalic, K. (2007): Compound Wall Treatment for RANS Computation of Complex Turbulent Flows and Heat Transfer. In: Flow, Turbulence and Combustion, 78 (2).

Shevchuk, I.; Böttner, C.-U.; Kornev, N. (2019): Numerical Investigation of Scale Effects on Squat in Shallow Water. In: Proceedings of 5th MASHCON 2019, 389–402.



## Schiffshydrodynamik von Seeschiffen

### Robuste Berechnung im seitlich begrenzten Flachwasser

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Berechnung der Schiffsumströmung eines Seeschiffs mit der CFD-Methode sowie die Berechnung der schiffsdynamischen Parameter Squat und Trimm sind Ziele dieses Forschungsprojektes. Dabei liegt der Fokus auf einer robusten Berechnung: Robust meint hier die Berechnung von sich unterschiedlich verhaltenden Seeschiffen im Trimm, sodass ein breites Spektrum von Verhaltensmöglichkeiten von Schiffen abgedeckt werden kann. Die in BAW Aktuell (Kastens 2015) dokumentierten Ergebnisse bilden dabei die Grundlage.

Neben der robusten Berechnung steht die Verwendung neuerer Software-techniken im Fokus, die eine naturähnlichere Abbildung des bisherigen numerischen Versuchsaufbaus versprechen. Hierbei geht es vor allem um eine Optimierung des bestehenden Simulationssetups und die Untersuchung von Sensitivitäten. Die Simulationsergebnisse werden mit Messungen aus dem physikalischen Modell verglichen, um die Güte der Simulationen zu dokumentieren. Die Kenntnis der Güte oder die Validität ist für die Bewertung von Simulationsergebnissen unerlässlich: Sie zeigt mögliche Defizite von Simulationsergebnissen auf, die bei der Interpretation Berücksichtigung finden müssen.

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

In der Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff/Seeschiffahrtsstraße werden u. a. physikalische Modelle verwendet, um Fragestellungen der WSV – wie auftretende dynamische Kräfte bei der Begegnung von Post-Panmaxschiffen – zu beantworten. Um diese Fachaufgabe zukünftig effizienter durchführen zu können, wird der physikalische Modellversuch um die Methode der numerischen Strömungssimulation (CFD) ergänzt. Diese bietet zentrale Vorteile: So können beispielsweise Veränderungen im Versuchsaufbau mit vergleichsweise geringem Zeitaufwand gegenüber den Umbauten in einer Versuchshalle durchgeführt werden. Ebenso sind Berechnungen direkt unter dem Rumpf eines Schiffes möglich, ohne die Strömung durch Messgeräte selbst zu stören. Vergleichbare Messungen im Schiffswellenbecken wären nur mit sehr großem Aufwand möglich. Die Verfügbarkeit eines numerischen Mo-

#### Auftragsnummer:

B3955.01.04.70225

#### Auftragsleitung:



Marko Kastens  
 Marko.Kastens@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Jonas Bechthold  
 Jonas.Bechthold@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2020

dellverfahrens zur Vorhersage fahrdynamischer Größen (Trimm und Squat), Wellen und Strömungen im Flachwasser ist bei vielen Aufgaben der WSV erforderlich.

Ergebnisse aus Untersuchungen zur Schiffsumströmung können zukünftig auch in die Schiffsführungssimulation einfließen und diese realitätsnäher gestalten. Durch sie kann eine Bemessung und wirtschaftliche Ausnutzung (Befahrbarkeitsanalyse) der Seeschiffstraßen optimiert werden.

### 3 Untersuchungsmethoden

Das kommerziell verfügbare und bereits bei der BAW im Einsatz befindliche Softwarepaket STAR-CCM+® wird genutzt, um die numerischen Strömungssimulationen durchzuführen. Werte aus Messungen in der Natur und dem physikalischen Modellversuch werden – soweit vorhanden – zur Plausibilisierung und Validierung herangezogen.

### 4 Ergebnisse

Zu Projektbeginn wurde eine numerische Schiffsflotte zur Durchführung einer großen Anzahl von Simulationen nach schiffbaulichen Qualitätskriterien aufbereitet und zusammengestellt (Kastens und Bechthold 2018). Anschließend sind die bestehenden CFD-Simulationen auf Basis eines Schiffes weiter optimiert worden (Kastens und Bechthold 2019). Die Simulationen und deren Ergebnisse für drei verschiedene große Postpanmax-Containerschiffe in unterschiedlichen Kanalkonfigurationen wurden im Jahr 2019 auf einer internationalen Konferenz veröffentlicht (Bechthold und Kastens 2019), auf der die Robustheit des entwickelten Setups sowie eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Modellversuche gezeigt wurde. Die Simulationen hierfür wurden ohne Propeller durchgeführt.

Um den Einfluss des Propellers zu bestimmen, wurde in den folgenden Simulationen der Propeller berücksichtigt. Das grundlegende Setup hierfür ist auf dem Titelbild gezeigt. Der Propeller wird durch ein Volumenstrommodell (Virtual Disk) abgebildet, in dem die Propellerkräfte durch Impulsquellterme berücksichtigt werden. Die sehr aufwendigen Simulationen mit einem geometrisch aufgelösten Propeller sind durch dieses Modell nicht notwendig. In der Simulation fährt das Schiff selbstangetrieben mit der aus dem Propellerschub resultierenden Geschwindigkeit  $V_s$  durch das umgebende Wasser. Tiefertauchung und Trimm werden durch Gitterverformung (Mesh-Morphing) innerhalb des Berechnungsgebiets realisiert.

In Bild 1 sind für das 52 m breite Postpanmax-Containerschiff in einem Kanalquerschnitt mit einem Querschnittsverhältnis von  $n = 11$  und einem Verhältnis von Wassertiefe zu Tiefgang von 1.17 Tiefertauchung, Trimm, Squat am vorderen (F.P.) und hinteren Lot (A.P.) gezeigt. Ergebnisse der Simulationen ohne Propeller, mit Propeller und der Modellversuche (EFD) werden miteinander verglichen. Die Tiefertauchung ist für die Simulation mit Propeller größer als ohne Propeller und stimmt besser mit den Modellversuchen überein. Der Trimmwinkel zeigt einen stärker den Modellversuchen entsprechenden Verlauf und ist mehr zum Heck des Schiffes gerichtet. Für den Squat am vorderen Lot ist kein Unterschied durch Berücksichtigung des Propellers zu erkennen, wohingegen der Squat am hinteren Lot mit Propeller größer ist und besser mit den Modellversuchen übereinstimmt. Die Berücksichtigung des Propellers führt zu einer besseren Übereinstimmung der CFD-Simulationen mit den Modellversuchen für alle drei Containerschiffe. In Zukunft kann dieses Setup für die effiziente numerische Simulation der Schiffsdynamik verwendet werden.

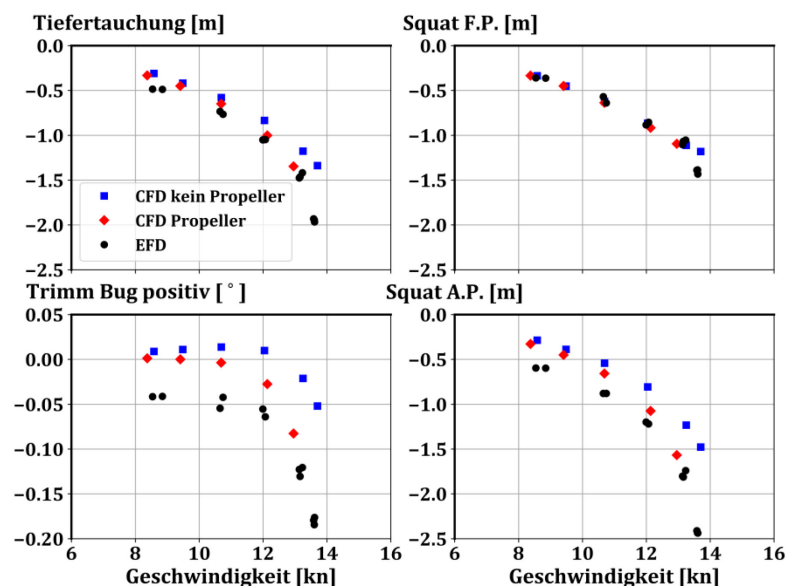


Bild 1: Tiefertauchung, Trimmwinkel, Squat am vorderen (F.P.) und hinterem Lot (A.P.) für das 52 m breite Postpanmax-Containerschiff.

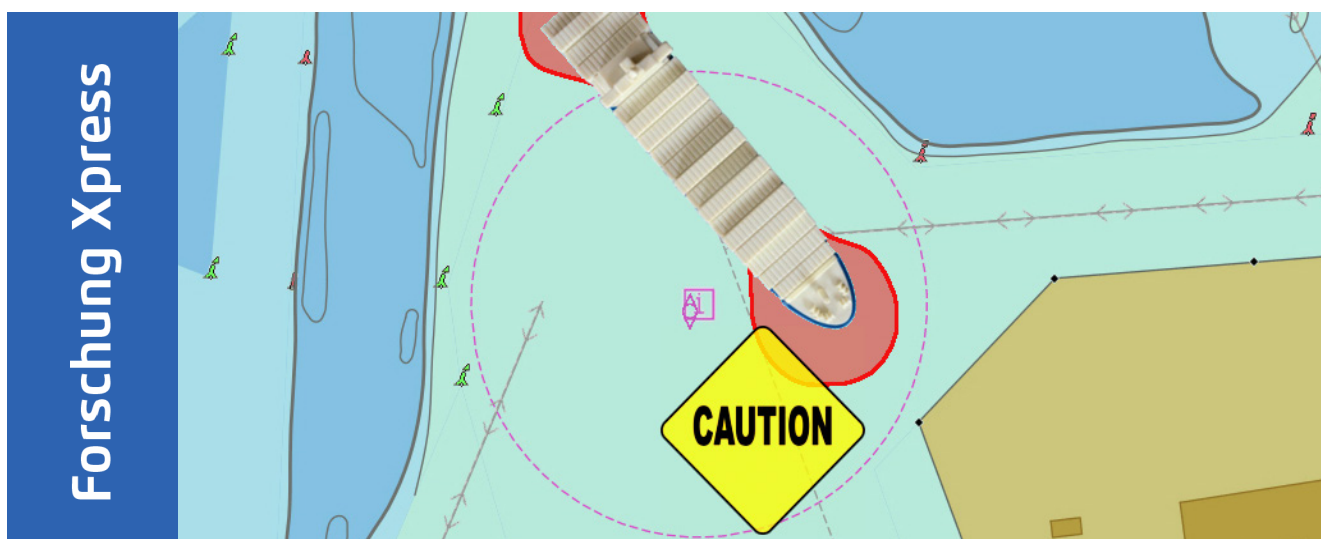
#### Literatur:

Bechthold, J.; Kastens, M. (2019): Robustness and Quality of Squat Predictions in Shallow Water Conditions Based on RANS-Calculations. In: Proceedings of the 5th International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water, Ostend, Belgium.

Kastens, M. (2015): Numerische Simulation der Schiffsdynamik. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWAktuell 2, Karlsruhe.

Kastens M.; Bechthold, J. (2018): Schiffshydrodynamik von Seeschiffen. Robuste Berechnung im seitlich begrenzten Flachwasser. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Forschung Xpress 11/2018, Karlsruhe.

Kastens M.; Bechthold, J. (2019): Schiffshydrodynamik von Seeschiffen. Robuste Berechnung im seitlich begrenzten Flachwasser. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Forschung Xpress 05/2019, Karlsruhe.



## SafeZone: Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs

Automatisierte Analyse nautischer Situationen aus der Schiffsführungssimulation

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Bei der Planung von Neu- und Ausbauten an den deutschen Wasserstraßen steht neben der Umweltverträglichkeit die Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit des Seeverkehrs im Vordergrund. Bereits in der Planungsphase werden die verschiedenen Varianten mithilfe der Schiffsführungssimulation virtuell befahren und auf nautische Schwachstellen überprüft. Bedingt durch die wachsenden Verkehre mit gleichzeitig immer größeren Schiffen werden wasserpolizeiliche Restriktionen auf den Wasserstraßen häufiger nötig. Deren Festlegungen werden derzeit zunehmend am Schiffsführungssimulator überprüft. Die Auswertung einer meist großen Zahl an Fahrten im Simulator hat dadurch eine Schlüsselrolle im Entscheidungsprozess. Bisher basiert sie auf dem „Expert Rating“, der Einschätzung durch erfahrene Nautiker mit guten Revierkenntnissen. Ziel dieses Projektes ist es, diesem Vorgang eine mathematisch-physikalische Analyse der nautischen Situation als ergänzendes Werkzeug für das „Expert Rating“ zur Seite zu geben.

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

Für die nautische Beurteilung wasserbaulicher Vorhaben wird von der WSV generell die Schiffsführungssimulation in der Planungsphase eingesetzt. Zur Beurteilung wasserpolizeilicher Regelungen und Restriktionen erlangt die Schiffsführungssimulation mehr und mehr an Bedeutung. Beiden Anwendungen gemein ist das Ziel, mittels einer Simulation der realen Bedingungen (Virtual Reality) den Nachweis über die Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffs- und Seeverkehrs zu erbringen. Bisher erfolgt die nautische Bewertung auf Basis der Einschätzung eines Gremiums aus Experten mit breitem und tiefem Erfahrungswissen. Sowohl für die nautische Beurteilung als auch für die Arbeit der Experten wäre eine zusätzliche objektive Situationsanalyse sehr wertvoll.

Etwa zur Mitte der Laufzeit kam die konkrete Nachfrage aus der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) nach Entwicklung einer Domäne aus einer nautischen Situation hinzu.

#### Auftragsnummer:

B3955.01.04.70226

#### Auftragsleitung:



Dr. Carl-Uwe Böttner  
 carl-uwe.boettner@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Thorsten Dettmann  
 Thorsten.dettmann@baw.de  
 Martin Wezel  
 martin.wezel@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2020

### 3 Untersuchungsmethoden

Automatische Situationsanalysen sind in der Nautik bislang im Bereich der Verkehrsüberwachung und der Kollisionsverhütung (Chien et al. 2012) in der ständigen Weiterentwicklung. Etwa in den 70ern fand der Ansatz der „Ship Domain“ bei den Nautikern Verbreitung (Goodwin 1975, Pietrzykowski und Uriasz 2009). Das Konzept besteht darin, dem Schiffsführer (oder dem Berater in der Verkehrszentrale) einen Bereich um sein Fahrzeug auf einer geeigneten Anzeige – entweder der elektronischen Seekarte oder dem Radarschirm – anzuzeigen, der sich abhängig von der momentanen Verkehrssituation in seiner Ausdehnung verändert und der vom Schiffsführer als frei zu halten wahrgenommen werden muss.

In Anlehnung an das Konzept der „Ship Domain“ wird in diesem Vorhaben eine SafeZone entwickelt, die einen Bereich um das gesamte Fahrzeug dynamisch in seiner Form und Ausdehnung bestimmt, der für die Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffs- und Seeverkehrs frei von wasserbaulichen Hindernissen sein muss. Für die Bestimmung der Ausdehnung dieses Bereichs wird dabei aus den dynamischen Daten der Schiffsführungssimulation eine nautische Analyse der momentanen Fahr-situation errechnet und die daraus resultierenden sicherheitsrelevanten Distanzen als SafeZone um das Schiff auf einer elektronischen Seekarte geeignet dargestellt.

Zunächst werden die Erfahrungen und Bedürfnisse der späteren Anwender des Analysewerkzeugs zusammengetragen und es wird in direkter Absprache ein Lastenheft erstellt. Nach erfolgter Umsetzung der Vorgaben in eine Computeranwendung und deren Installation auf den Anlagen der BAW wird diese im produktiven Einsatz intensiv getestet. Anschließend wird die Computeranwendung auf den Simulatoren der beteiligten Projektpartner für den produktiven Einsatz installiert. Im letzten Teil des Projekts wird die SafeZone nach einer ausreichend langen Testphase an die Erfahrungen angepasst und Fehler werden behoben. Ziel ist es, am Ende des Projekts eine produktive Software zur Verfügung zu stellen.

### 4 Ergebnisse

In der ersten Phase wurden die Anforderungen an die SafeZone-Berechnung festgelegt. Anschließend wurden die nötigen Hard- und Software Grundlagen geschaffen, um die Berechnung im Anschluss an eine Simulatorübung durchführen zu können.

Im nächsten Schritt wurde ein mathematischer Ansatz zur Bestimmung der Ausdehnung der SafeZone definiert. Hierbei wird jeweils eine Variation fahrdynamischer Parameter der Ist-Situation eines angepassten Zeitraums (abhängig von der Fahrt des Schiffes) als Grundlage für Manöversimulationen eingesetzt. Aus dieser Varianz ergibt sich eine Flächenüberdeckung, die den benötigten Manöverraum für kleine Änderungen in der Fahrweise repräsentiert und damit die Ausdehnung der SafeZone (Bild 1) definiert.

Nach erfolgter Umsetzung der Erweiterungen der Simulator-Software tritt das Projekt derzeit in die letzte Phase, in der eine Bedienungs Oberfläche für die SafeZone-Software erstellt wird. Abschließend erfolgen Softwaretests, um auftretende Schwachstellen beheben sowie Verbesserungen vornehmen zu können.

Ergänzend zu der SafeZone wird auf Anregung der GDWS Kiel in der letzten Projektphase die klassische „Ship Domain“ umgesetzt. Damit wird das Tool in seiner Funktionalität für die WSV erweitert und eine Vergleichsmöglichkeit der SafeZone zu anderen Ansätzen geschaffen. Bei der Umsetzung der „Ship Domain“ werden neuere Untersuchungen und Erkenntnisse (Szlapczynski und Szlapczynska 2016) berücksichtigt.

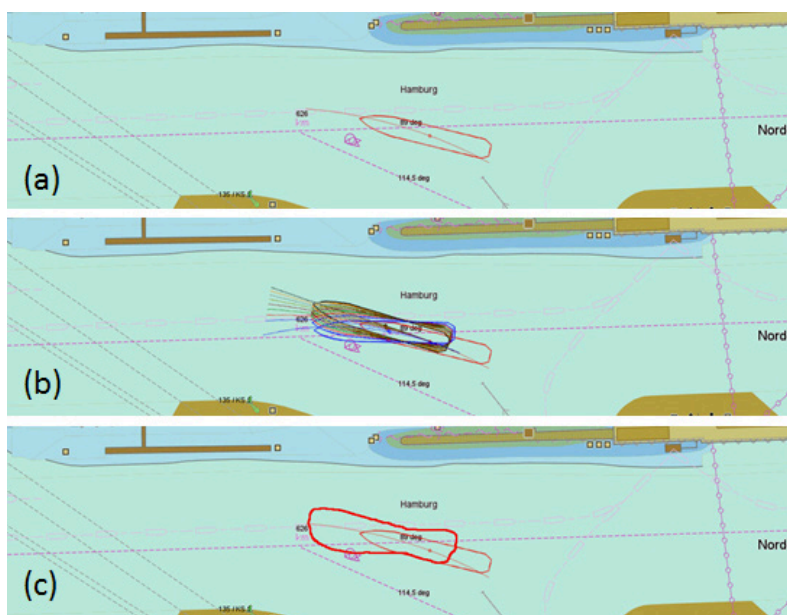


Bild 1: Ermittlung der SafeZone (c) aus einer nautischen Situation (a) und Manöversimulationen kleiner Abweichungen (b).

#### Literatur:

Chien-Min, S.; Ki-Yin, C.; Chih-Yung, C. (2012): Fuzzy decision on optimal collision avoidance measures for ships in vessel traffic service. In: *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 20, No. 1, pp. 38–48.

Goodwin, E. M. (1975): A statistical study of ship domain. In: *The Journal of Navigation*, 28, No. 3, pp. 328–344.

Pietrzykowski, Z.; Uriasz, J. (2009): The Ship Domain – A Criterion of Navigational Safety Assessment in an Open Sea Area. In: *The Journal of Navigation*, 62, pp. 93–108.

Szlapczynski, R.; Szlapczynska, J. (2016): An analysis of domain-based ship collision risk parameters. In: *Ocean Engineering*, 126, pp. 47–56.



## An- und Ablegemanöver großer Schiffe in der Schiffsführungssimulation

Teilprojekt im Verbundvorhaben FernSAMS

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Das Ziel des Teilvorhabens ist die Weiterentwicklung des heutigen Stands der Technik der fahrdynamischen Modelle in Schiffsführungssimulatoren am Markt zur verfeinerten und bedarfsangepassten Simulation von Hafenmanövern unter Zuhilfenahme von Schleppern. Spezielles Augenmerk wird auf die Einsatzfähigkeit zum Training mit virtuell ferngesteuerten Schleppern und autonom fahrenden Schleppern sowie auf die spätere Unterstützung des Remote-Operators gelegt.

Die Ertüchtigung der Simulation als belastbares Werkzeug zur Überprüfung von Handlungs- und Manöverstrategien beim An- und Ablegen großer Schiffe und als Testumgebung für Neuentwicklungen im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion ferngesteuerter Schleppschiffe steht im Vordergrund der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten des Antragstellers in dem Verbundprojekt.

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

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) ist für Fragestellungen der Schiffsführungssimulation zentraler Berater der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Dieser Aufgabe kommen die Erfahrungen und Erkenntnisse aus diesem Projekt zu Gute. Für zukünftig zu planende Einsatzszenarien und wasserbauliche Fragestellungen, in denen Schlepperassistenz eine große Bedeutung haben, werden die hier entwickelten Module eingesetzt werden können.

### 3 Untersuchungsmethoden

In diesem Projekt werden modulare Modellergänzungen entwickelt, die es ermöglichen, eine präzise Simulation der Hafenmanöver mit Schlepperassistenz in einem Schiffsführungssimulator durchzuführen. Diese Entwicklungen sind verallgemeinert gültig und anwendbar, werden in diesem Projekt zu-

#### Auftragsnummer:

B3955.01.04.70233

#### Auftragsleitung:



Dr. Carl-Uwe Böttner  
 carl-uwe.boettner@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Marcus Döscher  
 marcus.doescher@baw.de

#### Laufzeit:

2017 bis 2020

nächst für Simulatoren, die auf dem Norrbinn-Modell mit Abkowitz-Koeffizienten basieren, implementiert und eingesetzt. Es wird ein fahrdynamisches Simulator-Schiffsmodell erstellt, welches das Fahrverhalten des Schlepperentwurfs, das bis dahin durch Untersuchungen des Partners FDS (TU-HH) vorhergesagt wurde, in einen angepassten Koeffizienten-Satz überführt und dadurch diesen Schlepperentwurf im Simulator erlebbar macht.

Die Interaktion des Schleppers mit dem großen Schiff ist bei hergestellter Leinenverbindung stark durch diese geprägt. Hierauf wird das vorhandene Leinen-Kraftmodell im Simulator überprüft und gegebenenfalls angepasst. Ebenso ist die Abbildung der Windencharakteristik für eine realitätsnahe Simulation von Schlepper-Operationen wichtig.

Das Gesamtmodell muss, ehe es zum Einsatz kommen kann, ausgiebig auf mögliche unerwünschte Interaktion mit den Echtgeräten der Fahrstände (Integrated Bridge Instrumentation) und der Kommunikation innerhalb der Simulatoren getestet werden, um einwandfreie Funktion und störungsfreie Simulation zu ermöglichen.

#### 4 Ergebnisse

Im derzeit laufenden zweiten Projektjahr konnten die Arbeitspakete für die Schiffsführungssimulation der Hafenmanöver mit Assistenz eines ferngesteuerten Hafenschleppers erfolgreich vorbereitet und beim Projektpartner MTC Hamburg GmbH im November durchgeführt werden.

Bei dieser Simulation war ein erfahrener Schlepperkapitän beteiligt, der einen der zwei existierenden Schlepper vom Typ RAVE-Tug (Singer 2018) bereits regelmäßig fährt und im Einsatz kennt. Sein Urteil zur Fahrdynamik und zur Simulation des Manövers war sehr positiv. Dies zeigte sich auch gleich zu Beginn, als der Kapitän einen Parcours, der in die Simulation zur Eingewöhnung an das Simulator-Umfeld („familiarization“) integriert wurde, in unerwartet schneller Zeit ohne einen Fehler durchfuhr.

Die Fahrdynamik des Schleppers RoboTug (Bild 1) wurde dabei auf Grundlage der Ergebnisse umfangreicher CFD-Rechnungen zum Manövrierverhalten und der Hydrodynamik im Simulator modelliert. Als zu schleppendes Schiff wurde ein 13000 TEU Container Schiff ausgewählt (Bild 1). Dessen Fahrdynamik wurde ähnlich aufwendig kalibriert und modelliert. Dies war möglich, da für den Rumpf des Schiffes auf den offenen Test-Case DTC (El Moctar 2012) zurückgegriffen wurde, zu dem in der Literatur und bei dem Projektpartner TU-HH Daten zum Manövrierverhalten zur Verfügung stehen. So konnten alle beteiligten Fahrzeuge in der Simulation auf vergleichbarem Niveau eng an ein natürliches Verhalten eingestellt werden.

Für diese Simulationen wurden mehrere Plug-In entwickelt und bereitgestellt. Neben dem Windschatten-Plug-In, das die lokalen Windverhältnisse im Windschattenbereich des Großschiffs für jeden Zeitschritt berechnet, sind das ein Plug-In für die Strömungsabschattung durch einen tiefgehenden Rumpf, der seine Position relativ zum Grund hält, ein Plug-In für den erhöhten Widerstand durch Einengung der Wasserstraße und ein Plug-In, das die Dynamik der sich frei drehenden Karussell-Winde (Bild 1) mit ihrem sich kontinuierlich ändernden Leinen- und damit Kraftangriffspunkt berechnet.

Dieser hohe Aufwand kann nicht allgemein für jede Schiffsführungssimulation geleistet werden. In diesem Projekt wurde gezeigt, welches Potenzial besteht und welcher Zugewinn erwartet werden kann. Dies bildet eine gute Basis für zukünftige Entscheidungen, ob der zeitliche und finanzielle Aufwand einzelner zusätzlicher Entwicklungen und Modellierungen zur Verfeinerung der Modelle in einer Schiffsführungssimulation für eine bestimmte Zielstellung den Nutzen rechtfertigt und damit sinnvoll ist.

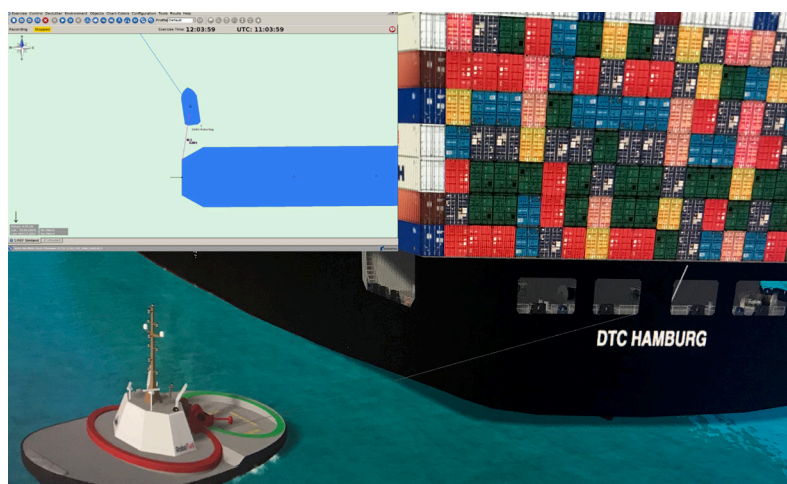
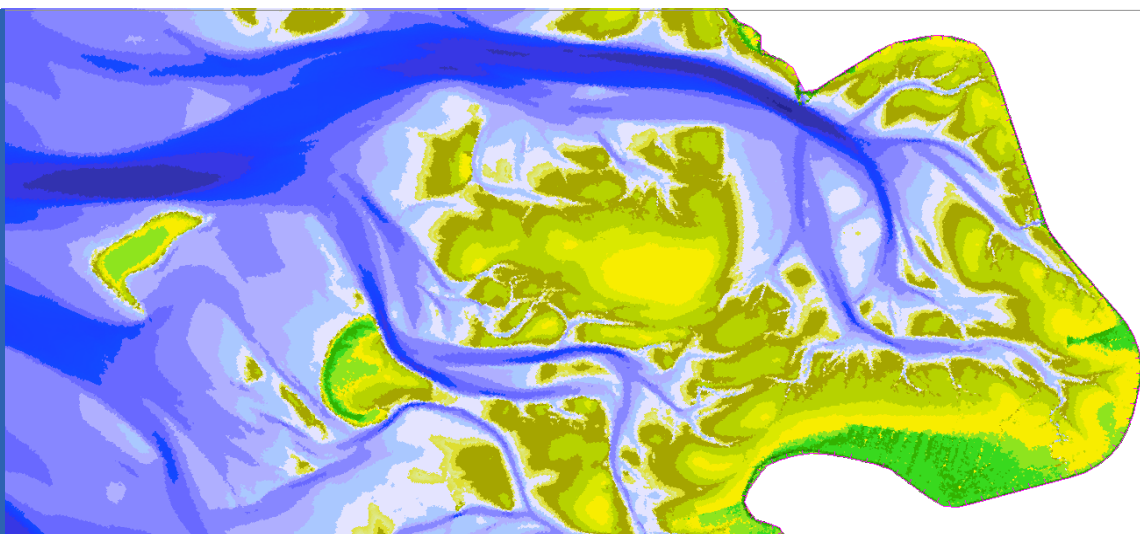


Bild 1: Hafenmanöver mit ferngesteuertem Schlepper in der Schiffsführungssimulation mit Plug-Ins (Instruktor-Sicht überlagert).

#### Literatur:

El Moctar, O.; Shigunov, V.; Zorn, T. (2012): Duisburg Test Case: Post Panamax Container Ship for Benchmarking. In: Ship Technology Research Schiffstechnik, Vol. 59, No 3, S. 50–64. Online verfügbar unter: [https://www.uni-due.de/imperia/md/content/ist/dtc\\_str\\_vol59no3.pdf](https://www.uni-due.de/imperia/md/content/ist/dtc_str_vol59no3.pdf) zuletzt geprüft am 26.11.2019.

Singer, S. (2018): Remote Controlled Tugs – Project FernSAMS. Vortrag in: German Norwegian Ocean Forum, GNOF, December 4, 2018, Hamburg.



## EasyGSH-DB

Erstellung anwendungsorientierter, **synoptischer** Referenzdaten zur **Geomorphologie, Sedimentologie** und **Hydrodynamik** in der Deutschen Bucht

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Ziel von EasyGSH-DB ist es, aus den sektoralen, verteilt vorliegenden, heterogenen behördlichen Datenbeständen flächendeckende, harmonisierte und qualitätsgesicherte Datensätze zur Geomorphologie, Sedimentologie und Hydrodynamik in der gesamten Deutschen Bucht zu erzeugen. Hierfür werden 20 Jahre durch die hydrodynamisch-numerischen Modellsysteme UnTRIM<sup>2</sup>-SediMorph-UnK bzw. TELEMAC-SISYPHE-TOMAWAC im Hindcast berechnet. Als Analysegrößen werden zum Projektende unter anderem folgende Parameter vom 01.01.1996 bis 31.12.2015 zur Verfügung gestellt:

- Jahresbathymetrien
- Analysen zur Hydrodynamik (Wasserstand, Strömung, Seegang)
- Stofftransport
- Sedimenteigenschaften Sedimentologie)

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) im Rahmen des mFUND gefördert. Darin übernimmt die BAW zusammen mit der Technischen Universität Hamburg (TUHH) die numerische Modellierung, smile consult GmbH die Pflege und Erweiterung des funktionalen Bodenmodells, das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) die Erstellung der Sedimentologie sowie Küste und Raum GbR die Produktentwicklung und den Dialog mit potentiellen Stakeholdern. Die Bereitstellung der Ergebnisdaten erfolgt durch die BAW über die Marine Daten Infrastruktur Deutschland (MDI-DE) und über die mCLOUD (<https://www.bmvi.de/mFund/mCloud/mcloud.html>) des BMVI. Dabei kommen die etablierten OGC Webdienste zur Visualisierung (WMS) und zum Download (WFS) sowie der Katalogdienst (CS-W) auf Basis des BAW Metadaten-Profiles zum Einsatz. Ferner ist derzeit ein E-Learning Portal im Aufbau und in der Erprobung.

#### Auftragsnummer:

B3955.02.04.70229

#### Auftragsleitung:

Dr. Andreas Plüß  
 andreas.pluess@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Robert Hagen  
 robert.hagen@baw.de



Janina Freund  
 janina.freund@baw.de



Romina Ihde  
 romina.ihde@baw.de

#### Laufzeit:

2017 bis 2020



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

Ziel des mFUND ist es, die vorhandenen behördlichen Daten für Dritte verfügbar zu machen, die daraus einen potenziellen Nutzen ziehen können. Als Mehrwert wird damit der Informationsbedarf Dritter bedient bzw. bestehenden Informationspflichten umfassend nachgekommen. Für die WSV ist es von Vorteil, die Anwenderfreundlichkeit und Nutzbarkeit der hier erzeugten, homogenisierten und qualitätsgesicherten Daten und Metadaten für Planungsaufgaben bei Infrastrukturprojekten sowie als Grundlage für Berichtspflichten im Rahmen geltender EU-Rahmenrichtlinien für unterschiedliche Fragestellungen über etablierte Internet-Portale im Geschäftsbereich des BMVI zur Verfügung gestellt zu bekommen.

## 3 Untersuchungsmethoden

Die Bereitstellung der unter 1) genannten Datensätze erfordert eine Reihe an Werkzeugen. Die flächenhafte Berechnung von Hydrodynamik, Salztransport und Seegang wird mit numerischen Modellen durchgeführt. Eingangsdaten für diese Modelle werden aus dem funktionalen Bodenmodell (FBM) erzeugt (Milbradt et al. 2015). Die Besonderheit des FBM ist die zeit- und ortsvariable Interpolation von Jahresbathymetriem auf Grundlage qualitätsgesicherter Messdaten u. a. des Bundes und der WSV. Die Oberflächensedimentzusammensetzung bzw. -verteilung wird aufgrund der unzureichenden Datengrundlage einheitlich erzeugt und vorgehalten. Die Ergebnisse der numerischen Modelle werden mit den erprobten Analysemethoden der BAW in Produkte aufbereitet und stehen dann der Fachöffentlichkeit kostenlos zur Verfügung. Die permanente Qualitätssicherung wird über den Multi-Modell-Ansatz mit den Modellfamilien UnTRIM<sup>2</sup> und TELEMAC, der sorgfältigen Dokumentation in Metadaten sowie durch das Vier-Augen-Prinzip bei allen Analysen gewährleistet und dokumentiert. Die BAW stützt sich in diesem Projekt auf die jahrelangen Erfahrungen mit dem Lebensraum Nordsee bzw. der Deutschen Bucht. Erste Ergebnisse und Erkenntnisse sind bereits in der Phase der Basisdokumentation zur Kalibrierung von HN-Modellen (Hagen 2019).

## 4 Ergebnisse

Nachdem einige Systemstudien durchgeführt wurden, erfolgt nun eine Ausweitung der Simulationen auf den anvisierten Projektzeitraum. Die vom Modell abgebildete Dynamik der Tide in der Nordsee wurde anhand von Partialtiden- und Tidekennwertanalysen detailliert nachgewiesen. Durch die Kopplung von meteorologischen Daten des DWD und der Berücksichtigung von Fernwellen wurde eine sehr gute Nachbildung der natürlichen Tidedynamik einschließlich der Sturmflutereignisse an den maßgeblichen Pegeln erreicht. Zur Beurteilung der Modellgüte wurden darüber hinaus die Strömung und der Salztransport mit Messdaten validiert. Zur Dokumentation wird ein Jahreskennblatt der spezifischen meteorologischen und hydrodynamischen Verhältnisse sowie der Oberwasserverhältnisse erstellt. Neben dem Kalibrierungsjahr 2006 wurden alle vorgesehenen Jahre ohne Seegangskopplung berechnet. Für das Jahr 2012 wurden Sensitivitätsstudien zur Seegangssimulation mit dem UnK-Modell durchgeführt und erfolgreich mit Messwerten verglichen. Hierbei wird die ursprünglich vorgesehene Offlinekopplung durch einen online berechneten Seegang ersetzt, um die Qualität der Berechnung weiter zu verbessern. Die Onlinekopplung soll nun auf alle anvisierten Jahre ausgeweitet und abgeschlossen werden.

Basierend auf den umfangreichen Modellsimulationen erfolgen die Tidekennwertanalysen für den Wasserstand und die Strömungsverhältnisse. Bis Ende 2018 sollen die Analysen (z. B. Bild 1: Reststromweg) in der Deutschen Bucht für einen Zeitraum von 2006 bis 2015 durchgeführt, ausgewertet und als Produkte hochgeladen werden. Der Fortschritt der Arbeiten wird laufend veröffentlicht (Projekt-Portal <https://mdi-de.baw.de/easygsh/>), zudem wurde eine eigene E-Mail-Adresse ([easygsh@baw.de](mailto:easygsh@baw.de)) für das Projekt eingerichtet. Daten zur Sedimentologie, zur Bathymetrie und erste Analyseergebnisse sind als Webdienste publiziert.

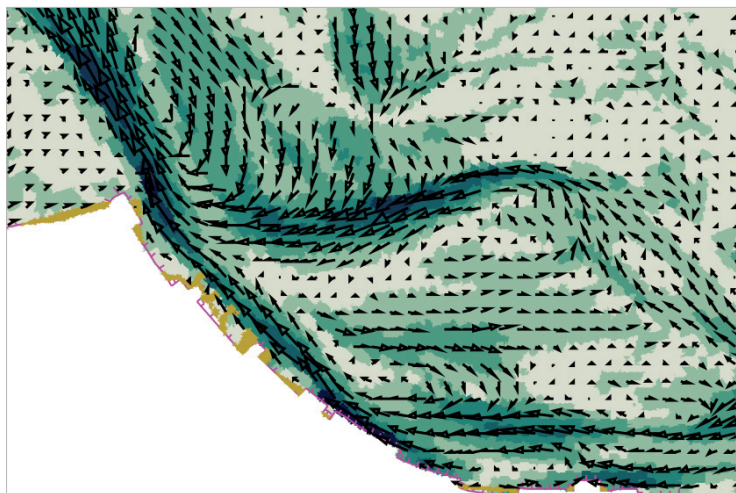


Bild 1: Beispielhafte Darstellung des Produkts „Reststromweg“ 2006.

### Literatur:

Hagen, R. (2019): Validation techniques and skill assessment for coastal and estuarine models: The EasyGSH-DB North Sea model. In: Die Küste, 2019 to appear.

Milbradt, P.; Valerius, J.; Zeiler, M. (2015): Das Funktionale Bodenmodell: Aufbereitung einer konsistenten Datenbasis für die Morphologie und Sedimentologie. In: Die Küste, 83, S. 19–38.

Plüß, A. (2004): Das Nordseemodell der BAW zur Simulation der Tide in der Deutschen Bucht. In: Die Küste, 69, S. 84–127.



## Sedimenttransport in der Trübungszone von Ästuaren

FAUST

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

In den Seehafenzufahrten von Elbe, Weser und Ems befinden sich Unterhaltungsschwerpunkte, in denen im Wesentlichen Feinsedimente gebaggert werden, aber gleichzeitig zeitweise hohe Strömungsgeschwindigkeiten herrschen. In der Weser ist dies im Bereich der „Schlickstrecken“ bei Nordenham und im Blexer Bogen der Fall. Die Prozesse, welche zur dauerhaften Deposition von Feinsedimenten in der stark durchströmten Fahrrinne führen, sind bis heute noch nicht vollständig beschrieben und mit den derzeit zur Verfügung stehenden Simulationswerkzeugen nicht ausreichend gut abbildbar.

Das Forschungsprojekt FAUST beschäftigt sich mit dem Sedimenttransport in den Ästuaren und insbesondere den Bodenaustauschprozessen in Bereichen feiner Sedimente. Ein Teilaspekt hierbei ist die Interaktion zwischen Bodenformen und dem Transport von Feinsedimenten. Ziele des Projektes sind eine Verbesserung des Prozessverständnisses sowie die Entwicklung von konzeptionellen Ansätzen zur Verbesserung der numerischen Modelle.

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

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) ist eine zentrale Beratungseinrichtung der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), die unter anderem zu allen Fragestellungen rund um die Auswirkungen von Umdor oder Ausbau der Seeschifffahrtsstraßen auf Sedimenttransport und Morphodynamik herangezogen wird.

Die Anforderungen an die Güte der Simulationsmodelle in diesem Bereich steigen, insbesondere wenn es um die Prognose langfristiger Trends geht. Für die Beratung der WSV durch die BAW ist es daher wichtig, das Prozessverständnis des Sedimenttransportes kontinuierlich zu verbessern und dem wissenschaftlichen Fortschritt bei der Abbildung des Sedimenttransportes Rechnung zu tragen. Durch eine verbesserte Abbildung des Sedimenttransportes und der Bodenaustauschprozesse in Modellen kann die Beratungsleistung im Bereich Sedimentmanagement weiter erhöht und das Fernziel einer modellbasierten Prognose weiter verfolgt werden.

#### Auftragsnummer:

B3955.02.04.70230

#### Auftragsleitung:



Dr. Anna Zorndt  
 anna.zorndt@baw.de

#### Laufzeit:

2017 bis 2021

#### Kooperationen:

Christian-Albrechts Universität zu Kiel (Prof. C. Winter) Technische Universität Hamburg (Prof. P. Fröhle)

### 3 Untersuchungsmethoden

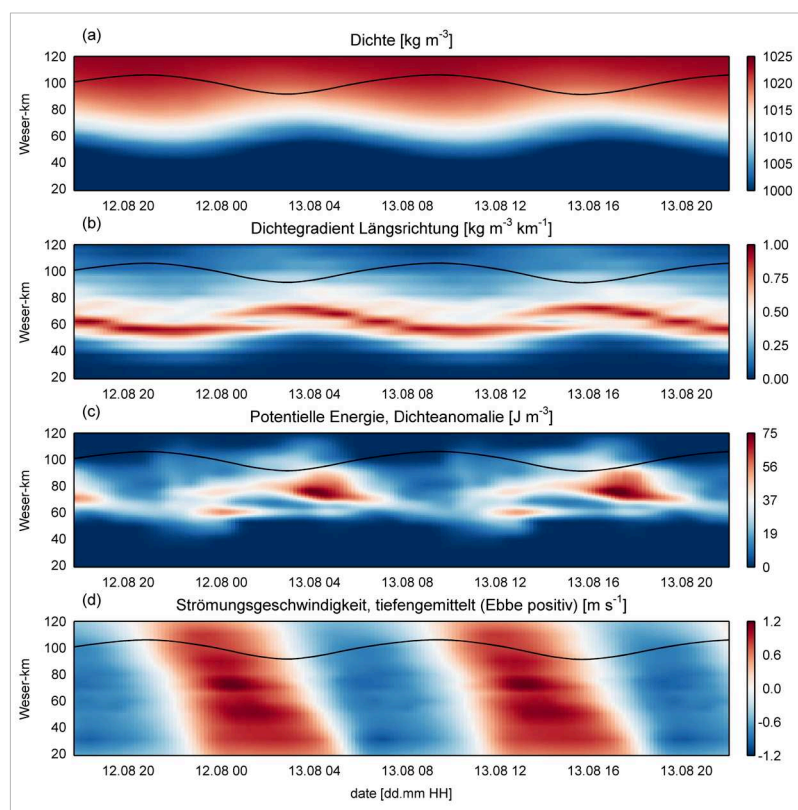
Die Untersuchungen erfolgen mithilfe von Messungen in der Natur, Laboruntersuchungen und Prozessstudien mit numerischen Modellen.

Eine wichtige Grundlage für eine verbesserte Abbildung der Schwebstoffdynamik ist ein Verständnis der dahinter liegenden Transportprozesse. Barokline-Prozesse und Asymmetrien in der vertikalen Vermischung führen dazu, dass sich in Ästuaren ein charakteristisches Muster von Restströmungen ausbildet (ästuarine Zirkulation) und sich feine Sedimente in der Trübungszone akkumulieren (Burchard et al. 2018). Zur Untersuchung dieser Prozesse erfolgen Simulationen sowie eine umfangreiche Messkampagne, die unten näher beschrieben ist.

Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt sind die bislang noch nicht vollständig verstandenen Bodenaustauschprozesse, insbesondere die feiner Sedimente. Dazu wird in Laboranalysen mithilfe von Absetzsäulen und einem Gust-Mikrokosmos das Erosionsverhalten kohäsiver Sedimente näher untersucht. Auch die Wirkung von Bodenformen auf die Sohlrauheit, die Strömung und den Sedimenttransport ist Untersuchungsgegenstand. Ziele sind dabei immer eine bessere Parametrisierung der Prozesse in numerischen Modellen sowie die Weiterentwicklung der Sedimenttransportformulierungen.

### 4 Ergebnisse

Wie in Geyer und McCready (2014) beschrieben, tragen unterschiedliche Prozesse zur Ausbildung der ästuarinen Zirkulation bei. Um diese für die Weser besser beschreiben und quantifizieren zu können, wurde im Juni 2019 in der Weser eine Messkampagne von der BAW in Kooperation mit dem WSA Jade-Weser-Nordsee und der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU) durchgeführt. Kernstück der Messkampagne war ein vierwöchiges Kurzzeit-Monitoring-Netzwerk, bestehend aus fünf bodenverankerten ADCP mit weiteren Sonden zur Messung von Temperatur, Salzgehalt und Trübung. Diese wurden zwischen Weser-km 53 und dem Container Terminal IV in Bremerhaven ausgebracht. Wie sich auch in Simulationen zeigt, sind in diesem Bereich vertikale und horizontale Salzgradienten zu beobachten (siehe Bild 1). Die Größe potentielle Energie-Dichteanomalie (engl. potential energy anomaly, PEA) ist hierbei ein Maß für die vertikale Schichtung des Salzgehaltes. Weiterhin führte die CAU mit dem Forschungsschiff Littorina an mehreren Positionen stationäre vertikale Messungen über mehrere Tiden durch. Die erhobenen Daten dienen der Beschreibung der Vermischungsdynamik in der Weser und sind eine weitere wertvolle Ergänzung für die Validierung grundlegender Prozesse in den numerischen Modellen. Im März 2020 soll die im Sommer durchgeführte Messkampagne durch eine weitere Messung unter höheren Oberwasserabflüssen durchgeführt werden.



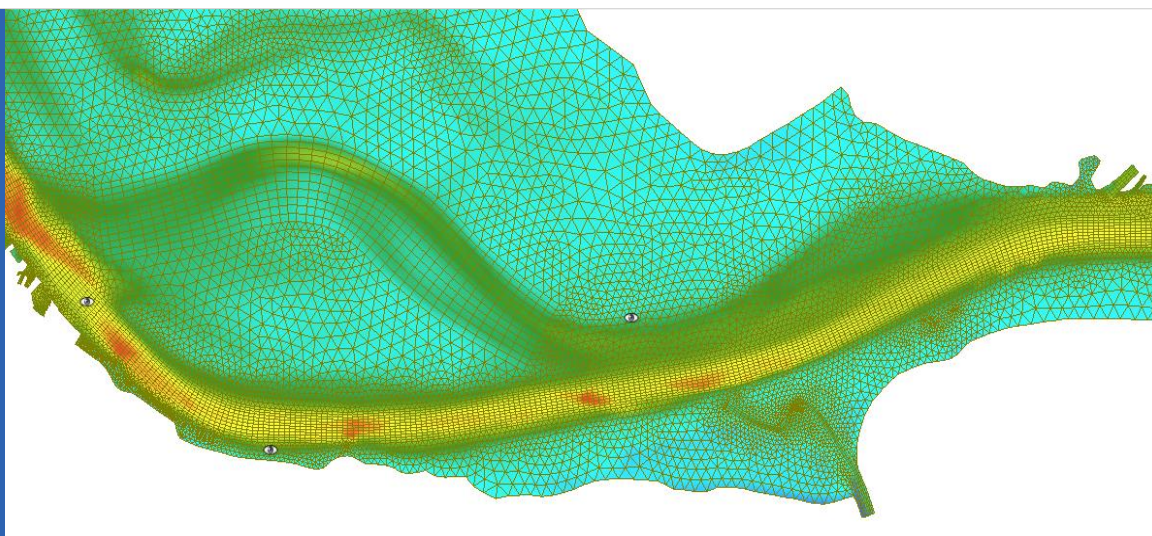
#### Literatur:

Burchard, H.; Schuttelaars, H. M.; Ralston, D. K. (2018): Sediment Trapping in Estuaries. In: *Annual Review of Marine Science* 10(3), S. 371–395. DOI: 10.1146/annurev-marine-010816-060535.

Geyer, W. R.; McCready, P. (2014): The estuarine circulation. In: *Annual Review of Fluid Mechanics* 46 (10), S. 175–197. DOI: 10.1146/annurev-fluid-010313-141302.

Kösters, F.; Grabemann, I.; Schubert, R. (2014): On SPM Dynamics in the Turbidity Maximum Zone of the Weser Estuary. In: *Die Küste* 81, S. 393–408.

Bild 1: Dichte, Dichtegradient in Längsrichtung, Dichteanomalie und Strömungsgeschwindigkeit entlang eines Längsschnittes des Weser-ästuars. Ergebnisse einer Simulation des hydrologischen Jahres 2012 mit UnTRIM SubGrid.



## Integration D-Flow FM

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Das mathematische Verfahren Delft3D wird seit 2005 in der BAW-DH eingesetzt. Mit Delft3D können Hydrodynamik und Transport gelöster sowie suspendierter Substanzen, morphologische Änderungen, Seegang sowie verschiedene Wasserqualitäts-Prozesse simuliert werden.

Im Gegensatz zu den mathematischen Verfahren UnTRIM und UnTRIM2 (mit SubGrid), die mit unstrukturierten, orthogonalen Gitternetzen genutzt werden, kann Delft3D nur auf strukturierten, krummlinig-orthogonalen Gitternetzen arbeiten. Dies stellt für die geometrisch komplexen Küsten-, Ästuar- und Hafengebiete einen Nachteil dar, da die Erstellung geeigneter Netze nicht immer oder nur mit sehr großem Aufwand möglich ist.

Seit einigen Jahren arbeitet Deltares an einem Nachfolgemodell für Delft3D. Der Arbeitsname ist D-Flow FM (Kernkamp et al. 2011). Im Gegensatz zu Delft3D kann D-Flow FM auch auf einem unstrukturierten Gitternetz eingesetzt werden. Des Weiteren wird der Code von D-Flow FM seit 2014 für ausgewählte Testuser als Open Source zur Verfügung gestellt. Hierdurch können erforderliche Anpassungen oder Erweiterungen durch Mitarbeiter der BAW oder von Dritten, z. B. Universitäten, durchgeführt und der Gemeinschaft der Anwender von D-Flow FM zur Verfügung gestellt werden. Es ist zu erwarten, dass D-Flow FM eine weite Verbreitung, intensive Anwendung und rasche Weiterentwicklung erfahren wird. Das in der BAW-DH eingesetzte mathematische Verfahren Delft3D soll durch D-Flow FM ersetzt werden. Hierbei ist D-Flow FM insbesondere mit den in der BAW-DH standardmäßig genutzten Methoden des Pre- und Postprocessing zu verknüpfen. Einheitlich soll das Dateiformat NetCDF in Kombination mit dem CF Metadatenstandard benutzt werden.

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

Der parallele Einsatz unterschiedlicher mathematischer Verfahren (Multi-Modell-Ansatz) für dieselbe Fragestellung, beispielsweise bei Ausbaumaßnahmen, verbessert die Sicherheit der mit mathematischen Verfahren er-

#### Auftragsnummer:

B3955.03.04.70221

#### Auftragsleitung:

Dr. Aissa M. Sehili  
 Aissa.sehili@baw.de

#### Laufzeit:

2014 bis 2020

stellten Prognosen. Die oben genannten Methoden bilden das Rückgrat praktisch aller für die WSV in Bezug auf Fragestellungen an den Seeschiffahrtsstraßen in der BAW durchgeführten Untersuchungen.

### 3 Untersuchungsmethoden

Die Ausgaben der mit dem neuen numerischen Verfahren D-Flow FM durchgeführten Simulationen erfolgen im Format UGRID CF NetCDF. Für die Auswertung der Ergebnisse werden die in der BAW entwickelten NC-Tools NC PLOT, NC ANALYSE, NC DELTA und NC AGGREGATE verwendet (<http://wiki.baw.de/de/index.php/Hauptseite>).

### 4 Ergebnisse

Anhand der Delft3D Flexible Mesh Suite 2019 wurde ein Modell für die Elbe mit der Bathymetrie von 2016 entwickelt.

Die Ergebnisse für den Ist-Zustand sowie für den Ausbau-Zustand (Vertiefung der Fahrrinne) wurden mit Ergebnissen aus UnTRIM für die gleichen Initial- und Randbedingung verglichen. DFlow FM und UnTRIM zeigen einen vergleichbaren Anstieg im Tidenhub aufgrund der Fahrrinnenvertiefung.

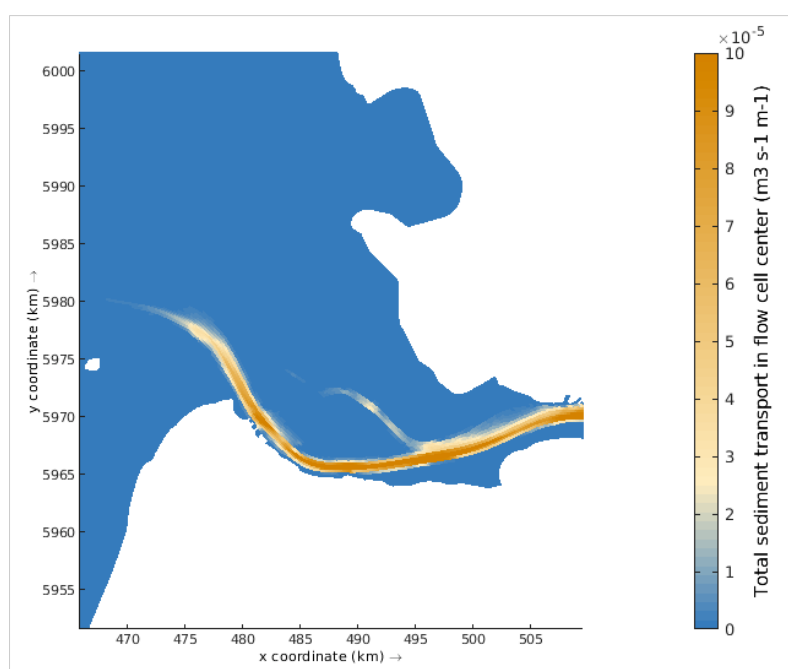
Ein 2D-DFlow-FM-Modell für die Deutsche Bucht wurde ebenso entwickelt. Gekoppelte Simulationen mit Morphodynamik und Seegang wurden durchgeführt mit dem Ziel, die neuen freigegebenen Funktionalitäten zu erproben und erste realistische Erkenntnisse zu gewinnen. Die erzielten morphodynamischen Ergebnisse mit realistischen Randbedingungen sehen plausibel aus (siehe Bild 1).

Parallel dazu wurde die Randwertgenerierung für die verschiedenen BAW-Modelle (Elbe, Jade-Weser, Ems und Deutsche Bucht) und Forschungsprojekte anhand des DFlow-FM-Nordseemodells DC SMv6 (Dutch Continental Shelf Model v6) fortgesetzt.

Darüber hinaus werden für die tägliche operationelle Wasserstandsvorhersage in der Deutschen Bucht mit dem BAW-GBOM (German Bight Operational Model) Randwerte aus DC SMv6 FM bereitgestellt.

Im Rahmen der Zusammenarbeit mit Deltares in Bezug auf die Vereinheitlichung des UGRID-NetCDF-Eingabe- und Ausgabeformats sowie Erweiterungen und Ergänzungen der Funktionalitäten des Systems wurden die Anpassungen der 2D-Ausgabe in der offiziellen Linux-Version eingepflegt. Nach dem Installieren der neuen Linux-Version werden selbsterzeugte Output-Daten mit den BAW-NC-Postprozessoren getestet und ausgewertet. Die Erweiterungen für die 3D-Ausgabe sollten im ersten Quartal 2020 erfolgen.

Da DFlow FM kontinuierlich weiterentwickelt wird, werden auch laufend neue Versionen freigegeben. Dies bedeutet, dass eine fortwährende Überprüfung der erzielten Ergebnisse durchgeführt werden muss.



#### Literatur:

Kernkamp, H. W. J.; van Dam, A.; Stelling, G. S.; de Goede, E. D. (2011): Efficient scheme for the shallow water equations on unstructured grids with application to the Continental Shelf. *Ocean Dynamics*, 61 (8): 1175–1188.

Sehili, A. (2015): Developing a hydrodynamical model for the Elbe Estuary using Delft3D Flexible Mesh. *Next Generation Hydro Software Symposium*. Delft, Netherlands, 3–4 November 2015.

Sehili, A. (2018): GBOM. Das operationelle Deutsche-Bucht-Modell. DC SMv6 FM als Randwerte-Generator. BAW TV12 Dezember 2018, Hamburg.

Bild 1: Gesamter Sedimenttransport (Betrag) an der Elbmündung (Abschnitt aus dem Deutsche-Bucht-Modell) am Ende einer morphodynamischen Simulation für einen Monat mit einer Sand-Fraktion.



## MudEstuary

Die Beeinflussung der Dynamik der Tideästuare durch Flüssigschlick

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Wie wird die Tidedynamik der Ästuare durch Flüssigschlick beeinflusst? Die Erforschung dieser Fragestellung ist Gegenstand des KFKI-Verbundprojekts MudEstuary. Das Forschungsprojekt wird durch das BMBF gefördert (Förderkennzeichen: 03KIS113) und in Kooperation mit der Universität der Bundeswehr in München (UniBwM) bearbeitet. In dem Forschungsprojekt liegt das Hauptziel auf einer Analyse der Interaktion des Flüssigschlicks mit der Wassersäule von hoch- bis zu niedrigkonzentrierten Sedimentsuspensionen. Während die UniBwM Laborversuche durchführt, geht es im Teilprojekt MudEstuary\_B der BAW um die Weiterentwicklung der Methoden für eine numerische Simulation des Emsästuars.

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

Über die letzten Jahrzehnte ist es zu einer zunehmenden Verschlickung an der deutschen Küste gekommen. Insbesondere das Emsästuar ist von hohen Schwebstoffkonzentrationen bis zu  $300 \text{ kg/m}^3$  und Flüssigschlickschichten bis zu einer Mächtigkeit von 2 m betroffen (Schrottke 2006).

Besonders gravierend ist dabei die Tatsache, dass das Auftreten von hochkonzentrierten Sedimentsuspensionen oder einer Flüssigschlickschicht dazu führen kann, dass nur eine sehr geringe Rauigkeit auf den darüber strömenden Wasserkörper wirkt. Es kann daher passieren, dass die Gezeitendynamik in einem schlickhaltigen Ästuar anders gedämpft wird als in einem vollständig turbulent strömenden Ästuar. Mit einer zunehmenden Verschlickung kann dies eine Verformung der Tidewelle zur Folge haben.

Das Systemverhalten der Ems hat sich über die letzten Jahrzehnte deutlich verändert. So hat sich die Fortschrittsgeschwindigkeit des Tidehochwassers im Bereich der Unterems von Pogum bis Papenburg verdoppelt (BAW 2000). Unter besonderen Randbedingungen kann das Tidehochwasser (Thw) in der Unterems stromauf (bei Papenburg) früher als stromab (bei Pogum) eintreten. Dieses sind Phänomene, die auch auf ein unterschiedliches Fließverhalten zwischen Wasser- und Schlickkörper hinweisen können. Um

#### Auftragsnummer:

B3955.03.04.70235

#### Auftragsleitung:



Holger Rahlf  
 holger.rahlf@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Marie Naulin  
 marie.naulin@baw.de  
 Julia Benndorf  
 julia.benndorf@baw.de

#### Laufzeit:

2015 bis 2019

die Ursachen und die Entwicklung zu diesem Systemverhalten zu analysieren, ist es notwendig, die prozessübergreifende Modellierung der turbulenten und rheologischen Viskosität einschließlich der Übergänge zwischen diesen Zuständen zu entwickeln und in einem numerischen Modell umzusetzen. Dieses wird sowohl für die Beschreibung des derzeitigen Zustands der Ems als auch für vergangene Zustände der letzten Jahrzehnte notwendig sein. Darauf aufbauend ermöglicht das prognostische numerische Verfahren die Entwicklung neuer Lösungsansätze durch ein vertieftes Prozessverständnis. Das langfristige Ziel ist es, notwendige Vorhaben zur Verringerung der Verschlickungsproblematik, die auch gegenwärtig im Rahmen des Masterplans Ems 2050 untersucht werden, für das Gesamtsystem Ems prognostisch abzusichern.

### 3 Untersuchungsmethoden

Basierend auf einem kontinuierlichen Modellansatz (Le Hir et al. 2001) wird zunächst ein linearer Zusammenhang der turbulenten und rheologischen Viskosität angenommen. So kann die effektive Viskosität eingeführt werden, die sowohl die turbulente als auch die rheologische Viskosität beinhaltet. Weiterhin wird für die Viskosität auch eine Dämpfung der Turbulenz sowie laminares Fließverhalten berücksichtigt.

Im Teilprojekt MudEstuary\_A (UniBwM) wurden grundlegende Modellkonzepte in einem numerischen 1D-Modell weiterentwickelt. In Laborversuchen zur Turbulenzdämpfung in Suspensionen wurden rheologische und turbulente Viskositäten gemessen und zur Validierung nachgerechnet. Des Weiteren wurde der Einfluss der Salinität und anderer Effekte auf die Rheologie der Flüssigschlicke untersucht.

Im Teilprojekt MudEstuary\_B (BAW) wurde der entwickelte Modellansatz in einem numerischen 3D-Modell implementiert. Es findet eine Anwendung und Validierung auf das Emsästuar statt. Weiterhin werden historische Zustände der Ems und die Ursachen der Verschlickung analysiert.

### 4 Ergebnisse

Im Rahmen der Weiterentwicklung des Simulationsmodells erfolgte eine Implementierung eines kontinuierlichen Modellansatzes in einem 3D-Modell unter Berücksichtigung folgender Komponenten:

- Hindered-Settling-Ansätze (Reduktion der Sinkgeschwindigkeit bei hohen Konzentrationen) und Flokkulation (Erhöhung der Sinkgeschwindigkeit durch Flockenbildung)
- Rheologische Viskosität in Abhängigkeit des Feststoffgehalts unter Berücksichtigung einer Fließgrenze und scherverflüssigenden Verhaltens des Flüssigschlicks
- Dämpfung bzw. Abschaltung der Turbulenz im Bereich des Flüssigschlicks

Der Modellansatz wurde zur Simulation der Laborversuche (Bild 1) sowie schematischer Ästuarmodelle angewandt. Die Ergebnisse stellen die Grundlage für eine spätere Anwendung auf das Emsästuar und die Untersuchung von historischen Zuständen dar.

Mit der Untersuchung historischer Zustände sollen Indikatoren für die Ursachen der Verschlickung abgeleitet werden. Für diese Analyse wurden drei Szenarien historischer Zustände ausgewählt: (i) 1923–1952 (vor größeren Ausbaumaßnahmen wie z. B. Häfen, Eindeichungen etc.); (ii) Unterems 1981 (vor den maßgeblichen Ausbaumaßnahmen in der Unterems) und (iii) 2015 (aktueller Vergleichszustand). Die Topografien wurden entsprechend aufgebaut, notwendige Anpassungen am Gitter durchgeführt sowie die Szenarien anhand von Tidehoch- und Tideniedrigwassermessungen kalibriert. Anschließend wurden die Simulationsergebnisse hinsichtlich der Hydrodynamik analysiert.

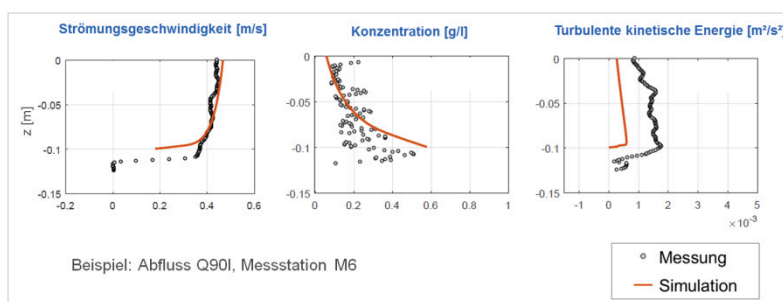


Bild 1: Vergleich zwischen Messung und Simulation der Laborversuche.

#### Literatur:

BAW (2000): Verifikation des Emsmodells 1998. Sachstandsbericht. Hamburg.

Le Hir, P. et al. (2001): Application of the continuous modelling concept to simulate high-concentrated suspended sediment in a macrotidal estuary. In: McAnally, W. H.; Mehta, A. J. (Hg): Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes 3. Elsevier Science, S. 229–247.

Schrottko, K. (2006): Dynamik fluidier Schlicke im Weser- und Ems-Ästuar. BAW/BfG-Kolloquium im Nov. 2006.



## BMVI-Expertennetzwerk: Küste

Wissen – Können – Handeln

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Unter dem Namen Expertennetzwerk haben sich sieben Ressortforschungseinrichtungen und Fachbehörden des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) zusammengeschlossen (DWD, BSH, BfG, BAW, EBA, BASt und BAG). Im BMVI-Expertennetzwerk werden unter anderem die durch Klimaveränderungen und extreme Wetterereignisse bedingten Betroffenheiten für Verkehr und Infrastruktur bestimmt und beispielhaft Anpassungsoptionen entwickelt. Der Netzwerkcharakter spiegelt sich im Austausch von Daten und jeweiliger Expertise zwischen den Fachbehörden des BMVI wider. Schwerpunkte der BAW-DH liegen unter anderem auf der Fragestellung, welche Änderungen von Hydrodynamik und Sedimenttransport in den Küstenbereichen der Deutschen Bucht bei einem Meeresspiegelanstieg zu erwarten sind und welche Folgen sich daraus für den Verkehrsträger Wasserstraße ergeben. Neue Aspekte dieser Untersuchungen im Vergleich zum Projekt KLIWAS (Seiffert et al. 2014) sind eine breitere Abdeckung möglicher Szenarien, die sowohl Meeresspiegelanstieg als auch topographische Änderungen im Wattenmeer beinhalten, sowie Untersuchungen zum Schwebstofftransport.

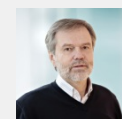
### 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)

Die Abschätzung einer Bandbreite möglicher langfristiger Veränderungen von Tide- und Sedimentdynamik im Zuge des Klimawandels ist die Grundlage für eine fundierte und umfassende Beratung der WSV. Dazu gehört auch die morphologische Entwicklung der Wattgebiete, welche die Tidedynamik der Ästuare beeinflussen. Die Watten dissipieren Tideenergie und sind somit von großer Bedeutung für das Sedimentmanagement in den Seehafenzufahrten. Die bei Meeresspiegelanstieg möglichen langfristigen Entwicklungen der Morphologie von Watten sollen abgeschätzt und geeignete Anpassungsmaßnahmen im Sedimentmanagement entwickelt werden. Des Weiteren können aus den flächenhaften Ergebnissen der numerischen Modelluntersuchungen Daten zu Klimawandelwirkungen für einzelne relevante Streckenabschnitte oder Bauwerke gewonnen werden.

#### Auftragsnummer:

B3955.03.04.70236

#### Auftragsleitung:



Dr. Norbert Winkel  
 norbert.winkel@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Caroline Rasquin  
 caroline.rasquin@baw.de

Benno Wachler  
 benno.wachler@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2020



### 3 Untersuchungsmethoden

Die Simulationen erfolgen mittels des numerischen Modellverfahrens UnTRIM<sup>2</sup>. Durch die Subgrid-Technologie kann das Volumen im Modell besonders in flachen Küstenbereichen höher aufgelöst werden. Das Modellgebiet umfasst die gesamte Deutsche Bucht von Terschelling in den Niederlanden bis Hvide-Sande in Dänemark inklusive der Ästuar Ems, Weser und Elbe bis zu den Tidewehren. Im Rahmen des Projektes werden die Effekte eines Meeresspiegelanstiegs auf die Tidedynamik untersucht. Die Annahme von Szenarien des Meeresspiegelanstiegs bis zur „nahen Zukunft“ (2031–2060) bzw. „fernen Zukunft“ (2071–2100) erfolgt in Anlehnung an Projektionen des IPCC AR5 für die Emissionsszenarien RCP4.5 und RCP8.5 (Church et al. 2013) sowie an Projektionen aktuellerer Studien für das Emissionsszenario RCP8.5 (Highend-Szenario: 95. Perzentil des von Grinsted et al. 2015 projizierten Meeresspiegelanstiegs). Änderungen der Tidedynamik (Wasserstands- und Strömungsverhältnisse sowie die Entwicklung einzelner Tidekomponenten) werden anhand von Tidekennwertanalysen ermittelt.

### 4 Ergebnisse

Verschiedene Studien aus der Literatur haben gezeigt, dass bei Schelfmodellen die Reaktion der Tidedynamik auf einen Meeresspiegelanstieg sehr unterschiedlich ausfallen kann (z. B. Pelling et al. 2013, Ward et al. 2012). Teilweise werden gegenläufige Trends bei Meeresspiegelanstieg simuliert. Modelle können nicht alle Prozesse im Detail abbilden. Daher müssen je nach Fragestellung Vereinfachungen wie zum Beispiel eine gröbere Modellauflösung oder eine vereinfachte Küstenlinie getroffen werden.

In einer Systemstudie wird in diesem Projekt untersucht, ob die Reaktion der Tidedynamik auf einen Anstieg des Meeresspiegels von den auflösungsbedingten Vereinfachungen der Schelfmodelle abhängt (Rasquin et al. 2020). Hierzu wird das im Vergleich zu den Schelfmodellen höher und detailreicher aufgelöste Deutsche-Bucht-Modell in zwei Schritten an die Schelfmodelle angepasst. Zum einen werden die Ästuar an der gleichen Stelle, an der die Schelfmodelle enden, abgetrennt, um zu untersuchen, welchen Einfluss der fehlende Schwingungsraum hat. Zum anderen wird untersucht, ob die Auflösung der Topographie die Reaktionen der Tidedynamik auf einen Meeresspiegelanstieg beeinflusst.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass besonders der Wattengürtel und die flachen Bereiche vor den Barriereinseln (~20 m Tiefenlinie) dazu beitragen, dass Tideenergie dissipiert wird, welche einen Einfluss auf die Wasserstände hat. Dies lässt den Schluss zu, dass gerade diese Bereiche in Modellen ausreichend genau aufgelöst sein müssen um Schlussfolgerungen für die Küste (beispielsweise für den Küstenschutz) ziehen zu können. Das Fehlen von Schwingungsraum durch die abgeschnittenen Ästuar führt zu lokalen Änderungen im Wasserstand von mehreren Dezimetern. Dies muss bei der Kalibrierung von ästuar-nahen Küstenpegel berücksichtigt werden.

Bild 1 zeigt die Reaktion der M2 Amplitude auf einen Meeresspiegelanstieg von 0,80 m in der Topographie des Deutsche-Bucht-Modells (links) und in einer vereinfachten Topographie, wie sie in Schelfmodellen verwendet wird (rechts).

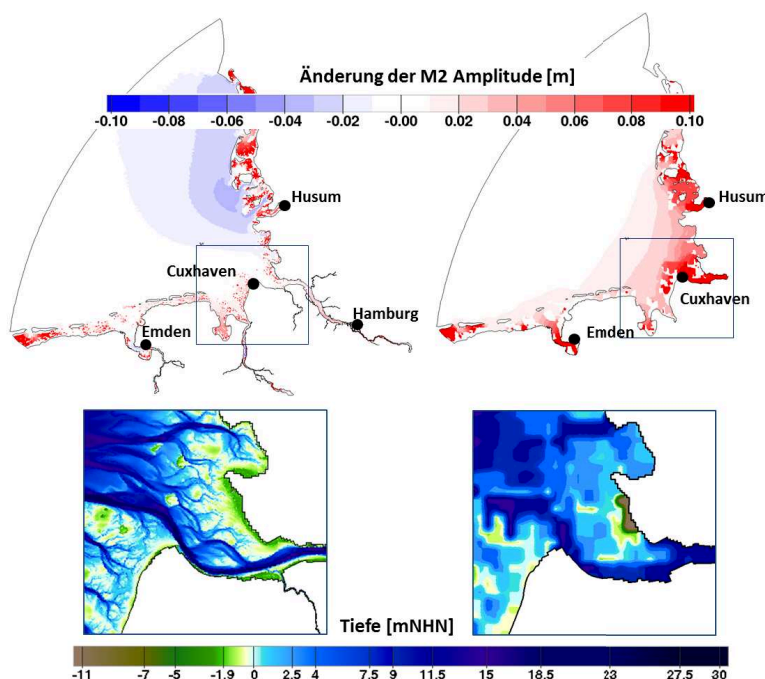


Bild 1: Reaktion der M2 Amplitude auf einen Anstieg des Meeresspiegels um 0,8 m bei verschiedenen Topographieauflösungen.

#### Literatur:

Church et al. (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of WG1 to the Fifth Assessment Report of the IPCC.* Cambridge and New York.

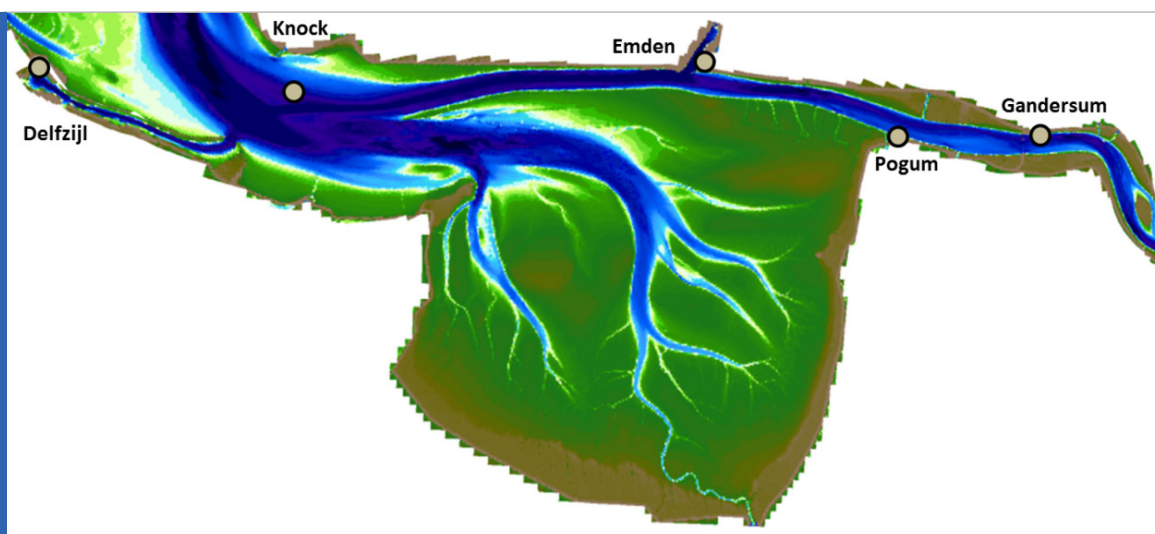
Grinsted et al. (2015): *Sea level rise projections for northern Europe under RCP8.5, Clim. Res., 64, 15–23, DOI: 10.3354/cr01309.*

Pelling et al. (2013): *Modelling tides and sea-level rise. To flood or not to flood. In: Ocean Modelling 63, pp. 21–29. DOI: 10.1016/j.ocemod.2012.12.004.*

Rasquin et al. (2020): *The significance of coastal bathymetry representation for modelling the tidal response to mean sea level rise in the German Bight, Ocean Sci., 16, 31–44, https://doi.org/10.5194/os-16-31-2020, 2020.*

Seiffert et al. (2014): *Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.04/3.02. KLIWAS Schriftenreihe 36.*

Ward et al. (2012): *Tides, sea-level rise and tidal power extraction on the European shelf. In: Ocean Dynamics 62 (8), pp. 1153–1167. DOI: 10.1007/s10236-012-0552-6.*



## EXTREMENESS-C

Analyse von extremen Sturmfluten in den Ästuaren von Elbe und Ems und mögliche Verstärkungen

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeiten schwerer Sturmfluten sowie möglicher Änderungen im Zuge des anthropogenen Klimawandels sind für den Küstenschutz in der Deutschen Bucht sowie in den angrenzenden Ästuaren von z. B. Elbe und Ems von großer Bedeutung. Im Gegensatz zu bisher existierenden Untersuchungen, die sich typischerweise mit hohen Perzentilen oder Wiederkehrwerten und deren Änderungen beschäftigen, sollen in dem vom BMBF im Rahmenprogramm Forschung für Nachhaltige Entwicklung (FONA 3) geförderten Projekt EXTREMENESS Ereignisse untersucht werden, die extrem selten und höchst unwahrscheinlich, aber potentiell mit extremen Konsequenzen verbunden sind. Zu diesem Zweck werden zunächst verschiedene Methoden genutzt, um aus einer Vielzahl existierender Beobachtungsdaten, Reanalysen und Klimaszenarienrechnungen extreme Sturmflutereignisse und die zugehörigen meteorologischen Bedingungen zu identifizieren/selektieren. Anschließend wird mithilfe von Modellstudien untersucht, inwieweit diese Ereignisse innerhalb physikalisch plausibler Grenzen zu noch extremeren Sturmfluten hätten führen können. Dabei werden z. B. Effekte des Meeresspiegelanstiegs oder der Tatsache, dass der zeitliche Ablauf eines Sturms unabhängig von der Tidephase ist, berücksichtigt. Mit regionalen Stakeholdern der Stadt Emden wird anschließend eine transdisziplinäre reflexive Bewertung für die extremsten Fälle durchgeführt, wobei Konsequenzen bei unterstelltem Versagen von Schutzanlagen beispielhaft untersucht und in einem sozialwissenschaftlich begleiteten Diskussionsprozess mit Entscheidungsträgern hinsichtlich ihrer regionalen Auswirkungen und möglicher Anpassungsmaßnahmen bewertet werden.

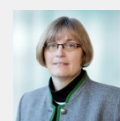
### 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)

Um mögliche, mit einer Klimaänderung verbundene Betroffenheiten für die Bundeswasserstraßen identifizieren und Anpassungsmaßnahmen entwickeln zu können, ist es wichtig, die zukünftigen Bedingungen unter dem Einfluss eines sich ändernden Klimas zu verstehen und zu analysieren. Das auf Basis der Modellergebnisse im Rahmen von EXTREMENESS analysierte

#### Auftragsnummer:

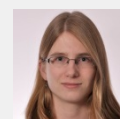
B3955.03.04.70237

#### Auftragsleitung:



Dr. Elisabeth Rudolph  
 elisabeth.rudolph@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Tabea Brodhagen  
 tabea.brodhagen@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2020

veränderte Systemverhalten bei extremen Sturmfluten kann z. B. für die Entwicklung von Anpassungsoptionen für den Strombau und den Küsten- und Uferschutz sowie für Entwässerungskonzepte genutzt werden.

### 3 Untersuchungsmethoden

Extreme Sturmfluten mit den zugehörigen meteorologischen Bedingungen werden in den Teilprojekten EXTREMENESS-A (HZG) und EXTREMENESS-B (DWD) aus existierenden Datensätzen heutiger und möglicher zukünftiger Klimabedingungen herausgefiltert. Die Auswirkungen der ausgewählten extremen Sturmfluten sowie ihr Potential für eine mögliche Verstärkung, z. B. durch einen Meeresspiegelanstieg (SLR) oder eine Veränderung des Abflusses (Q), werden im Teilprojekt EXTREMENESS-C (BAW) mit dem numerischen Modellverfahren UnTRIM2009 untersucht (Casulli 2008). Das Modellgebiet umfasst neben der Deutschen Bucht auch die Ästuarie von Elbe, Weser und Ems und erlaubt somit die gleichzeitige Untersuchung der Auswirkungen von Sturmfluten in den Elbe- und Ems-Ästuaren. Die simulierten Wasserstandszeitreihen sind die Grundlage der Analyse verschiedener Sturmflutkenngößen, z. B. des Sturmflutscheitelwasserstandes, d. h. des höchsten während der Sturmflut erreichten Wasserstandes.

### 4 Ergebnisse

Für die weitere Betrachtung in der Fokusregion Ems zwischen Borkum und Herbrum haben die Teilprojekte EXTREMENESS-A und EXTREMENESS-B zwei extreme Nordseesturmfluten für Borkum aus Klimaszenarien ausgewählt: das höchste in den betrachteten Datensätzen gefundene Ereignis EH sowie das Ereignis mit der längsten Andauer von hohen Wasserständen EL/EC. Diese Sturmflutereignisse werden von EXTREMENESS-C in der Deutschen Bucht modelliert und analysiert. Dabei werden auch mögliche weitere Verstärkungen durch eine Zunahme des Abflusses Q in die Ems oder ein Meeresspiegelanstieg SLR in der Nordsee untersucht.

Bild 1 zeigt die analysierten Sturmflutscheitelwasserstände HW entlang der Fahrrinne der Ems zwischen Hubertgat in der Emsmündung und Herbrum für die drei Sturmflutereignisse 5. Allerheiligenflut (SF06, schwarz), EH (rot) und EL/EC (blau) ohne Meeresspiegelanstieg (SLR000). Bei offenem Sturmflutsperrwerk (SPWo, durchgezogen) ist der Einfluss der Sturmflut im gesamten Ästuar zu sehen. Eine Erhöhung des Abflusses im Sturmflutzeitraum auf 1200 m<sup>3</sup>/s (Q1200, strichpunktiert) erhöht die Sturmflutscheitelwasserstände im oberen Teil des Ems-Ästuars um mehrere Dezimeter und im breiteren und tiefen Bereich bei Emden um mehrere Zentimeter. Im sehr breiten Mündungsbereich verändert der Abfluss die Sturmflutscheitelwasserstände nicht. Das Schließen des Sperrwerkes (SPWg) bei einem Wasserstand von NHN + 3,50 m schützt den stromauf von Gandersum gelegenen Teil der Ems vor hohen Sturmflutwasserständen. Durch eine Erhöhung des Abflusses im Sturmflutzeitraum auf 1200 m<sup>3</sup>/s (Q1200, gestrichelt) erhöhen sich die Sturmflutscheitelwasserstände in diesem geschützten Bereich, bleiben jedoch bei allen Sturmflutereignissen unter den Sturmflutscheitelwasserständen bei offenem Sperrwerk. Im Bereich zwischen dem Sperrwerk und Dukegat bewirkt das geschlossene Sperrwerk eine Erhöhung der Sturmflutscheitelwasserstände um bis zu 30 cm (siehe hierzu auch BAW 2007). Eine Erhöhung des Abflusses im Sturmflutzeitraum verändert in den betrachteten extremen Sturmflutereignissen EH und EL/EC den Sturmflutscheitelwasserstand in gleicher Weise wie bei SF06.

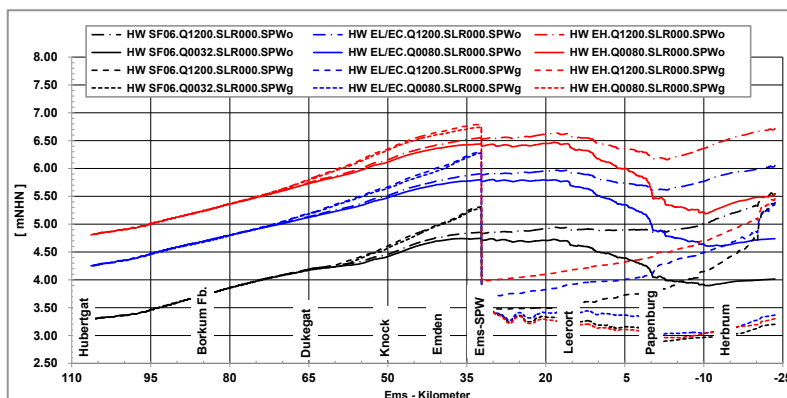


Bild 1: Sturmflutscheitelwasserstand HW entlang der Fahrrinne der Ems für verschiedene Abflussszenarien Q sowie für ein offenes bzw. gesteuertes Emssperrwerk für die Sturmflutereignisse SF06, EH und EL/EC.

#### Literatur:

BAW (2007): 5. Allerheiligenflut in der Ems. Endbericht zu Sturmflutkenngößen in Unter- und Außenems. Bericht. BAW A39550310161.

Casulli, V. (2008) A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics. In: International Journal for Numerical Methods in Fluids 60 (4), S. 391-408. DOI: 10.1002/fld.1896.



## BASEWAD – BALancing SEDiment deficits in the WADden Sea

### Simulation der morphologischen Entwicklung im Schleswig-Holsteinischen Wattenmeer

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Bei dem Projekt BASEWAD handelt es sich um ein Teilprojekt des Interreg-Projektes BWN („Building with Nature“). In diesem Projekt verfolgen Partner aus Deutschland, Belgien, Dänemark, Schweden und den Niederlanden das Ziel, nachhaltige Strategien zu überprüfen oder zu entwickeln, um möglichen Auswirkungen des Klimawandels entgegenzuwirken und zugleich bestimmte Ökosysteme gezielt zu stärken. Natürliche Transportprozesse sollen genutzt werden, um durch verschiedene Maßnahmen (insbesondere Sandvorspülungen) den Küstenschutz nachhaltig zu stärken und so der Erosion der Küsten entgegenzuwirken. Die Effektivität solcher Maßnahmen ist aber noch mit Unsicherheiten belegt und erfordert daher weitere Untersuchungen.

In unseren Untersuchungen liegt der Fokus auf dem nordfriesischen Teil des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres. Ziel ist es, mithilfe numerischer Simulationen die Auswirkungen von Maßnahmen wie Sandeinbringungen oder Sandentnahmen auf die Morphologie des Gebietes zu untersuchen. Im Hinblick auf die Auswirkungen des Klimawandels (Meeresspiegelanstieg, Starkwindereignisse) sind Aussagen zu mittel- und langfristigen Änderungen der Morphologie gefordert. Weiterhin sollen für historische topografische Zustände des Gebietes Analysen durchgeführt werden, um ein besseres Verständnis darüber zu erlangen, wie sich die hydrodynamischen Bedingungen im Laufe der Zeit geändert haben.

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

Die bei diesem Projekt durchzuführenden methodischen Weiterentwicklungen und gesammelten Erfahrungen sind unmittelbar für Fragestellungen des Sedimentmanagements, insbesondere in den Mündungsbereichen der Ästuar, von großem Nutzen. Die Modellierung des Einflusses des Seegangs auf den Sedimenttransport und die Methoden zur Modellierung des Geschiebetransports sind hier besonders hervorzuheben.

#### Auftragsnummer:

B3955.03.04.70238

#### Auftragsleitung:



Benjamin Fricke  
 benjamin.fricke@baw.de

#### Laufzeit:

2017 bis 2019

### 3 Untersuchungsmethoden

Die Untersuchungen werden mit den numerischen Verfahren UnTRIM (Hydrodynamik), SediMorph (Morphodynamik) und UnK (Seegang) durchgeführt. Auch wenn der Fokus auf dem schleswig-holsteinischen Wattenmeer und der morphologischen Entwicklung im Umfeld der Inseln Sylt, Amrum und Föhr liegt, umfasst das Modellgebiet die gesamte Deutsche Bucht, um die Tidedynamik korrekt abzubilden.

Zur Validierung der morphologischen Aussagekraft des Modells findet ein Vergleich der Erosions- und Depositionsmuster von mittelfristigen Simulationen mit Messungen an definierten Punkten statt, die von besonderem Interesse sind und eine wichtige Rolle bei der Planung des Sedimentmanagements spielen. Weiterhin findet ein Vergleich mit verschiedenen Abschätzungen – basierend sowohl auf Messungen als auch auf analytischen Überlegungen – über großräumige Sedimentbewegungen statt. Darauf aufbauend werden dann verschiedene Szenarien zu Maßnahmen wie Sandvorspülungen gerechnet und deren Einfluss auf die lokale Entwicklung betrachtet.

### 4 Ergebnisse

Ein lokales Seegangmodell wurde aufgebaut und mit Seegangsmessungen der Pegel Westerland (vor der Westküste Sylts liegend) und Hörnum (am östlichen Ende des Seegatts im Wattenmeer liegend) validiert. Es wurde eine gute Übereinstimmung der Modellergebnisse mit den Messungen erzielt. Erste morphodynamische Rechnungen mit einer Simulationsdauer von einem Jahr wurden durchgeführt und die Ergebnisse mit der in der Natur beobachteten Entwicklung an den definierten Punkten verglichen. Grundlegende Transportprozesse im Fokusgebiet werden bereits gut abgebildet.

Im Sommer 2017 wurde vom Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein eine Sandvorspülung mit einem Volumen von 400.000 m<sup>3</sup> im Vorstrandbereich der Hörnum Westküste durchgeführt. Diese wurde im Modell umgesetzt, um die Ausbreitungswege des eingebrachten Sediments abbilden zu können. Erste Ergebnisse zeigen Übereinstimmungen mit aus den Messungen abgeleiteten Tendenzen. Diese zeigen eine Ausbreitung des eingebrachten Sediments entlang der Küste in südlicher Richtung hinein in das Vortrapptief.

Für den Projektpartner Bioconsult.SH wurde der Zeitraum 2011 bis 2016 simuliert und diverse Langzeitkennwerte im monatlichen Mittel erstellt. Diese sind Eingangsgrößen für die biologische Modellierung, die bestimmen soll, wie das Vorkommen bestimmter Arten von den hydrologischen Bedingungen abhängt.

Es wurden vier Klimaszenarien aus der Wattenmeerstrategie 2100 des LKN gerechnet, bei der sowohl ein Anstieg des Meeresspiegels als auch Änderungen in der Topographie berücksichtigt wurden. Dazu zählen ein Anheben der Wattflächen und ein Absenken der Küstenvorfelder und der Ebbdeltas. Das Absenken erfolgt in einem Ausmaß, um die entsprechende Menge Sediment für das Wachstum der Wattflächen zu liefern. Besonderes Augenmerk bei der Auswertung lag auf Änderungen der Seegangenergie sowie den Auswirkungen auf den Sedimenttransport und den Eintrag von Sediment in das Hörnum Tidebecken. Hierbei spielen vor allem starke Seegangereignisse eine wichtige Rolle.

Außerdem wurden Änderungen in den Tidekennwerten untersucht. Von Bedeutung ist dabei unter anderem die Überflutungsdauer auf den Wattflächen (Bild 1), da diese für die ökologische Nutzbarkeit eine wichtige Rolle spielt. Für das Szenario G100 (Anstieg des Meeresspiegels von 80 cm und Wachstum der Wattflächen um 50 cm) ist zu sehen, dass die Wattflächen in vielen Bereichen des Tidebeckens deutlich kürzer trocken fallen.

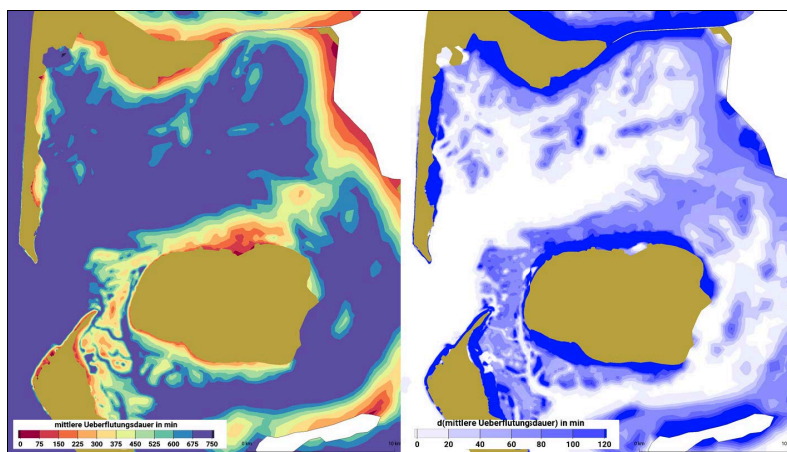


Bild 1: Links: Mittlere Überflutungsdauer während einer Tide in min im Referenzzustand. Rechts: Differenz der Überflutungsdauer zwischen Referenzzustand und Szenario G100. Die blauen Bereiche bedeuten eine geringere Überflutungsdauer mit steigendem Meeresspiegel.

#### Literatur:

Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (2015): Strategie für das Wattenmeer 2100. Kiel: Schmidt & Klaunig.

Wilmink, R. J. A. et. al. (2017): Assessment of the Design and Behaviour of Nourishments in the North Sea Region. In: Conference Proceedings Coastal Dynamics 2017, 801–809.



## MudEms

### Flüssigschlick im Emsästuar

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Über die letzten Jahrzehnte ist es zu einer zunehmenden Verschlickung an der deutschen Küste gekommen. Insbesondere das Emsästuar ist von hohen Schwebstoffkonzentrationen betroffen. In der Unterems wurden Flüssigschlickschichten über mehrere Meter Mächtigkeit mit bis zu 50 g/l über etwa die Hälfte der Wassersäule beobachtet (Becker et al. 2018), was mit ökologischen Folgen (kaum/kein Sauerstoff) sowie ökonomischen Konsequenzen (hoher Unterhaltungsaufwand) verbunden ist.

Um zukünftig Aussagen hinsichtlich der Verschlickungsproblematik treffen zu können, ist es ein notwendiger Schritt, das vorhandene Prognoseverfahren fachlich zu erweitern und abzusichern.

In vergangenen FuE-Projekten (MudSim, MudEstuary) lag der Fokus auf dem Prozessverständnis der komplexen Tidedynamik unter dem Einfluss von Flüssigschlick. Hierfür wurde die Simulationssoftware weiterentwickelt und überwiegend auf vereinfachte schematische Ästuarmodelle angewandt. Eine Anwendung mit einer Verifizierung sowie fundierten Kalibrierung und Validierung in einem hochaufgelösten Ästuarmodell der Ems fehlt bislang. Hierfür ist auch ein erweitertes Prozessverständnis zwingend erforderlich. Um die hydrologischen Verhältnisse im Ems-Dollart Ästuar zu untersuchen, fand das internationale Messprogramm Ems-Dollart-Measurements (EDoM) im Zeitraum 2018/2019 statt. Die Analyse der Messdaten mit einem Vergleich sowie einer Weiterentwicklung des Simulationsmodells stehen nun im Fokus des Forschungsprojekts MudEms.

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

Die BAW hat den Auftrag, für die WSV hydro- und morphodynamische Simulationen und Bewertungen von Maßnahmen u. a. für den Masterplan Ems 2050 durchzuführen. Die Untersuchungen erfolgen in Kooperation mit dem Land Niedersachsen (NLWKN), welche ein Flüssigschlickmodul im Rahmen ihrer Modellierungen entwickeln und anwenden (Oberrecht et al. 2016).

#### Auftragsnummer:

B3955.03.04.70241

#### Auftragsleitung:

Marie Naulin  
 marie.naulin@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Anna Wünsche  
 anna.wuensche@baw.de

#### Laufzeit:

2019 bis 2022

Die Weiterentwicklung der Methoden sowie die Diskussion zum Prozessverständnis sind dabei unerlässlich, um die Anforderungen als behördlicher Gutachter zu erfüllen. Das Ziel ist es, notwendige Vorhaben zur Verringerung der Verschlickungsproblematik prognostisch abzusichern.

### 3 Untersuchungsmethoden

Als Untersuchungsmethoden sollen die Analyse von Messdaten und numerische Modelle Anwendung finden. In MudEms sollen die beiden Arbeitsschwerpunkte Weiterentwicklung des Simulationsverfahrens und die praktische Anwendung in einem hochaufgelöstem 3D-Modell der Ems fortgesetzt und verbessert werden. Hierfür ist jedoch zunächst ein verbessertes Prozessverständnis des Emsästuars erforderlich. Aus diesem Grund wurden die Arbeitsschwerpunkte um ein weiteres Arbeitspaket ergänzt, was sich der Analyse von Messdaten widmet.

Die Arbeitsschwerpunkte sollen zeitgleich folgende Arbeitspakete bearbeiten:

- AP 1: Analyse von Messdaten
  - Langzeitliche Änderungen aus Daten der Dauermessstationen
  - Prozessverständnis aus Daten der EDoM-Messkampagne
- AP 2: Weiterentwicklung Simulationsmodell
- AP 3: Anwendung Emsmodell
  - Kalibrierung und Validierung mit Daten aus EDoM 2018/2019
  - Entstehung von Flüssigschlick
  - Masterplan Ems 2050

Weiterhin soll ein Bestandteil des Forschungsvorhabens den Austausch von Forschungsaktivitäten im Bereich „Schlick in Ästuaren“ mit weiteren Partnern aus Forschung und Praxis beinhalten.

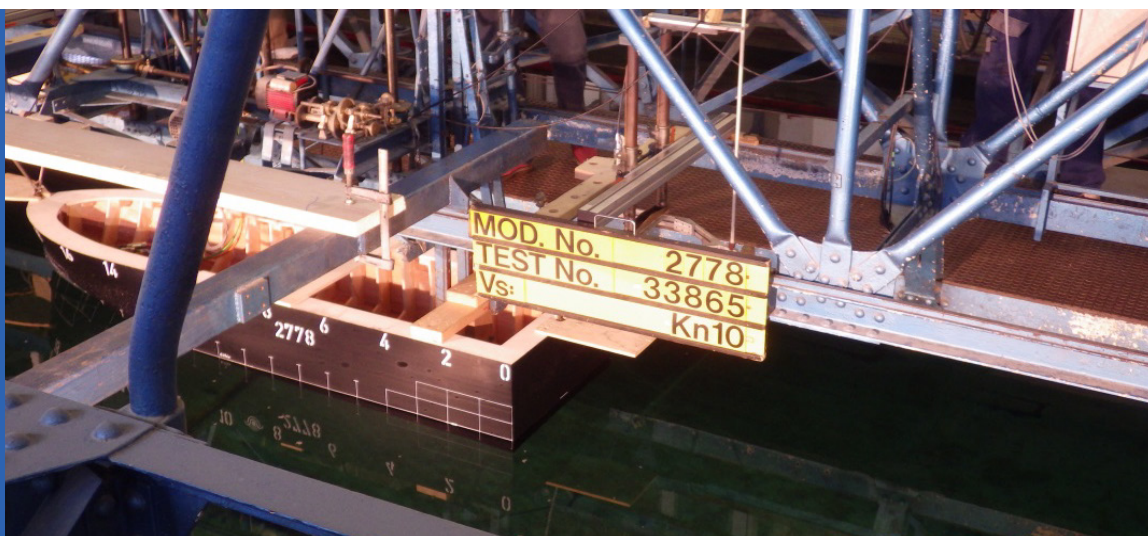


Bild 1: Baggerschiff auf der Unterems.

#### Literatur:

Becker, M.; Maushake, C.; Winter, C. (2018). Observations of mud-induced periodic stratification in a hyperturbid estuary. *Geophysical Research Letters*, 45. DOI: 10.1029/2018GL077966.

Oberrecht, D.; Franz, B.; Wurpts, A. (2016): Hydro- und morphodynamische Auswirkungen eines Tidesteuerungsbetriebes mit dem Emssperrwerk. Analyse im Rahmen der Machbarkeitsstudie zum Masterplan Ems 2050. Gutachten 04/2016 NLWKN.



## Batteriehybrid-Betrieb Vermessungsboote

### Grundlagenermittlung für Bootsentwurf

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Im Zuge weiterer Verschärfungen der Grenzwertsetzung von Abgasemissionen in der See- und Binnenschifffahrt sind aus Sicht des BMVI sowie des nachgeordneten Bereiches Anstrengungen erforderlich, repräsentative Beispiele für den Einsatz moderner und umweltfreundlicher Antriebstechnologien, insbesondere im Bereich der Behördenschiffe zu schaffen. Hierbei geht es neben der Nutzung alternativer Kraftstoffe, wie z. B. LNG oder GTL auch um die Untersuchung/Etablierung des Einsatzes emissionsärmer oder -loser Antriebstechniken, in diesem Falle um die Möglichkeit von rein batteriegetriebenen Antriebsanlagen. Im Zuge des Neubaus des Vermessungs-, Wracksuch- und Forschungsschiffes ATAIR ist auch die Entwicklung neuer Vermessungsboote (Tochterboote) geplant. Diese Vermessungsboote operieren in der Regel in Zusammenarbeit mit dem Mutterschiff und haben max. Einsatzzeiten von bis zu acht Stunden pro Tag. Im Rahmen der Forschungsarbeit soll ein alternatives Antriebskonzept entwickelt werden, welches auf Basis eines Batteriespeichers in Verbindung mit Elektromotoren den Einsatz der Vermessungsboote gewährleistet. In Abhängigkeit der Anforderungen aus dem vorliegenden Fahrprofil ist gegebenenfalls eine Kombination mit einem modernen Verbrennungsmotor erforderlich. Im Rahmen der Forschungsarbeit soll dieser Prototyp sowohl entwickelt als auch im Rahmen des bestehenden Auftrages möglichst realisiert werden.

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

Die WSV verfügt im Binnenbereich über eine große Anzahl an Arbeits- und Aufsichtsfahrzeugen (Spatzklasse), für die auf Grund ihrer Altersstruktur in absehbarer Zeit die Notwendigkeit von Grundinstandsetzungen, u. a. der Antriebstechnik und konkret hier der Antriebsmotoren entsteht. An einer geeigneten alternativen Energie- und Antriebskonzeption, die z. B. in einer Kombination aus Diesel- und Elektromotor (Hybrid) oder auch rein elektrisch (batteriegestützt) erfolgen könnte, besteht grundlegendes Interesse vor den absehbar anstehenden Investitionsentscheidungen. Die sich daraus ergebenden Möglichkeiten können ein wesentlicher Bestandteil seitens der

#### Auftragsnummer:

B3955.04.04.70001

#### Auftragsleitung:

Benno Lenkeit  
 benno.lenkeit@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Jan-Moritz Schäfer  
 moritz.schaefer@baw.de

#### Laufzeit:

2017 bis 2022



WSV zur Reduzierung der Emissionen der Flotte und damit zum Erreichen des Klimaziels der Bundesregierung werden.

### 3 Untersuchungsmethoden

- Durchführung von Marktrecherchen zu bereits vorhandenen Anwendungen vergleichbarer Antriebstechnologien, Marktrecherche zu aktuellen und in der Entwicklung befindlichen Systemen und Systemkomponenten,
- Durchführung technischer Vergleichsbetrachtungen und Bewertungen hinsichtlich der Anwendbarkeit,
- Entwurfsarbeit zur Integration von alternativen Antrieben in das neu zu entwickelnde Vermessungsboot sowie weitere Fahrzeugtypen der WSV,
- Entwicklung geeigneter Monitoringkonzepte für die Begleitung von Prototypen im Betrieb.

### 4 Ergebnisse

Ziel der Forschungsarbeit ist die praktische Umsetzung vorhandener Technologien auf die konkrete Anwendung im Bereich der Wasserfahrzeuge des BMVI und seines nachgeordneten Bereiches. Zudem sammeln von Einsatzerfahrungen zur Optimierung und Übertragung wesentlicher Erkenntnisse auf weitergehende Anwendungen im Geschäftsbereich. Die notwendigen Arbeitspakete wurden wie folgt definiert:

2018 – Marktrecherche, Technische Konzepte, Technisches Konzept Vermessungsboote, Technische Konzepte für Arbeitsschiffe der WSV

2019 – möglichst Umsetzung/Realisierung eines Prototyps im Rahmen des Neubaus ATAIR, Entwurfsarbeit für Arbeitsschiffe der WSV

2020 – Aufnahme Betrieb, Monitoring im Betrieb, erste Erkenntnisse/Erfahrungen aus dem Betrieb, Schwachstellenanalyse und Ansätze zu technischen Anpassungen

Die Grundlagenuntersuchung zum technischen Konzept Vermessungsboote führte leider zu keinem positiven Ergebnis, da die gestellten Anforderungen an die Vermessungsboote hinsichtlich ihres Fahrprofils (Geschwindigkeit, Einsatzzeit, ...) aus aktueller Sicht keine technisch vertretbare/ realisierbare Lösung ermöglichen. Zudem haben sich ausgewählte Lieferanten aus sowohl technischen als auch wirtschaftlichen Gründen aus dem Projekt zurückgezogen, so dass das Vorhaben, speziell für die Vermessungsboote bis auf weiteres eingefroren wurde. Als positiver Aspekt ist dennoch zu nennen, dass die Weiterentwicklung und im Zuge der „Elektrifizierung“ durchgeführte Optimierung des Bootsentwurfes, inkl. durchgeführter Modellversuche, in jedem Falle eine erhebliche Leistungseinsparung zur Erreichung der Geschwindigkeit geführt hat.

Im Rahmen der Mitwirkung/Unterstützung im Pilotprojekt „E-Spatz“ der WSV konnten die zugewiesenen Arbeiten an der notwendigen Voruntersuchung gem. VV WSV 2107 durchgeführt werden.

Mit Wirkung vom 4.11.2019 wurde zur Fortführung des FuE-Projektes Herr Jan-Moritz Schäfer eingestellt.



Bild 1: Aus der laufenden Fertigung des Schriftzugs „ATAIR“ (BAW, Referat K4).



## Bestimmung der Widerstandsfähigkeit von Deichen

### Laborversuche und Numerische Modellierung

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Bemessung von Seedeichen geschieht derzeit auf der Grundlage von Erfahrungswissen, physikalischen Modellansätzen sowie analytischen Berechnungsansätzen. Dabei bestehen analytische Nachweisführungen für verschiedene einzelne Versagensmechanismen. Einzelne Aspekte für die Widerstandsfähigkeit von Deichen werden unabhängig voneinander untersucht, wie z. B. die Rissentwicklung, der Einfluss der Grasnarbe auf den Erosionswiderstand sowie die Erosion des Deichbaumaterials.

Eine ganzheitliche Betrachtung aller Aspekte findet derzeit nicht statt. Der Einfluss aller Faktoren und die jeweiligen Abhängigkeiten sollen durch Feld- und Laborversuche ermittelt und in einem numerischen Modell zusammengeführt werden.

Durch eine numerische mechanisch-hydraulisch gekoppelte Modellierung eines Deichquerschnittes mit seinen charakteristischen Eigenschaften (Deichbaumaterial, Bodenstruktur, Jahreszeit, Grasnarbe) unter der Einwirkung eines hydraulischen Ereignisses (Sturmflut, Starkregen, Einwirkungsdauer) ist eine Bemessung möglich, die alle Versagensmechanismen beinhaltet. Deichschäden und potentielle Gefährdungsbereiche können über eine Parametervariation ermittelt und Deichverstärkungsmaßnahmen bewertet werden.

#### 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV)

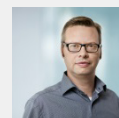
Für den Hochwasserschutz sind funktionstüchtige und widerstandsfähige Deiche gegenüber den Einwirkungen aus Sturmfluten unerlässlich. Im Rahmen der Unterhaltung von Bundeswasserstraßen fallen große Mengen an Baggergut an.

In Kenntnis des säkularen Meeresspiegelanstiegs sind Deichverstärkungsmaßnahmen erforderlich. Die Entnahme von Klei und Mergel ist häufig mit rechtlichen und ökologischen Schwierigkeiten verbunden, so dass sich die Verwendung von Baggergut als Deichbaumaterial anbietet. Zur Bewertung

#### Auftragsnummer:

B3952.05.04.70318

#### Auftragsleitung:



Dr. Thomas Nuber  
 thomas.nuber@baw.de

#### Laufzeit:

2010 bis 2021

zu verstärkender Deichquerschnitte mit Baggergut auf bestehenden Klei- oder Mergeldeichen sollen physikalische und numerische Untersuchungen vorgenommen werden.

Beim Ausbau der Bundeswasserstrassen im Tidebereich werden Deichschäden sowie Schäden im Hinterland häufig Ausbaumaßnahmen zugewiesen. Durch eine numerische Simulation sollen auftretende Schäden und verursachende Mechanismen untersucht werden. Die Ursachen können benannt und somit verhindert werden.

### 3 Untersuchungsmethoden

Anhand von Untersuchungen an bestehenden Deichen werden unter definierten Bedingungen der Einfluss von Alterungsvorgängen (Strukturbiologie) und Wasserbelastung auf die Scherfestigkeit sowie Durchlässigkeit der Deichabdeckung ermittelt. Zur Simulation erhöhter Wasserstände im Sturmflutfall wird auf der jeweiligen Deichkrone eine Wasserauflast erzeugt. Zu verschiedenen Zeitpunkten werden Sonderproben über die Tiefe der Deichabdeckung entnommen. Diese werden anschließend im bodenmechanischen Labor (z. B. durch u. a. Triaxialversuche) untersucht. Ziel ist es, alle wassergehaltsabhängigen Parameter für die jeweiligen Deichabdeckungen zu ermitteln.

Der Deichquerschnitt wird mit einem drei-dimensionalen Finite Differenzen Programm FLAC3D (ITASCA 2013) simuliert. Somit sind Berechnungen bei großen Dehnungen möglich, um Versagensmechanismen sowie deren Verlauf ermitteln zu können. Zur Erfassung der hydraulischen und bodenmechanischen Vorgänge wird die Simulation mechanisch-hydraulisch gekoppelt durchgeführt. Die Spannungs-Dehnungs-Kurven aus den Triaxial- und Kompressionsversuchen (s. Bild 1) in Abhängigkeit der Dauer der hydraulischen Beanspruchung und weiterer Randbedingungen (Bodenart, Alter, ...) werden im Programm hinterlegt, um die Entwicklung der Scherfestigkeiten und Durchlässigkeiten realistisch zu erfassen.

### 4 Ergebnisse

Probennahmen sowie die entsprechenden Feld- und Laboruntersuchungen wurden an einem Mergeldeich, an einem Kleideich sowie an einem Baggergutdeich durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die einzelnen Deiche unterschiedliche Infiltrationskapazitäten infolge ihrer Strukturbiologie aufweisen und dass die jeweiligen Materialien unterschiedliche, tiefenabhängige natürliche Wassergehalte besitzen. Zudem weisen die jeweiligen Materialien sowohl unterschiedliche Festigkeiten als auch unterschiedliche wassergehaltsabhängige Spannungs-Dehnungs-Verhalten auf (Nuber und Pohl 2014).

Parallel erfolgte der Aufbau eines mechanisch-hydraulisch gekoppelten Finite-Differenzen-Modells in FLAC3D 5.0, das durch erste Berechnungsläufe zunächst plausibilisiert wurde (Sorgatz und Nuber 2017) und anschließend in die aktuellere Software-Version FLAC3D 6.0 überführt wurde. Durch die Überführung war es möglich weitere Stoffmodelle, die im Zuge der Weiterentwicklung der Software mittlerweile implementiert sind, zu nutzen. Zudem wurden die Ergebnisse der bisher durchgeführten Feld- und Laborversuche hinsichtlich der Parameter, die für die entsprechenden Stoffmodelle erforderlich sind, ausgewertet. Derzeit werden mit dem Modell historische Hochwasserereignisse (z. B. Nikolaussturmflut von 2013) simuliert.

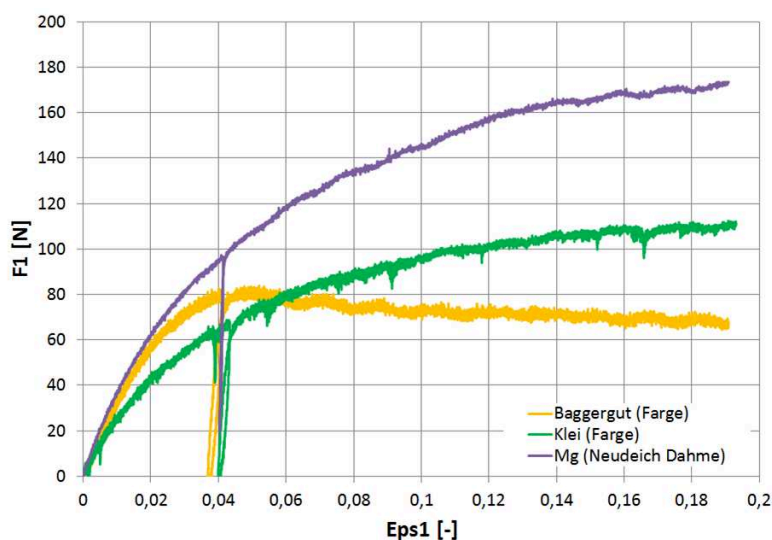


Bild 1: Spannungs-Dehnungskurven der Deichabdeckungen.

#### Literatur:

ITASCA Consulting Group Inc. (2013): FLAC3D. Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3-Dimensions. User's Guide.

Nuber, T.; Pohl, M. (2014): Geotechnical investigations on dike material as a basis for a holistic numerical model, In: Saathoff, F. (Hrsg.): Dredgdikes: Proceedings of the South Baltic Conference in Dredged Materials in Dike Construction, Rostock, April 2014.

Sorgatz, J.; Nuber, T (2017) Numerical Investigations of the Stability of Sea Dikes. In: Conference Proceedings of Workshop on Numerical Methods in Geotechnics 2017, September 2017, Hamburg, Germany.



## Störung des Baugrundes durch Kampfmittelsondierungen

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Vor einer Baumaßnahme ist sicherzustellen, dass sich keine Kampfmittel im Baufeld befinden. Die zur Kampfmittelsuche eingesetzten, meist magnetischen und elektromagnetischen Verfahren arbeiten selbst zwar zerstörungsfrei, erfordern aber häufig Bohrungen, um die Messsonde vom Bohrloch aus in geeigneter Tiefe einsetzen zu können. Während zur Kampfmitteldetektion aber ein möglichst enges Bohrraster benötigt wird, bedeutet die Vielzahl der abgeteuften Bohrungen für den Bauherrn in erster Linie eine Störung des Baugrundes. Zum Ausmaß der daraus resultierenden Festigkeitsänderung liegen keine gesicherten Informationen vor. Die Kenntnis der geotechnischen Eigenschaften des Baugrundes ist aber die Grundlage für erdstatische Bemessungen und damit für die Dimensionierung von Bauteilen.

Ziel des FuE-Vorhabens ist es, Vorschläge zur Planung und Durchführung von Kampfmittelsondierungen zu erarbeiten, um den anstehenden Baugrund in seiner Tragfähigkeit möglichst wenig zu beeinträchtigen bzw. um das Ausmaß der zu erwartenden Festigkeitsänderung abschätzen zu können.

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

Der Bauherr ist gesetzlich verpflichtet, sich die Kampfmittelfreiheit im Bau- feld bescheinigen zu lassen. Die Freigabe erfolgt durch den Kampfmittel- räumdienst des jeweiligen Bundeslandes oder durch qualifizierte Fachfir- men auf Grundlage länder- oder bundesspezifischer Vorschriften. Für die WSV ergeben sich daraus folgende Probleme, die über die der meisten ande- ren Bauherrn hinausgehen:

- Bauprojekte der WSV – wie z. B. der Ausbau von Wasserstraßen – sind häufig Landesgrenzen übergreifend. Zudem sind bei Bundesliegenschaf- ten neben länder- auch bundesspezifische Regelungen zu beachten.
- Für Pfahlgründungen und Spundwände – häufig verwendete Bauteile im Bereich der WSV – werden meist gesonderte Anforderungen an die Kampfmittelerkundung gestellt.

**Auftragsnummer:**

B3952.05.04.70362

**Auftragsleitung:**



Anne Heeling

anne.heeling@baw.de

**Laufzeit:**

2012 bis 2020

- In bindigen oder organischen Böden geringer Festigkeit – wie z. B. Auelehm, Mudde, Klei – ist auch in größeren Tiefen mit Bomben-Blindgängern zu rechnen. Solche Böden treten häufig gewässernah und damit im Zuständigkeitsbereich der WSV auf.
- Nach dem zweiten Weltkrieg wurde Munition häufig in Kanälen, Flüssen oder Seen versenkt und damit in den Zuständigkeitsbereich der WSV eingebracht.

### 3 Untersuchungsmethoden

Zunächst wurden die Kampfmittelverordnungen der Länder und des Bundes hinsichtlich geotechnisch relevanter Vorgaben gesichtet; jedoch geben nicht alle Bundesländer entsprechende Technische Anleitungen heraus.

Deshalb wurde in einer anschließenden Fragebogenaktion und in Gesprächen mit Kampfmittelräumdiensten, Fachfirmen und Betreibern von Häfen und Wasserstraßen u.a. erfragt, welche Bohrverfahren, Bohrraster, Erkundungstiefen und Bohrlochverfüllungen in der Praxis vorrangig bei der Kampfmittelerkundung zum Einsatz kommen.

Darauf aufbauend wurde die Störung des Baugrundes im Rahmen von Feldtests für verschiedene Baugrundtypen (bindiger bzw. nichtbindiger Boden unterschiedlicher Ausgangsfestigkeit, über bzw. unter Grundwasser) untersucht: In einem (kampfmittelfreien) Testfeld wurde mittels Sondierungen (z. B. Spitzendrucksondierungen) die Vorher-Festigkeit bestimmt, eine Kampfmittelerkundung simuliert und anschließend die Nachher-Festigkeit im Feld und unmittelbar im Bohrloch (z. B. mittels Sondierungen mit der Leichten oder Schweren Rammsonde) bestimmt. Aus dem Verhältnis von Nachher- zu Vorher-Festigkeit ergibt sich die quantitative Störung des Baugrundes. Dabei wurden je Feldtest in Einzelfeldern unterschiedliche Bohrverfahren (Endlos- bzw. Hohlbohrschnecke/verrohrte Trockenbohrung/Spülbohrung), Bohrlochverfüllungen (Bohrgut/Dämmer) und Rasterabstände (0,5 m/1,5 m/3,0 m) miteinander kombiniert.

2019 wurde zusätzlich der Einfluss unterschiedlicher Bohrlochverfüllungen sowie die Selbstdichtung unverfüllter Bohr- und Sondierlöcher in bindigem und nichtbindigem Baugrund untersucht.

Anschließend soll mittels numerischer Simulation, deren Ergebnisse an den Feldversuchen zu validieren sind, der Einfluss der Kampfmittelerkundung auf den Baugrund abgeschätzt werden.

### 4 Ergebnisse

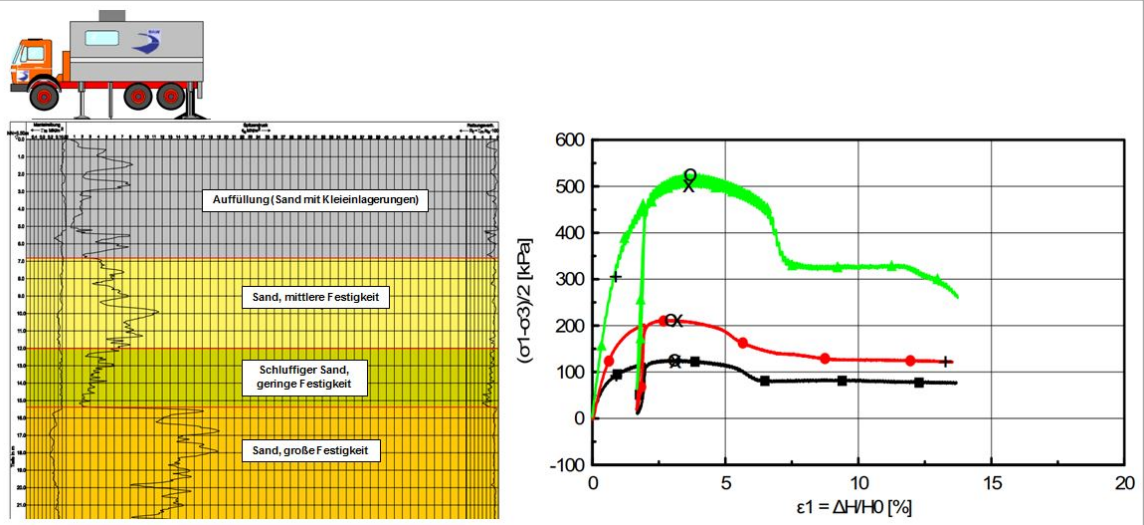
Insgesamt wurden vier Feldtests für unterschiedliche Baugrundtypen durchgeführt und feldübergreifend nach Bodenarten ausgewertet. Erste Ergebnisse wurden im September 2019 auf der ECSMGE-Tagung in Reykjavik vorgestellt: Neben dem Baugrundtyp und dem Rasterabstand wird die Störung des Baugrundes maßgeblich von der Bohrlochverfüllung beeinflusst, während das Bohrverfahren nur einen zweitrangigen Einfluss hat. Tabelle 1 zeigt beispielhaft für eine „typische“ Kampfmittelerkundung (Hohlbohr- oder Endlosschnecke/1,5 m Raster) die prozentuale Veränderung der Festigkeit innerhalb des kampfmittelerkundeten Bohrrasters.

Tabelle 1: Prozentuale Festigkeitsänderung infolge einer „typischen“ Kampfmittelerkundung (Tiefenbereich: 1,5 m GOK bis Endteufe; berücksichtigt wurden Einzellagen ab 0,5 m Mächtigkeit)

nichtbindige Böden				bindige/organische Böden					
über GW		unter GW		Ausgangslagerungsdichte	Ausgangskonsistenz	über GW		unter GW	
Bohrlochverfüllung						Bohrlochverfüllung			
Bohrgut	Dämmer	Bohrgut	Dämmer			Bohrgut	Dämmer	Bohrgut	Dämmer
—	220	—	—	sehr locker	breiig	—	—	110	90
80	250	—	50	locker	weich	—	—	70	80
80	130	30	50	mitteldicht	steif	60	130	—	—
60	—	40	—	(sehr) dicht	halbfest	110	—	50	—

Zudem zeigte sich, dass nicht nur unverfüllte oder mit Bohrgut verfüllte Bohrlöcher, sondern auch „zerstörungsfreie“ Drucksondierlöcher über lange Zeit – bisher wurde ein Zeitraum von 100 Tagen untersucht – nahezu stabil im Baugrund verbleiben und damit zu bevorzugten vertikalen Wasserwegigkeiten führen können. Daher sollte in Ausschreibungen auch deren Verfüllung mit Dämmer gefordert werden.

## Forschung Xpress



## Festigkeiten nichtbindiger Böden

### Herleitung von Korrelationen zur realitätsnahen Beurteilung der Festigkeiten nichtbindiger Böden

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Das maßgebliche Kriterium zur Bemessung von Bauteilen sowie zur Beurteilung von Standsicherheiten ist neben dem Grundwasserstand die Festigkeit, d. h. die Scherfestigkeit und die Kompressibilität der anstehenden Böden. Während bei Festgestein und bindigen Böden (Tone und Schluffe) vornehmlich direkte Untersuchungen an entnommenen Bodenproben im Labor aus

geführt werden, kommen bei nichtbindigen Böden (Sande und Kiese) indirekte Verfahren mittels Sondierungen in Verbindung mit Korrelationen zur Anwendung.

Von den unterschiedlichen Sondierverfahren kommt heutzutage überwiegend die Drucksondierung (CPT – Cone Penetration Test) zur Anwendung, um auf die Festigkeiten und die Schichtenfolge der Böden in situ zu schließen. Wie Untersuchungen (z. B. Melzer 1968; Lunne et al. 1997) gezeigt haben, ist das Sondierergebnis einer CPT, d. h. der Spitzenwiderstand und die Mantelreibung, abhängig von diversen Eigenschaften des anstehenden Bodens, wie z. B.: Kornform, Kornverteilung, Lagerungsdichte, Chemismus, Grundwasserstand. Derzeitige Korrelationen (z. B. DIN EN 1997-2, 10/2010) gehen auf einige der Parameter, insbesondere die Kornverteilung, ein.

Die Datengrundlage zur Herleitung der derzeit verwendeten Korrelationen basiert lediglich auf oberflächennahen Untersuchungen; die Datenbasis ist gering. Eine Interpretation durch den Sachverständigen für Geotechnik auf Grundlage lokaler Erfahrungen wird daher in den Normen empfohlen.

In der norddeutschen Tiefebene stehen regionaltypische nichtbindige Böden in weiten bauwerksrelevanten Bereichen an. Zur realitätsnahen Beurteilung der Festigkeiten dieser Böden sind systematische Untersuchungen mit Hilfe von Drucksondierungen durchzuführen und folglich eigene Korrelationen aufzustellen. Hierbei ist in die unterschiedlichen Ablagerungsmilieus, wie z. B. marine Sedimente, glaziale Schmelzwassersande und Beckensande zu unterscheiden.

#### Auftragsnummer:

B3952.05.04.70390

#### Auftragsleitung:



Ulf Matthiesen  
 ulf.matthiesen@baw.de

#### Laufzeit:

2015 bis 2019

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

In der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) werden Sondierungen überwiegend als Drucksondierungen (CPT) für die Erkundung des Baugrunds ausgeführt. Nur durch eine zutreffend ermittelte Scherfestigkeit und Kompressibilität des Baugrunds können Bauteile wie Uferwände, Baugrubenwände und -sohle, Rückverankerungen, Pfähle, etc. gleichzeitig wirtschaftlich und sicher dimensioniert werden. Zudem kann die Standsicherheit realitätsnäher berechnet werden, was z. B. bei bestehenden übersteilen Böschungen an Kanälen das Entscheidungskriterium für die weitere Vorgehensweise (Erhalt, Beobachtungsmethode, Ertüchtigung, Neubau) ist. Des Weiteren kommt den o. g. Parametern in der Planung eine bedeutende Rolle bei der Festlegung geeigneter Bauverfahren zu.

## 3 Untersuchungsmethoden

Es sind experimentelle Untersuchungen zur Erstellung eigener Korrelationen vorgesehen. Hierbei sind unter definierten Bedingungen unterschiedliche Korngemische zu untersuchen, um verschiedene Einflussparameter wie z. B. Kornverteilung, Korngröße, Kornform, Kornrauigkeit, Lagerungsdichte Spannungsabhängigkeit (Überlagerungsdruck) und Alterung (Zementierung) auf das Sondierergebnis zu untersuchen. Zusätzlich können hierbei auch grundsätzliche Einflüsse auf das Sondierergebnis – wie verschieden ausgebildete CPT-Spitzen, deren Abnutzung, die Sondiergeschwindigkeit, etc. – untersucht werden.

Zur Korrelation der Festigkeiten mit den Sondierergebnissen sind Laboruntersuchungen erforderlich. Hierbei sind ungestörte Proben vom untersuchten Material zu gewinnen. Die Bodenprobe wird nachfolgend im Triaxial-, Rahmenscher- und Kompressionsgerät eingebaut und die Scherfestigkeit und die Kompressionsmodule ermittelt.

Des Weiteren sind numerische Untersuchungen vorgesehen, um einen Vergleich von experimentellen und numerischen Ergebnissen herzustellen und um den Vorgang der Eindringung der Sondierspitze in den Boden bodenmechanisch zu untersuchen und zu interpretieren.

Im Rahmen von aktuellen Baugrunderkundungen sollen Spitzendrucksondierungen durchgeführt und mithilfe von an ebenfalls gewonnenen ungestörten Bodenproben durchgeführten bodenmechanischen Laborversuchen bewertet werden. Im gewachsenen Boden ist jedoch aufgrund der natürlichen Heterogenität mit größeren Schwankungsbreiten der Ergebnisse zu rechnen, sodass diese Untersuchungen lediglich einen ergänzenden Charakter haben können.

## 4 Ergebnisse

In einer Literaturrecherche wurden die Ergebnisse bisher durchgeführter Untersuchungen gesichtet sowie die bestehenden Korrelationen zusammenfassend bewertet.

Für die Durchführung der geplanten experimentellen Untersuchungen wurde in einem ersten Schritt eine Machbarkeitsstudie und Variantenuntersuchung zur Erstellung einer geotechnischen Versuchsrube auf dem Dienststellengelände der BAW Hamburg in Zusammenarbeit mit einem Ingenieurbüro durchgeführt. Aufgrund der Abmessungen einer derartigen Versuchsrube und dem damit verbundenen Aufwand zur Durchführung der Versuche durch die ein- und auszubauende Menge des Versuchsbodens wurden anschließend alternative Möglichkeiten der experimentellen Versuchsdurchführung recherchiert.

Eine alternative Untersuchungsmethode zur Durchführung der experimentellen Versuche stellt ein labortechnischer Druckbehälter, auch Kalibrierkammer genannt, dar. Derzeit wird in Kooperation mit dem Zentrum Geotechnik der TU München in einem ersten Arbeitsschritt die technische Konzeptionierung – insbesondere die Detailplanung zur mechanischen Konstruktion einschließlich der Mess- und Steuerungstechnik einer für die Fragestellung konzeptionierten Kalibrierkammer – vorgenommen. Anschließend sollen mithilfe dieser Kalibrierkammer die experimentellen Untersuchungen unter Anwendung und Weiterentwicklung einer von Cudmani (2001) entwickelten Methode zur Interpretation von Sondierergebnissen, basierend auf experimentellen und numerischen Untersuchungen, durchgeführt werden.

### Literatur:

Cudmani, R. O. (2001): Statische, alternde und dynamische Penetration in nichtbindigen Böden. Karlsruhe: KIT (Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, 152).

DIN EN 1997-2:2010-10: Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds; Deutsche Fassung EN 1997-2:2007 + AC:2010.

Lunne, T.; Robertson, P. K.; Powell, J. J. M. (1997): Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. Routledge, London, New York: Blackie Academic & Professional.

Melzer, K.-J. (1968): Sondenuntersuchungen in Sand. Aachen: Technische Hochschule (Mitteilungen aus dem Institut für Verkehrswasserbau, Grundbau und Bodenmechanik (VGB) der TH Aachen, 43).



## Rückverankerung mit Stahlrammpfählen

### Einflussfaktoren für geringe Tragfähigkeiten

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Im Zuge der Errichtung des neuen Schiffshebewerks Niederfinow sollten die Uferwände des Unteren Vorhafens mit Stahlrammpfählen rückverankert werden. Im Baugrundgutachten (aus dem Jahr 2001) wurde der Baugrund bewertet und es wurden für die verschiedenen Bodenarten u. a. Bruchwerte der Mantelreibung für Stahlrammpfähle empfohlen. Diese Werte befinden sich im Bereich der üblichen Erfahrungswerte und entsprechen auch jenen nach der aktuellen EA Pfähle (2012).

Zur Verifikation der empfohlenen Bruchwerte wurden statische Probelastungen an insgesamt sechs lotrechten Stahlrammpfählen durchgeführt. Hierbei konnten keine ausreichenden Tragfähigkeiten nachgewiesen werden. Die nachgewiesenen Tragfähigkeiten liegen lediglich zwischen 17 % und 49 % der geplanten Prüflast.

Zur Ursachenanalyse wurden zusätzliche Baugrundaufschlüsse ausgeführt. Diese bestätigten den Schichtenaufbau gemäß Baugrundgutachten, d. h. Torf unterlagert von gleichförmigen Feinsanden und zur Tiefe hin größeren Sanden. Ferner wurden die Rammprotokolle gesichtet, die Stahlrammpfähle ausgebaut und visuell begutachtet. Es konnten keine Auffälligkeiten festgestellt werden, die die geringe Lastaufnahme unmittelbar erklären könnten.

Die Ursachen bzw. die Einflussfaktoren für die geringe Tragfähigkeit der Stahlrammpfähle sollen herausgefunden werden. Je nach Ergebnis sind die bisherigen Erfahrungswerte in den einschlägigen und in der Fachwelt anerkannten Empfehlungen (EAP) neu zu formulieren.

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

Stahlrammpfähle sind ein übliches und bewährtes Verankerungselement bei Bauprojekten der WSV sowie generell im Hafenaufbau. Beim Torinstandsetzungsdock in Brunsbüttel werden aktuell Stahlrammpfähle für die Sohlverankerung geplant (wegen Betonangriff gibt es dort keine anderen Rückverankerungsarten nach DIBt-Zulassung).

#### Auftragsnummer:

B3952.05.04.70410

#### Auftragsleitungsleitung:



Christian Puscher  
christian.puscher@baw.de

#### Laufzeit:

2018 bis 2021



Die Untersuchungsergebnisse sollen eine sichere und fundierte Bemessungsgrundlage für die Anwendung von Verankerungen mittels Stahlrammpfählen ermöglichen.

### 3 Untersuchungsmethoden

Weitere statische und dynamische Probelastungen mit identischen Stahlrammträgerprofilen sollen im Bereich des Baufeldes erfolgen. Hierbei sollen der Einbringvorgang sowie die Durchführung der Probelastung eng begleitet werden. Zusätzliche Baugrundaufschlüsse im Nahbereich der Probelastungs-Standorte dienen der Bewertungsmöglichkeit der unmittelbaren Baugrundverhältnisse. Eine messtechnische Instrumentation mittels Faseroptik ist zu erwägen.

Mit numerischen Methoden soll der Einbringvorgang simuliert werden, um die maßgeblichen Einflussfaktoren herauszuarbeiten sowie das Prozessverständnis zu verbessern. Für letzteres sind auch ergänzende kleinmaßstäbliche Modellversuche vorzusehen.

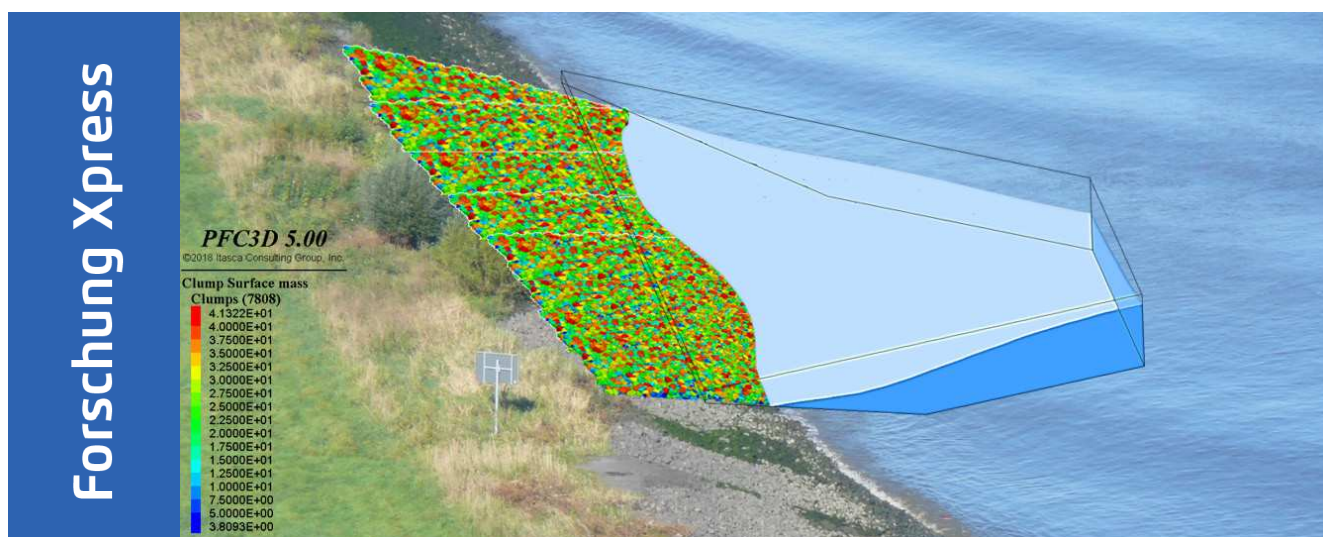
### 4 Ergebnisse

Da die Forschungsarbeiten erst am Anfang stehen, sind noch keine Ergebnisse zu verzeichnen. Im Rahmen der Untersuchungen sollen

- die Literatur zu der Thematik gesichtet,
- die bisherigen Fakten und Untersuchungsergebnisse zu den Stahlrammpfählen beim Bauprojekt Niederfinow analysiert,
- ein Konzept zu numerischen Simulationen und Modellversuchen erarbeitet,
- statische und dynamische Probelastungen begleitet bzw. durchgeführt und die Ergebnisse dargestellt und analysiert sowie
- Baugrunderkundungen, Laboruntersuchungen, numerischen Simulationen und Modellversuche durchgeführt werden.



Bild 1: Ausgerüttelter Probepfahl.



## Deckwerksanalyse mit der Diskreten-Elemente-Methode CFD-DEM-Modellierung von Schüttsteindeckwerken an Seeschiffahrtsstraßen

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Deckwerke dienen dem Schutz einer Uferböschung vor Erosion infolge der angreifenden hydraulischen Belastungen aus Wellen und Strömungen. Kenntnisse über Schädigungsmechanismen und Widerstände von Deckwerken aus losen Wasserbausteinen gegenüber hydraulischen Belastungen sind für eine wirtschaftliche Bemessung von Deckwerken in der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) unverzichtbar. Für die komplexen und vielfältigen Randbedingungen in den Ästuaren sind die derzeitigen Bemessungsgrundlagen mitunter mit gewissen Unsicherheiten verbunden. Das Ziel ist, mit Hilfe eines gekoppelten CFD-DEM-Modells (Computational Fluid Dynamics und Diskrete-Elemente-Methode) die Widerstände von Schüttsteindeckwerken für die jeweiligen Randbedingungen an Seeschiffahrtsstraßen zu erfassen und somit die bisherigen Bemessungsverfahren zu verifizieren.

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

Aufgrund zahlreicher Vorteile sind sogenannte Schüttsteindeckwerke aus losen Wasserbausteinen (s. o.) das am häufigsten an Wasserstraßen angewandte Sicherungsverfahren und stellen somit ein erhebliches finanzielles Anlagevolumen dar. In der WSV werden im Rahmen der Unterhaltung und des Neubaus jedes Jahr große Mengen von Wasserbausteinen als Ufersicherung eingebaut. Eine Bemessung von Deckwerken an Seeschiffahrtsstraßen ist jedoch aufgrund der stetig größer werdenden Seeschiffe sowie der sich ändernden Schiffsformen mitunter mit gewissen Unsicherheiten verbunden.

Die derzeitigen Bemessungsgrundlagen für Deckwerke (z. B. GBB 2010, EAK 2002, korr. 2007 und Hansen 1985) basieren auf Erfahrungswerten, physikalischen Modellansätzen sowie zumeist kleinmaßstäblichen Modellversuchen und decken hauptsächlich entweder den Binnen- oder den Küstenbereich (d. h. seegangsbeanspruchte Küstenschutzwerke) ab. Die Interaktion aus hydraulischen Einwirkungen und Deckwerk für die speziellen Randbedingungen im Ästuarbereich mit Tideeinfluss und Einwirkungen passierender Seeschiffe wurde bisher nur unzureichend untersucht.

**Auftragsnummer:**

B3952.06.04.70270

**Auftragsleitung:**

Uwe Tzasch

**Auftragsbearbeitung:**



Livia Petzoldt

livia.petzoldt@baw.de

**Laufzeit:**

2008 bis 2020

### 3 Untersuchungsmethoden

Die Projektbearbeitung gliedert sich in die Teile physikalische Modellversuche, Naturversuche sowie numerischer Modellierung.

Für die Abbildung des Deckwerkes im numerischen Modell wird die Deckschicht aus losen Wasserbausteinen mithilfe der DEM simuliert. Die einzelnen Steine können so in ihrer Form bzw. Größen- und Massenverteilung weitestgehend realistisch abgebildet und in der Bewegung mit jeweils drei translatorischen bzw. rotatorischen Freiheitsgraden wirklichkeitsnah simuliert werden. Die hydraulischen Einwirkungen aus Wellen und Strömungen werden mit einem CFD-Programm modelliert. Zur ganzheitlichen Simulation der Interaktion Wasser und Deckschicht werden die DEM- und CFD-Modellierung miteinander gekoppelt.

Das numerische Modell wird anhand physikalischer Modellversuche in der großen Strömungsrinne der BAW-HH sowie durch Naturmessungen an bestehenden Deckwerken plausibilisiert. Im Rahmen des FuE-Vorhabens wurde zur Verifikation der Ergebnisse der DEM-Modellierung eigens ein Messsystem entwickelt, bei dem reale Wasserbausteine mit Beschleunigungs-, Drehraten und Drucksensoren ausgerüstet sind. Über die Aufzeichnung der an den Steinen auftretenden Lageänderungen kann auf die Bewegungen infolge der angreifenden hydraulischen Belastungen rückgeschlossen und mit den Simulationsergebnissen verglichen werden

### 4 Ergebnisse

Die für die numerischen Deckwerkssteine erforderlichen Parameter wurden durch die Rinnenversuche ermittelt. Dazu wurde ein Abschnitt aus losen Wasserbausteinen in verschiedenen Versuchsstufen mit steigender Geschwindigkeit und bei jeweils unterschiedlicher Neigung durch böschungsparelle Strömung beansprucht. Die Erfassung der Steinverlagerungen erfolgte messtechnisch mittels Laserscan sowie visuell durch Farbmarkierungen. Lageänderungen der Steine konnten bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten ab etwa 1,6 m/s festgestellt werden. Die in den Rinnenversuchen gemessene Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit sowie die Verlagerung der Deckwerkssteine wurden im numerischen Modell nachvollzogen und somit die entsprechenden Eingangsparameter kalibriert.

Im Rahmen der Naturversuche wurden an der Elbinsel Lühesand an drei Stationen in exponierter Lage Wellen- und Strömungsmessungen unter Einsatz stationärer Messtechnik sowie zweier flexibler autarker Sonden durchgeführt. Weiterhin wurden mehrere Messkampagnen mit jeweils fünf instrumentierten Steinen in-situ im bestehenden Deckwerk durchgeführt und ergänzend Videoaufzeichnungen der auftretenden schiffsinduzierten Wellenbilder vorgenommen. Aus den Ergebnissen der Naturmessungen sind Abhängigkeiten der Steinbewegungen im Deckwerk von Wellenaufbau, Strömungsregime, Tidewasserstand sowie Einbettung des jeweiligen Messsteines im Verbund erkennbar (Bsp. siehe Bild 1).

Im numerischen Modell wurden Variantenbetrachtungen mit ausgewählten hydraulischen Ereignissen aus den Naturmessungen sowie den an Seeschiffahrtsstraßen üblichen Wasserbausteinclassen CP<sub>90/250</sub>, LMB<sub>5/40</sub> und LMB<sub>10/60</sub> durchgeführt, die resultierenden Beschleunigungen und Kräfte in der Deckschicht untersucht und den Ergebnissen aus den Naturmessungen gegenübergestellt.

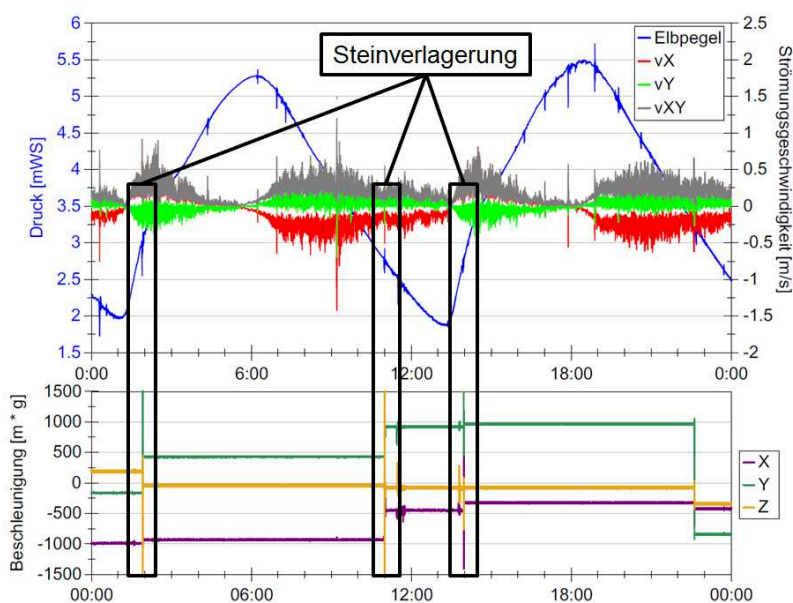


Bild 1: Beispiel für registrierte Steinverlagerungen im Zeitraum von 24 h.

#### Literatur:

BAW (Hg.) (2010): Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlsicherungen an Binnenwasserstraßen (GWB). BAW Merkblatt.

Hansen, U. A. (1985): Wasserbausteine im Deckwerksbau, Bemessung und Konstruktion. Heide: Westholsteinische Verlagsanstalt Boysens & Co.

KFKI (Hg.) (2002, korr. Ausgabe 2007): Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken (EAK). Die Küste, 65. Heide: Westholsteinische Verlagsanstalt Boysens & Co.

Petzoldt, L. (2018): Anwendung der DEM zur Analyse der Stabilität von Schüttsteindeckwerken. In: DGGT (Hg.): 35. Baugrundtagung. Forum für junge Geotechnik-Ingenieure. Beiträge der Spezialsitzung. ISBN 978-3-946039-05-1, S. 113–119.



## Bestimmung des Tragverhaltens von offenen Stahlrohrpfählen

### Zur Regeneration der axialen Pfahltragfähigkeit

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

In der Fachwelt ist das Verständnis für das physikalische Verhalten von offenen Stahlrohrpfählen bei unterschiedlichen Durchmessern nur unzureichend erschlossen. Entsprechend unterscheiden sich beispielsweise Angaben in diesbezüglichen maßgeblichen Empfehlungen: Die Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ (EAP) weichen deutlich von den Empfehlungen des American Petroleum Institute (API) ab. Diese führen zu unterschiedlichen rechnerischen axialen Pfahltragfähigkeiten, wodurch sich Unsicherheiten bei der Dimensionierung von Gründungen mit offenen Stahlrohrpfählen ergeben.

Bei vielen Pfahlprobelastungen an Rohrpfählen, jedoch auch bei anderen geramnten Profilen und Ankern, konnte zudem durch erneute Probelastung zu einem späteren Zeitpunkt eine Zunahme  $\Delta R$  der anfänglichen Tragfähigkeit  $R_{t=0}$  beobachtet werden.

$$R_t = R_{t=0} + \Delta R$$

Die Bandbreite reicht jedoch – in ähnlichen Zeiträumen – von  $\Delta R = 0$  (keine Zunahme der Tragfähigkeit) bis etwa  $\Delta R = R_{t=0}$  (Verdoppelung der Tragfähigkeit). Untersuchungen zum zeitlich veränderlichen Tragverhalten von Pfahlgründungen in rolligen Böden lassen darauf schließen, dass unterschiedliche Faktoren sowohl die Tragfähigkeit als auch die Steifigkeit geramnter Profile beeinflussen. Obwohl dieses Phänomen laut Long (1999) bereits vor über 100 Jahren von Wendel zum ersten Mal dokumentiert wurde (Wendel 1900), liegen bis heute keine verlässlichen Ansätze zur Prognose der zeitlichen Tragfähigkeitsentwicklung geramnter Profile vor.

Verschiedenen Untersuchungen nach ist die zeitliche Veränderung von Pfahltragfähigkeit und Pfahlsteifigkeit von mechanischen, chemischen und mikrobiologischen Bedingungen beeinflusst (Suarez 2012). Im Folgenden wird beispielhaft einer dieser möglichen Einflüsse beschrieben:

Nach Einbringung des Pfahles verspannt sich der Baugrund in dessen Umgebung. Die für die Mantelreibung maßgebenden radialen Spannungen sind laut einer Hypothese von Chow (Chow et al. 1998) zunächst nicht in vollem

#### Auftragsnummer:

B3952.06.04.70378

#### Auftragsleitung:



Mussie Kidane  
 mussie.kidane@baw.de

#### Laufzeit:

2013 bis 2022

Umfang wirksam. Aufgrund von Gewölbebildung sollen diese zunächst vom Pfahlmantel abgeschirmt sein. Diese Gewölbebildung soll sich infolge von Kriechprozessen über die Zeit abbauen, was wiederum zu einem Anstieg der radialen Spannungen und damit zur Erhöhung der Pfahltragfähigkeit führt. Die Hypothese wird u. a. auf Ergebnisse der Feldmessungen von Ng (Ng et al. 1988) zurückgeführt.

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

Offene Stahlrohrpfähle werden in der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) vornehmlich bei kombinierten Rohrspundwänden, Tiefgründungen im offenen Wasser sowie als Anlegedalben eingesetzt. Häufig kommen sie auch beim Bau von Kajen als zusammengesetzte Tragbohlen vor. Die Belastungsrichtungen variieren stark zwischen vorwiegend vertikal und vorwiegend horizontal. Des Weiteren werden offene Stahlrohrpfähle mit ähnlichen, aber auch deutlich größeren Durchmessern, als Gründungselemente von Offshore-Windenergieanlagen und -Plattformen eingesetzt. Um offene Stahlrohrpfähle wirtschaftlich und sicher einsetzen zu können, werden möglichst präzise Prognoseverfahren zur Bestimmung des Pfahltragverhaltens benötigt.

## 3 Untersuchungsmethoden

Im Rahmen von WSV-Baumaßnahmen soll der Rammvorgang von offenen Stahlrohrpfählen messtechnisch begleitet werden, um die Pfropfenbildung, die innere und äußere Mantelreibung, den Spitzenwiderstand sowie entstehende Porenwasserüberdrücke zu ermitteln. Die Begleitung soll an einer Modellfamilie, bestehend aus Stahlrohrpfählen mit Durchmessern von etwa 70 cm, 150 cm und 250 cm erfolgen. Durch dynamische und statische Probelastungen soll das Tragverhalten ermittelt werden. Hierdurch wird zudem ein direkter Vergleich der Ergebnisse zur Tragfähigkeit aus verschiedenen Prognoseverfahren ermöglicht. Zur Ermittlung von „Anwachseffekten“ sollen dynamische Probelastungen zu späteren Zeitpunkten ( $t = 28$  d, 180 d) durchgeführt werden. In ergänzenden Modell- und Laborversuchen wird die zeitliche Tragfähigkeitsentwicklung unter definierten Bedingungen (u. a. mechanisch, chemisch und biologisch bedingte Alterung) in Kooperation mit der TU München - Zentrum Geotechnik untersucht. Hierbei soll eine Pfahlgruppe in einem Versuchsfeld eingebaut werden, welches für die Fragestellung repräsentative Randbedingungen aufweist. Die Pfähle sollen bei verschiedenen Belastungsbedingungen sowie unterschiedlicher Zeit statischen sowie dynamischen Pfahlprobelastungen unterzogen werden. Ein zugehöriges Laborversuchsprogramm soll die zeitlichen Effekte im Labormaßstab untersuchen. Ergänzende numerische Simulationen sollen helfen, ein besseres Verständnis für beobachtete Phänomene zu erhalten.

## 4 Ergebnisse

In einem ersten Feldversuch im Marinehafen Wilhelmshaven wurden u. a. kombinierte Erddruck-/Porenwasserdrucksensoren an einem Schutzdalben mit einem Durchmesser von 71 cm und einer Einbindetiefe von 15 m installiert. Dieser wurde im Rahmen einer Baumaßnahme des WSA in mitteldicht gelagerten Sand gerammt. Es konnten Spannungsmessungen entlang des Schaftes des Dalbens bei Einrammung sowie über einen Zeitraum von 27 Monaten erfolgen.

Erste Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die unter Abs. 1 genannte Hypothese von Chow (Chow et al. 1998) nicht zutrifft und eine Erhöhung der radialen Spannungen über die Zeit nicht gemessen werden konnte. Im Gegensatz hierzu wurde eine Reduktion der radialen, auf den Schutzdalben wirkenden Spannungen festgestellt. Über eine dynamische Pfahlprobelastung nach Einrammung des Schutzdalbens konnte dessen axiale Anfangstragfähigkeit abgeschätzt werden. Die Bestimmung des Zuwachses dieser Tragfähigkeit wurde 27 Monate nach Einbringung des Schutzdalbens, durchgeführt, eine deutliche Tragfähigkeitssteigerung konnte beobachtet werden.

Das Konzept für die Ausführung eines Versuchsfeldes wurde erarbeitet. In Vorversuchen wurde der Einsatz faseroptischer- sowie weiterer Sensortechnik vergleichend untersucht. Erste numerische Simulationen von Feld- und Laborversuchen wurden mittels der Finite Elemente Methode sowie der Diskrete Elemente Methode durchgeführt.

### Literatur:

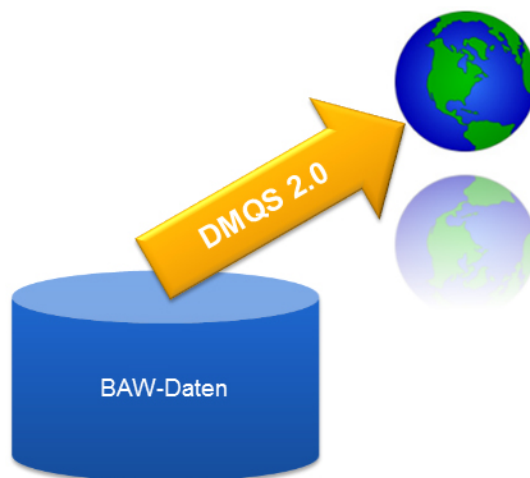
Chow, F. C. (1998): Effects of Time on Capacity of Pipe Piles in Dense Marine Sand. In: ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Bd. 124, (Nr. 3).

Long, J. H. (1999): Measured Time Effects for Axial Capacity of Driven Piling. Transportation Research Record 1663 (Paper No. 99-1183).

Ng, E. S. et al. (1988): Pile Foundations: The Behaviour of Single Piles in Cohesionless Soils, Federal Highway Administration Report, FHWA-RD-88-081 & 082 Federal Administration, Washington D. C.

Suarez, N. R. (2012): Micromechanical Aspects of Aging in Granular Soils. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University (Blacksburg VA, USA).

Wendel, E. (1900): On the Test Loading of Piles and its Application to Foundation Problems in Gothenburg. Tekniska Samfundet Goteberg handl. (No. 7).



## Datenmanagement und Qualitätssicherung im Verkehrswasserbau (DMQS) 2.0

### BAW-Metadatenprofil Version 1.3

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die BAW nutzt vielfältige selbst erzeugte Daten zur Erfüllung ihrer speziellen fachlichen Aufgaben. Aufgrund der in den vergangenen Jahren rasant angestiegenen Datenmengen, der immer höheren Komplexität der hierfür vorzuhaltenden technischen Plattformen und der aktuellen politischen und rechtlichen Veränderungen im Umgang mit öffentlich finanzierten Daten, ist der Umgang mit und die Bereitstellung von diesen Daten und Publikationen für die BAW neu zu definieren. Die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse aber auch die Nachnutzung von Fachdaten muss künftig gewährleistet sein. Das Vorhaben zum Datenmanagement und zur Qualitätssicherung in der BAW ist in drei Teilprojekte gegliedert.

Teilprojekt 1 befasst sich in den Abteilungen Wasserbau im Binnenbereich und Wasserbau im Küstenbereich mit den dort betriebenen numerischen Modellverfahren als den zentralen Methoden zur Bearbeitung der komplexen und sich stetig verändernden Projektaufgaben. Der Umgang mit diesen Daten und deren Dokumentation muss zur Bewältigung des stetig anwachsenden Datenvolumens vereinheitlicht werden. Mithilfe eines zu entwickelnden Metadatenkonzepts sollen so beispielsweise verschiedene Simulationsparameter sowohl für den Bearbeiter als auch für Dritte nachvollziehbar dokumentiert und wiederauffindbar sein. Ein Konzept für das Simulationsdatenmanagement in der BAW soll die Organisation und Präsentation der Fachdaten innerhalb der BAW und nach außen regeln (z. B. Datenzugriff). Teilprojekt 2 befasst sich mit dem Management von Forschungsdaten und Open Data. Forschungsdatenmanagement (FDM) umfasst dabei alle Maßnahmen, die sicherstellen, dass digitale Forschungsdaten nutzbar sind. FDM beginnt bei der Planung eines Forschungsvorhabens und umfasst sowohl die Erfassung, Verarbeitung, Aufbewahrung als auch die Öffnung bzw. Beschränkung des Zugangs zu Daten. Anhand von Pilotprojekten wird ein abteilungsübergreifendes Konzept für FDM an der BAW entwickelt. Teilprojekt 3 befasst sich in Anlehnung an TP 1 mit dem Management von Labor- und Naturdaten. Die in TP 1 entwickelten Methoden und Systeme sollen für den Bereich der Labor- und Naturdaten ergänzt werden, um ein verfahrensunabhängiges Management von Fachdaten und deren Metadaten einzuführen.

#### Auftragsnummer:

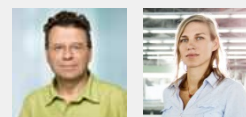
B3954.07.04.70006

#### Auftragsleitung:



Thomas Damrau  
thomas.damrau@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Georg Carstens  
georg.carstens@baw.de

Ellen Diermayer  
ellen.diermayer@baw.de

#### Laufzeit:

2018 bis 2021

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

Die Einführung von Richtlinien und Systemen zum Management von Fachdaten und Publikationen führt in der BAW zu einer deutlichen Effizienzsteigerung in der Projektbearbeitung, schafft Transparenz und ermöglicht über die Festlegung von Standards die Sicherung und Kontrollierbarkeit der erreichten Qualität. Gleichzeitig schaffen die Maßnahmen die Basis für eine qualitätsgesicherte und technisch sichere Weitergabe der Fachdaten der BAW an die WSV bzw. an Dritte. Dieses fachlich strukturierte und rechtlich gesicherte Vorgehen schafft eine wesentliche Grundlage zur Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen.

## 3 Untersuchungsmethoden

Die Untersuchungsmethoden für konzeptionelle Arbeiten beinhalten unter anderem die Ist-Analyse der bestehenden Systeme und vorhandenen Daten sowie die Erarbeitung eines Soll-Konzepts. Ferner werden weitere Workflows und Datenflüsse in den Bereichen Modellierung, Laborbearbeitung und Naturmessung in allen Fachbereichen der BAW inklusive der dort entstehenden bzw. verarbeiteten Daten analysiert. Konzepte für die standardisierte Datenbereitstellung für Informationssysteme der Fachabteilungen der BAW werden erstellt. Weiterhin werden Software bzw. technische Systeme z. B. für die Unterstützung von Auftragsbearbeitungs-Workflows, Metadatenerfassung sowie Datenrecherche und Datenlangzeitspeicherung erstellt.

## 4 Ergebnisse

Das vorliegende BAW-Metadatenprofil Version 1.3 stellt die Weiterentwicklung der Vorversion (1.2) dar. In dieser aktuellen Version 1.3 wurde die Konformität zu den inzwischen aktualisierten Konventionen und Anforderungen von GDI-DE und INSPIRE erhöht. Die Abbildung einiger Elemente nach dem XML-Schema von ISO-19139 wurde angepasst, um den semantischen Aufbau der Metadaten zu verbessern. Zusätzlich wird durch Ergänzungen des Vorgängerprofils um weitere Elemente die Abbildung der in der BAW daten-seitig vorhandenen Hierarchiestrukturen umfassender unterstützt. Die Anzahl der sogenannten Hierarchieebenen ist zwar beliebig, die folgenden Metadatenhierarchieebenen werden in der BAW-Auftragsbearbeitung vorgeschlagen: Auftrag, Modell/Variante, Szenario, Simulationslauf und Datei.

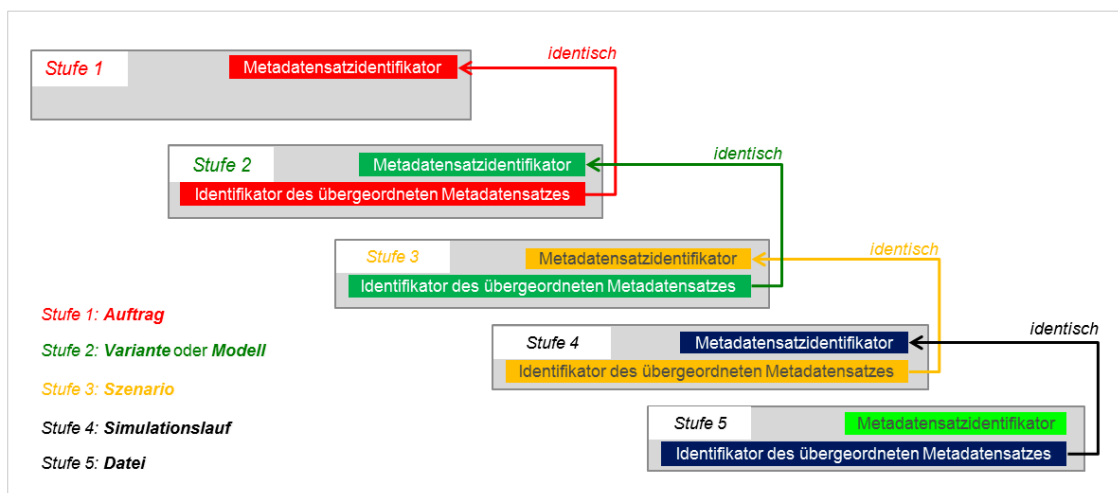


Bild 1: BAW-Metadatenhierarchien

Die Anwendung dieses aktuellen BAW-Metadatenprofils Version 1.3 ermöglicht die standardisierte Beschreibung der numerischen Simulationsdaten für den gesamten Fachbereich Wasserbau. Aufgrund des universellen Aufbaus des Metadatenprofils können neben der Beschreibung von Simulationsdaten auch andere Datenarten der BAW beschrieben werden.

Die im Modellierungs-Workflow vorhandenen Strukturen wie Auftrag, Modell, Simulationslauf wurden als sogenannten Metadatenhierarchiestufen benannt; diese können mit dem BAW-Metadatenprofil abgebildet werden. Zusätzlich zur ISO-standardmäßigen Verknüpfung von Metadatensätzen durch Elterndatensatz-Identifikatoren (parentIdentifier) können die Metadatenhierarchien durch das ISO-Element Bezeichnung der Hierarchieebene sichergestellt werden.

Das BAW-Metadatenprofil wird im Metadateninformationssystem MISBAW implementiert. Der interne Betrieb startet Anfang 2020.

### Literatur:

ISO 19115 „Geographic Information – Metadata“.

ISO 19139 „Geographic Information – Metadata – XML schema implementation“.

GDI-DE: Konventionen zu Metadaten.

Metadatenprofil GDI-WSV (Version 2.0).

NetCDF Climate and Forecast (CF) Metadata Conventions.

INSPIRE-Durchführungsbestimmungen für Metadaten.

### III. Neue FuE-Vorhaben in 2019







## Monitoring für massive Wasserbauwerke

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Bei vielen älteren Wasserbauwerken lassen sich Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit nicht mit den üblichen statischen Berechnungsverfahren nachweisen. Das BAWMerckblatt TbW sieht in solchen Fällen als eine mögliche Kompensationsmaßnahme das Bauwerksmonitoring (Structural Health Monitoring – SHM) vor, dessen Einsatz zukünftig an WSV-Bauwerken deutlich zunehmen wird. Gegenstand dieses FuE-Projektes ist eine intensive und systematische Aufbereitung und wissenschaftliche Auseinandersetzung mit Monitoringsystemen für massive Wasserbauwerke.

Das Ziel ist die Entwicklung eines modularen Monitoringsystems für Standardfälle im Bereich der WSV.

Wesentliche Teilaspekte davon sind:

- Analyse von Szenarien beim Bauteilversagen (zeitlicher Verlauf, Duktilität, Erkennbarkeit)
- Erstellung von Messkonzeptionen und Aufgabenstellungen mit Zuordnung von Versagensabläufen
- Ermittlung von Entwicklungsstand und Verfügbarkeit von Messsystemen und Sensortechnik (Eignung, Langzeitstabilität, Messunsicherheit)
- Datenmanagement: Erfassung, Sammlung, Dokumentation, Datenanalyse
- Entwicklung von Konzepten zur Festlegung von Grenzen für einen stufenweisen Alarm in Abhängigkeit von betrieblichen und umweltbedingten Randbedingungen (dynamische Alarmwerte).

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

Der zuverlässige Betrieb der bestehenden Schleusen- und Wehranlagen ist eine Grundvoraussetzung zur Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt. Werden Schäden erkannt oder rechnerische Defizite bei Tragfähigkeit oder Gebrauchstauglichkeit identifiziert, können Monitoringanlagen den temporären Weiterbetrieb ermöglichen und Sperrungen verhindern, ohne das geforderte Sicherheitsniveau reduzieren zu müssen. Die Schleuse Uelzen I konnte nach etwa dreijährigem Stillstand trotz bekannter Schäden ohne auffällige Blockverformungen für circa einen Monat wieder in

#### Auftragsnummer:

B3951.01.04.70007

#### Auftragsleitung:



Dr. Christoph Stephan  
christoph.stephan@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Simeneh Tibebu

#### Laufzeit:

2019 bis 2025

Betrieb genommen werden (Bild 1). Aufgrund langer Planungs- und Bauzeiten bei Instandsetzungen und Ersatzneubauten wird diese Möglichkeit in den nächsten Jahren erheblich an Bedeutung gewinnen.

Darüber hinaus ist zukünftig auch eine Verwendung der Ergebnisse von Monitoringanlagen zur Planung zustandsorientierter Instandhaltungsmaßnahmen denkbar.

### 3 Untersuchungsmethoden

#### Bauwerk

Durch eine systematische Auswertung der in WSVPruf dokumentierten Schäden nach der Relevanz für die Tragfähigkeit können Erkenntnisse über das Tragverhalten eines Bauwerkes gewonnen werden. Bauwerke bzw. Bauteile mit bekannten rechnerischen Defiziten werden dabei besonders betrachtet. Falls vorhergehende Messungen verfügbar sind, werden auffällige Entwicklungstendenzen ausgewertet, um die potenzielle Versagensart zu plausibilisieren. Weiterhin werden Berechnungsmodelle an den Messergebnissen kalibriert und verifiziert.

#### Sensorik

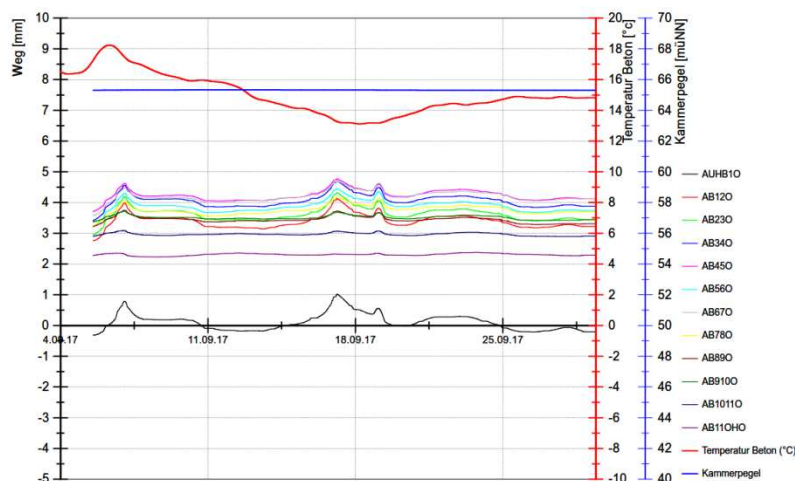
Unter kontrollierbaren Quasilabor-Randbedingungen werden die gängigen und geeigneten Messeinrichtungen u. a. auf Messgenauigkeit und -unsicherheit, Langzeitstabilität sowie Empfindlichkeit gegenüber Rauschen und anderen Phänomenen erprobt und geprüft. Die Einflüsse auf die Messgenauigkeit, die aus den verwendeten Befestigungssystemen resultieren, werden zusätzlich betrachtet. Die notwendige Redundanz (Sicherheit des Messsystems) leitet sich aus den Langzeitbeobachtungen ab.

#### Datenanalyse

Die Kernkomponente eines SHM ist die Auswertung der erfassten Daten. Auswertungsabläufe wie z. B. die Bereinigung und bei mehrfach überlagerten Messreihen die Trennung in Kurzzeitverformungen (betriebsbedingt, tagestemperaturbedingt) und Langzeitverformungen (bleibende Verformungen, jahrestemperaturbedingt) werden standardisiert. Durch multiple Regressionsanalysen lassen sich die zu erwartenden Verformungen als Funktion mehrerer Variablen ermitteln und als dynamische Alarmwerte festlegen.

### 4 Ergebnisse

Bisher konnten anhand einer Literaturrecherche Erkenntnisse über den Stand der Technik in Sachen SHM, Sensorik und Datenanalyse gewonnen werden. Bestandsunterlagen wie BAW-Gutachten und Datenbanken der WSV (WSVPruf und DVtU) werden in Hinblick auf die üblich auftretenden Schäden an massiven Bauteilen ausgewertet. Weiterhin wird die Vereinheitlichung der Datenauswertung laufender Monitoringprojekte vorangetrieben. Dazu werden gängige (kommerzielle) Daten-Analyse-Programme verwendet und auf ihre Eignung hin untersucht.



#### Literatur:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2016): BAWMerkblatt Bewertung der Tragfähigkeit bestehender, massiver Wasserbauwerke (TbW). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien).

Bild 1: Blockverformungen infolge einer befristeten Inbetriebnahme der Schleuse Uelzen I im September 2017.



## Ermittlung der Systemtragfähigkeit unter Berücksichtigung von Schädigungsgraden an Stahlwasserbauten

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die normative Nachweisführung für Stahlwasserbauten ist bauteilbezogen und ausgerichtet auf die Bemessung von Neubauten (vgl. DIN 19704). Das Tragverhalten des gesamten Bauwerks wird dadurch nicht abgebildet. Für die Berücksichtigung von Systemtragverhalten im Falle einer Schädigung am bestehenden Bauwerk fehlen daher geeignete Bewertungsmethoden. Dementsprechend schwierig ist eine Beurteilung des Bauwerkverhaltens unter dem Einfluss von Schäden am Tragwerk. Im derzeit angewendeten Verfahren zur Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken werden daher pauschale Grenzwerte für den Schädigungsgrad verwendet, nach denen die Schadensklasse festgelegt wird. Dabei wird nach Schaden (Korrosion, Formänderung etc.), Bauteil (primär/sekundär) und Belastung (Zug, Druck, Biegung) unterschieden. Dies geschieht jedoch ungeachtet der vorhandenen Auslastung in dem betroffenen Bereich und den tatsächlichen Auswirkungen des Schadens auf das Tragverhalten des gesamten Bauwerks.

Eine direkte Abhängigkeit der Schadensbewertung von den an das Tragwerk gestellten Anforderungen ist im derzeitigen Bewertungskonzept somit nicht gegeben. Diese Lücke zwischen vorhandener Information (z. B. Auslastungsgrade der maßgebenden Bauteile, Schadensklassen an betroffenen Bauteilen) und erforderlichem Wissen (Systemtragfähigkeit des beschädigten Bauwerks) muss erst durch einen Mehraufwand an Arbeit geschlossen werden, bevor der Grad der globalen Schädigung des Tragwerks ersichtlich wird. Der Mehraufwand besteht u. a. darin, den nach qualitativen Anhaltspunkten bestimmten Schädigungsgrad durch zusätzliche Untersuchungen am Bauwerk zu quantifizieren, um diese in den entsprechenden Berechnungsmodellen abbilden zu können. Erst dann kann die Wirksamkeit von Maßnahmen am realen Objekt (z. B. Verstärkungen) beurteilt werden. Dieser Mehraufwand verkompliziert und verlangsamt den Entscheidungsprozess über geeignete Maßnahmen und soll daher verringert werden. Dafür ist es notwendig, die Verletzbarkeit des Tragwerks zu ermitteln und die Schadenstoleranz des Gesamtsystems quantifizieren zu können. Dies soll in erster Linie anhand von Kennwerten zur Systemtragwirkung geschehen. Überlegungen hinsichtlich einer Visualisierung der Ergebnisse (z. B. mittels „Heat Map“) werden angestellt.

#### Auftragsnummer:

B3951.02.04.70011

#### Auftragsleitung:

Andreas Panenka

#### Auftragsbearbeitung:



Andreas Panenka  
 andreas.panenka@baw.de

#### Laufzeit:

2019 bis 2022

Mithilfe der entwickelten Werkzeuge können Bauwerksinspektionen zielgerichteter geplant und die erhaltenen Informationen für die statische Bewertung nutzbar gemacht werden. Endprodukt der Bauwerksbewertung ist dann eine quantitative Aussage über den Schädigungsgrad des realen Objekts, basierend auf den Schäden und deren Auswirkungen auf das Tragwerk.

Abschließend werden die Einsatzmöglichkeiten von probabilistischen Methoden zu Ermittlung der Systemzuverlässigkeit evaluiert. Dabei ist neben dem spezifischen Versagensverhalten unter der gegebenen Belastung in den Bauteilen und der möglichen Lastumlagerung nach Bauteilausfällen auch der Umgang mit sehr großen Modellen, die aus seriellen und parallelen Teilsystemen bestehen, zu diskutieren.

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

Durch die Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung des globalen Schädigungsgrads eines Bauwerks in Abhängigkeit der betroffenen Bauteile wird die Entscheidungsfindung im Rahmen der Schadensbewertung erleichtert und deren Aussagekraft erhöht. Durch die Bereitstellung der entwickelten Methodik können beauftragte Dritte aussagekräftige Bewertungen von Bestandsbauwerken liefern, die die erarbeiteten Informationen in einem größeren Umfang als bisher für die WSV nutzbar machen.

## 3 Untersuchungsmethoden

Im einführenden Literaturstudium liegt der Fokus auf Methoden zur Quantifizierung von Schädigungseinflüssen und der Systemtragwirkung von Stahlkonstruktionen. Insbesondere das duktile Materialverhalten von Stahl, das nach einem lokalen Bauteilversagen eine Lastumlagerung innerhalb des Tragsystems erlaubt, ist dabei von Interesse.

Neben den aus den einschlägigen Eurocodes bekannten analytischen Methoden kommen numerische Verfahren unter Zuhilfenahme von kommerziellen Softwarepaketen zum Einsatz. Grundlage für die Untersuchungen sind die numerischen Modelle von Stahlwasserbauten, die i. d. R. für die Bemessung und Nachrechnung bestehender Konstruktionen erstellt werden und somit für eine Vielzahl an Bauwerken vorliegen. Aufbauend auf numerisch gestützte analytische Nachweismethoden (z. B. DIN EN 1993, Teil 1-5 & 1-6) werden weiterführende, rein numerische Methoden wie z. B. die geometrisch und materiell nicht-lineare Analysen unter Berücksichtigung von Imperfektionen (GMNIA) durchgeführt (vgl. Rotter 2016), um dadurch eine möglichst realistische Einschätzung der Systemtragfähigkeit zu erhalten. Die Untersuchungen sehen eine schrittweise Erhöhung des Detaillierungsgrads vor (global – lokal – Detail). Aus einer Variantenstudie werden die maßgebenden Parameter und der Schädigungseinfluss auf die Systemtragfähigkeit ermittelt (vgl. Harte et al. 2007).

Die verwendeten Methoden werden hinsichtlich einer Überführung in vorhandene probabilistische Verfahren (vgl. Zhu und Frangopol 2014) evaluiert. Dabei werden die gewonnenen Erfahrungen bezüglich des Modellierungs- und Berechnungsaufwands der analytischen und numerischen Methoden zur Bereitstellung der notwendigen Eingangsgrößen diskutiert.

## 4 Ergebnisse

Eine vorläufige Literaturrecherche ergab einen Überblick über den Stand der Technik in den Bereichen der numerischen Nachweisführung mittels der Finite-Element-Methode und der Systemzuverlässigkeit. Die Anwendbarkeit der gewählten Methoden ist nach Probeläufen an generischen Modellen gewährleistet. Die Projektbearbeitung begann mit dem Jahr 2020. Erste Zwischenergebnisse werden für Ende 2020 erwartet.

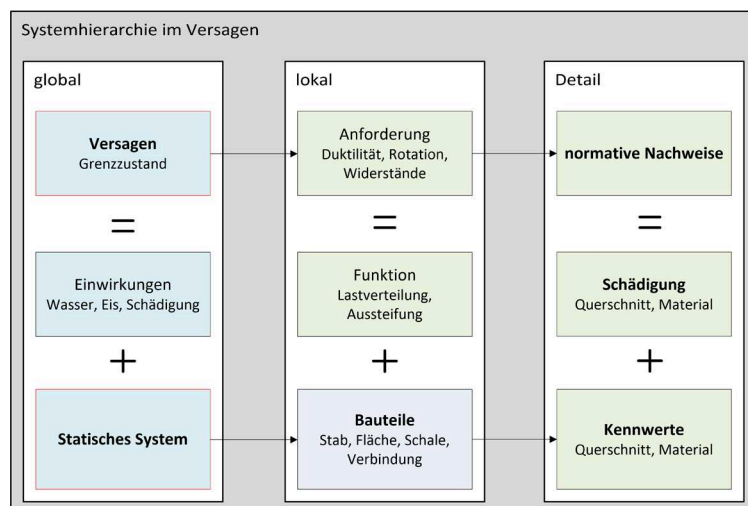


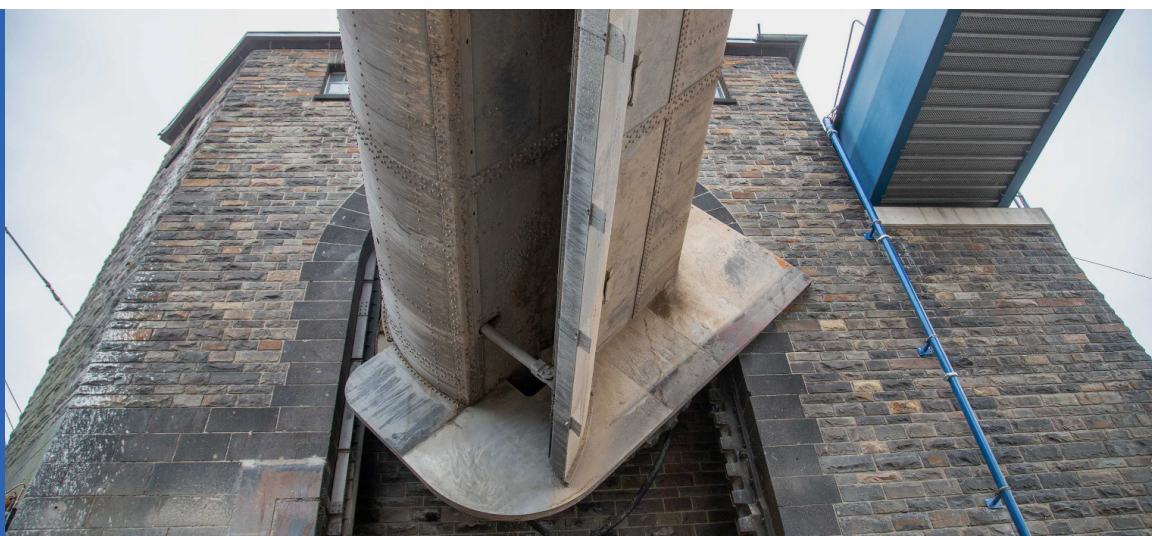
Bild 1: Systemhierarchie im Versagen mit dem entsprechenden Informationsgehalt und den notwendigen Eingangsgrößen.

### Literatur:

Harte, R.; Krätzig, W. B.; Petryna, Y. S. (2007): Robustheit von Tragwerken – ein vergessenes Entwurfsziel? DOI: 10.1002/bate.200710019.

Rotter, J. M. (2016): Advances in understanding shell buckling phenomena and their characterisation for practical design. In: Gizejowski, M. A. et al. (Hg.): Recent progress in steel and composite structures. Boca Raton, London, New York, Leiden: CRC Press, 3–16.

Zhu, B.; Frangopol, D. M. (2015): Effects of Postfailure Material Behavior on System Reliability. DOI: 10.1061/AJRU6.0000808.



## Tragfähigkeitsorientierte Bewertung von Bauwerksschäden

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Im Zuständigkeitsbereich der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) befinden sich zunehmend Bauwerke mit kritischem Zustand. Die wachsende Anzahl dieser Bauwerke und die zukünftig anstehenden Instandhaltungs- oder Neubaumaßnahmen erfordern eine Priorisierung sowie Optimierung des Erhaltungsmanagements. Der aktuelle Erhaltungszustand kann auf die historisch gewachsene Altersstruktur und den entstandenen Instandhaltungsrückstau zurückgeführt werden. Fachkundiges Ingenieurpersonal führt die regelmäßige Überprüfung und Dokumentation des Zustands durch und inspiziert die Bauwerke hinsichtlich der Gesichtspunkte Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Verkehrssicherheit. Die ermittelte Zustandsnote stellt eine Grundlage für Entscheidungen und Priorisierungen im Erhaltungsmanagement dar, um die nach § 48 WaStrG geforderte Sicherheit und Ordnung an den Wasserstraßen zu gewährleisten.

Als systemrelevante und somit nicht sperrbare Anlagen haben Wehranlagen eine besonders hohe Relevanz im Wasserstraßennetz. Wehranlagen sind Bauwerke mit weitreichenden Folgen im Falle eines Bauwerksausfalls, weshalb die Entwicklungen basierend auf dieser Objektart erfolgen und auf das restliche Objektportfolio der WSV übertragen werden.

Das Ziel dieses FuE-Vorhabens ist die Optimierung des Erhaltungsmanagements auf Basis der visuellen Bauwerksinspektion. Der Fokus der Untersuchungen liegt auf dem Einfluss von Schädigungen auf die Tragfähigkeit des Bauwerks oder einzelner Tragwerksteile. Es sollen Zusammenhänge und Einflüsse verschiedener Schädigungsmechanismen und Schadensorte untersucht werden. Zur Überführung der Ergebnisse in die Bauwerksprüfung sind Handlungsempfehlungen zu entwickeln, welche das bestehende BAWMerkblatt zur „Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken“ (MSV) ergänzen. Der Schwerpunkt wird auf Schäden am Massivbau mit besonderer Relevanz für die Tragfähigkeit gelegt. Die Ergänzung des Merkblatts zielt auf die Aspekte Erkennung und Betonung von Schäden mit Tragfähigkeitsrelevanz ab.

**Auftragsnummer:**

B3951.04.04.70008

**Auftragsleitung:**Sarah Elting  
sarah.elting@baw.de**Laufzeit:**

2019 bis 2022

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

Die WSV erhält eine Unterstützung zur Steigerung der Verkehrssicherheit sowie zur Priorisierung von Erhaltungs- und Neubaumaßnahmen. Die Qualität der Bauwerksinspektion kann durch zusätzliche Handlungsempfehlungen gesteigert werden und Schäden mit Relevanz für die Tragfähigkeit werden sicherer identifiziert und einheitlich bewertet. Somit kann eine fundierte Grundlage für Entscheidungen im Erhaltungsmanagement geschaffen werden.

## 3 Untersuchungsmethoden

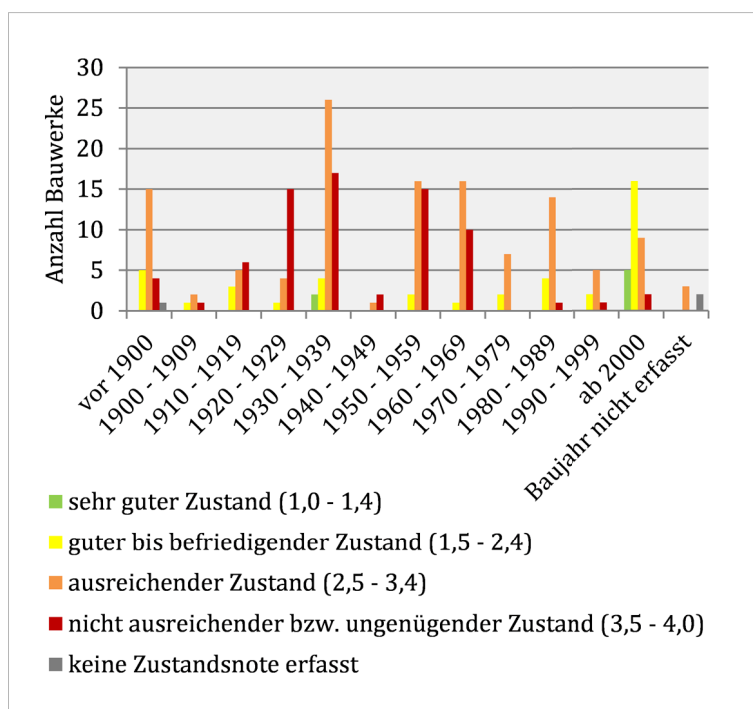
Ausgangsbasis für die anstehenden Untersuchungen sind Inspektionsergebnisse der Objekte der Inspektionskategorie A nach VV-WSV 2101 sowie von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) erstellten Gutachten und Nachrechnungen. Für Bauwerke im Zuständigkeitsbereich der WSV werden seit 2009 die Ergebnisse der Inspektion systematisch mit dem Programmsystem WSVPruf erfasst und können somit als Basis für die Auswertungen herangezogen werden.

Zur Entwicklung der Zusammenhänge und Auswirkungen von Schäden auf die Tragfähigkeit sollen vorhandene Informationen zu Schadensmechanismen und Auswirkungen der Schadensbilder zusammengestellt werden. Hierzu sind Analysen der Bauwerksinspektionsergebnisse, Nachrechnungen und Gutachten notwendig, um typische Schadensbilder und Schadensmechanismen an Wasserbauwerken zu identifizieren. Nach einer Abgrenzung in tragfähigkeitsrelevante und nicht tragfähigkeitsrelevante Schäden ist die Bedeutung für das Tragwerk einzustufen. Mithilfe von Tragfähigkeitsanalysen soll der Einfluss einzelner Schädigungen auf die Standsicherheit beurteilt werden, um im Anschluss bei einer Nachrechnung die Schäden entsprechend berücksichtigen zu können. Dazu müssen die ermittelten charakteristischen Schädigungen mit Berechnungsmodellen kombiniert werden. Zur Schärfung der Ergebnisse sollen unterschiedliche Bauarten von Wehranlagen klassifiziert werden. Hierzu sind Ansätze zur Clusterbildung und zur Beurteilung der Robustheit der Bauwerke zu entwickeln.

## 4 Ergebnisse

Eine erste Bestandsanalyse der Wehranlagen in der Inspektionskategorie A zeigt, dass sich der überwiegende Anteil der Bauwerke in einem schlechten Zustand befindet (siehe Bild 1). Rund 30 % der Wehranlagen sind in einem nicht ausreichenden bzw. ungenügenden Zustand. Weitere 50 % der Anlagen erreichen nur noch einen ausreichenden Zustand. Zudem ist zu erkennen, dass eine Vielzahl der Bauwerke die planmäßige Nutzungsdauer nach DIN 19702:2013-02 von 100 Jahren in den nächsten Jahren erreichen wird oder bereits erreicht hat.

Für den dokumentierten Zustand der Anlagen sind häufig der Massivbau und der Stahlbau maßgebend. Typische Schadensbilder am Massivbau, sind z. B. Risse, Bewehrungskorrosion und Oberflächenschäden am Beton. Notwendige tiefergehende Untersuchungen hinsichtlich Schadensmechanismen stehen noch aus.



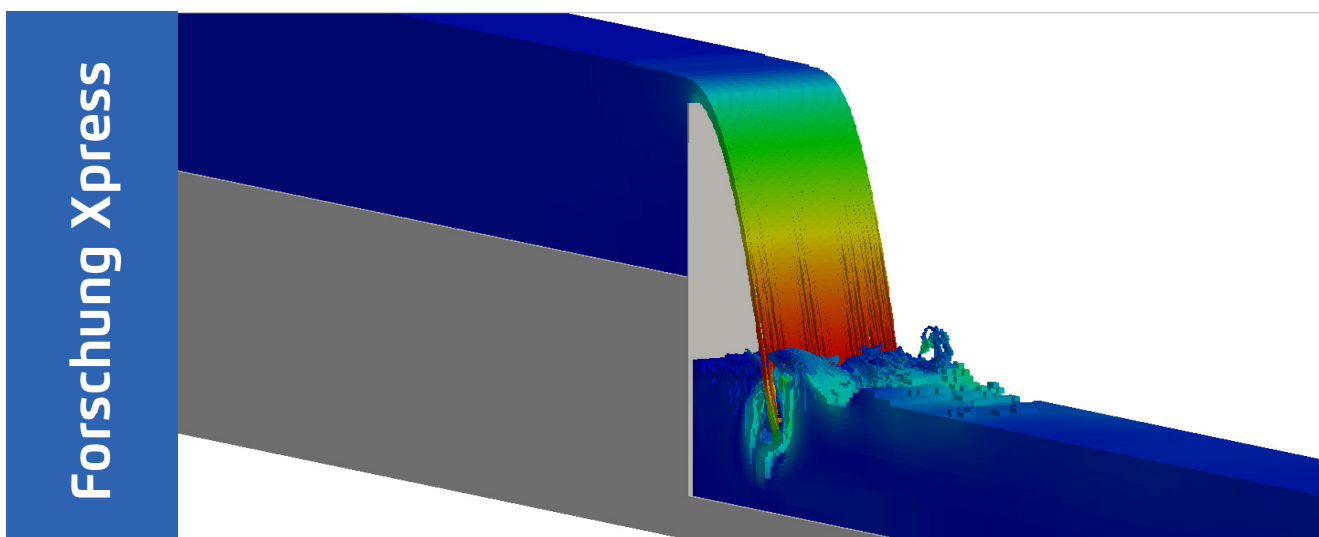
### Literatur:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2018): BAWMerkblatt Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien).

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Bundesamt für Justiz (2018): Bundeswasserstraßengesetz. WaStrG, Fassung vom 23.5.2007 (BGBl. I, S. 962; 2008 I, S. 1980), zuletzt geändert durch Artikel 4 des Gesetzes vom 29.11.2018 (BGBl. I, S. 2237).

DIN 19702:2013-02: Massivbauwerke im Wasserbau – Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit. Berlin: Beuth-Verlag.

Bild 1: Zustandsnotenverteilung der Wehranlagen in Abhängigkeit vom Baujahr (Stand 29.07.2019).



## Fischabstieg an Wehranlagen – Untersuchungen zur Mehrphasenströmung beim Wehrüberfall

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Bei der Passage von Wasserbauwerken sind Fische einer Vielzahl von Einflüssen ausgesetzt. Diese können neben der Verzögerung der Wanderung auch zur physischen Schädigung der passierenden Fische führen. Das Schädigungspotential bei einem Fischabstieg über ein Wehr wird dabei maßgeblich durch dessen hydraulische Situation bestimmt, welche u. a. durch den Einsatz von numerischen Verfahren bewertet wird. Mit den aktuell zur Verfügung stehenden Zweiphasenlösern auf Basis der Volume-of-Fluid-Methode (VoF) ist jedoch die realitätsgetreue Abbildung großskaliger freifallender Strömungen, wie sie zumeist an überströmten Wehren vorzufinden sind, nur schwerlich möglich. Ursächlich hierfür ist die Notwendigkeit einer sehr feinen Auflösung der Wasser-Luft-Grenzfläche, die nötig ist, um die dort herrschende Strömungssituation auf der Mikroskala erfassen zu können. Eine derartig feine Auflösung der Wasser-Luft-Grenzschicht erzeugt jedoch einen enormen Bedarf an Berechnungsressourcen, welcher diese Methode impraktikabel werden lässt. Eine gröbere Auflösung des Strömungsgebiets stellt die hydraulische Situation im Überfallbereich des Wehres unter Verwendung der VoF-Methode nicht realistisch dar und beeinflusst dadurch ebenfalls das Strömungsbild im weiteren Verlauf der unterwasserseitigen Strömung. Damit ist die numerische Bewertung der ökologischen Durchgängigkeit von Wasserbauwerken mit frei fallenden Überfallstrahlen zum aktuellen Stand der Technik nur unzureichend möglich.

Ziel des Forschungsprojektes ist die Entwicklung eines numerischen Ansatzes zur Berücksichtigung des Lufteintragungs- und Aufweitungsprozesses freifallender Strömungen für großskalige Strömungssituationen. Das zu entwickelnde Modell soll durch ein gegenständliches Modell validiert werden. Durch die Kombination mit einem bereits entwickelten numerischen Ansatz zur Abbildung des Lufttransports und zum Aufsteigen von Luftblasen (Schulze 2018) soll die hydraulische Situation an und stromabwärts von überströmten Wehren künftig realitätsnah abgebildet werden.

#### Auftragsnummer:

B3953.01.04.70009

#### Auftragsleitung:



Dr. Roman Weichert  
 roman.weichert@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Markus Wagner  
 markus.wagner@baw.de

#### Laufzeit:

2019 bis 2021



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

Bei Baumaßnahmen an Wehranlagen stehen derzeit Fragen zu möglichen Fischschädigungen in der Diskussion. Kenntnisse, unter welchen WSV-relevanten Randbedingungen mit Schädigungen bei der Passage einer Wehranlage zu rechnen ist, sind daher – insbesondere im Hinblick auf die anstehenden Genehmigungsverfahren – von großer Bedeutung. Die Entwicklung eines numerischen Ansatzes zur realitätsnahen Abbildung von Überfallstrahlen wird zu einer belastbaren Beurteilung des Fischabstiegs durch fischbiologische Experten beitragen.

## 3 Untersuchungsmethoden

Der numerische Modellansatz zur Berücksichtigung der Strahlaufweitung im frei fallenden Bereich des Überfallstrahls soll weitgehend physikalisch basiert sein. Zunächst wird durch eine Literaturrecherche zum Thema „Lufteintrag bei Freistrahlen“ vertieftes Wissen über die physikalischen Vorgänge am Freistrahlaufgebaut und somit für ein verbessertes Prozessverständnis gesorgt.

Für die dreidimensionale Strömungssimulation wird bei der Bundesanstalt für Wasserbau unter anderen die Open-Source-Software OpenFoam® eingesetzt. Diese ermöglicht durch direkten Zugriff auf den Quellcode die Weiterentwicklung der Strömungslöser.

Zur Validierung der numerischen Entwicklung soll ein gegenständliches Modell betrieben werden, welches in einem 1:1-Maßstab zum Anwendungsfall ausgeführt ist. Für die Bestimmung der im Strahl herrschenden Strömungsbedingungen sollen neben konventionellen Strömungsmesssonden zur Geschwindigkeitsmessung auch Leitfähigkeitsmesssonden eingesetzt werden. Diese ermöglichen das Detektieren der Strahloberfläche und somit die Quantifizierung der Strahlaufweitung im frei fallenden Bereich des Überfallstrahls.

## 4 Ergebnisse

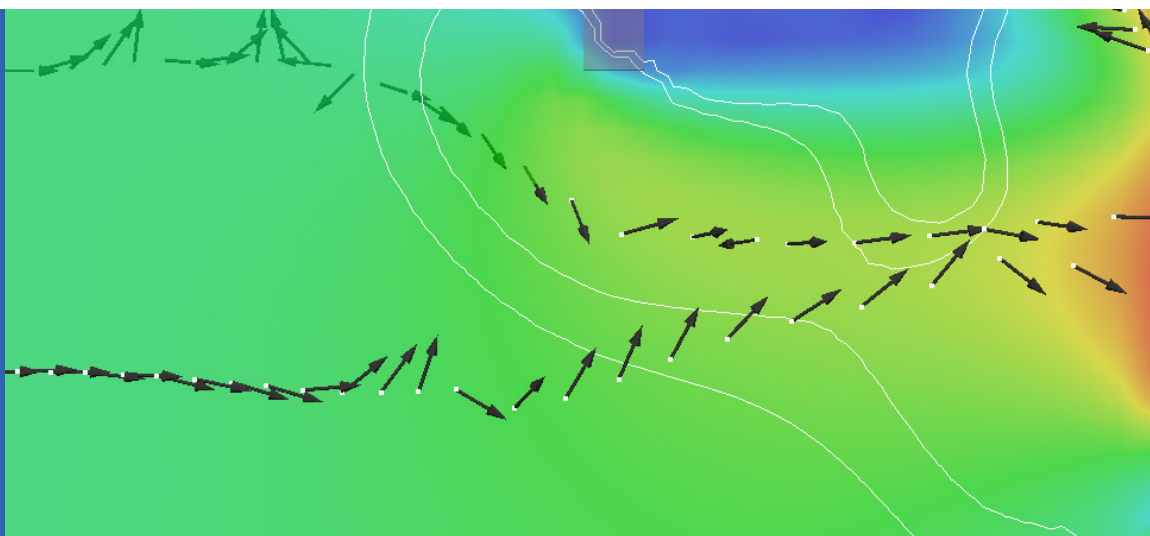
Eine erste Evaluierung des gegenständlichen Modells liefert wertvolle Erkenntnisse für die zukünftige Modellentwicklung. Zu diesen Erkenntnissen gehört, dass die im Oberwasser, insbesondere an der Wehrkante, und durch Strahlaufreißer eingetragene Turbulenz maßgeblich für den Aufweitungs- und Lufteintragsprozess des Überfallstrahls einer Wehranlage während des freien Falls ist. Der Einfluss der Reibung an der Wasser-Luft-Grenzschicht ist bei Fallhöhen, die dem Anwendungsfall entsprechen, nur von untergeordneter Bedeutung. Die Aufweitung des Strahls bestimmt dessen Auftrefffläche sowie dessen Eintauchtiefe im unterwasserseitigen Bereich der Wehranlage und dadurch dessen lufteintragende Wirkung. Eine Literaturrecherche zum Aufweitungsverhalten bei Überfallstrahlen an Wehranlagen lieferte keine verwendbaren Messdaten, welche jedoch für die Validierung der numerischen Modellentwicklung nötig sind. Daher ist zur Quantifizierung der Strahlaufweitung die Untersuchung eines Überfallstrahls mit Kenntnis der oberstrom herrschenden Strömungsbedingungen unabdingbar.

Erste Untersuchungen der numerischen Abbildbarkeit von Überfallstrahlen zeigen, dass aufgrund numerischer Fehler die Strahlaufweitung für kleine Überströmungshöhen der Wehrkante und hohe Fallhöhen des Strahls tendenziell überschätzt wird. Ursächlich ist hierbei die Limitierung der Auflösungsgenauigkeit der Wasser-Luft-Grenzschicht. Hingegen wird für große Überströmungshöhen der Wehrkante und hohe Fallhöhen die Strahlaufweitung bei gleicher Auflösung der Wasser-Luft-Grenzschicht unterschätzt.

Das angestrebte numerische Modell wird genau an diesem Punkt ansetzen. Die richtungsweisende Idee ist dabei, den strahlaufweitenden Effekt der nichtaufgelösten turbulenten Strukturen über einen physikalisch basierten Modellierungsansatz zu berücksichtigen. Dieser Ansatz wird die realitätsnahe numerische Abbildbarkeit von Strömungssituationen mit Überfallstrahlen, insbesondere für große Überströmungshöhen, positiv beeinflussen.

### Literatur:

Schulze, L. (2018): Development of an Application-Oriented Approach for Two-Phase Modelling in Hydraulic Engineering. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Dresdner Wasserbauische Mitteilungen, 61).



## Modellierung aufwärtsgerichteter Fischwanderung im Kraftwerksunterwasser

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Auffindbarkeit ist für die Funktionsfähigkeit von Fischaufstiegsanlagen (FAA) an den deutschen Bundeswasserstraßen ein entscheidender Faktor. Existierende Richtlinien wie das DWA-Merkblatt 509 (DWA 2014) sind jedoch nicht detailliert genug, um alle relevanten Planungsfragen zur Auffindbarkeit quantitativ zu beantworten, da wissenschaftliche Erkenntnisse für die Mehrheit der einheimische Arten derzeit nicht vorliegen. Rein hydraulische Modelluntersuchungen können benötigte Antworten liefern (Gisen et al. 2017), stoßen jedoch bei der Bewertung von hydraulisch geringfügigen, aber finanziell gravierenden Planungsunterschieden mangels geeigneter Methoden an ihre Grenzen.

Eine häufige Frage aus der Beratungspraxis von BAW und BfG (Bundesanstalt für Gewässerkunde) lautet beispielsweise, wie sich die Vergrößerung des Längsabstands zwischen Einstieg und Querbauwerk um wenige Meter auf die Auffindbarkeit auswirkt. Um diese sicher zu beantworten, müsste sowohl der Anteil der erfolgreichen Fische als auch ihr Zeit- und Energieaufwand verglichen werden. Diese Werte in der Natur zu erheben, ist mit immensum Aufwand und Unsicherheiten verbunden. Ziel des Projekts ist daher die Entwicklung eines numerischen Verfahrens, welches den quantitativen Vergleich von baulichen und betrieblichen Planungsvarianten einer FAA in Bezug auf die Auffindbarkeit ermöglicht.

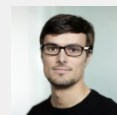
### 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)

Im Auftrag der WSV wird derzeit an 42 Standorten der Bau einer FAA geplant (Stand Mai 2019), insgesamt sind an den Bundeswasserstraßen ca. 250 Anlagen zu errichten. Fragen nach der optimalen Position, baulichen Gestaltung und Anzahl der Einstiege in eine FAA und dem Leitabfluss sind überall kostenrelevant, insbesondere bei paralleler Wasserkraftnutzung und räumlich beengten Verhältnissen.

#### Auftragsnummer:

B3953.01.04.70010

#### Auftragsleitung:



Dr. David Gisen  
 david.gisen@baw.de

#### Laufzeit:

2019 bis 2021

### 3 Untersuchungsmethoden

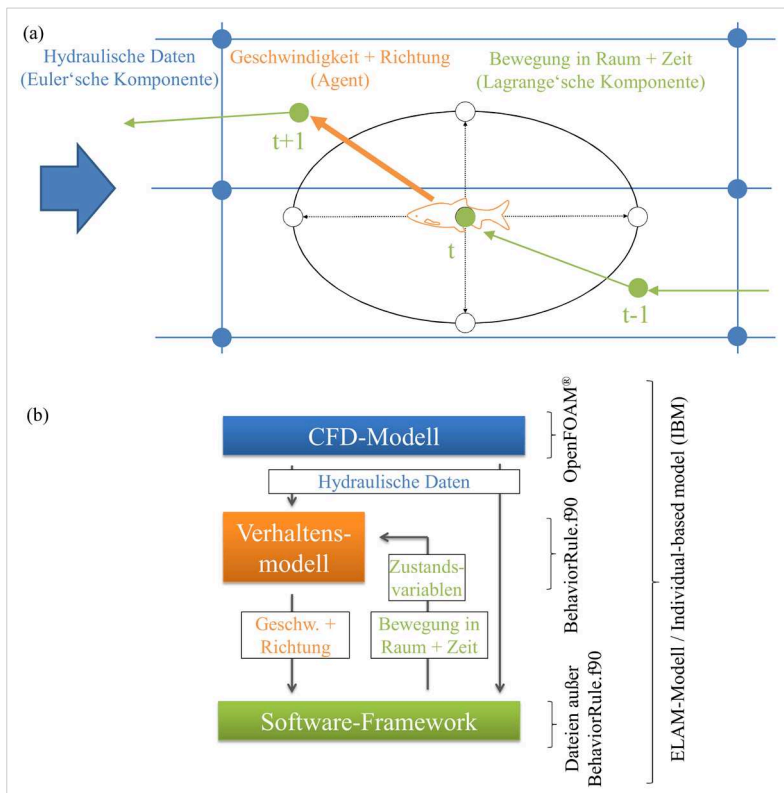
Als Untersuchungsstandort wurde die Staustufe Eddersheim am Main gewählt, da die BfG dort umfangreiche 2D- und 3D-Fischtrack-Daten in unmittelbarer Nähe der dortigen Wasserkraftanlage erhoben hat. Für das Fischtracking im Kraftwerksunterwasser setzt die BfG akustische Telemetrie mit aktiven Sendern ein. Die Ergebnisse sind, wie bei Felduntersuchungen häufig, teilweise lückenhaft und müssen statistisch aufbereitet werden. Dafür werden von der BfG unter anderem die Programme RStudio und ArcGIS verwendet. Die Berechnung der Durchflüsse der einzelnen Komponenten (Wehr und Kraftwerksturbinen) an der Staustufe Eddersheim erfolgt an der BAW mit MATLAB. Die Durchflüsse dienen als Input für numerische Modelle, die wiederum Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen für die Analysen der BfG liefern.

Zur Simulation des Strömungsfelds im Unterwasser der Staustufe Eddersheim werden 2D- und 3D-hydrodynamisch-numerische Modelle verwendet, die mit Telemac bzw. OpenFOAM® erstellt werden. Die 3D-Ergebnisse werden mittels der ELAM (Eulerian-Lagrangian-agent Method) mit einem Verhaltensmodell verknüpft (Bild 1). Die ELAM wird seit über 15 Jahren vom renommierten US Army Corps of Engineers zur Beschreibung der abwärts gerichteten Wanderung von Jungsalmoniden entwickelt und angewandt (Goodwin et al. 2014). Ein bestehendes ELAM-Modell wurde im FuE-Projekt B3953.01.04.70007 mit OpenFOAM gekoppelt und so erweitert, dass beliebige unstrukturierte Polyedernetze verwendet werden können (Gisen 2018). Das Verhaltensmodell wurde ersetzt durch ein kleinskaliges (<0,1 m; <1 s) 3D-Verhaltensmodell für aufwandernde Bachforellen in einer Laborrinne. Dieses neue ELAM-Modell („ELAM-de“) ist die Basis für weitere Untersuchungen.

### 4 Ergebnisse

Bislang konnten folgende Ergebnisse erzielt werden:

- Die Geschwindigkeit des Software-Frameworks wurde ungefähr um den Faktor 43 gesteigert, wodurch mehr Tests in kürzerer Zeit möglich sind. Die verwendeten Funktionen (Klasse Foam::meshSearch) sind auf seriellen Einsatz beschränkt; eine Verwendung in parallelisierten Netzen ist jedoch ohnehin nicht vorgesehen.
- Das Software-Framework wurde von OpenFOAM 2.3.1 auf 4.1 (Standardversion der BAW) portiert.
- Eine Option zur visuellen Erkennung von Wänden wurde in das Verhaltensmodell eingebaut.



#### Literatur:

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hg.) (2014): Merkblatt DWA-M 509 – Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke. Hefen: Eigenverlag.

Gisen, D. C.; Weichert, R. B.; Nestler, J. M. (2017): Optimizing attraction flow for upstream fish passage at a hydropower dam employing 3D Detached-Eddy Simulation. In: Ecological Engineering 100, S. 344–353. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.10.065.

Gisen, D. C. (2018): Modeling upstream fish migration in small-scale using the Eulerian-Lagrangian-agent Method (ELAM). Dissertation Universität der Bundeswehr München, <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105158>.

Goodwin, R. A.; Politano, M.; Garvin, J. W.; Nestler, J. M.; Hay, D.; Anderson, J. J.; Weber, L. J.; Dimperio, E.; Smith, D. L.; Timko, M. (2014): Fish navigation of large dams emerges from their modulation of flow field experience. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 111 (14), S. 5277–5282. DOI: 10.1073/pnas.1311874111.

Bild 1: (a) Komponenten und (b) Informationsfluss eines ELAM-Modells: Strömungssimulation (CFD) (blau, Eulersche Betrachtung), Transportframework (grün, Lagrangesche Betrachtung, passiver und ggf. aktiver Transport), Verhaltensmodell (orange, aktiver Agent).



www.danubius-ri.eu

## DANUBIUS-PP

### Etablierung einer europäischen Forschungsinfrastruktur zu Fluss-Meer-Systemen

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Fluss-Meer-Systeme sind bedeutende Ökosysteme von großem ökologischen, gesellschaftlichen und ökonomischen Wert. Sie unterliegen hohem Nutzungsdruck und sind infolgedessen in vielfältiger Weise gefährdet. Maßnahmen zum Erhalt bzw. zur Wiederherstellung dieser wertvollen Systeme müssen integrale Wirkungen entfalten und setzen ein koordiniertes Vorgehen voraus. Die Funktionsweise und die Dynamik von Fluss-Meer-Systemen sind jedoch trotz weltweiter Forschungsaktivitäten aufgrund der Komplexität der Prozesse bis heute nur unzureichend verstanden. DANUBIUS-PP bereitet die Einführung der pan-europäischen Forschungsinfrastruktur (European Research Infrastructure Consortium – ERIC) DANUBIUS-RI vor. Diese soll langfristig (30 bis 40 Jahre) Forschungsaktivitäten im Bereich der Fluss-Meer-Systeme in Europa wesentlich unterstützen, indem zentrale Elemente und Leistungen für interdisziplinäre Forschungsaktivitäten und Wissensweitergabe erarbeitet und angeboten werden. Hierzu zählen insbesondere Analyse- und Beobachtungsdaten, die auf Basis abgestimmter Standards erhoben und bereitgestellt werden, fachspezifische und integrative Modellwerkzeuge, die auch eine verständliche Kommunikation von Forschungserkenntnissen ermöglichen sollen, sowie die Betrachtung von Folgen und Lösungsstrategien. Eine wesentliche Rolle spielen sogenannte Supersites, in Europa verteilte Naturräume begrenzter Ausdehnung mit unterschiedlicher Charakteristik, die auf Grundlage der angebotenen Dienstleistungen Bezugsräume für Fluss-Meer-Forschungsaktivitäten sind. Zwei von bislang zwölf Supersites sind der freifließende deutsche Rhein (Supersite Middle Rhine) unter Federführung der BAW und Mitwirkung der BfG sowie das Elbe-Ästuar mit den angrenzenden Bereichen der Nordsee (Supersite Elbe-North Sea), für welche die BAW wichtige Beiträge liefert.

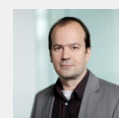
#### 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)

In Anbetracht des hohen Nutzungsdrucks auf unsere Flüsse und Ästuar und angesichts ihres heutigen ökologischen Zustandes sind dauerhafte Anstrengungen notwendig, um das Ziel einer nachhaltigen Gestaltung in der Abwä-

#### Auftragsnummer:

B3953.02.04.70007

#### Auftragsleitung:

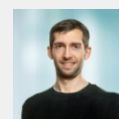


Dr. Nils Huber  
nils.huber@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Annkathrin Lammin  
annkathrin.lammin@baw.de



Dr. Martin Struck  
martin.struck@baw.de

#### Laufzeit:

2019 bis 2021

gung unterschiedlicher Anforderungen zu erreichen. Nur mit einem tiefen Systemverständnis kann den damit verbundenen Herausforderungen an die Fluss-Meer-Systeme, die größtenteils Bundeswasserstraßen sind, durch die WSV wirkungsvoll begegnet werden. Die Schaffung einer hierfür bedeutenden Beiträge liefernden Forschungsinfrastruktur mit bereits mehr als 30 Partnern aus dem europäischen Raum ermöglicht es der WSV sowie den Bundesoberbehörden BAW und BfG darüber hinaus, einen intensiven Fachaus-tausch betreiben zu können. Die Koordination bzw. die Beteiligung an den *Supersites Middle Rhine* und *Elbe-North Sea* ermöglicht maßgeschneiderte Forschungsvorhaben, welche das Verständnis für bedeutende Herausforderungen und insbesondere ökologisch orientierte Lösungsansätze vertiefen. Eine enge Kooperation mit den niederländischen Partnern der *Supersite Rhine-Meuse-Delta* in DANUBIUS-RI wird als besonders vielversprechend angesehen und daher vorbereitet. Im Rahmen von DANUBIUS-PP vertritt das BMVI die Belange Deutschlands und nimmt damit eine zentrale unterstützende Rolle bei den Planungen für den langfristig orientierten Betrieb von DANUBIUS-RI ein.

### 3 Untersuchungsmethoden

Während der Vorbereitungsphase DANUBIUS-PP fand eine fachliche und administrative Konzeption zum Aufbau und Betrieb von Kompetenzzentren, sogenannter Nodes, und der Supersites statt. Halbjährliche Hauptversammlungen sowie regelmäßige Lenkungsgruppensitzungen dienten der Steuerung der Prozesse in Richtung des Aufbaus von DANUBIUS-RI. Die inhaltliche Ausgestaltung erforderte eine Vielzahl an Workshops unter Beteiligung von Vertretern der Konsortiumsmitglieder. Im weiteren Verlauf des Aufbaus von DANUBIUS-RI werden verschiedene Austauschformate zu Fluss-Meer-Systemen sowohl im nationalen wie internationalen Rahmen zwischen Fachleuten, z. B. Vertretern von Flussgebietskommissionen, Wasserwirtschafts- und Umweltverwaltungen und Verbänden, angestrebt. Im Rahmen der Implementierungsphase ab voraussichtlich Frühjahr 2020 sind sowohl der Aufbau der Supersites als auch der Probetrieb verschiedener Testfälle von Dienstleistungsanfragen aus der Forschungslandschaft geplant, um den Workflow zu verbessern und den Weg in den operationellen Betrieb zu ebnen.

### 4 Ergebnisse

Seit 2016 ist DANUBIUS-RI Bestandteil der Roadmap des ESFRI (Europäisches Strategieforum für Forschungsinfrastrukturen). Zentraler Baustein einer solchen europäischen Forschungsinfrastruktur ist die Identifikation bedeutender wissenschaftlicher Herausforderungen und Fragestellungen, deren Beantwortung von hoher fachlicher und gesellschaftlicher Relevanz ist. Die „Science and Innovation Agenda“ (SIA) von DANUBIUS-RI, an deren Ausgestaltung die BAW mitgewirkt hat, adressiert insbesondere die Leitthe-men globaler Wandel und Megatrends, Wasser und Sediment, Biodiversität und Ökosysteme sowie die Erfordernis, den stetig komplexer werdenden Einflüssen auf Fluss-Meer-Systeme wirkungsvoll zu begegnen.

In den vergangenen etwa zwei Jahren arbeitete die BAW auch intensiv an der Definition der Dienstleistungen, welche zukünftigen Forschungstreibenden im Rahmen von DANUBIUS-RI an der *Supersite Middle Rhine* angeboten werden sollen. Die Bereitstellung der Dienstleistungen setzt Personalressourcen voraus, deren voraussichtlicher erforderlicher Umfang ebenso wie die resultierenden Gesamtkosten abgeschätzt und abgestimmt werden mussten.

Die Schwerpunkte der *Supersite Middle Rhine* liegen insbesondere in den Bereichen des Sedimentmanagements, in der ökologischen Entwicklung unter Berücksichtigung konkurrierender Nutzungen sowie in der ökologisch orientierten Gestaltung von Elementen des Verkehrswasserbaus. Neben der langfristigen Erhebung, Aufbereitung, Sicherung und Interpretation von Daten wird die BAW zusammen mit der BfG Expertise in vielen Bereichen flussbezogener Forschung anbieten. Auch der Betrieb und die Weiterentwicklung von numerischen Modellen und die Mitwirkung bei der Erarbeitung von Modellierungs- und Ingenieursstandards sollen geleistet werden. Der Fokus der BAW in der *Supersite Elbe-North Sea* liegt neben dem Betrieb und der Weiterentwicklung numerischer Modelle und der langfristigen Erhebung, Aufbereitung und Sicherung von Daten auf Auswirkungen und Anpassungsmöglichkeiten an den Klimawandel in küstennahen Gebieten. Die neuen Erkenntnisse und das daraus generierte Wissen werden kontinuierlich für den Rhein und die Tideelbe aggregiert und bereitgestellt.

Die im Rahmen des Horizon-2020-Programms EU-geförderte Vorbereitungsphase DANUBIUS-PP endete am 30.11.2019. Der Antrag auf Zuerkennung eines ERIC-Status zu DANUBIUS-RI wird Ende Januar 2020 bei der EU eingereicht. Im Falle einer positiven Entscheidung im Laufe des Jahres 2021 kann mit dem formalen Aufbau der Forschungsinfrastruktur begonnen werden, um einen operationellen Betrieb ab den Jahren 2023 bzw. 2024 zu erreichen.

#### Literatur:

Projektseiten [03.12.2019]:

<https://danubius-pp.eu/>

[https://danubius-pp.eu/www/wp-cotent/uploads/2019/11/Danubius\\_Agenda\\_Seth\\_B\\_n12\\_web.pdf](https://danubius-pp.eu/www/wp-cotent/uploads/2019/11/Danubius_Agenda_Seth_B_n12_web.pdf)

<https://www.danubius-ri.eu/>



## Rauheitswirkung von Vorlandvegetation

Abbildung bei der HN-Modellierung von Bundeswasserstraßen

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Vegetation auf den Vorländern der freifließenden Bundeswasserstraßen hat einen signifikanten Einfluss auf das Strömungsgeschehen bei Hochwasserabflüssen. Dieser Einfluss reicht von kleinskaligen Wirbelstrukturen im Nachlauf der Blätter bis hin zu Änderungen der Abflussaufteilung über den gesamten Fließquerschnitt und einer Erhöhung der Wasserstände. Um bauliche Maßnahmen zur naturnahen Umgestaltung und Anbindung von Flussauen sowie die Unterhaltung und das Management der Vorländer im Planungszustand analysieren und bewerten zu können, ist es essentiell, die entsprechenden hydraulischen Verhältnisse für den Ist- und Planungszustand möglichst genau berechnen zu können (siehe auch DWA-M 524).

In den letzten Jahrzehnten konnten große Fortschritte im Verständnis der Interaktion von Strömung und Vegetation erzielt werden. Dennoch gibt es viele offene, noch zu klärende Forschungsfragen. Insbesondere die Beschreibung von flexiblem Bewuchs und der Hydraulik bei überströmten Bedingungen stellen derzeit noch eine große Herausforderung dar. Bisher ist auch noch nicht vollständig geklärt, wie komplexe Bewuchselemente interagieren. Zur Abbildung des Ufer- und Vorlandbewuchses an den Bundeswasserstraßen in der hydraulischen Modellierung ist die Klärung der offenen Fragen essentiell. Das geplante Forschungsvorhaben soll daher an die bisherigen Untersuchungen anknüpfen und sich insbesondere auf die typischen Vorlandstrukturen an den Bundeswasserstraßen fokussieren.

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

Zur Erreichung der Ziele der EU-Wasserrahmenrichtlinie gewinnen Ufer- und Vorlandbewuchs für die WSV im Rahmen von Unterhaltung und Ausbau der Bundeswasserstraßen zunehmend an Bedeutung. Dies vor allem auch vor dem Hintergrund der zu erwartenden Ausweitung der gesetzlichen Zuständigkeit der WSV im Hinblick auf den wasserwirtschaftlichen Ausbau. Durch die Umsetzung des Bundesprogramms „Blaues Band Deutschland“ zur Förderung der Renaturierung von Fließgewässern und Auen wird die WSV derzeit und auch zukünftig zunehmend mit Renaturierungsmaßnahmen

#### Auftragsnummer:

B3953.02.04.70008

#### Auftragsleitung:



Frederik Folke  
 frederik.folke@baw.de

#### Laufzeit:

2019 bis 2022

konfrontiert. Die BAW wird daher verstärkt gefordert sein, vegetationsbeeinflusste Auswirkungen von Maßnahmen hinsichtlich ihrer Unschädlichkeit bezüglich Leichtigkeit und Sicherheit der Schifffahrt sowie ihres Einflusses auf die Wasserspiegellagen bei höheren Abflüssen zu bewerten.

### 3 Untersuchungsmethoden

Im Rahmen des FuE-Vorhabens sollen sowohl gegenständliche als auch numerische Modelle für die Untersuchungen verwendet werden. Hintergrund hierfür ist, dass es viele offene (grundsätzliche) Fragen, insbesondere im Bereich der flexiblen Vegetation gibt. Für die Modellierung des Widerstandsverhaltens durchströmter flexibler Vegetation existieren vielversprechende Ansätze, welche aber noch einer Validierung im Naturmaßstab bedürfen. Derzeit fehlt die Erweiterung der Ansätze für den Fall der überströmten flexiblen Vegetation. Allerdings werden laufend neue Ergebnisse zum Thema Interaktion zwischen Vegetation und Strömungsfeld publiziert. Neben den Berechnungsansätzen selbst ist auch die Erfassung der erforderlichen Vegetationsparameter ein Grundbaustein für die erfolgreiche Modellierung.

Derzeit werden in Kooperation mit dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig die Rauheitswirkung von durch- und überströmter flexibler Vegetation in einer speziell für diese Versuche ausgestatteten Laborrinne untersucht (Niewerth und Aberle 2019). Hierbei sind die Vegetationselemente über die gesamte Rinnenbreite verteilt. Die Bewuchsdichte, die relative Überströmungshöhe und auch die Anströmgeschwindigkeit können variiert werden. Die Versuche sind die Weiterführung intensiver Untersuchungen von vollständig durchströmter flexibler Vegetation (Schoneboom 2010).

Parallel zu den experimentellen Untersuchungen wurde ein 2D-HN Modell des Labormodells aufgebaut und verschiedene Vegetationsansätze in Telemac-2D implementiert (Folke et al. 2019a, 2019b). Zudem wurde das Verhalten verschiedener Vegetationsansätze analytisch untersucht und bewertet.

Zukünftig sind weiterführend Laborversuche mit komplexerer Konfiguration geplant. Zudem soll eine Pilotstrecke zur Validierung der Vegetationsansätze identifiziert werden und eine entsprechende Messkampagne vorbereitet werden. Zur Weiterentwicklung der (automatisierten) Erfassung von Vegetationszonen soll in Zusammenarbeit mit der BfG untersucht werden, wie die erforderlichen Vegetationsparameter effizient großflächig erfasst und für die Modellierung aufbereitet werden können.

### 4 Ergebnisse

Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass die klassische Abstraktion der Vegetation durch starre, durchströmte Zylinderelemente Schwächen bei der Modellierung von Vorlandvegetation aufweist. Hierbei werden die Morphologie der Pflanzen und das Widerstandsverhalten von überströmter Vegetation nur unzulänglich beschrieben. In Bild 1 ist beispielhaft das Verhalten unterschiedlicher Vegetationsansätze in Abhängigkeit der relativen Überströmungshöhe dargestellt.

Die Verwendung des Blattflächenindex zur Beschreibung der Vegetationsdichte sowie die Verwendung eines Mehrschichtenansatzes für überströmte Vegetation erscheinen vielversprechend. Wie signifikant der Einfluss der Flexibilität für die Modellierung des Widerstandsverhaltens von Ufer- und Vorlandvegetation an Bundeswasserstraßen ist, konnte bisher noch nicht geklärt werden und ist Bestandteil der weiterführenden Untersuchungen innerhalb des FuE-Projekts.

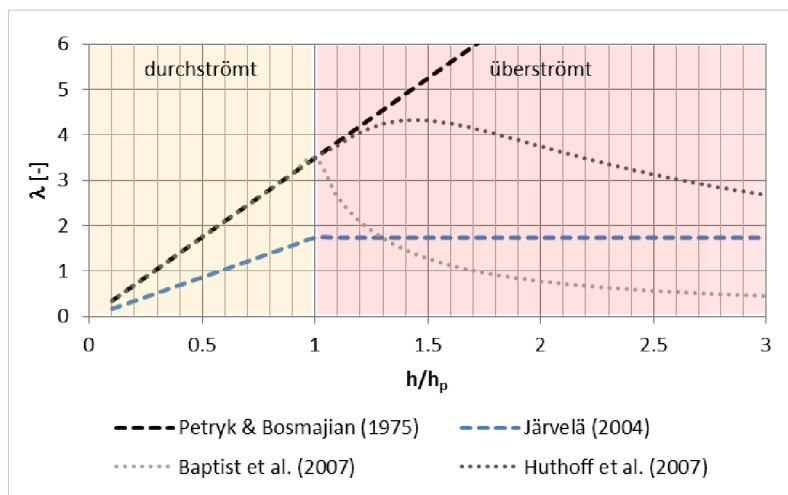


Bild 1: Widerstandsbeiwert in Abhängigkeit der relativen Überströmungshöhe (gestrichelt: 1-Schicht Modelle, gepunktet: 2-Schicht Modelle, schwarz/grau: starr, blau: flexibel)

#### Literatur:

Folke, F.; Attieh, M.; Kopmann, R. (2019a): In search of friction laws for vegetated flow within 2D large-scale applications. E-Proc. IAHR World Congress, Panama City, Panama.

Folke, F.; Kopmann, R.; Dalledonne, G.; Attieh, M. (2019b): Comparison of different vegetation models using TELEMAC 2D. Proc. TELEMAC-MASCARET User Conference, Toulouse, France.

Niewerth, S.; Aberle, J. (2019): Grundlagenversuche mit überströmter flexibler Vegetation. LWI, TU Braunschweig.

Schoneboom, T. (2011): Widerstand flexibler Vegetation und Sohlenwiderstand in durchströmten Bewuchsfeldern. LWI, TU Braunschweig.



## Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Modellierung der Strömungen mit freier Oberfläche gekoppelt mit der Umströmung von Schiffen in freifließenden Wasserstraßen

Zusammenarbeit mit der Universität Trient, Italien

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Gegenstand dieses in Zusammenarbeit mit der Universität Trient (Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale e Meccanica, Università di Trento) bearbeiteten Projektes ist die Entwicklung eines neuen semi-impliziten Finite-Volumen-Verfahrens zur numerischen Simulation von Fluid-Struktur-Wechselwirkungen mit besonderem Fokus auf der Umströmung von Schiffen in freifließenden Binnenwasserstraßen.

Das Ziel ist die Entwicklung eines massenerhaltenden semi-impliziten numerischen Verfahrens mit dem dazugehörigen dokumentierten Quellcode zur gekoppelten Simulation hydrostatischer und nicht-hydrostatischer dreidimensionaler Strömungen mit freier Oberfläche im Nahbereich eines fahrenden Binnenschiffs.

Das zu entwickelnde numerische Verfahren modelliert die Schiffsdynamik über ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen, welche die Bewegung eines dreidimensionalen Starrkörpers mit sechs Freiheitsgraden beschreiben. Dieses Differentialgleichungssystem wird in konsistenter Art und Weise mit den Navier-Stokes-Gleichungen mit freier Oberfläche (oder deren hydrostatischer Approximation) gekoppelt, die die Dynamik der Flussströmung beschreiben.

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

Es handelt sich um eine Entwicklung, die die Möglichkeiten der Modellierung der fahrenden Schiffe in mesoskaliger Betrachtung (z. B. Flussstrecken mittlerer Länge) erweitern soll, mit dem Zweck, die Methodik zur Befahrbarkeitsbewertung und Dimensionierung von Wasserstraßen zu verbessern und als Fernziel eine Kopplung an den Schiffsführungssimulator zu realisieren.

#### Auftragsnummer:

B3953.04.04.70013

#### Auftragsleitung BAW:

Dr. Jacek A. Jankowski  
 jacek.jankowski@baw.de

#### Auftragsleitung Uni Trient:

Prof. Michael Dumbser  
 michael.dumbser@unitn.it

#### Laufzeit:

2019 bis 2023



### 3 Untersuchungsmethoden

Es werden numerische Methoden für Strömungen mit freier Oberfläche und zur Modellierung der Schiffsumströmung in begrenzten Wasserstraßen angewendet.

Die vorgesehenen Arbeitspakete des Projektes 2019 bis 2023 sind:

Arbeitspaket (1) 2019–20: Machbarkeitsstudie anhand eines vereinfachten hydrostatischen zweidimensionalen 2Dxz-Modells. Beschreibung der Schiffsdynamik durch einen 2D-Starrkörper mit einem, zwei und drei Freiheitsgraden. In diesem Arbeitspaket wird angenommen, dass die einzigen auf das Schiff wirkenden Kräfte der Auftrieb und die Schwerkraft sind. Berechnungen einfacher akademischer Testbeispiele mit einfacher Geometrie und Vergleich mit Referenzlösungen aus der Literatur, falls vorhanden.

Arbeitspaket (2) 2020–21: Erweiterung der Software auf drei Raumdimensionen und auf nicht-hydrostatische Strömungen. Beschreibung der Schiffsdynamik durch einen 3D-Starrkörper mit sechs Freiheitsgraden. In diesem Arbeitspaket wird angenommen, dass die auf das Schiff wirkenden Kräfte der Auftrieb, die Schwerkraft und eine bekannte, von außen aufgeprägte Kraft bzw. ein Drehmoment sind. Es wird weiterhin eine vereinfachte Schiffsgometrie angenommen.

Arbeitspaket (3) 2021–22: Erweiterung auf realistische Schiffsgometrien. Software interface zum Import der Schiffsgometrie und der nötigen DTM-Daten. Beschreibung der Geometrie auf sub-grid-Ebene. Detaillierte mathematische Modelle für die auf das Schiff wirkenden Kräfte und Drehmomente (Ruder, Vortrieb, Reibungskräfte etc.). Parallelisierung der Software zur Erhöhung der Rechengeschwindigkeit für die realistischen Szenarien aus Arbeitspaket 4.

Arbeitspaket (4) 2022–23: Anwendung der Software auf realistische Testfälle. Die Geometrien der Schiffe und der Flussläufe werden von der BAW zur Verfügung gestellt. Weitere für die Simulation benötigte Parameter und Daten (Reibungskoeffizienten, Volumenstrom im Flusslauf, Schiffsmanöver etc.) werden von der BAW zur Verfügung gestellt bzw. gemeinsam erarbeitet. Vorbereitung einer Veröffentlichung in einer internationalen Fachzeitschrift.

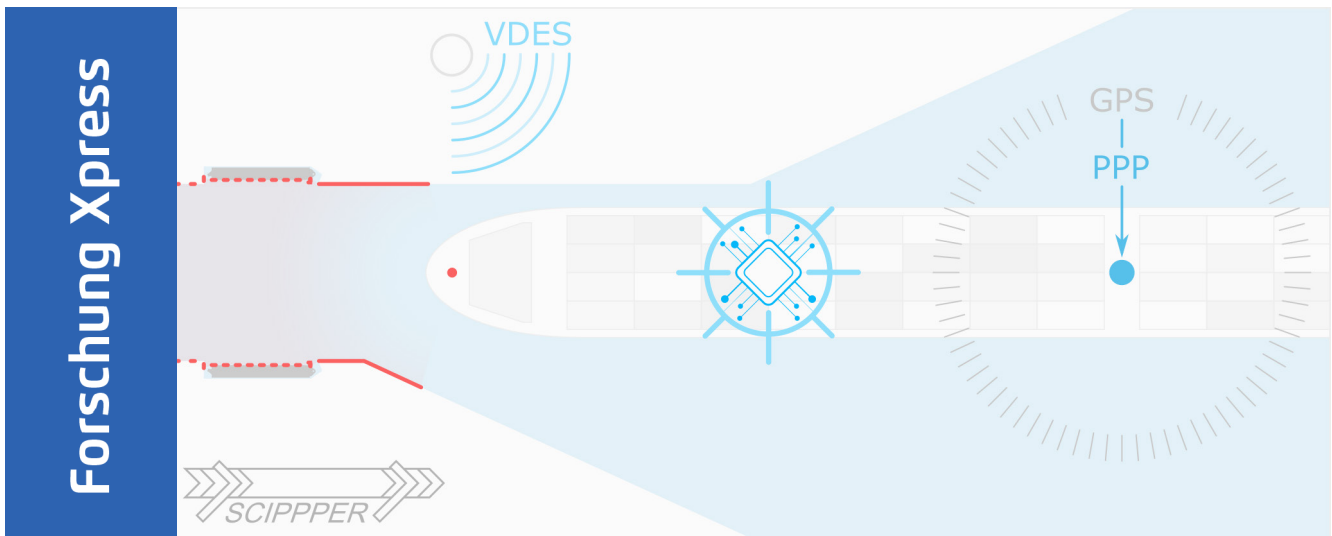
### 4 Ergebnisse

Es wurden seit September 2019 einige Arbeiten aus dem geplanten ersten und dritten Arbeitspaket durchgeführt. Neben der theoretischen Machbarkeitsstudie ist vor allem die Erstellung von Software zur Behandlung und Interpolation der in üblichen Darstellungen gegebenen Schiffsgometrie auf die rechnerischen Netze des zu entwickelnden Verfahrens zu erwähnen. Es wurden Tests der Tauglichkeit dieser Vorgehensweise im Rahmen eines existierenden zwei- und dreidimensionalen Verfahrens gemacht, das unter Anwendung der Subgrid-Technologie die gleichzeitige Modellierung der Strömungen mit und ohne freier Wasseroberfläche im mesoskaligen Bereich erlaubt (UnTRIM2, Casulli und Stelling 2011). Diese Vorgehensweise ist konsistent mit den bisher in der BAW durchgeführten Arbeiten (Kastens und Lang 2016).

#### Literatur:

Casulli, V.; Stelling, G. S. (2011): Semi-implicit subgrid modelling of three-dimensional free-surface flows. In: Int. J. Num. Meth. in Fluids, 2011 (67), 441–449.

Kastens, M.; Lang, G. (2016): Berücksichtigung von beweglichen oder fixen Strukturen (Schiffe) an der freien Wasseroberfläche in hydrodynamisch numerischen Verfahren UnTRIM. FuE-Abschlussbericht, BAW Hamburg.



## Projekt SCIPPER

Schleusenassistentensystem basierend auf PPP und VDES für die Binnenschifffahrt

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Verlagerung des Gütertransports von Straßen und Schienen auf die Binnenwasserstraßen ist ein vielversprechender Lösungsansatz, um die Umweltbilanz des Güterverkehrs zu verbessern. Um international wettbewerbsfähig zu bleiben und den Technologiestandard des Verkehrsträgers Wasserstraße an die üblichen Verkehrsträger anzupassen, sind modern ausgestattete Transportwege aber auch innovative Techniken an Bord eines Binnenschiffes notwendig.

Die Schleusung ist eines der häufigsten, aber auch kritischsten Manöver in der Binnenschifffahrt. Typisch für die Wasserstraßen in Deutschland ist die Situation, dass ein 11,40 m breites Schiff in eine 12,00 m breite Schleusenkammer einfährt. Die Zeit, die das Schiff für die Schleusenein- und -ausfahrt benötigt, nimmt einen beträchtlichen Teil der Fahrtzeit bis zum Zielort ein. Eine Automatisierung dieses Vorgangs zielt zum einen auf eine Erhöhung der Leichtigkeit und zum anderen auf eine Beschleunigung des gesamten Schleusungsvorganges.

Technologische Basis für die neue Fahrerassistenzfunktion ist die Bereitstellung von zuverlässigen und hochgenauen Informationen zur Position, Lage und Geschwindigkeit des Binnenschiffes durch Auswertung der Signale des Global Navigation Satellite System (GNSS) mittels des Verfahrens Precise Point Positioning (PPP). Die hierfür notwendigen Korrekturdaten sollen über den neuartigen Datenkanal VHF Data Exchange (VDE) zur Verfügung gestellt werden. Dieser ist Bestandteil des neuen VHF Data Exchange Systems (VDES). VDES offeriert ein bidirektionales Kommunikationssystem zwischen Schiffen, zwischen Schiffen und Landstationen sowie zwischen Schiffen und Satelliten. Der VDE Datenkanal eröffnet mit seinen neuen Übertragungskapazitäten neue Perspektiven für die Binnenschifffahrt. Da es hierfür weltweit noch keine Produkte für die Sende- und Empfangseinheiten gibt, bietet sich die Möglichkeit, anhand einer konkreten Pilotanwendung innovative Technologien für zukünftige Produkte zu entwickeln.

#### Auftragsnummer:

B3953.04.04.70014

#### Auftragsleitung:



Tobias Höfler  
tobias.hoefler@baw.de

#### Laufzeit:

2019 bis 2021

#### Projektseite:

scippper.de

#### Projektpartner:

Alberding  
Argonics  
In - innovative navigation  
DLR  
WSV FVT  
Weatherdock

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

Im Fall positiver Ergebnisse im Projekt SCIPPER entstehen diverse Nutzungsmöglichkeiten für die WSV, so z. B. die Zuverlässigkeit des Assistenzsystems aus erster Hand zu beurteilen sowie die geplante VDES-Infrastruktur auf störungsfreie Integration mit der bestehenden Infrastruktur für das Automatic Identification System (AIS) vorzubereiten. Letztere Forschung liefert zudem kurz- und mittelfristige Beiträge für Standardisierungsgremien. Darüber hinaus kann mittel- und langfristig erwartet werden, dass das in diesem Projekt entwickelte Fahrerassistenzsystem einen Beitrag zur Erhöhung der Leichtigkeit und Sicherheit der Binnenschifffahrt bietet sowie dass die Unfallzahlen im Zusammenhang mit Brückenanfahrungen verringert werden können und die damit einhergehenden Kosten für die Binnenschifffahrt und für die WSV verringert werden. Erkenntnisse aus der VDES-Entwicklung können für zukünftigen Infrastrukturaufbau unmittelbar genutzt werden.

## 3 Untersuchungsmethoden

An der BAW erfolgt die Simulation der automatisierten Schleusung in diversen Testszenarien am Schiffsführungssimulator. Hierfür werden Schiffsführer virtuelle Schiffe unter verschiedensten Umweltbedingungen mit und ohne Assistenzsystem durch die Testreviere steuern. Auf diese Weise sollen die Funktionen des Reglers und des Mensch-Maschine-Interface validiert werden, bevor die Installation auf einem realen Schiff vorgenommen wird. Dieser Teil des Assistenzsystems wird von den Projektpartnern Argonics GmbH und in - innovative navigation GmbH entwickelt und beinhaltet einen Sensor-Simulator für Nahbereichsradar und Laserscanner als Erweiterung des Schiffsführungssimulators. Das System wird mit Daten aus dem Schiffsführungssimulator beschickt, berechnet Sensormessungen, wertet diese aus, leitet Steuerbefehle für Ruder, Hauptmaschine und Bugstrahlruder ab und sendet diese an den Simulator zurück. Der Schiffsführer wählt hier lediglich die gewünschte Liegeposition und überwacht den Vorgang, kann aber im Notfall durch Betätigung der Steuerorgane die Befehle des Reglers überschreiben. Durch Aufzeichnung der Fahrten kann ein Vergleich zwischen Messfahrten in der Realität und den simulierten Fahrten gezogen werden. Parallel dazu untersuchen und entwickeln die Projektpartner Alberding GmbH, DLR - Institut für Kommunikation und Navigation, die Fachstelle der WSV für Verkehrstechnik (FVT), sowie Weatherdock AG die Precise Point Positioning-Auswertung sowie VDES-Kommunikation. Letztere muss zunächst auf ihre Vereinbarkeit mit der bestehenden AIS-Infrastruktur getestet und optimiert werden. Zuletzt werden beide Teilsysteme in einer gemeinsamen Installation auf einem realen Schiff geprüft und bewertet werden.

## 4 Ergebnisse

Zum aktuellen Zeitpunkt wurde ein Anforderungskatalog definiert, die Systemarchitektur bestimmt und Schnittstellen spezifiziert. Weiterhin liegen Messungen von initialen Testfahrten vor, während derer verschiedene Nahbereichssensoren und GNSS-Empfänger auf ihre Eignung hin untersucht wurden.

In Hinsicht auf den Schiffsführungssimulator wurde mit der Modellierung des Fahrtreviers Koblenz begonnen. Es umfasst Rhein und Mosel in einem Radius von 15 km vom Deutschen Eck, beinhaltet 2 Staustufen, 14 Brücken, sowie diverse besondere Landmarken. Für all diese müssen Pläne gesammelt, 3D-Modelle erstellt und Animationen konfiguriert werden (z. B. Schleusensteuerung, aber auch Beleuchtung der Schifffahrtszeichen). Eingangsdaten wie ein digitales Geländemodell, Orthofotos, digitale Bundeswasserstraßenkarten, offizielle IENC-Karten und Bebauungspläne sind zusammengetragen; ein Strömungsmodell ist in Arbeit. Darüber hinaus werden neue Schiffsmodelle fahrdynamisch konfiguriert.



Bild 1: 3D-Modell der MS Bingen des WSA Bingen.  
(Modell i. A. der BAW angefertigt von mach:idee, machidee.de)



## Entwicklung eines Verkehrssimulationsmodells auf Binnenwasserstraßen

### Großräumige Untersuchungen auf den Wasserstraßen

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Untersuchung von Verkehrsströmen ist eine wichtige Komponente für verkehrliche und wirtschaftliche Untersuchungen an den Binnenwasserstraßen. Die dafür erforderliche großräumige Darstellung der Verkehrsströme ist mit einem Verkehrssimulationsmodell möglich, das als sogenanntes Mikrosimulationsmodell für Binnenwasserstraßen im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks vom Institut für Wirtschaft und Verkehr, „Professur für Ökonometrie und Statistik, insbesondere im Verkehrswesen“ der TU Dresden bis Anfang 2018 entwickelt und für einen Abschnitt des Mittelrheins aufgebaut wurde. Das FuE-Vorhaben „Entwicklung eines Verkehrssimulationsmodells auf Binnenwasserstraßen“ befasst sich mit der Entwicklung einer verbesserten und erweiterten Version für das Anwendungsgebiet „Niederrhein“, wo aufgrund der hohen Verkehrsdichte das Konzept eines spurgebundenen Verkehrs nicht mehr zielführend ist.

Mithilfe des Verkehrssimulationsmodells können Analysen der Flottenstrukturen, der Transportkapazitäten und der Transportmengen durchgeführt werden. Unterschiedliche Faktoren können zu einer Veränderung der Flottenstruktur führen. Dies sind zum einen langzeitige Entwicklungen, wie die Tendenz zu größeren Schiffen oder eine Anpassung an klimatische Änderungen und zum anderen kurzzeitige Einflüsse, wie wechselnde Wasserstände, andauernde extreme Wetterlagen oder wirtschaftliche Konjunkturphasen. Diese Faktoren wirken sich auf die Leistungsfähigkeit der Wasserstraße und die Transportmengen aus.

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

Durch die Weiterentwicklung des Verkehrssimulationsmodells können unter anderem Breiten- und Tiefenengstellen identifiziert werden, die die Kapazität der Wasserstraßen vermindern. Zudem können Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs unter Berücksichtigung veränderter hydrologischer Bedingungen, z. B. infolge des Klimawandels, untersucht werden. Damit er-

**Auftragsnummer:**

B3953.04.04.70015

**Auftragsleitung:**Hauke Stachel  
hauke.stachel@baw.de**Laufzeit:**

2019 bis 2023

hält die WSV frühzeitig Informationen über potentielle Engstellen, die die Sicherheit, Leichtigkeit und Wirtschaftlichkeit der Binnenschifffahrt einschränken können. Die Verkehrssimulation ist darüber hinaus ein wichtiges Werkzeug, mit dem z. B. im Rahmen einer intelligenten Schleusenzulaufsteuerung eine Prognose der Verkehrsentwicklung in einem Wasserstraßenabschnitt auf der Basis von AIS-Daten erfolgen kann. Mit der Simulation können die voraussichtlichen Ankunftszeiten (ETA) der Schiffe an der Schleuse ermittelt werden.

### 3 Untersuchungsmethoden

Die Weiterentwicklung des vorhandenen Mikrosimulationsmodells für die Binnenschifffahrt erfolgt am Institut für Wirtschaft und Verkehr, „Professur für Ökonometrie und Statistik, insbesondere im Verkehrswesen“ der TU Dresden. Das Verkehrssimulationsmodell besteht grundsätzlich aus

- einem fahrdynamischen Modell, welches die Bewegung von Binnenschiffen auch in frei fließenden Wasserstraßen mithilfe von semi-empirischen Ansätzen beschreibt,
- einem Fahrzeugfolgemodell, mit dem jedes Schiff als ein individuelles Objekt simuliert wird, und
- einem Entscheidungsmodell, welches das Verhalten eines Schiffsführers regelbasiert nachbildet, um z. B. Schiffsbegegnungen und Überholmanöver zu realisieren.

Ein wichtiger Parameter des fahrdynamischen Modells ist z. B. die von einem Binnenschiff benötigte Fahrspurbreite in Flusskrümmungen, die zur Bewertung von Engstellen verwendet wird (Fischer 2017) und die Grundlage für eine regelbasierte Entscheidung darüber darstellt, ob eine Begegnung oder Überholung in einer Flusskrümmung möglich ist.

Das vorhandene Verkehrssimulationsmodell beruht auf spurgebundenem Verkehr und ist daher hinsichtlich der maximal möglichen Anzahl der Fahrspuren stark begrenzt. Aus diesem Grund wird im Rahmen der Weiterentwicklung der Ansatz des spurgebundenen Verkehrs aufgegeben und die Entwicklung eines vollständig zweidimensionalen Verkehrssimulationsmodells mit freien Trajektorien angestrebt. Dies soll es ermöglichen, auch auf breiten, stark frequentierten Wasserstraßen wie dem Niederrhein eine heterogene Flotte, vom Europaschiff bis zum 6-er Schubverband, zu simulieren.

Andere Aspekte der Weiterentwicklung betreffen die Einbeziehung des Ladens und Löschens von Gütern, von Ruhe- und Wartezeiten sowie die umfassende Berücksichtigung von Verkehrsregeln.

### 4 Ergebnisse

Das Projekt ist im März 2019 gestartet. Ergebnisse liegen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vor.



Bild 1: Binnenschiffsverkehr auf dem Rhein.

#### Literatur:

Fischer, N.; Treiber, M. und Okhrin, O. (2017): Fahrdynamikbasierte Entscheidungsmodelle zur mikroskopischen Simulation des Verkehrsflusses auf Binnenwasserstraßen. In: BAW (Hg.): BAW-Kolloquium Tagesband „Wasserbauliche Herausforderungen an den Binnenschifffahrtsstraßen.“ Karlsruhe: BAW, S. 61–66.



## Automatisierung in der Binnenschifffahrt

### Entwicklung einer virtuellen Testumgebung

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Mit der fortschreitenden Digitalisierung steigen in vielen Bereichen von Industrie und Forschung die Anwendung und die Nutzbarkeit von automatischen und (teil-) autonomen Systemen. Insbesondere im Transportsektor ist die Automatisierung von Fahrzeugen ein Thema, das seit vielen Jahren in unterschiedlichen Ausprägungen untersucht wird. In der Automobilbranche sind zahlreiche Assistenzsysteme bereits im Einsatz und der Schritt zur Vollautomatisierung wird vielfach zumindest in Versuchen umgesetzt. In der Schifffahrt ist der maritime Sektor im Vergleich zur Binnenschifffahrt deutlich weiter fortgeschritten, was u. a. mit der Größe des Marktes und damit auch dem Nutzen einer Automatisierung zusammenhängt. In der Binnenschifffahrt sind zurzeit nur vereinzelt Fahrassistenzsysteme zur Unterstützung des Schiffsführers im Einsatz, was einer eher niedrigen Stufe der Automatisierung entspricht (ZKR 2018). Ein Grund, die Automatisierung voranzutreiben, ist die Chance, durch Personaleinsparungen das Problem von fehlenden Nachwuchskräften zu kompensieren. Mit einem Fortschreiten der Automatisierung ist zudem die Erwartung verbunden, die Sicherheit und Wirtschaftlichkeit durch eine optimierte Fahrweise zu erhöhen, wozu auch die Entlastung des Schiffsführers beitragen würde.

Das übergeordnete Ziel des hier bearbeiteten Projektes ist die Entwicklung einer echtzeitfähigen, fahrdynamischen Simulationssoftware als Teil eines virtuellen Testfeldes. Ein solches Testfeld bietet Möglichkeiten, sicher und in einer kontrollierten Umgebung ein Schiff durch einen Flussabschnitt zu steuern. Dabei können verschiedene Szenarien wie Hindernisse oder Interaktionen zwischen den Schiffen (Begegnungen/Überholungen) erprobt werden. Um Versuche in der Natur durchzuführen, sind Tests mit einem Messträger des Referats W4 angedacht.

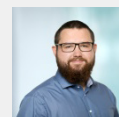
#### 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)

Durch die Entwicklung eines virtuellen Testfeldes können die Randbedingungen aus Sicht einer automatisierten Binnenschifffahrt für verschiedene Themen identifiziert bzw. definiert werden. So kann z. B. auch eine Beratung

#### Auftragsnummer:

B3953.04.04.70016

#### Auftragsleitung:



Hauke Stachel  
 hauke.stachel@baw.de

#### Laufzeit:

2019 bis 2022

der WSV bezüglich der Infrastruktur wie zusätzliche oder angepasste Sendeanlagen für AIS (Automated Identification System) oder VDES (VHF Data Exchange System) stattfinden. Daneben können Themen wie das autonome Messen fachlich fundiert unterstützt werden. Die Bereitstellung von hochaktuellen Messdaten durch die WSV ist sehr personal- und ressourcenaufwendig. Im virtuellen Testfeld können beispielsweise potentielle Konzepte, die das autonome Messen von automatisierten Plattformen aus ermöglichen, erprobt werden.

### 3 Untersuchungsmethoden

Im Projekt wird eine fahrdynamische Steuerungssoftware entwickelt, die in einer virtuellen Umgebung getestet wird. Um einen höheren Grad der Automatisierung zu erhalten, ist zuerst eine Definition der technischen Anforderungen nötig. So müssen Fragen zu Hardwarekomponenten wie Mess- und Sensortechnik, aber auch zu Kommunikation und zugehöriger Software geklärt werden. Für eine autonome Schiffssteuerung werden zusätzlich genaue Daten der Infrastruktur benötigt, wie Strömungs- und Geländemodelle sowie Bauwerksdaten. Diese Daten und Untersuchungen werden auch mit den Erfahrungen aus anderen existierenden oder beantragten Projekten abgestimmt. Mit diesen Daten und Untersuchungen ist ein Aufbau der Steuerungssoftware in drei Schritten geplant.

Der erste Schritt ist die Prognose des potentiellen Kurses anderer Fahrzeuge mithilfe von AIS-Daten. Aus den AIS-Informationen eines (Fremd-) Schiffes wird zu Beginn eine Wahrscheinlichkeitsverteilung in Echtzeit errechnet, an welchem Ort sich das Schiff nach einer gewissen Zeit befindet. Die verschiedenen Fahrweisen unterschiedlicher Schiffsklassen bei variierenden Tiefgängen können eine große Streuung der Kurslinien verursachen (Bild 1). Die zur Bestimmung nötigen fahrdynamischen Grundlagen können aus dem in der BAW entwickelten und eingesetzten Modellverfahren FaRAO (Fahrdynamische Routenanalyse und Optimierung) übernommen bzw. wenn nötig adaptiert werden (Linke 2015). Mit einer guten Prognose eines Schiffes sollen Schiff-Schiff-Interaktionen wie Begegnungen oder Überholungen betrachtet werden. Das eigene Schiff soll stets sicher auf eine Störung (Begegnung, Vorbeifahrtsituation) reagieren können. In der normalen Streckenfahrt ohne kritische Begegnung, die einen Großteil der Fahrzeit ausmacht, ist eine auf der Grundlage der verfügbaren Infrastrukturdaten optimierte, treibstoffsparende Fahrweise das Ziel.

Als finales Arbeitspaket sollen mehrere Schiffe im virtuellen Testfeld eingesetzt und beispielsweise eine mit AIS-Daten aufgezeichnete Situation störungsfrei bewältigt werden. Dabei sollen verschiedene Randbedingungen wie Treibstoffeffizienz oder Geschwindigkeitseingrenzungen eingesetzt werden.

### 4 Ergebnisse

Das Projekt startete im Oktober 2019. Ergebnisse liegen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vor.

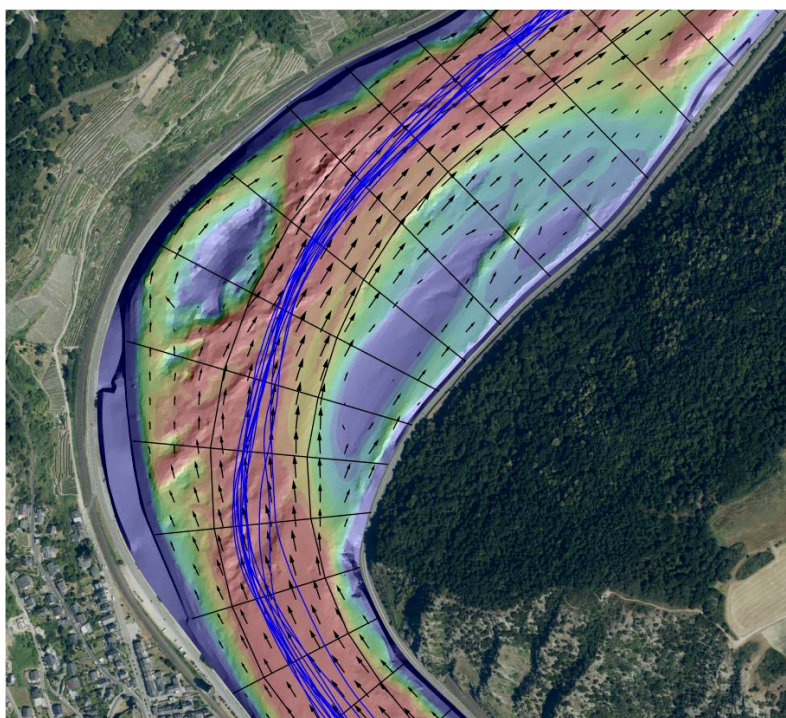


Bild 1: Streuung von aufgezeichneten Fahrspuren (blau) eines üGMS bei Mittelwasserströmungslinien (Pfeile) in der Bergfahrt.

#### Literatur:

Linke, T.; Rauscher, D.; Söhngen, B. (2015): Recent developments in the application of shallow water ship hydrodynamics in inland waterway design. SMART RIVERS Conference. Buenos Aires.

ZKR (2018): Erste internationale Definition der Automatisierungsgrade in der Binnenschifffahrt. ZKR Pressemitteilung. Straßburg.



## Binnenschiffsemissionen (BinEm)

### Entwicklung eines Verfahrens zur Berechnung von Binnenschiffsemissionen

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Treibhausgase und Luftschadstoffe wie CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, Feinstaub und Rußpartikel werden zu einem wesentlichen Anteil dem Verkehr zugeschrieben (IFEU 2018). Der Gesetzgeber reagiert auf die zunehmende Sensibilisierung der Gesellschaft durch die Festlegung von verschärften Abgasgrenzwerten und Verordnungen zur Luftreinhaltung. Dies betrifft auch die allgemein als umweltfreundlich angesehene Binnenschifffahrt (EU 2016), die im Zuge der Verminderung von Luftschadstoffemissionen aufgrund der teilweise sehr alten Motorentechnik Optimierungspotentiale aufweist.

Die BAW ist im Expertennetzwerk des Bundesverkehrsministeriums (BMVI) an einem Projekt zur Evaluierung und Minderung der verkehrsbedingten Emissionen beteiligt und hat dort die Aufgabe, den Anteil der Binnenschifffahrt an allen Emissionen zu quantifizieren sowie den Erfolg von technischen und betrieblichen Maßnahmen zur Emissionsminderung zu bewerten. Aktuell sind die Emissionen von Schiffen und ihre spezifischen Zusammensetzungen jedoch nicht ausreichend bekannt. Bisher gibt es nur wenige direkte Emissionsmessungen auf Binnenschiffen, bzw. die Messungen sind häufig nicht repräsentativ für den tatsächlichen Betrieb oder auf einzelne Schadstoffe, Schiffstypen und Strecken bezogen (Corbett und Robinson 2001, Pillot et al. 2016). Der Großteil veröffentlichter Binnenschiffsemissionsdaten basiert auf Modellen, die Abschätzungen und Vereinfachungen anhand von Statistiken und Kennwerten vornehmen (z. B. in IFEU 2018). Diese Modelle berücksichtigen nicht die Betriebsparameter im realen Einsatz und können daher nur bedingt technische und betriebliche Maßnahmen zur Emissionsminderung simulieren.

Im Rahmen eines FuE-Vertrages mit dem Institut für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme (ISMT) der Universität Duisburg-Essen soll ein Verfahren entwickelt werden, das aufbauend auf den Ergebnissen des BMVI-Expertennetzwerks eine fundierte Modellierung der Binnenschifffahrtsemissionen mit einem universellen Ansatz ermöglicht. Dieses Bottom-Up-Verfahren erlaubt die Simulation von Binnenschiffsemissionen einzelner Schiffe auf ausgewählten Strecken bis hin zur Gesamtemission der Flotte einer Region sowie deren Minderung nach Umsetzung technischer und betrieblicher Maßnahmen.

#### Auftragsnummer:

B3953.04.04.70017

#### Auftragsleitung:



Dr. Christian Noß  
 christian.noss@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Dr. Udo Lantermann  
 udo.lantermann@uni-due.de

#### Laufzeit:

2019 bis 2022



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

Fundierte quantitative Aussagen zu den von der Binnenschifffahrt verursachten Luftschadstoffen werden seitens des BMVI und der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) benötigt, um auf Anfragen von Politikern, Kommunen, Medien und Verbänden kompetent antworten zu können.

Mit der im Rahmen einer Forschungskoooperation mit dem ISMT entwickelten Software können die Emissionen der Binnenschifffahrt für beliebige Regionen und Schiffsflotten modelliert werden. Damit steht der BAW eine Methode zur Verfügung, die es ermöglicht, den Anteil der Binnenschifffahrt an den Luftschadstoffen beispielsweise in einer städtischen Region zum heutigen Zeitpunkt, den Erfolg von Emissionsminderungsmaßnahmen oder auch die Veränderung unter veränderten Umweltbedingungen zu bewerten. Auf Basis dieser Ergebnisse können Entscheidungsträger im BMVI und in der GDWS erfolversprechende Maßnahmen zur Minderung von Binnenschiffsemissionen gezielt ableiten, geltende Vorschriften anpassen oder neue erlassen.

## 3 Untersuchungsmethoden

Es soll ein Modell zur möglichst realitätsnahen Bestimmung der Emissionen von Binnenschiffen entwickelt, validiert und angewendet werden. Basierend auf der gefahrenen Strecke und den zugrunde liegenden Schiffstypen, d. h. unter Berücksichtigung der strömungs- und fahrdynamischen Randbedingungen, wird die Motorbelastung und die hieraus folgende Emission ermittelt. Das zu entwickelnde Berechnungsmodell wird modular aufgebaut, sodass je nach Kenntnis- und Entwicklungsstand einzelne Module verbessert bzw. je nach Datenverfügbarkeit passend ausgewählt werden können. So können zum Beispiel Emissionen für Fahrzeuge und Streckenabschnitte ermittelt werden, für die bisher keine Messungen vorliegen. Das Modell umfasst aufeinander aufbauende Module

- zur Abschätzung des Widerstands in Abhängigkeit der Schiffs- und Umgebungsbedingungen auf Basis vereinfachter Modelle oder numerischer Verfahren,
- zur Berechnung der Propulsionsgüte in Abhängigkeit des Schiffseinflussgrads, der Anordnung und des Wirkungsgrads der Propulsionsorgane auf Basis von numerischen Verfahren,
- zur Ermittlung der Maschinenleistung durch Berücksichtigung mechanischer und sonstiger Verluste sowie
- zur Ermittlung der Schiffsemissionen basierend auf Motorkennfeldern und spezifischen Kraftstoffverbräuchen gemäß den Angaben von Motorenherstellern oder auf Basis eines numerischen Motorenmodells.

Zur Validierung des Binnenschiffsemissionsmodells bzw. einzelner Module des Modells dienen von der BAW im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerkes bereits erhobene (Walz 2019) sowie bevorstehende Real-Driving-Emissionsmessungen. Die Messungen erfolgen unter realen Bedingungen auf unterschiedlichen Schiffen und Strecken und beinhalten vielfältige Manöver.

Die Anwendung des Modells in Verbindung mit Daten des Automatic Identification Systems (AIS), welche seit dem 18. April 2019 von der BAW deutschlandweit aufgezeichnet werden, dient zur Ermittlung der Gesamtemission der Schiffsflotte für ausgewählte Regionen und Zeiträume, aber auch der eines Einzelfahrzeugs entlang einer gefahrenen Route. Für letztgenannte kann mithilfe des Modells die Wirksamkeit emissionsmindernder Betriebsmaßnahmen wie dem sogenannten „slow steaming“ oder technischer Maßnahmen durch Nachrüsten von Filtern und Katalysatoren direkt ermittelt werden.

## 4 Ergebnisse

Das FuE-Projekt Binnenschiffsemissionen in Kooperation mit dem ISMT der Universität Duisburg-Essen startete im August 2019. Derzeit liegen noch keine Ergebnisse des Projektes vor.

### Literatur:

Corbett, J. J.; A. L. Robinson (2001): Measurements of NO<sub>x</sub> Emissions and In-Service Duty Cycle from a Towboat Operating on the Inland River System. In: ES&T (35), 1343–1349.

EU (2016): Verordnung (EU) 2016/1628 des europäischen Parlaments und des Rates. Amtsblatt der Europäischen Union. L 252/3.

IFEU (2018): TREMOD 5.82 – Transport Emission Model, im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau/Heidelberg: Eigenverlag.

Pillot, D.; Guiot, B.; Le Cottier, P.; Perret, P.; Tassel, P. (2016): Exhaust emissions from in-service inland waterways vessels. In: Journal of Earth Science and Geotechnical Engineering, 6 (4), 205–225.

Walz, C. (2019): Minderung verkehrsbedingter stofflicher Belastungen in Luft, Wasser und Boden – Betriebliche und technische Optimierungen in der Binnenschifffahrt, BAW (Hg): Forschung Xpress 53/2019.



Foto: A. Plüß, 2006

## SMMS

Stratigraphische Modellkomponenten zur Verbesserung von hochaufgelösten und regionalisierten morphodynamischen Simulationsmodellen (SMMS)

Teilprojekt: Anwendung und gebrauchstaugliche Nutzung stratigraphischer Daten für morphodynamische Multi-Modell-Simulationen

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Ausgehend vom Gesamtziel des Verbundvorhabens, dem Aufbau und der Plausibilisierung einer datenbasierten stratigraphischen Modellkomponente im Rahmen des Funktionalen Bodenmodells und der Nutzung dieser Daten in prozessbasierten hydro- und morphodynamischen Simulationsmodellen fokussiert dieses Teilprojekt vor allem auf die Bildung einer qualitätsgesicherten Datenbasis. Der Antragsteller (smile consult GmbH) und die BAW als forschende Oberbehörde haben durch ihre fortlaufenden Aufgaben auch sedimentologische Daten des Bodens (Oberflächensedimente und vertikale Sedimentverteilung aus Bohrungen (die stratigraphischen Daten)) zusammengetragen, die im Rahmen dieses Teilprojektes gesichtet, aufbereitet und dem Verbundprojekt verfügbar gemacht werden.

Neben dem Aufbau der stratigraphischen Komponente besteht ein wesentliches Ziel des Projektes darin, den praxistauglichen Einsatz der hier abgeleiteten Produkte durch den Einsatz verschiedener hydro- und morphodynamischer Simulationsmodelle unterschiedlicher Ausprägung nachzuweisen. Der räumliche Fokus liegt hierbei auf dem Gebiet der Deutschen Bucht mit den sandigen Küsten, den vorgelagerten Inseln, den Watten sowie den Ästuarmündungen.

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

In enger Abstimmung mit den assoziierten Partnern und insbesondere der projektbegleitenden Gruppe des KFKI werden Fokusgebiete ausgewählt, an denen zum Einen die entwickelten Interpolationsverfahren des datenbasierten stratigraphischen Modells geprüft und weiterentwickelt und zum Anderen die morphodynamischen Simulationsmodelle auf ganz konkrete Fragestellungen des Küsteningenieurwesens/Ästuardynamik angewendet werden.

#### Auftragsnummer:

B3955.02.04.70233

#### Auftragsleitung:

Dr. Andreas Plüß  
 andreas.pluess@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Dr. Katharina Müller-Navarra  
 katharina.mueller-  
 navarra@baw.de

#### Laufzeit:

2019 bis 2021

### 3 Untersuchungsmethoden

Basierend auf den bathymetrischen und oberflächensedimentologischen Modellkomponenten sollen zunächst die verfügbaren stratigraphischen Naturdaten zusammengetragen, qualitätsgesichert und homogenisiert werden (Basisdaten). Hierzu werden die in der BAW und den WSÄ vorhandenen Bohrungen (etwa 3.000 Bohrungen) gesichtet und aus der analogen Form (Papierform, Bild 1) in ein digital zu verarbeitendes Format überführt. Dabei sind die zum Aufnahmezeitpunkt (zurück bis in die 1960er Jahre) geltenden Normen, Vorschriften und Bezeichnungen (DIN EN ISO 14688-1:2018 bis DIN 4022: 1938-04) zu beachten.

Zugleich werden die Daten dokumentiert (Metadaten), harmonisiert und mit lithologisch vergleichbaren Daten der näheren Umgebung qualitätsgesichert. Hierzu werden Bohrungen aus anderen Projekten wie z. B. „Geopotential Deutsche Nordsee“ (GPDN) herangezogen, aber auch Daten aus Behörden wie dem „Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume“ (LLUR) und dem „Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrografie“ (BSH) berücksichtigt. Zurzeit sind im Arbeitsgebiet (mit einer Fläche von ca. 10.000 km<sup>2</sup>) über 19.000 Bohrungen enthalten. Die Phase der Zusammenstellung und Homogenisierung der Datengrundlage ist gegenwärtig in Arbeit und noch nicht abgeschlossen.

Die BAW wird morphodynamische Berechnungen unter Wirkung von Tidedynamik sowie Salz- und Sedimenttransport mit den Modellierungssystemen UnTRIM/SediMorph sowie zur Qualitätssicherung mit DELFT3D/MOR durchführen (Plüß und Milbradt 2014). Als Projektpartner wird die smile consult GmbH Vergleichsuntersuchungen mit MARINA betreiben.

### 4 Ergebnisse

Die Ansprachen der Bohrungen sind von unterschiedlichsten Bearbeitern über die Jahre – abhängig vom Zweck der abgeteufte Bohrung – in ihrer Qualität und Genauigkeit höchst divers. Zudem können Höhen- und Lagebezüge ganz fehlen oder ungenau sein. Ein, wenn im Sediment vorhanden, verlässlich protokolliertes homogenes, organogenes Sediment bilden die Torfe, welche sich abhängig von holozänen Meeresspiegelschwankungen in Küstennähe bei steigendem Grundwasser flächenhaft bilden konnten (Streif 1990).

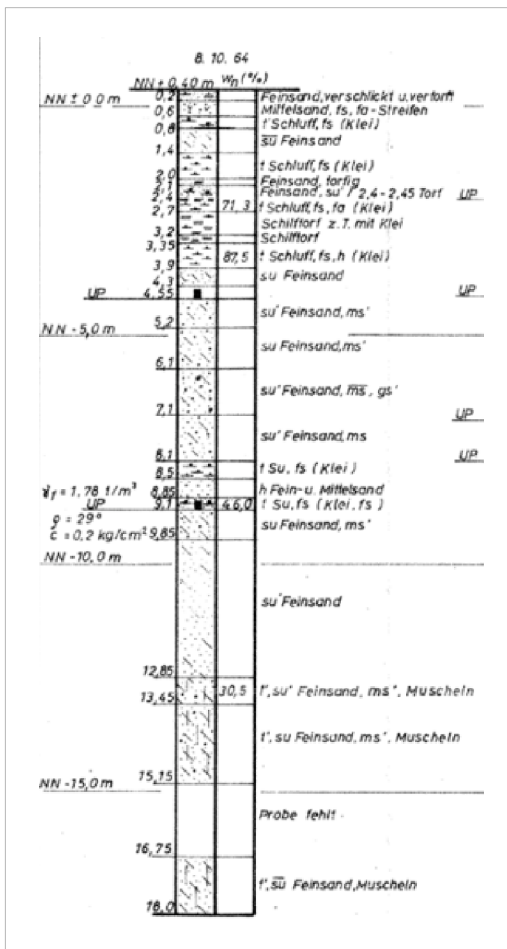


Bild 1:  
Bohransprache einer einzelnen Bohrung aus einem BAW-Gutachten im Rahmen der Eiderabdämmung 1964. Aufgeführt sind neben der linguistischen Ansprache der einzelnen Schichten auch Laborkennwerte.

Im Gegensatz zu dieser homogenen Schicht lassen sich die Siliziklastika in ihrer Heterogenität über kürzeste Distanzen – verursacht durch Rinnenverlagerung, durch transgressive und regressive sedimentäre Abfolgen und zuletzt auch durch anthropogene Eingriffe in den küstennahen Naturraum – basierend auf einer geologischen Perspektive nur interpretativ korrelieren. Daten aus reflexionsseismischen Verfahren werden hier unterstützend mit eingebunden. Diese stellen ein weiteres Hilfsmittel zur Detektion von homogenen Schichten innerhalb der lithostratigraphischen Abfolge dar.

Die Gesamtheit an Naturmessungen in ihrer noch divers vorliegenden Qualität birgt ein hohes Potential, die Bildungsbedingungen des flacheren Untergrundes der Nordseeküste zu verstehen und damit auf die zukünftige Variabilität dieses dynamischen Systems mit den entsprechenden bautechnischen Maßnahmen reagieren zu können.

#### Literatur:

Plüß, A.; Milbradt, P. (2014): Morphodynamic evolution in the mouth of the Elbe estuary. In: Lehfeldt & Kopmann (eds): ICHE-2014 Hamburg, BAW, ISBN 987-939230-32-8, 7 S.

Reineck, H.-E. (1958): Longitudinale Schrägschichtung im Watt. Geologische Rundschau, 47, S. 73–82.

Streif, H. (1990): Das ostfriesische Küstengebiet. Sammlung geologischer Führer, 57, 376 S.



## Prozessintegration und Performanzsteigerung des biogeochemischen Modells der Tideelbe

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Eingriffe an Gewässern unterliegen heute hohen Umweltauflagen und dem kritischen Blick von potentiellen Einwendern. Um Maßnahmen erfolgreich zu planen und durchzuführen, sind daher immer aufwändigere Untersuchungskonzepte notwendig, die auch ein verbessertes Systemverständnis voraussetzen. Gerade an der Tideelbe mit ihren sommerlichen Sauerstoffmangelsituationen werden Maßnahmen, wie zum Beispiel Umlagerungen, kritisch beobachtet.

Das in den vorangegangenen FuE-Projekten entwickelte hydrodynamisch-biogeochemische Modell der Tideelbe (A39550370190, B3955.03.04.70228) bietet die Möglichkeit, Maßnahmen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf gewässerökologische Größen, wie z.B. Sauerstoffgehalt oder Nährstofftransport, systematisch und einheitlich zu untersuchen. An diese Arbeiten soll nun angeknüpft werden, um unter anderem biogeochemische Einflüsse auf den partikelgebundenen Transport zu untersuchen. Durch Flokkulation verändern sich die Größe und somit auch das Sedimentationsverhalten von Partikelaggregaten im Ästuar. Bisherige Modelle sind stark auf physikalische Prozesse ausgerichtet und vernachlässigen mögliche wichtige biogeochemische Einflussgrößen. Dies soll nun untersucht und ein entsprechendes Modell entwickelt werden.

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

Umlagerungen im Bereich des Ästuars unterliegen sowohl ökonomischen als auch ökologischen Zwängen. Baggerungen sind nicht nur teuer, sie haben unter Umständen auch weitreichende ökologische Auswirkungen. Ganz direkt wird zum Beispiel durch Trübungsfahren das Lichtklima im Gewässer verändert, was Auswirkungen auf die aquatischen Organismen hat. Zusätzlich können auch sedimentgebundene Schadstoffe remobilisiert werden. Es ist daher wichtig, das Verhalten von Feststoffpartikeln und damit auch ihre Transportwege besser zu verstehen und im Modell abzubilden. So können in

#### Auftragsnummer:

B3955.03.04.70239

#### Auftragsleitung:



Dr. Norbert Winkel  
 Norbert.Winkel@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Dr. Arne Hammrich  
 Arne.Hammrich@baw.de

#### Laufzeit:

2019 bis 2021

Zukunft wirtschaftliche und ökologische Aspekte besser in Einklang gebracht werden. Die langfristige Bereitstellung und technische Weiterentwicklung des gekoppelten Modells der Tideelbe für den Projektbetrieb stellt dabei auch einen Schritt in Richtung operationell arbeitender Modelle dar.

### 3 Untersuchungsmethoden

Es kommen ausschließlich numerische Methoden zur Anwendung. Die hydrodynamischen Berechnungen werden mit dem numerischen Verfahren UNTRIM2 (Casulli und Stelling 2011) durchgeführt. Für die anschließende biogeochemische Simulation werden die hydrodynamischen Ergebnisse offline an die Modellumgebung D-Water Quality (Deltares 2019) gekoppelt. Im Rahmen der angestrebten Performanzsteigerung ist zusätzlich eine Kopplung an die Modellumgebung FABM (Bruggeman und Bolding 2014) geplant.

Die Ausgabe der Ergebnisdateien erfolgt im Format UGRID NetCDF, dies ermöglicht die Nutzung der standardisierten Workflows und Tools der BAW. So kann eine langfristige qualitätsgesicherte und dokumentierte Verwertung der Modellergebnisse sichergestellt werden.

### 4 Ergebnisse

Derzeit wird eine Testumgebung aufgebaut, mit der die biogeochemischen Modelle getestet werden können. Dazu wird zunächst eine vereinfachte hydraulische Umgebung der Elbe (Holzwarth und Wirtz 2018) mit UNTRIM berechnet; anschließend werden die Ergebnisdateien an das eigentliche biogeochemische Modell gekoppelt.

In ersten Tests konnte die Kopplung mit einem Modell zur Berechnung des Wasseralters erfolgreich getestet werden. Der nächste Schritt ist die Portierung dieser Testumgebung auf den Hochleistungsrechner der BAW in Hamburg. Dies ist die Voraussetzung für eine performante Berechnung zukünftiger Modelle. Das Modell wird dann sukzessive erweitert und getestet. Ziel ist es, ein dreidimensionales biogeochemisches Modell der Tideelbe aufzubauen, welches performant auf dem Hochleistungsrechner rechnet, und es in den Standard-Workflow der BAW zu integrieren.

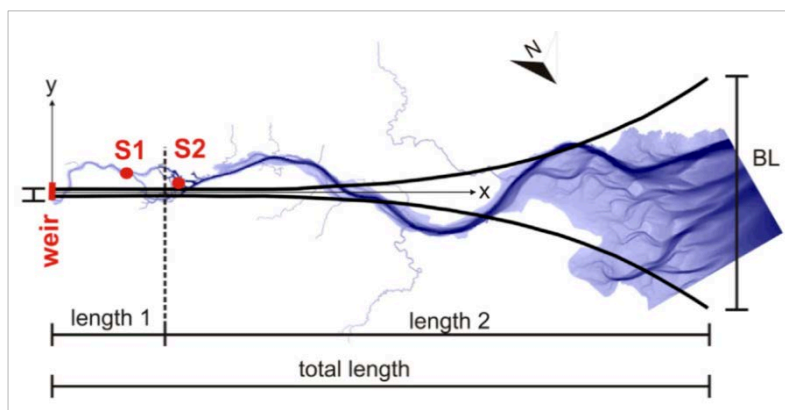


Bild 1: Vereinfachtes eindimensionales Modell der Tideelbe (Holzwarth und Wirtz 2018). Das Modell dient als Testumgebung für biogeochemische Kopplungen.

#### Literatur:

Bruggeman, J.; Bolding, K. (2014): A general framework for aquatic biogeochemical models. In: *Environmental Modelling & Software*, 61, S. 249–265.

Casulli, V.; Stelling, G. S. (2011): Semi-implicit subgrid modelling of three-dimensional free-surface flows. In: *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 67, 4, S. 441–449.

Deltares (2019): D-Water Quality, User Manual. Online verfügbar unter [https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/D-Water\\_Quality\\_User\\_Manual.pdf](https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/D-Water_Quality_User_Manual.pdf).

Holzwarth, I.; Wirtz, K. (2018): Anthropogenic impacts on estuarine oxygen dynamics. A model based evaluation. In: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 211, S. 45–61.



**Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)**

Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe  
Telefon: +49 (0) 721 9726-0  
Telefax: +49 (0) 721 9726-4540

Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg  
Telefon: +49 (0) 40 81908-0  
Telefax: +49 (0) 40 81908-373

[www.baw.de](http://www.baw.de)