

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Periodical Part, Published Version

**Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.)**

## **Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2021**

BAWForschungskompodium

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/108618>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2022): Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2021. 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.

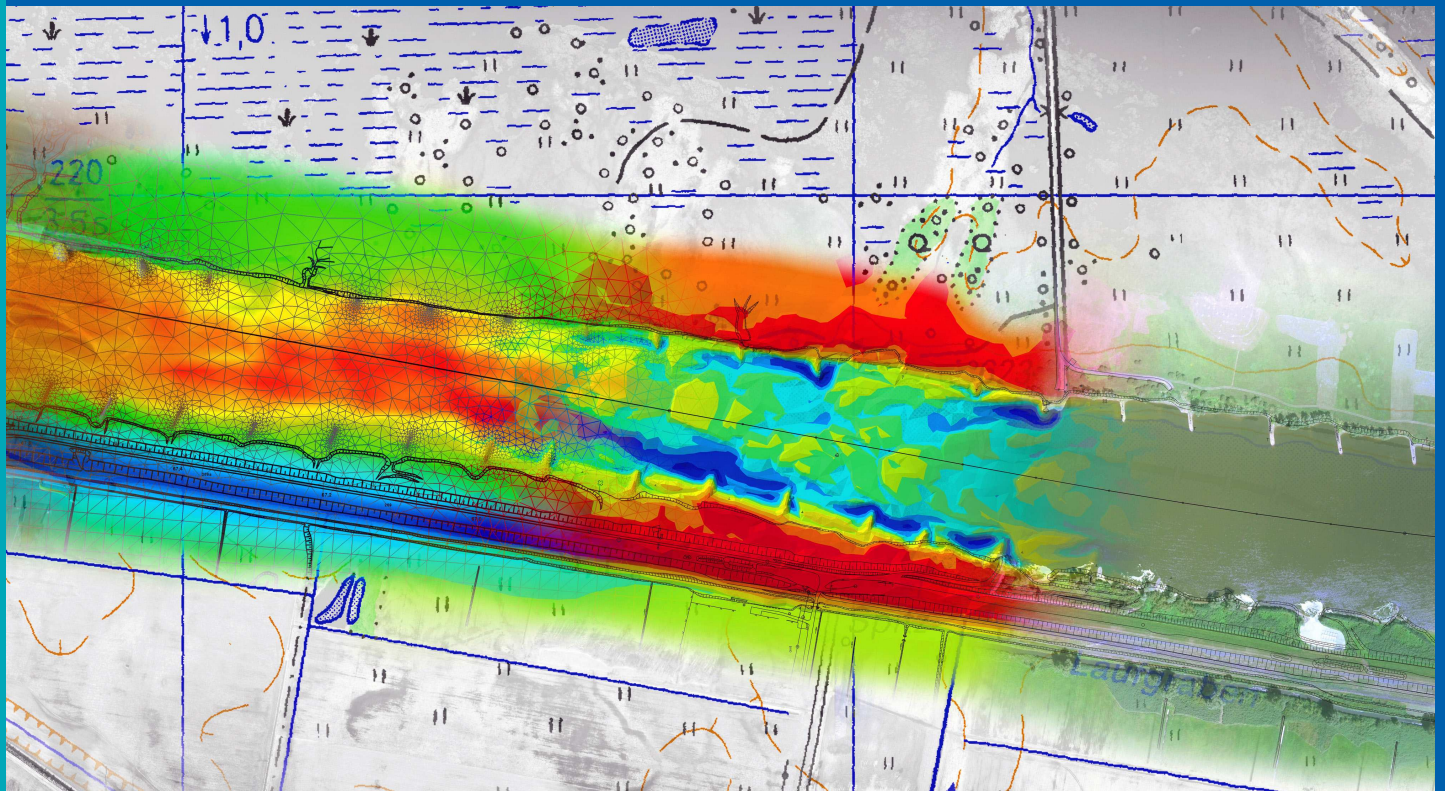
Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply;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



# Forschungskompodium

Verkehrswasserbau

2021





## 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 · Februar 2022

# Forschungskompodium

Verkehrswasserbau

# 2021





# Die neue Forschungsstrategie Verkehrswasserbau der BAW

Liebe Leserin, lieber Leser,

mit der BAW-Strategie 2030 hat die BAW im Jahr 2019 ihre fachlichen und organisatorischen Ziele für die nächste Dekade festgelegt. Darin stellen wir dar, wie wir unsere Position als das wissenschaftliche Kompetenzzentrum für den Verkehrswasserbau und den Spezialschiffbau in Deutschland weiter ausbauen wollen. Damit legen wir die Basis für unsere anspruchsvollen Beratungsleistungen, vorrangig für das Bundesministerium für Digitales und Verkehr und die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes.

Eine wichtige Voraussetzung für unsere Dienstleistungen nach dem Stand von Wissenschaft und Technik sind die Ergebnisse unserer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Dienstleistungen und Forschungsleistungen müssen eng miteinander verknüpft werden. Zu diesem Zweck haben wir die Ausrichtung unserer Forschung und Entwicklung im Jahr 2021 neu fixiert und in der Forschungsstrategie Verkehrswasserbau festgeschrieben. Die Forschungsstrategie ist damit die Ausgestaltung unserer BAW-Strategie 2030 bezüglich Forschung und Entwicklung.

Die inhaltlichen Schwerpunkte unserer Forschungsstrategie Verkehrswasserbau kommen in den drei Forschungsfeldern zum Ausdruck:

- Wasserstraßeninfrastruktur erhalten und weiterentwickeln,
- Wasserstraßen umweltgerecht gestalten,
- Mobilität auf den Wasserstraßen fördern.

Mit der Forschungsstrategie zeigen wir auch, wie in der BAW geforscht wird. Wie wird die hohe Qualität der Forschung gewährleistet? Welche Methoden kommen zum Einsatz? Wie erfolgt die Vernetzung mit anderen wissenschaftlichen Einrichtungen? Wie werden die Möglichkeiten des digitalen Wandels genutzt? Wie werden die Forschungsergebnisse an die verschiedenen Zielgruppen kommuniziert?

Ein bewährtes Kommunikationsmittel ist das jährlich erscheinende Forschungskompodium Verkehrswasserbau, das einen vollständigen Überblick über die im Berichtsjahr neu begonnenen, laufenden und abgeschlossenen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben gibt.

Wir wünschen Ihnen eine interessante Lektüre.

Ihre



Prof. Dr.-Ing. Christoph Heinzelmann  
Leiter der BAW



Dr.-Ing. Jan Kayser  
Forschungsbeauftragter der BAW

Karlsruhe, im Februar 2022



# 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

In der Forschungsstrategie Verkehrswasserbau werden die Ziele der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der BAW für die kommenden Jahre dargestellt. Die konkreten Themen ergeben sich dabei aus den technischen, politischen und gesellschaftlichen Herausforderungen, die für den Verkehrswasserbau relevant sind. Diese Themen werden mit den übergeordneten Forschungsfeldern

- Wasserstraßeninfrastruktur erhalten und weiterentwickeln
- Wasserstraßen umweltgerecht gestalten
- Mobilität auf den Wasserstraßen fördern

in den fachwissenschaftlichen Kontext der BAW eingeordnet. Die Forschungsfelder passen sich in den Ressortforschungsrahmen ein, mit dem das BMDV seine Forschungsziele und Forschungsschwerpunkte beschreibt.

Zwischen den Forschungsfeldern bestehen intensive Wechselwirkungen und es ist zu erwarten, dass diese Wechselwirkungen zukünftig noch zunehmen werden. Eine Stärke der BAW ist es, die Fragestellungen des Verkehrswasserbaus mit seinen klassischen Disziplinen der Bautechnik, der Geotechnik und des binnenländischen und maritimen Wasserbaus fachübergreifend zu bearbeiten.

In allen Forschungsfeldern werden auch die großen Herausforderungen adressiert, die sich der BAW aus dem Klimawandel und aus der Digitalisierung heraus ergeben.

### 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 BMDV-Expertennetzwerk 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 BMDV 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 BMDV 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 2021

Personalausgaben:	34.515 T€
Sächliche Verwaltungsausgaben inkl. IT:	20.652 T€
Bauinvestitionen:	252 T€
Investitionen in Geräte und Anlagen inkl. IT:	4.424 T€
<b>Summe Ausgaben:</b>	<b>59.843 T€</b>
<b>Einnahmen:</b>	<b>2.911 T€</b>

### 5 Finanzplanung 1203 Tgr. 02

Angaben in T€

2021 Ist	2022 Soll	2023 Soll	2024 Soll
16.572	11.954	11.954	11.954

davon BAW

2021 Ist	2022 Soll	2023 Soll	2024 Soll
6.852	5.977	5.977	5.977



## 6 Personal

	2019	2020	2021
Beamte	62	63	63
Tarifbeschäftigte	397	420	418
Auszubildende	11	11	10
<b>Beschäftigte gesamt</b>	<b>470</b>	<b>494</b>	<b>491</b>

Neben dem Stammpersonal werden im Bereich Forschung und Entwicklung 82 befristet beschäftigte Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter eingesetzt. Davon sind 11 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter im Rahmen des Expertennetzwerks beschäftigt.

## 7 Anteil Forschung und Entwicklung

	2019	2020	2021
Anteil FuE/externe Produkte	28,4	28,1	28,7

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

## 8 2021 – Daten und Fakten

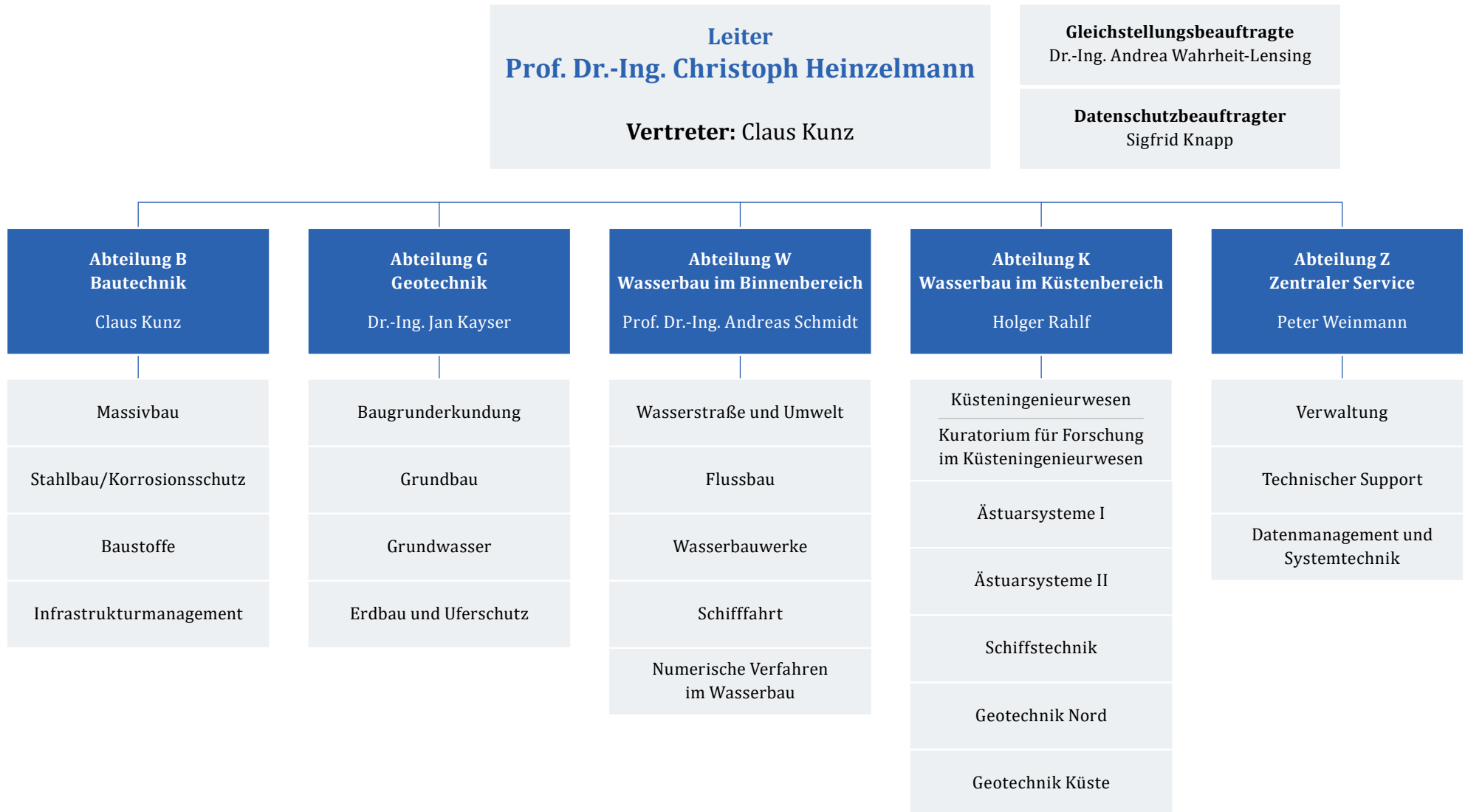
- Tätigkeiten in Ausschüssen: 255
- Promotionen: 2
- Veröffentlichungen und Vorträge: 137
- Lehraufträge: 8
- Forschungsvorhaben: 130
  - beendet: 16
  - laufend (neu + aktiv): 114
- Veranstaltungen: 7  
(3 Kolloquien und 4 Aussprachetage mit insges. 1.383 Teilnehmern (1.049/334))

## 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 BMDV. 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 2021

<b>Titel</b>	<b>Auftragsnummer FuE-Vorhaben</b>	<b>Referat</b>	<b>Forschungs- feld*</b>	<b>Seite</b>
Risikoklassifikation von Verkehrswasserbauwerken	B3951.04.04.70002	B4	I	3
Tragfähigkeitskennzahlen für bestehende Konstruktionen	B3951.04.04.70003	B4	I	5
Geohydraulik Schleuse Hessigheim. Die Wechselwirkungen zwischen Bauwerk, Grundwasserströmung und Gips im Baugrund	B3952.03.04.70008	G3	I	7
Zuverlässigkeitsbasierte Deckwerksbemessung	B3952.04.04.70009	G4	I	9
Langfristsimulation in Fließgewässern	B3953.05.04.70004	W5	I	11
Integration von Zuverlässigkeitsanalysen in die hydro- und morphodynamische Modellierung von Binnenwasserstraßen	B3953.05.04.70005	W5	I	13
Datenmanagement und Qualitätssicherung im Verkehrswasserbau (DMQS) 2.0	B3954.07.04.70006	Z3	I	15
An- und Ablegemanöver großer Schiffe in der Schiffsführungssimulation	B3955.01.04.70233	K1	M	17

\* 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- feld*</b>	<b>Seite</b>
Reliability Analysis of Existing Hydraulic Structures	B3951.00.04.70002	B0	I	21
Numerische Untersuchungen an massiven Wasserbauwerken. Nachweiskonzeption: Unbewehrte Bauteile unter Teilflächenbelastung	B3951.01.04.70006	B1	I	23
Monitoring für massive Wasserbauwerke	B3951.01.04.70007	B1	I	25
Einsatz von Fertigteilen im massiven Verkehrswasserbau	B3951.01.04.70008	B1	I	27
Entwicklung eines Bemessungskonzeptes für den Nachweis der Tragfähigkeit von Schlauchwehrmembranen	B3951.02.04.70007	B2	I	29
Bemessung galvanischer Anoden im Stahlwasserbau	B3951.02.04.70008	B2	I	31
Mikrobiell induzierte Korrosion. Ermittlung von Ursachen, Nachweismöglichkeiten und Vorhersage	B3951.02.04.70010	B2	I	33
Ermittlung der Systemtragfähigkeit unter Berücksichtigung von Schädigungsgraden an Stahlwasserbauten	B3951.02.04.70011	B2	I	35
Beständigkeit von Korrosionsschutzbeschichtungen. Zeitlicher Verlauf der Unterrostung im Salzsprühnebel	B3951.02.04.70012	B2	U	37
Frostwiderstand zementgebundener Baustoffe	B3951.03.04.08099	B3	I	39
Messverfahren Hydratationswärme	B3951.03.04.70004	B3	I	41
Betone für Verkehrswasserbauwerke mit Hydroabrasionsbeanspruchung	B3951.03.04.70008	B3	I	43
Instandsetzung von Schleusenanlagen unter Betrieb (IuB)	B3951.03.04.70011	B3	I	45
Chemischer Angriff auf Gründungselemente. Betontechnische Belange	B3951.03.04.70015	B3	I	47
Betonstahlkorrosion in Rissbereichen von Verkehrswasserbauwerken	B3951.03.04.70016	B3	I	49
Instandsetzungssysteme aus textilbewehrten Mörteln und Betonen für Wasserbauwerke	B3951.03.04.70017	B3	I	51

<sup>1</sup> (Stand: 01.01.2022)

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

<b>Titel</b>	<b>Auftragsnummer FuE-Vorhaben</b>	<b>Referat</b>	<b>Forschungs- feld*</b>	<b>Seite</b>
Frischbetonfeuchtesonden. Anwendbarkeit bei ZTV-W-Betonen	B3951.03.04.70018	B3	I	53
Entwicklung und Anpassung von AKR-Performance-Prüfungen	B3951.03.04.70019	B3	I	55
Resilienz kritischer Verkehrsinfrastrukturen am Beispiel der Wasserstraßen	B3951.04.04.70006	B4	I	57
Ausschreibung, Vergabe und Abrechnung von Bauleistungen im Verkehrswasserbau	B3951.04.04.70007	B4	I	59
Tragfähigkeitsorientierte Bewertung von Bauwerksschäden	B3951.04.04.70008	B4	I	61
Innovative Methoden zur Zustandserfassung. Eine Handlungsempfehlung für den Einsatz im Rahmen der Bauwerksinspektion	B3951.04.04.70009	B4	I	63
Fuzzy-FMEA zur Steigerung der Aussagefähigkeit von Inspektionsergebnissen	B3951.04.04.70010	B4	I	65
Strukturierung und Verbesserung von Bestandsunterlagen der DVtU mit maschinellem Lernen und KI	B3951.04.04.70011	B4	I	67
Numerik für Boden-Wasser-Wechselwirkung	B3952.00.04.70001	G3	I	69
Ermittlung geotechnischer Parameter aus geophysikalischen Messungen	B3952.01.04.70003	G1	I	71
GeoValML – Das interoperable Austauschformat für boden- und felsmechanische Kennwerte	B3952.01.04.70004	G1	I	73
Böden unter Stoßbelastung	B3952.02.04.10014	G2	I	75
Modellierung der Verformung nichtbindiger Böden unter zyklischer Belastungseinwirkung von Schleusenbauwerken	B3952.02.04.10045	G2	I	77
Ermittlung charakteristischer Kennwerte veränderlicher Gesteine unter Berücksichtigung des Porenwasserdrucks	B3952.02.04.70005	G2	I	79
Chemischer Angriff auf geotechnische Elemente – Veränderung der Grenztragfähigkeit	B3952.02.04.70006	G2	I	81

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

<b>Titel</b>	<b>Auftragsnummer FuE-Vorhaben</b>	<b>Referat</b>	<b>Forschungs- feld*</b>	<b>Seite</b>
Untersuchung des Bodeneintrags in den Frischbeton von Ortbetonbohrpfählen	B3952.02.04.70007	G2	I	83
3D-Baugrundsichtenmodell	B3952.02.04.70008	G0	I	85
Erfassung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit mittelst dreidimensionaler FE-Berechnungen in der Geotechnik	B3952.02.04.70009	G2	I	87
Kolmation als Schlüsselgröße der Wechselwirkung Oberflächenwasser – Grundwasser	B3952.03.04.70003	G3	U	89
Interaktion Oberflächenwasser-Grundwasser in den tidebeeinflussten Gebieten der deutschen Nordseeästuare	B3952.03.04.70004	G3	U	91
Chemischer Angriff auf geotechnische Elemente	B3952.03.04.70005	G3	I	93
Hydraulischer Widerstand feinkörniger Böden	B3952.03.04.70006	G3	I	95
Geohydraulische Anisotropie des Untergrundes. Ein neuer Ansatz: Kopplung experimenteller und numerischer Untersuchungsmethoden	B3952.03.04.70007	G3	U	97
Mikroplastik als OW-GW-Indikator. Beurteilung und Bewertung der Interaktion von Oberflächenwasser und Grundwasser an Bundeswasserstraßen	B3952.03.04.70009	G3	U	99
Bestandsaufnahme vorhandener Deckwerke	B3952.04.04.10006	G4	I	101
Technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen	B3952.04.04.10151	G4	U	103
Filterstabilität grober Gesteinskörnungen	B3952.04.04.70001	G4	I	105
Wellen-induzierte Porenströmungen im Gewässerbett und ihre Auswirkungen auf Erosionsprozesse	B3952.04.04.70008	G4	I	107
Entwicklung definiert abbaubarer Geotextilien zur Anwendung als temporäre Filter in technisch-biologischen Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen	B3952.04.04.70011	G4	U	109
Erosion bindiger Böden. Bestimmung der Erosionseigenschaften von Dichtungstonen	B3952.04.04.70012	G4	I	111

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

<b>Titel</b>	<b>Auftragsnummer FuE-Vorhaben</b>	<b>Referat</b>	<b>Forschungs- feld*</b>	<b>Seite</b>
Porenwasserüberdruck im Gewässerbett. Erste Versuchsergebnisse zu Porenwasserüberdrücken und Durchlässigkeiten	B3952.04.04.70013	G4	I	113
Wurzeln zur Ufersicherung an Binnenwasserstraßen. Berücksichtigung im Nachweis der lokalen Standsicherheit	B3952.04.04.70014	G4	U	115
Bestimmung der Widerstandsfähigkeit von Deichen. Laborversuche und Numerische Modellierung	B3952.05.04.70318	K5	I	117
Störung des Baugrundes durch Kampfmittelsondierungen	B3952.05.04.70362	K5	I	119
Festigkeiten nichtbindiger Böden	B3952.05.04.70390	K5	I	121
Rückverankerung mit Stahlrammpfählen	B3952.05.04.70410	K5	I	123
Wissensbasierte Prognose der äußeren Tragfähigkeiten von Rückverankerungselementen	B3952.05.04.70420	K5	I	125
Deckwerksanalyse mit der Diskrete-Elemente-Methode	B3952.06.04.70270	K5	I	127
Bestimmung des Tragverhaltens von offenen Stahlrohrpfählen. Zur Regeneration der axialen Pfahltragfähigkeit	B3952.06.04.70378	K6	I	129
Strömungsvergleichmäßigung in Dotationsbecken. Einleitung von Dotation in Fischaufstiegsanlagen mit geringem Platzbedarf	B3953.01.04.70006	W1	U	131
Berücksichtigung zeitabhängiger Strömungsprozesse bei der Beurteilung der Hydraulik von Fischaufstiegsanlagen	B3953.01.04.70008	W1	U	133
Fischabstieg an Wehranlagen – Untersuchungen zur Mehrphasenströmung beim Wehrüberfall	B3953.01.04.70009	W1	U	135
Modellierung aufwärtsgerichteter Fischwanderung im Kraftwerksunterwasser	B3953.01.04.70010	W1	U	137
DANUBIUS-RI. Etablierung einer europäischen Forschungsinfrastruktur zu Fluss-Meer-Systemen	B3953.02.04.70007	W2	U	139
Abbildung der Rauheitswirkung von Vorlandvegetation in der HN-Modellierung von Bundeswasserstraßen	B3953.02.04.70008	W2	U	141

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

<b>Titel</b>	<b>Auftragsnummer FuE-Vorhaben</b>	<b>Referat</b>	<b>Forschungs- feld*</b>	<b>Seite</b>
Wirkungen veränderter klimatischer Randbedingungen auf die Bundeswasserstraßen. Forschungsphase 2 des BMDV-Expertennetzwerks	B3953.02.04.70009	W2	I	143
Hydraulische und morphodynamische Untersuchungen in Krümmungsstrecken mit Geschiebetransport	B3953.02.04.70010	W2	I	145
Koordinierte Bewirtschaftung von Staustufenketten - Modellierung und Betrieb	B3953.03.04.70003	W3	I	147
Entwicklung von Verfahrensweisen zur Simulation bewegter Objekte mit OpenFOAM (R)	B3953.03.04.70004	W3	I	149
Fluid-Struktur-Wechselwirkung im Stahlwasserbau: Ursachen, Auswirkungen und Abhilfemaßnahmen bei strömungsinduzierten Schwingungen.	B3953.03.04.70006	W3	I	151
Aktualisierung der Kriterien für die hydraulische Bemessung von Schleusen	B3953.03.04.70007	W3	I	153
Resiliente Abfluss- und Stauregelung der Wasserstraßen bei extremen Niederschlagsereignissen	B3953.03.04.70008	W3	I	155
Einwirkung des Propellerstrahls auf die Gewässersohle	B3953.04.04.10038	W4	I	157
Binnenschiffsführungssimulation – Referenzschiff und Schubverband	B3953.04.04.70003	W4	M	159
Fast-Time-Simulation von Binnenschiffen mit FaRAO	B3953.04.04.70008	W4	M	161
HN-Modellierung von Binnenschiffsbelastungen auf Ufer und Sohle	B3953.04.04.70009	W4	M	163
Minderung verkehrsbedingter stofflicher Belastungen in Luft, Wasser und Boden – Betriebliche und technische Optimierungen in der Binnenschifffahrt	B3953.04.04.70011	W4	U	165
AIS-basierte Bewertung des Schiffsverkehrs	B3953.04.04.70012	W4	M	167
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	169
Projekt SCIPPER. SchleusenassIstenzsystem basierend auf PPP und VDES für die Binnenschifffahrt	B3953.04.04.70014	W4	M	171

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

<b>Titel</b>	<b>Auftragsnummer FuE-Vorhaben</b>	<b>Referat</b>	<b>Forschungs- feld*</b>	<b>Seite</b>
Entwicklung eines Verkehrssimulationsmodells auf Binnenwasserstraßen. Untersuchung des Verkehrsflusses mit KI-Anwendung	B3953.04.04.70015	W4	M	173
Automatisierung in der Binnenschifffahrt. Entwicklung einer virtuellen Testumgebung	B3953.04.04.70016	W4	M	175
Binnenschiffsemissionen (BinEm). Entwicklung eines Verfahrens zur Berechnung von Binnenschiffsemissionen	B3953.04.04.70017	W4	U	177
Verkehrswirtschaftliche Analysen in der Binnenschifffahrt. Im Rahmen des BMDV-Expertennetzwerks Wissen – Können – Handeln	B3953.04.04.70018	W4	M	179
Implementierung numerischer Verfahren für flussbauliche Fragestellungen in der Entwicklungsumgebung DUNE	B3953.05.04.70006	W5	I	181
RiverCloud – UAV/USV-Tandemsystem für Management und Unterhaltung von Wasserstraßen	B3953.05.04.70007	W5	I	183
IMMERSE. Implementing MeasurEs for Sustainable Estuaries, a North Sea Region Program	B3955.00.04.70001	K0	I	185
Maßstabseffekte im schiffbaulichen Modellversuch	B3955.01.04.70174	K1	M	187
SafeZone: Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs	B3955.01.04.70226	K1	M	189
Probabilistische Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen (ProbBem)	B3955.01.04.70234	K1	I	191
Direkte Identifikation der Manövriereigenschaften eines Schiffes aus Fahrtaufzeichnungen im Betrieb	B3955.01.04.70235	K1	M	193
Schiffserzeugte Belastung von Seeschiffen (Integra3D)	B3955.01.04.70379	K1	M	195
Numerische Simulation der Schiffswelle-Struktur-Interaktion (Num SiSSI)	B3955.01.04.70380	K1	I	197
Sedimenttransport in der Trübungszone von Ästuaren (FAUST)	B3955.02.04.70230	K2	I	199
SMMS – Stratigraphische Modellkomponenten zur Verbesserung von hochaufgelösten und regionalisierten morphodynamischen Simulationsmodellen.	B3955.02.04.70233	K2	I	201

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

<b>Titel</b>	<b>Auftragsnummer FuE-Vorhaben</b>	<b>Referat</b>	<b>Forschungs- feld*</b>	<b>Seite</b>
Datenbasierte Analyse der Sedimentdynamik im Wattenmeer. Das Projekt HERKULIS	B3955.02.04.70234	K2	U	203
Integration D-Flow FM	B3955.03.04.70221	K3	M	205
Prozessintegration und Performanzsteigerung des biogeochemischen Modells der Tideelbe	B3955.03.04.70239	K3	U	207
FuE: MudEms. Flüssigschlick im Ästuar	B3955.03.04.70241	K3	I	209
BMDV-Expertennetzwerk. Küste (Phase 2). Wissen – Können – Handeln	B3955.03.04.70242	K3	M	211
Einsatz von alternativen Antriebstechnologien. Grundlagenermittlung für Entwürfe von Behördenschiffen	B3955.04.04.70001	K4	M	213

### III. Berichte zu neuen FuE-Vorhaben in 2021

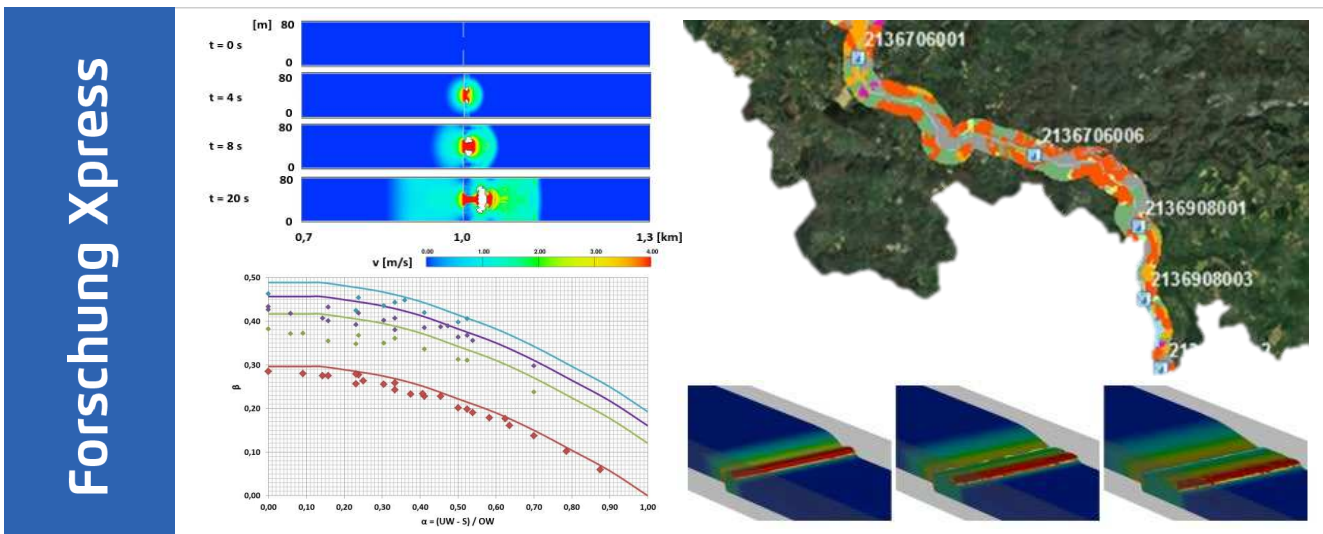
<b>Titel</b>	<b>Auftragsnummer FuE-Vorhaben</b>	<b>Referat</b>	<b>Forschungs- feld*</b>	<b>Seite</b>
Wartung massiver Wasserbauwerke	B3951.03.04.70020	B3	I	217
Charakterisierung relevanter Mauerwerkseigenschaften zur Nachrechnung bestehender Wasserbauwerke aus Mauerwerk im Rahmen des TbW	B3951.03.04.70021	B3	I	219
Erprobung der Methode Semantic Web zur Überführung von relevanten Informationen in ein Datenmodell	B3951.04.04.70012	B4	I	221
GeoValDB – Geotechnical Value Database. Aufbau und Betrieb einer geotechnischen Kennwertdatenbank	B3952.00.04.70002	G0	I	223
Geohydraulische und geotechnische Optimierung von Fischaufstiegsanlagen in Schlitzpassbauweise	B3952.03.04.70010	G3	I	225
Verockerung geotextiler Filter in Deckwerken	B3952.04.04.70015	G4	I	227
Versuche zu Treibgutverhalten sowie Treibgutabwehr an Fischaufstiegsanlagen	B3953.01.04.70011	W1	U	229
Projekt FernBin	B3953.04.04.70019	W4	M	231
Automatisierung zweidimensionaler hydrodynamisch-numerischer Modelle im Rahmen flussbaulicher Anwendungen	B3953.05.04.70008	W5	I	233
Numerische Modellierung des Suspensionstransports zur Berücksichtigung des lateralen Sediment austauschs	B3953.05.04.70009	W5	U	235
Erzeugung von Schiffsprimärwellen im physikalischen Modellversuch (2DShipWaves)	B3955.01.04.70381	K1	I	237
Big-Simulation- and Geodata-Middleware BiSiGeMi	B3955.02.04.70235	K2	I	239





## I. Abgeschlossene FuE-Vorhaben in 2021





# 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 Erhaltungsmanagement berücksichtigt die begrenzte Ressourcenverfügbarkeit und hat den Abbau des Instandhaltungsrückstaus zum Ziel.

**Auftragsnummer:**

B3951.04.04.70002

**Auftragsleitung:**

Dr. Jörg Bödefeld  
joerg.boedefeld@baw.de

**Laufzeit:**

2016 bis 2021

### 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 ein Eingreifzeitpunkt 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 (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. 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. Sie sind in Schmidt-Bäumler (2020) ausführlich dokumentiert.

Das Projekt wird bis Ende 2021 mit einem Bericht abgeschlossen.

#### Literatur:

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

Schmidt-Bäumler, H. (2020): Multi-kriterielle Entscheidungsunterstützung in der risiko-basierten Instandhaltungsplanung am Beispiel der Verkehrswasserbauwerke. Dissertation. Karlsruhe Institute of Technology. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107146>

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. Verkehrswasserbauwerke 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 IT-gestütztes Erhaltungsmanagementsystem (WSVPruf) eingesetzt, das die verantwortlichen Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter (WSÄ) bei der systematischen Dokumentation und Bewertung 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 erhält eine Vielzahl an Bauwerken die gleiche Bewertung. Aussagen über die Auswirkungen der Schäden auf die funktionalen Anforderungen an das Bauwerk sind im Benotungssystem nicht vorgesehen. Die Zielsetzung des Forschungsvorhabens besteht darin, ergänzende Kennzahlen, die die derzeitigen Einschränkungen berücksichtigen und einen schlüssigen Vergleich einer großen Anzahl von Bauwerken ermöglichen, zu entwickeln. Hiermit wird die Aussagekraft der bisherigen Zustandsbenotung erhöht. Das FuE-Vorhaben wurde im Rahmen des BMDV-Expertenetzwerks, das 2016 durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) initiiert wurde, erarbeitet.

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

Die zusätzlichen Kennzahlen berücksichtigen die funktionalen Anforderungen, die an das Bauwerk dargestellt werden und erhöhen somit den Informationsgehalt der bisherigen Zustandsbewertung. Durch die Erweiterung des Bewertungssystems lassen sich 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 2021



### 3 Untersuchungsmethoden

Durch eine detaillierte Analyse der dokumentierten 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) ausgestaltet, um die Auswirkungen einzelner Schäden auf die Nachweisbarkeit der normativ vorgegebenen Anforderungen an Bauwerke beurteilen zu können. Für die Bewertung der ermittelten Wirkzusammenhänge werden drei Kriterien herangezogen, die neben dem Auftreten und der Abwendbarkeit eines Fehlers auch die Konsequenzen beim Eintreten eines 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 Unsicherheiten in einem Bewertungsprozess, der von menschlichen und daher subjektiven Entscheidungen geprägt ist.

### 4 Ergebnisse

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 festgelegten Datenstruktur ist. Anhand der unabhängigen Kategorien lassen sich die Inspektionsergebnisse 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 die maßgeblich betroffene 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.

Die Bewertung der UWK anhand der RPZ erweitert die Bewertung um eine zusätzliche 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 Anforderungen an 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 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.

Durch den Aufbau eines Fuzzy-Sets zur Ermittlung der RPZ kann die Bewertung auf Basis semantischer Beschreibungen erfolgen, was die Nutzung von Erfahrungswissen vereinfacht. Ebenso ist eine Wichtung der Eingangsgrößen zur Ermittlung der RPZ möglich, was im Rahmen des klassischen FMEA-Ansatzes nicht möglich ist. Die Zusammenführung der Eingangsgrößen über Wenn-Dann-Regeln führt zu plausibleren RPZ als die einfache Multiplikation der Eingangsgrößen. Die Aussagekraft der RPZ erhöht sich damit deutlich.

Basierend auf zusätzlich erhobenem Expertenwissen und dem Austausch mit anderen Beteiligten wurde das durch die FMEA erweiterte Bewertungsverfahren konsolidiert und anhand von Massiv- und Stahlwasserbauten der Bundeswasserstraße validiert.

Der Abschlussbericht des Forschungsprojekts für den Zeitraum 2016-2021 befindet sich derzeit in der Überarbeitungsschleife und steht kurz vor der Fertigstellung.

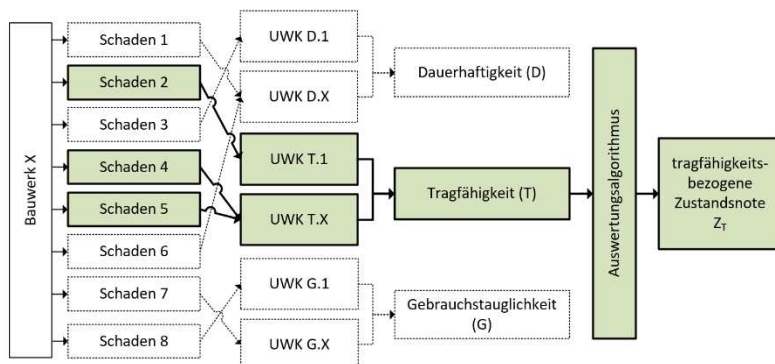


Bild 1: Ermittlung der anforderungsspezifischen Zustandsnote in Abhängigkeit der jeweiligen UWK.

#### 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.



## 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 im Bereich der Bauwerke. Durch umfassende Zementinjektionen im Untergrund wurden in den 1980er und 1990er Jahren Hohlräume unterhalb der Bauwerke 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, insbesondere 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 und -ausspülung sowie Bildung von Residualsedimenten
- Grundwasserströmungsverhältnisse mit hydraulischen Durchlässigkeiten, Gradienten, Geschwindigkeiten und Fließwegen
- Auswirkungen der bisherigen Sanierungsmaßnahmen in Bezug auf Abdichtung und Umströmung

Aufbauend auf den Untersuchungsergebnissen 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.

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

Voraussetzung für eine nachhaltige Sicherung von Bauwerken einer Staustufe auf lösungsempfindlichem Untergrund sind Detailkenntnisse über die Wirkungszusammenhänge im Untergrund. An der Staustufe Hessigheim werden

#### Auftragsnummer:

B3952.03.04.70008

#### Auftragsleitung:



Dr. Cindy Giersch  
cindy.giersch@baw.de

#### Laufzeit:

2018 bis 2021



die Auslaugungsvorgänge im sulfathaltigen Untergrund untersucht, um eine verbesserte Planungsgrundlage für die Unterhaltung der wasserbaulichen Anlagen zu schaffen.

### 3 Untersuchungsmethoden

Durch Automatisierung der Messungen in einem großen Teil der Grundwassermessstellen wird eine Intensivierung der Überwachung der Grundwasserverhältnisse umgesetzt. Darüber hinaus erfolgen wiederholt Messungen des Sulfatgehaltes im Grundwasser, um hydrochemische Veränderungen im Untergrund festzustellen. Sanierungsmaßnahmen im Baugrund werden durch ein Monitoring von Porenwasserdruck, Grundwasserstand und weiteren Parametern begleitet. Alle gewonnenen Erkenntnisse fließen in ein numerisches Grundwasserströmungsmodell ein. Die Modellierung dient der Darstellung der Grundwasserströmungsverhältnisse für den derzeitigen Baugrundzustand und der Veränderungen infolge fortschreitender Lösungsprozesse. Darüber hinaus werden die Auswirkungen geplanter Sanierungsmaßnahmen auf die geohydraulischen Verhältnisse anhand entsprechender Szenarien untersucht.

### 4 Ergebnisse

Die Auswertungen der geohydraulischen Untersuchungen bestätigen, dass im Bereich der Staustufe Hessigheim sehr komplexe Grundwasserströmungsverhältnisse vorherrschen. Das obere Grundwasserstockwerk der Neckarkiese ist gut durchlässig, während das untere, aus teilweise ausgelaugtem Festgestein bestehende Grundwasserstockwerk sehr heterogene Eigenschaften aufweist. Beide Grundwasserstockwerke sind hydraulisch nicht vollkommen voneinander getrennt. Daher führen sowohl die horizontale Umströmung abgedichteter Bereiche als auch vertikale Grundwasserbewegungen zu lokal erhöhten Fließgeschwindigkeiten, welche wiederum eine fortschreitende Auslaugung der gipsführenden Schichten bedingen. Für die Planung von Bodenverbesserungsmaßnahmen spielen geohydraulische Aspekte daher eine wichtige Rolle.

Im Vorfeld der im Bereich der Schleusenplanie geplanten Baugrundsanierung erfolgte die Herstellung von Testfeldern für Injektionen mit Sand-Zement-Mörtel, die messtechnisch begleitet wurden. In vier voll verdammt (fully-grouted) ausgebauten Grundwassermessstellen wurden der Porenwasserdruck sowie die geophysikalischen Eigenschaften des Untergrundes gemessen. Die Messungen bestätigen das Vorliegen eines sehr heterogenen geschädigten Baugrundes, dessen Verbesserung durch Injektionen mit Sand-Zement-Mörtel möglich ist.

Basierend auf den bisherigen Untersuchungen erfolgte die Erstellung eines numerischen Grundwasserströmungsmodells, mit welchem die derzeitigen geohydraulischen Verhältnisse sowie die Auswirkungen von Sanierungsmaßnahmen darstellt wurden. Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass Injektionen mit Sand-Zement-Mörtel im Untergrund der Schleusenplanie zu einer Verringerung der Durchlässigkeiten und zur Verlagerung der Grundwasserströmungsmaxima an deren Rand führen. Um eine fortschreitende Auslaugung in diesem Bereich zu verhindern, ist die Errichtung einer Drainage als hydraulische Ausgleichsmaßnahme vorgesehen. Weitere numerische Berechnungen auf dieser Grundlage werden die geplanten Sanierungsmaßnahmen auch nach Abschluss des Forschungsvorhabens begleiten.

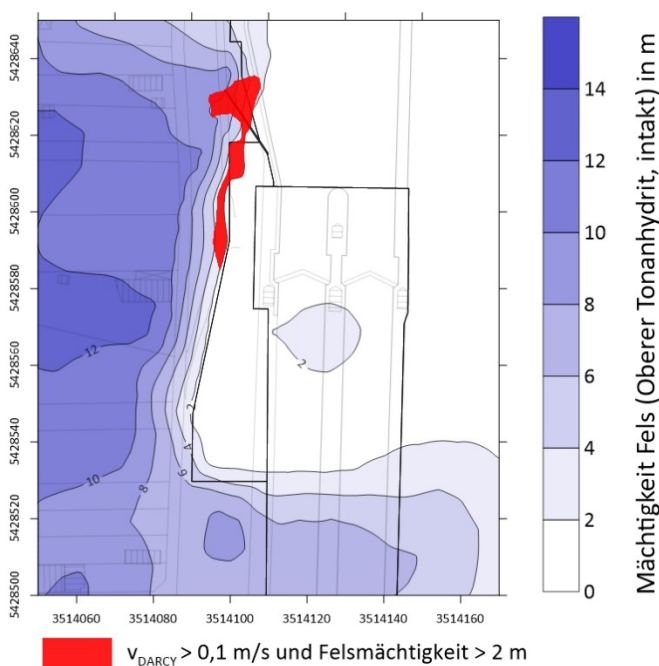


Bild 1: Risikobereich fortschreitender Lösungserscheinungen landseitig des Schleusenoberhauptes anhand eines Vergleichs zwischen Felsmächtigkeit und erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten.

Den Abschluss der Arbeiten bilden Untersuchungen zur Entstehung des „Residualtons“. Dieses Sediment lagert auf dem lösungsempfindlichen Oberen Tonanhydrit. Mineralogisch-petrographische Untersuchungen und Mächtigkeitsberechnungen zeigen, dass der „Residualton“ als Rückstandssediment aus Lösungsprozessen im oberen Teil des Oberen Tonanhydrits entstanden ist. Die Bildung und der Verstoß von Lösungshohlräumen verursachen an der Erdoberfläche Setzungen und Dolen. Es ist davon auszugehen, dass die Entstehung des Residualtons in der Vergangenheit in mehreren Phasen jeweils in denjenigen Gesteinspartien stattfand, die von Grundwasser durchströmt wurden, und dass die Residualtonentstehung bis heute stattfindet. Fortschreitende Lösungsprozesse mit Hohlräum- und der Entstehung von Residualsedimenten sind demnach vor allem dort zu erwarten, wo intakter Oberer Tonanhydrit lagert, der verstärkt von Grundwasser durchströmt wird. Bild 1 stellt einen solchen lösungsgefährdeten Bereich als ein Ergebnis der numerischen Berechnungen dar.



## Zuverlässigkeitsbasierte Deckwerksbemessung

Erweiterung des bestehenden Bemessungskonzepts um Elemente der Probabilistik zur Berücksichtigung von Parameterunsicherheiten

### 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 Sohlensicherungen projektspezifisch – unter der tatsächlichen Verkehrsbelastung und an das jeweilige Sicherheitsbedürfnis angepasst – ermöglichen.

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

### 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 2021

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

Mit Hilfe von Experteninterviews werden qualitative Informationen zu Schadensursachen und Schadensbildern ermittelt. Parallel dazu sollen Versuche in einer Wellengrube vertiefende Erkenntnisse zur Schadensentwicklung eines Deckwerks liefern. Unter Verwendung zuverlässigkeitsbasierter Methoden werden anschließend zum GBB (2010) ergänzende Empfehlungen zur Berücksichtigung von Parameterunsicherheiten erarbeitet. Die statistische Unsicherheit der Eingangsparameter wird mit Hilfe eines Bootstrapping-Verfahrens untersucht. Die Transformationsunsicherheit soll durch neu zu ermittelnde Modellfaktoren berücksichtigt werden. Mithilfe eines random-field-Ansatzes wird der Einfluss der räumlichen Variabilität der Bodeneigenschaften auf die Deckwerksbemessung analysiert. Ergänzende Naturmessungen am Dortmund-Ems-Kanal sollen bei der Validierung einer statistisch bestimmten mindestens erforderlichen Messdauer unterstützen und Aussagen zu repräsentativen Einwirkungen an der Wasserstraße ermöglichen.

### 4 Ergebnisse

Experteninterviews zu Wasserstraßen unterschiedlicher Netzkategorien und Ausbauzustände ergaben, dass vor allem Wellen und Strömungen zu Steinverlagerungen an der Wasserstraße führen. Böschungsrutschungen, resultierend aus Porenwasserüberdrücken, werden hingegen selten beobachtet. Aus einzelnen Steinverlagerungen an der Deckwerksoberfläche entwickeln sich mit der Zeit größere Schadstellen (Sorgatz 2021).

Für eine Prognose von Steinverlagerungen wurde eine Zuverlässigkeitsanalyse mit einem Markov-Ketten-Ansatz kombiniert. Dies erlaubt eine Interpretation der Versagenswahrscheinlichkeit als Wahrscheinlichkeit eines Initialschadens bezogen auf Verkehr oder Zeit. Die Ergebnisse zeigen allerdings auch, dass homogene Markov-Ketten mit der darin implizierten exponentiell fortschreitenden Schadensentwicklung für eine langfristige Schadensprognose ungeeignet sind (Sorgatz et al. 2019).

Die Analysen zur erforderlichen Deckschichtdicke zeigen, dass der Großteil der Unsicherheiten aus den verwendeten Lastkombinationen resultiert. Die gegenwärtig verfügbaren Daten erlauben es nicht, zuverlässigkeitsbasierte Lastkombinationen anzusetzen. Zurzeit wird daher empfohlen, bei der Bemessung oder Beurteilung der geotechnischen Auslegung verschiedene Lastkombinationen, z. B. aus Feldbeobachtungen, oder den gültigen Bemessungsstandards anzusetzen (Sorgatz und Kayser 2021).

Die Bootstrapping-Analysen zeigen, dass mit abnehmender Anzahl an Messwerten und größerer Variabilität der Eingangsparameter die Unsicherheit bei der Bemessung steigt (siehe Bild 1). Ein Vergleich zwischen Ergebnissen von Zuverlässigkeitsanalysen mit gemessenen und berechneten Einwirkungen verdeutlicht, dass berechnete Einwirkungen zu größeren Deckwerksabmessungen führen. Die Berücksichtigung von Verkehrsbeobachtungen und die Einführung von Modellfaktoren können diesen Effekt reduzieren (Sorgatz 2021).

Untersuchungen zum Effekt von räumlich variablen Bodeneigenschaften auf die Böschungsstabilität zeigen, dass die charakteristischen Kennwerte der bodenmechanischen Eigenschaften eine Funktion der Absolutwerte, aber auch der Varianz und der räumlichen Korrelation sind. Bei Baugrunduntersuchungen und bei der Wahl der charakteristischen Kennwerte sollte daher auch ein Augenmerk auf die räumliche Variabilität des Baugrunds gelegt werden (Sorgatz 2021).

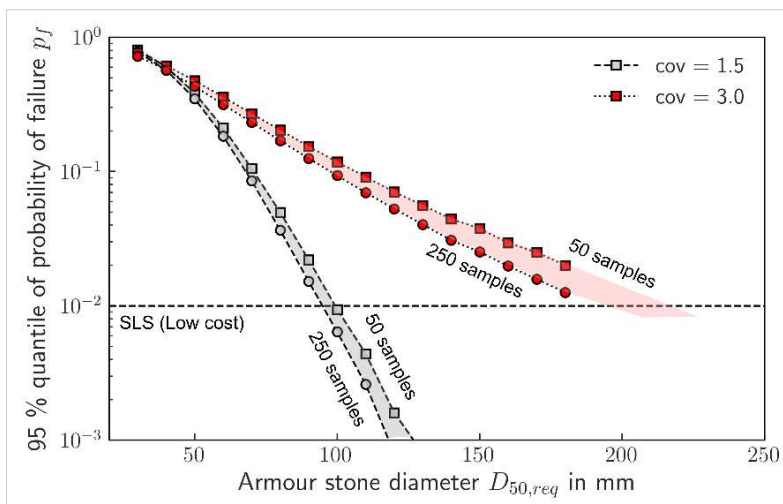


Bild 1: Einfluss der Stichprobenanzahl und Variabilität (cov) der Wellenhöhe auf die Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  als Funktion der erforderliche Deckwerkssteingröße ( $D_{50, req}$ ).

#### Literatur:

Sorgatz, J.; Kayser, J.; 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 2019.

Sorgatz, J. (2021): Towards reliability-based bank revetment design: Investigation of limit states and parameter uncertainty. RWTH Aachen (Dissertation). <https://publications.rwth-aachen.de/record/811173/files/811173.pdf>.

Sorgatz, J.; Kayser, J. (2021): Investigation of Parameter Uncertainties Inherent to the Geotechnical Design of Bank Revetments at Inland Waterways, 18th International Probabilistic Workshop. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-73616-3\\_35](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-73616-3_35).





## 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. Ganz unabhängig von der 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. Dafür eignen sich Ensemble-Rechnungen, 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.

### 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

#### Auftragsnummer:

B3953.05.04.70004

#### Auftragsleitung:

Dr. Leopold Stadler  
 leopold.stadler@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2021

Rechenzeiten lassen sich längere Zeiträume modellieren und Unsicherheiten, wie sie etwa in den Anfangs- und Randbedingungen vorliegen, mithilfe statistischer Methoden untersuchen. Die Möglichkeit, 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 hydrodynamischen Ergebnisse zwischen dem voll impliziten Verfahren, dem expliziten Verfahren sowie den aktuell in der Abteilung Wasserbau eingesetzten Verfahren.

Der Vergleich wird anhand einer Reihe von Standardtestfällen durchgeführt. Zusätzlich erfolgt eine Validierung an einem Rheinabschnitt im Rahmen des WSV-Auftrags „Geschiebezugabe mittlerer Niederrhein“. Dabei wird unter anderem untersucht, wie groß die Zeitschrittweiten für das implizite Verfahren an den 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

Mit der Überführung der im FuE-Projekt „Langfristsimulation in Fließgewässern“ entwickelten Methoden und Ansätze für die zweidimensionale hydrodynamisch-numerische Modellierung in das Dune-Modul DuMux wurden die Arbeiten am FuE-Projekt abgeschlossen. Die für die Langfristsimulation benötigte Erweiterung für den Sedimenttransport wird im FuE-Vorhaben „Implementierung numerischer Verfahren für flussbauliche Fragestellungen in der Entwicklungsumgebung DUNE“ entwickelt. Dank des modularen Aufbaus von DuMux kann diese Erweiterung später direkt mit dem fertiggestellten hydrodynamisch-numerischen Modell gekoppelt werden.

Für die Anwendung von Simulationsverfahren ist es besonders wichtig, eine benutzerfreundliche Applikation zur Verfügung zu stellen. Hierzu wurde für die BAW mit DuMux-ShallowWater zusätzlich eine flexible und leistungsfähige Applikation auf Basis von DuMux geschaffen. DuMux-ShallowWater wird seit letztem Jahr in einem ersten WSV-Projekt eingesetzt, bei dem die Strömung im Rhein im Bereich der Moselmündung untersucht wird. Während des Einsatzes konnten erste Erfahrungen gesammelt werden. Als besonders praktisch hat sich erwiesen, dass sich Verbesserungsvorschläge und Wünsche der Anwender zeitnah in die Software integrieren lassen.

Das im WSV-Projekt eingesetzte Rechengitter besteht aus über 2,8 Millionen Elementen. Unter Verwendung der neu veröffentlichten Version DuMux 3.3 und den somit neu verfügbaren parallelen Gleichungslösern zeigt sich die exzellente Skalierbarkeit und Rechengeschwindigkeit des Verfahrens. Für die Berechnungen können problemlos mehrere tausend Rechenkern gleichzeitig eingesetzt werden, um die Rechenzeit zu reduzieren. Das neue Verfahren ist jedoch bereits mit wenigen hundert Rechenkernen so schnell, dass typische Aufgabenstellungen in weniger als einer Stunde simuliert werden können.

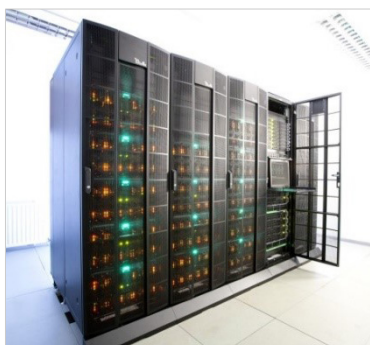
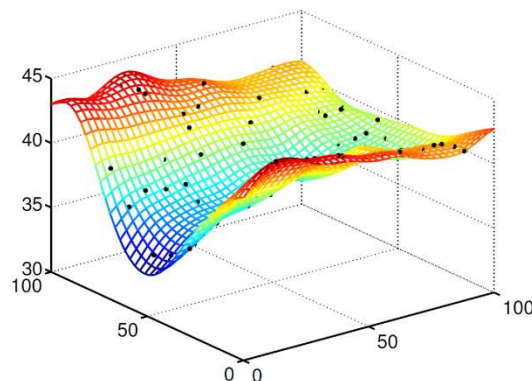


Bild 1: Hochleistungsrechner der BAW.

#### Literatur:

Blatt, M.; Burchardt, A.; Dedner, A.; Engwer, C.; Fahlke, J.; Flemisch, B.; Gersbacher, C.; Gräser, C.; Gruber, F.; Grüninger, C.; Kempf, D.; Klöfkorn, R.; Malkmus, T.; Müthing, S.; Nolte, M.; Piatkowski, M.; 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 2021



### 3 Untersuchungsmethoden

Zum Erreichen der Projektziele wurden die Aufgaben in die folgenden Untersuchungsschwerpunkte gegliedert:

- Auswahl, Bearbeitung und Interpretation von verschiedenen „Beispielprojekten“ zu typischen Fragestellungen im Flussbau.
- Entwicklung einer bedienerfreundlichen Umgebung zur Anwendung der vorhandenen Zuverlässigkeitsmethoden First Order Second Moment, Monte Carlo und Metamodell. Das im Rahmen des FuE-Projekts entwickelte Programm heißt UnAnToPy und basiert auf der Programmiersprache Python.
- Erstellung von Bearbeitungsleitfäden zur Anwendung von Zuverlässigkeitsmethoden in der hydro-morphodynamischen mehrdimensionalen numerischen Modellierung im Flussbau. Durchführung von BAW-internen Schulungen. Informationen zu den verwendeten Zuverlässigkeitsmethoden, Bearbeitungsleitfäden und Installationshinweise für das Programm UnAnToPy werden im FuE-Abschlussbericht und im internen Wiki-System der BAW zur Verfügung gestellt.

### 4 Ergebnisse

In diesem Forschungsprojekt wurde auf der Basis der Programmiersprache Python das Werkzeug UnAnToPy entwickelt. Damit ist eine effiziente Integration von Zuverlässigkeitsanalysen in den Projektalltag der BAW für hydro- und morphodynamische mehrdimensionale numerische Modelle von Binnenwasserstraßen möglich. Ein problemloser Einstieg und eine qualitätsgesicherte Anwendung der Zuverlässigkeitsanalysen wird bei Verwendung von UnAnToPy und den zugehörigen Benutzerleitfäden gewährleistet. Der zum Teil nicht unerhebliche Vorbereitungs- und Auswerteaufwand kann durch eine weitgehende Automatisierung reduziert werden. Das ermöglicht es dem Projektbearbeiter, sich auf die Interpretation der Ergebnisse zu fokussieren.

Typische Einsatzbereiche von Zuverlässigkeitsanalysen für den Projektalltag für mehrdimensionale numerische Flussmodelle sind z. B. Sensitivitätsanalysen für bestimmte Kalibrierparameter (siehe Bild 1). Dies ist immer dann besonders sinnvoll, wenn ein neuer Ansatz mit Parametern verwendet wird, deren Wirkungsweise noch unbekannt ist. Darüber hinaus können auch ganze Ansätze miteinander verglichen werden. Das Ergebnis kumuliert dann die Sensitivität und Variabilität jedes einzelnen Parameters eines Ansatzes (Dalledonne et al. 2019). Gerade bei der morphodynamischen Modellierung mit einer Vielzahl von empirischen Ansätzen bietet diese Herangehensweise eine wertvolle Hilfestellung bei deren Auswahl.

Eine weitere interessante Anwendung der Zuverlässigkeitsanalyse mit UnAnToPy ist der Vergleich der Sensitivitäten eines Istzustands mit den Sensitivitäten einer Variante. Die mit beiden Modellen einzeln erzeugten Ergebnisse werden anschließend gemeinsam ausgewertet. Das Ziel dieser Auswertung ist es, abzuschätzen, inwieweit sich Unsicherheiten in den Eingangsparametern nicht nur auf den Istzustand oder die Variante, sondern auch auf deren Differenzaussage auswirken. Es soll die Frage beantwortet werden, ob die Variabilität der Eingangsparameter im Istzustand und bei der Variante die gleiche Wirkung haben. Eine detaillierte Auswertung dieser Anwendung steht noch aus und soll im laufenden Projektbetrieb erfolgen.

Bisher wurde vorrangig auf die räumliche Verteilung der Prognoseintervalle für stationäre Strömungszustände fokussiert. Insbesondere für morphodynamische Modellierungen ist aber auch der zeitliche Verlauf der Prognoseintervalle sehr interessant. Um grundsätzliche Aussagen über das zeitliche Verhalten der Prognoseintervalle treffen zu können, sollen entsprechende Auswertungen von verschiedenen Anwendungen gesammelt und gemeinsam bewertet werden.

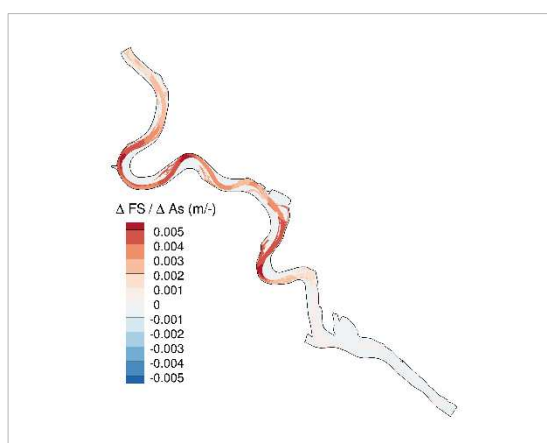
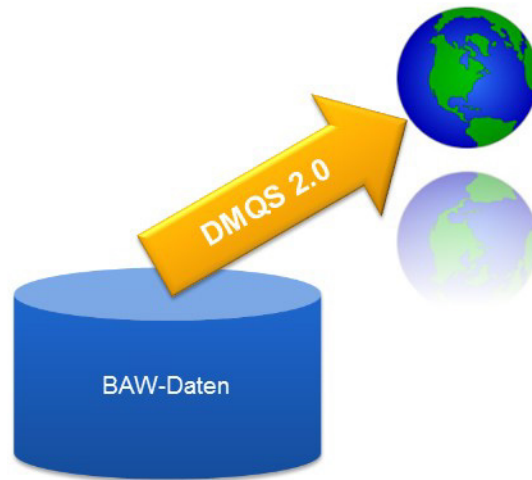


Bild 1: Sensitivität der freien Oberfläche (FS) bezüglich des Dissipationskoeffizienten ( $A_s$ ), eines Kalibrierparameters des Sekundärströmungsansatzes hydrodynamischer 2D-Modelle, für einen Donauabschnitt.

#### Literatur:

Dalledonne, G. L.; Kopmann, R.; Brudy-Zippelius, T. (2019): Uncertainty quantification of floodplain friction in hydrodynamic models, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 3373–3385.

Kopmann, R.; Dalledonne G. L.: FuE-Abschlussbericht „Integration von Zuverlässigkeitsanalysen in die hydro- und morphodynamische Modellierung von Binnenwasserstraßen“. In Bearbeitung, BAW Karlsruhe.



## Datenmanagement und Qualitätssicherung im Verkehrswasserbau (DMQS) 2.0

### Metadateninformationssystem und Langfristspeicherung

#### 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 verschiedene Simulationsparameter sowohl für den Bearbeiter als auch für Dritte nachvollziehbar dokumentiert und wieder auffindbar sein. Ein Konzept für das Datenmanagement 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. Das Datenmanagement (DM) umfasst dabei alle Maßnahmen, die sicherstellen, dass digitale Fachdaten nutzbar sind. DM beginnt bei der Planung eines Vorhabens und umfasst sowohl die Erfassung, Verarbeitung und Aufbewahrung als auch die Öffnung bzw. Beschränkung des Zugangs zu Daten. Anhand von Pilotprojekten wird ein abteilungsübergreifendes Konzept für DM an der BAW sowie ein Veröffentlichungskonzept für Fachdaten 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  
Kirsten Binder  
kirsten.binder@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

Für die Verwaltung von automatisiert (via CSW-Schnittstelle) übertragenen oder manuell (via Metadateneditor) zu erfassenden Metadaten wurde das Metadateninformationssystem der BAW (MISBAW) auf der Basis der Open-Source-Software „InGrid“ aufgebaut. MISBAW befindet sich mit dem BAW-Metadatenprofil Version 1.3 im Testbetrieb. Daneben werden Dienste für 1) die langfristige, schreibgeschützte Speicherung von Daten in einem Langfristspeicher (LFS) bei der BAW, 2) die automatisierte Generierung der Metadaten aus den Fachdaten sowie 3) das automatische Kopieren der Daten in den LFS und die Generierung der Download-Links in den Metadaten entwickelt. Die Integration dieser Dienste in MISBAW und weiterer Programme befindet sich im Testbetrieb. Die Produktivsetzung des MISBAW für den BAW-internen Einsatz ist in Kürze geplant.

Die Portal-Komponente des MISBAW (Bild 1) bietet Funktionalitäten für die metadatenbasierte Recherche von Daten entweder über die Freitextsuche oder in der Katalogansicht. Über die Links in den Metadaten können Daten vom LFS heruntergeladen werden. Darüber hinaus können im Kartenklient Karten über die Einbindung von WMS- und WMTS-Diensten dargestellt werden.

Das zunächst auf Simulationsdaten ausgerichtete BAW-Metadatenprofil 1.3 wird nun auch für Messdaten erweitert. Dazu wird anhand von prototypischen Beispielen evaluiert, welche speziellen Informationen für eine ausreichende Beschreibung der BAW-Messdaten benötigt werden. Auswahllisten sollen die Eingabe von Messarten, -methoden, Ortungs- und Beschickungsverfahren erleichtern.

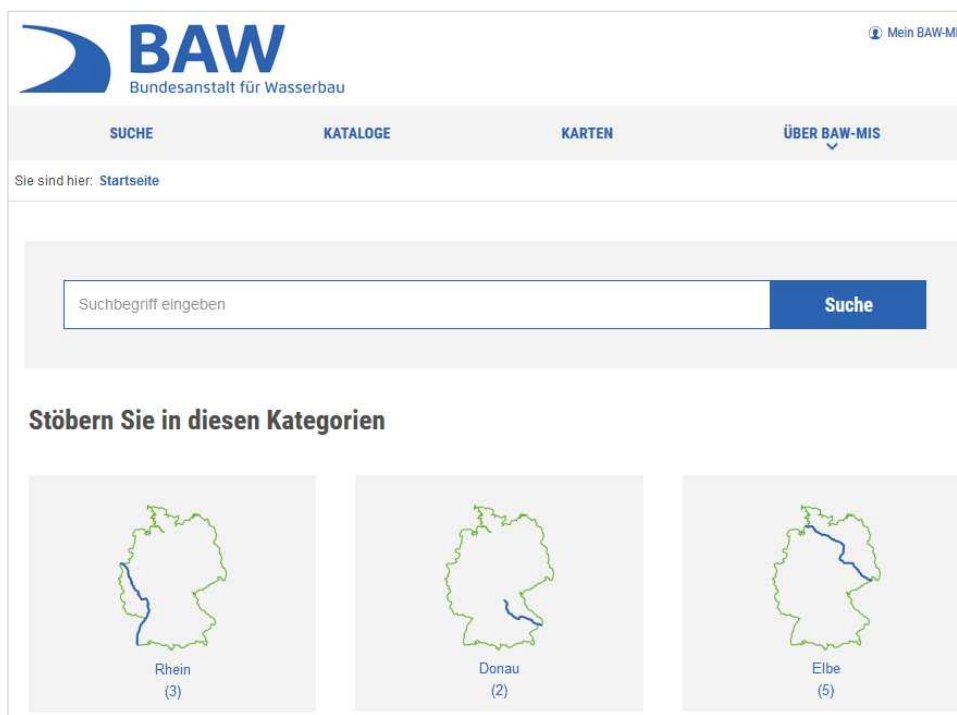


Bild 1: Oberfläche MISBAW.



## 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 zunächst für Simulatoren, die auf dem Norrbinn-Modell mit Abkowitz-

#### 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 2021

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 dritten 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 aufwändig 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-ins 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.

Derzeit wird als weiteres Plug-in und Projektergebnis die hydrodynamische Interaktion des Schleppers mit dem fahrenden Großschiff und mit dessen Schraubenstrahl bei achterlicher Annäherung implementiert und getestet. Anschließend werden die einzelnen entwickelten Plug-in in einer Anwendung zusammengefasst und für die produktive Nutzung in Schiffsführungssimulationszentren mit einer Bedieneroberfläche (GUI) ergänzt. Das kommerzielle Schiffsführungssimulationszentrum und Partner in dem Projekt MTC Hamburg plant, die verfeinerte Modellierung der Schlepper-Interaktion zukünftig produktiv einzusetzen.

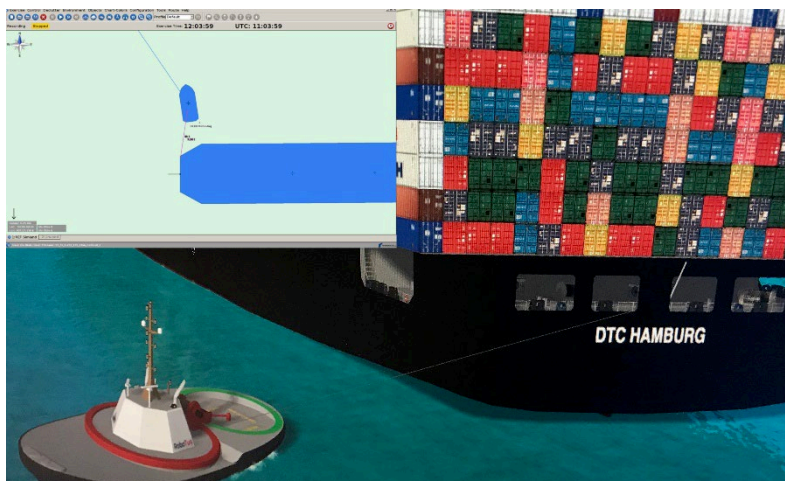


Bild 1: Hafenmanöver mit ferngesteuertem Schlepper in der Schiffsführungssimulation mit Plug-ins (Instruktor-Sicht überlagert).

#### Literatur:

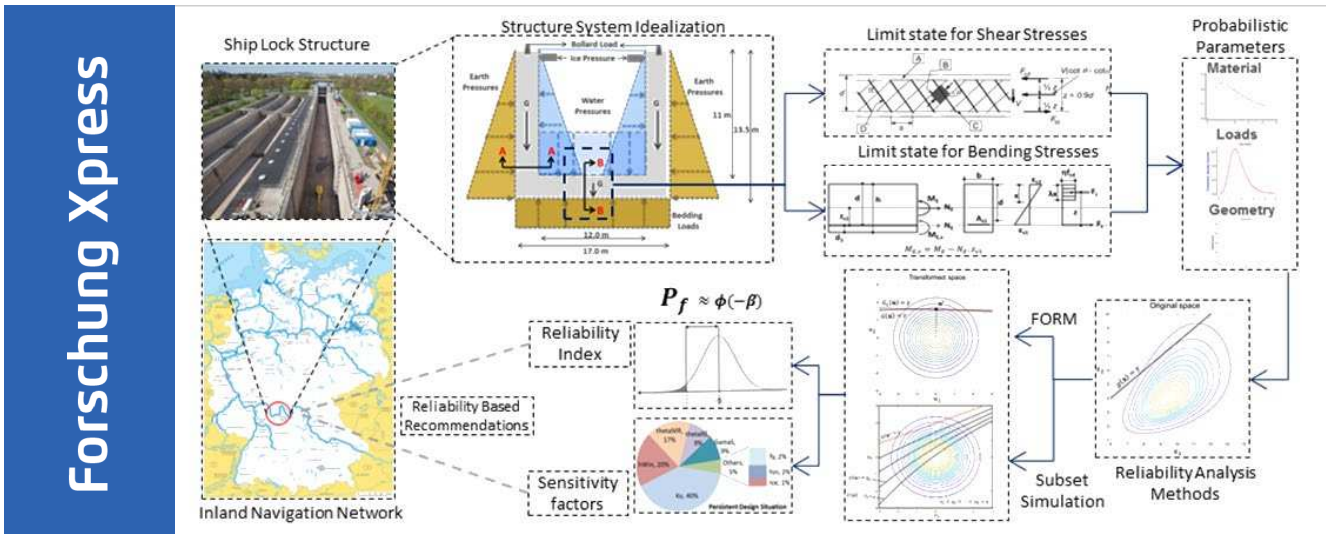
El Moctar, O.; Shigunov, V.; Zorn, T. (2012): Duisburg Test Case: Post Panmax Container Ship for Benchmarking. In: Ship Technology Research Schiffstechnik, Vol. 59, No 3, S. 50–64.

FernSAMS-Promotion-von VOITH:  
<https://voith.com/corpe/branchen/schiffstechnik/fernsams.html>

Singer, S. (2018): Remote Controlled Tugs – Project FernSAMS. Vortrag in: German Norwegian Ocean Forum, GNOF, December 4, 2018, Hamburg.

## 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 as-set 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.

### 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

#### 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 2023



reliability analysis of an unreinforced concrete ship lock wall structure and additionally investigates the influence of Crack and Pore-Water Pressures (CPWP) on the structural safety using full probabilistic methods. For the study three failure mechanisms (sliding, 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

Several components of existing hydraulic structures are reinforced, but these structures neither were designed using the latest Reinforced Concrete Section (RCS) theory nor the quality of steel/concrete corresponds to the latest standard classes. This, along with diverse geometrical arrangements, can lead to any type of section failure. Figure 1 (1) indicates all the possible stress-strain arrangements for a typical RCS. Additionally, DIN 19702 for hydraulic structures requires considering Crack and Pore-Water Pressures (CPWP) at a section level. CPWP leads to additional stresses in the section and causes a shift in the M-N interaction failure curves, as shown in figure 1 (2) with the blue line. The inclusion of CPWP in the RC section analysis leads to three different safety scenarios. Firstly, the load (indicated by the red dot in figure 1(2)) remains within both M-N curves with and without CPWP (figure 1 (2)-(A)). Secondly, the section is safe in case loads are for section without CPWP consideration but unsafe otherwise (figure 1 (2)-(B)), and thirdly, the loads which lead to an unsafe section regardless of consideration of CPWP (figure 1 (2)-(C)). Given all possible variations for failure modes for RCS with/without CPWP, a generalized approach was developed in coherence to structural analysis models and principles agreed by the latest standards. It is applicable under any material quantity/properties in view of all possible failure modes. The developed methodology and probabilistic modeling of input parameters enabled the structural reliability analysis of any RCS with/without CPWP in the entire network of structures. Additionally, the influence of CPWP can also be investigated and, in the future, can be compared to advanced analysis methods, e. g. FEM.

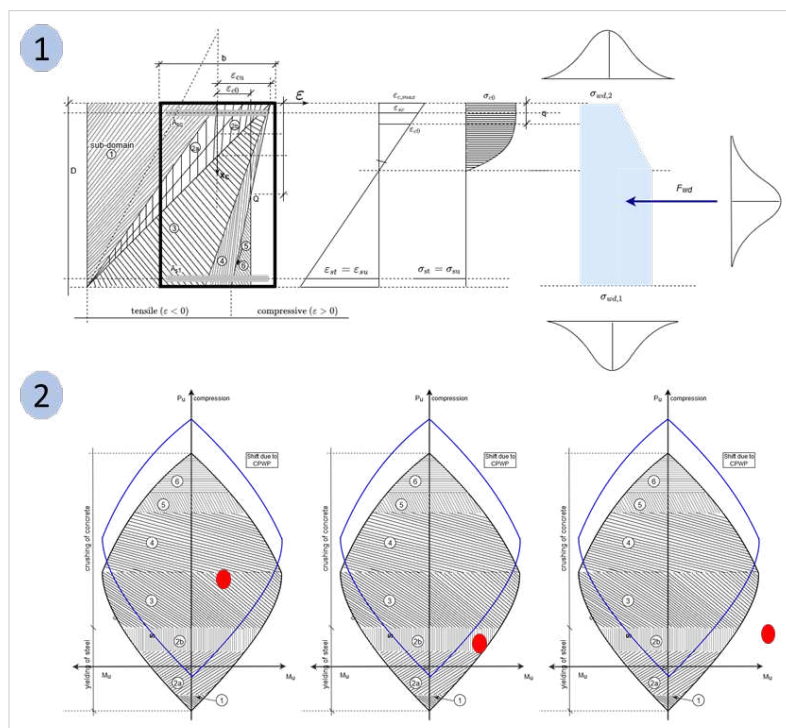


Figure 1: Sectional stress distribution with/without consideration of crack and pore-water pressures. (1) Reinforced concrete section, for different strain conditions with CPWP. (2) (A) Safe loading with and without CPWP, (B) safe loading without CPWP but unsafe with CPWP, (C) Unsafe loading with and without CPWP.

## Literature

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

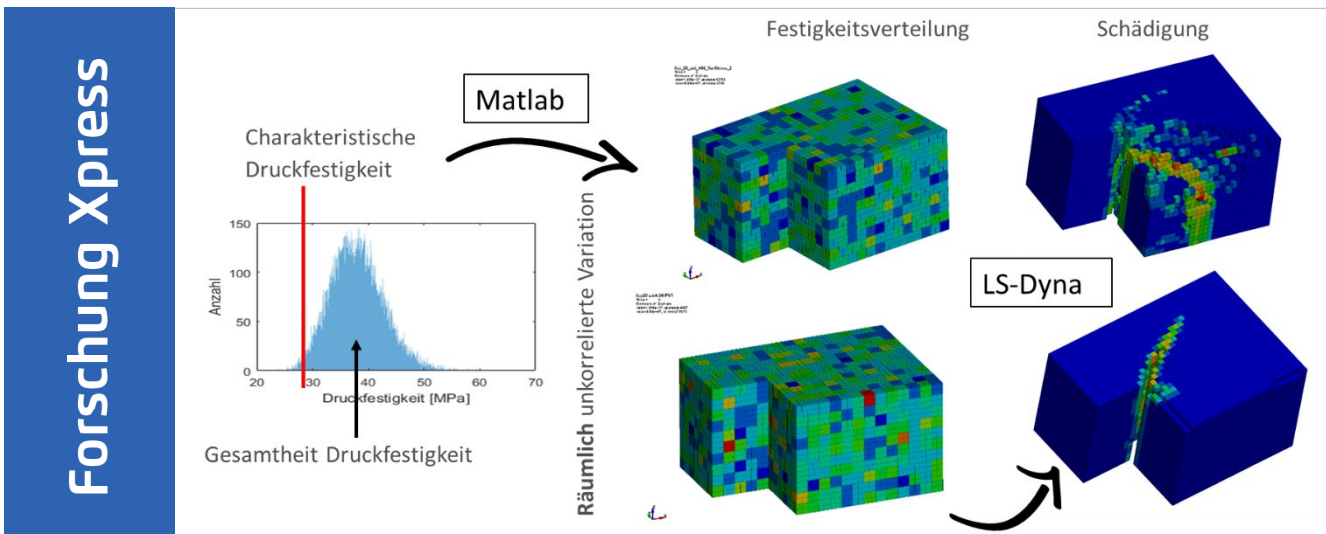
DIN 19702 (2013): Massivbauwerke im Wasserbau – Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit.

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: Bergmeister, E. K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Eds.), BetonKalender 2015, 185–246; Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH.



## Numerische Untersuchungen an massiven Wasserbauwerken

Nachweiskonzeption: Unbewehrte Bauteile unter Teilflächenbelastung

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Nachrechnung massiver Wasserbauwerke beruht i. A. auf vereinfachten Annahmen, sowie der homogenen Anwendung eines stark reduzierten Stoffgesetzes. Die Gegenüberstellung mit aktuellen numerischen Untersuchungsmethoden umfasst zwei Bereiche: Der erste Projektabschnitt validierte den Ansatz für Riss- und Porenwasserdruck nach DIN 19702 (Ergebnisse vgl. (Fleischer et al. 2020)). Der zweite Projektabschnitt adressiert Tragfähigkeitsreserven in der Homogenisierung und Materialabbildung. Hier finden sich die breiten Streuungen der Zusammensetzung 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. Somit werden nicht selten aufwändige Verstärkungen 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 und der räumlichen Verteilung der Materialparameter. Das Bemessungsmodell soll sich an dem BAW-Merkblatt zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Wasserbauwerke (TbW) (BAW 2016a) orientieren und in die dortige Untersuchungsstufe C eingebunden werden.

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

Für einen Großteil der Wasserbauwerke in Deutschland ist ihre Tragfähigkeit in lokalen Bereichen wie z.B. (Revisions-)Nischen etc. nach gültigen Regelwerken nicht direkt nachweisbar. Ein nach TbW, Stufe C entwickeltes Bemessungsmodell als Basis einer entsprechenden Nachweiskonzeption ermöglicht die Offenlegung rechnerischer Tragfähigkeitsreserven und könnte die Dienststellen der WSV sowohl bei der Notwendigkeitsabschätzung als auch bei der Effizienzbeurteilung von Verstärkungsmaßnahmen unterstützen.

**Auftragsnummer:**

B3951.01.04.70006

**Auftragsleitung:**



Sophie Rüd  
sophie.rued@baw.de

**Laufzeit:**

2018 bis 2023



Die Einordnung wasserbautypischer Bauteile und ihrer Belastung in eine aufzustellende Entscheidungsmatrix nach ihrer geometrischen und materialspezifischen/bauzeitlichen Charakteristik, erlaubt eine Reduktion des Untersuchungsaufwands im Einzelfall.

### 3 Untersuchungsmethoden

Der Einsatz von FEM-Simulationen mit einem nichtlinearen Materialmodell und räumlich verteilten Materialeigenschaften gestattet die Abbildung von Schädigung und lokalem Versagen. Dies modelliert ein realistischeres Materialverhalten unter Einbeziehung der 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 her.

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

**Stochastische Simulationsanalysen:** Die Einbindung der Materialverteilungsfelder wird als stochastische Variable realisiert. Hierbei werden zufällige oder einer eigenen Verteilungsfunktion folgende Verteilungsfelder einem ansonsten identischen FE-Modell aufgeprägt. Jede dieser Varianten erfährt in LS-Dyna dann die gleiche Belastung und versagt je nach ihrer räumlichen Festigkeitsanordnung etwas anders. Um hunderte bis tausende Variationen parametrisiert zu erfassen und auszuwerten, finden die LS-Dyna Berechnungen innerhalb einer probabilistischen Analyse in der Optimierungssoftware LS-Opt statt. Dort erfolgt auch die Definition von Versagenskriterien sowie die Metamodellierung. Somit können Versagenswahrscheinlichkeiten gegenüber definierten Kriterien, wie zum Beispiel einer bestimmten Mindestlasttragfähigkeit oder einem maximalen Versagensanteil (z.B. Volumen des Lasteinleitungsbereichs) berechnet werden.

### 4 Ergebnisse

Als Demonstratorprojekt wurde zunächst ein Ausschnitt einer Bauwerksnische aus unbewehrtem Beton abgebildet. Die Simulationen zeigen den Einfluss sowohl der räumlichen Variation der Festigkeit, als auch der Standardabweichung der Festigkeitsverteilung, wie Bild 1 anhand dreier Kurvenscharen der aufgenommenen Druckkraft über der Anzahl der versagenden Elemente veranschaulicht: Durch die räumlich unterschiedliche Anordnung der Festigkeitsverteilung weitet sich mit steigender Standardabweichung die jeweilige Bandbreite sowohl bezüglich der aufgenommenen Kraft als auch bezüglich der dabei ausfallenden Elementanzahl aus.

Die durchgeführten Untersuchungen umfassten erste Sensitivitätsanalysen hinsichtlich Standardabweichung der Materialverteilung sowie der Eignung verschiedener Versagenskriterien und ihre Kombinationen. Unterschieden wurde zudem in modellweite und lokale Kriterien, beispielsweise für den Lasteinleitungs- oder Kantbereich. Im nächsten Schritt erfolgt die endgültige Festlegung der Versagenskriterien als Grundlage des aufzustellenden Sicherheitskonzeptes.

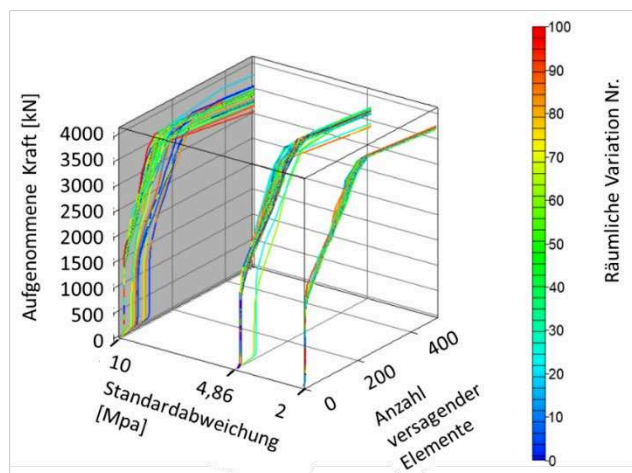


Bild 1: Kurvenscharen der aufgenommenen Druckkraft über der Anzahl der versagenden Elemente und der Standardabweichung der drei Materialverteilungen. Farblich dargestellt ist jeweils die räumliche Anordnungsvariation.

#### Literatur:

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

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

Fleischer, H.; Schlegel, R.; Eckardt, S. (2020) Standsicherheitsberechnungen an bestehenden Gewichtsstützwänden. In: Bautechnik 97, H. 6, S. 387–394.



## 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 BAWMerkblatt 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 systematische, wissenschaftliche und intensive 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

#### Auftragsnummer:

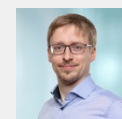
B3951.01.04.70007

#### Auftragsleitung:



Dr. Christoph Stephan  
christoph.stephan@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Charly Kühne  
charly.kuehne@baw.de

#### Laufzeit:

2019 bis 2025

Uelzen I konnte nach etwa dreijährigem Stillstand trotz bekannter Schäden ohne auffällige Blockverformungen für circa einen Monat wieder in 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 Kurzzeitverhalten (betriebsbedingt, tagestemperaturbedingt) und Langzeitverhalten (bleibende Verformungen, jahrestemperaturbedingt) werden standardisiert. Durch multiple Regressionsanalysen lässt sich das zu erwartende Verhalten als Funktion mehrerer Variablen ermitteln und es lassen sich damit dynamische Alarmwerte festlegen.

### 4 Ergebnisse

Bisher konnten anhand einer Literaturrecherche Erkenntnisse über den Stand der Technik für die Bereiche des SHMs und der zugehörigen Sensorik gewonnen werden. Ein entsprechender Sachstandbericht zu dem Thema ist in Arbeit. Ein Prüfstand zur Ermittlung der Langzeitstabilität potenzieller Neigungssensoren für Wasserbauwerke wird aufgebaut. Mit Hilfe laufender Messungen an der Staustufe Hessigheim konnte eine Vorgehensweise entwickelt werden, um dynamische Grenzwerte aus einer Regressionsanalyse zu bestimmen.

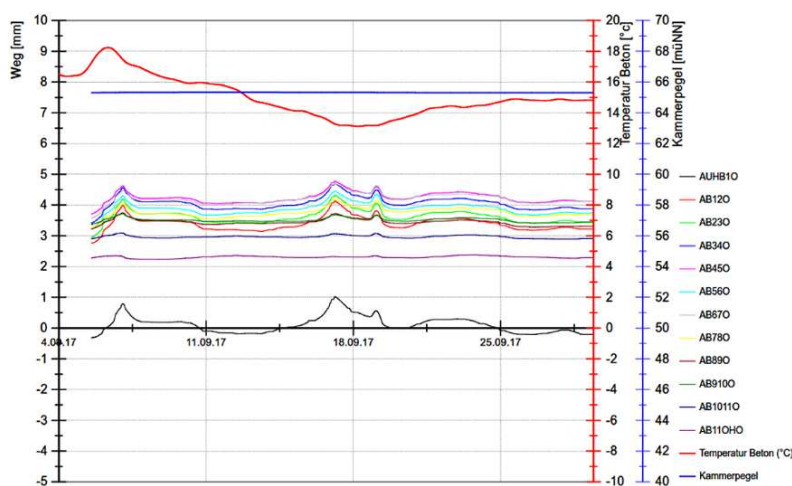
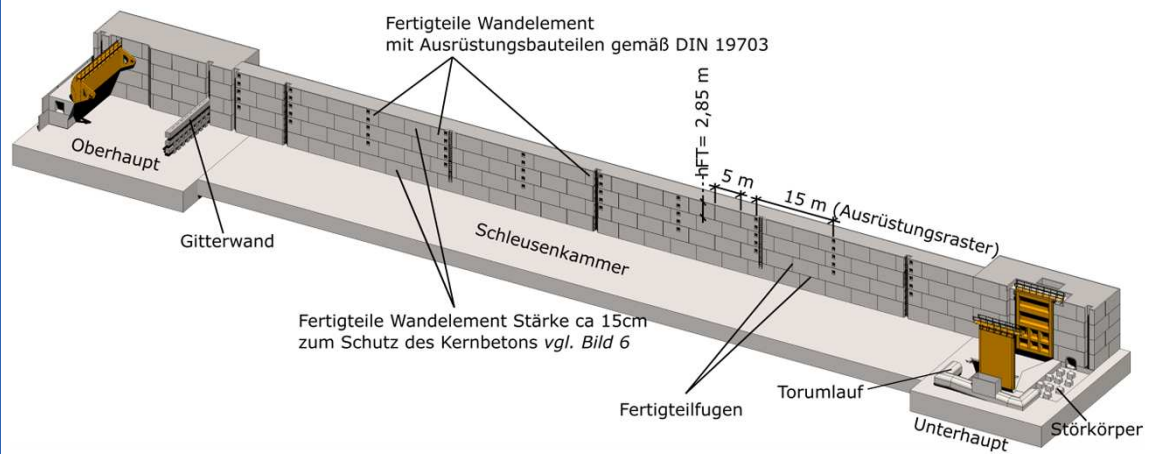


Bild 1: Blockverformungen infolge einer befristeten Inbetriebnahme der Schleuse Uelzen I im September 2017.

#### Literatur:

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



vgl. Lühr et al. (2020) Bild 1

## Einsatz von Fertigteilen im massiven Verkehrswasserbau

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

In den kommenden Jahren steht im Bereich der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung eine Vielzahl an großen Instandsetzungs- und Neubaumaßnahmen im Bereich der massiven Wasserbauwerke an. Diese müssen trotz stetig steigender Anforderungen an die Dauerhaftigkeit mit den zukünftig zur Verfügung stehenden Ressourcen zuverlässig und nachhaltig abgewickelt werden. Massive Fertig- und Teilfertigteillösungen können auf Basis aktueller Erkenntnisse diesen Anforderungen gerecht werden.

Das laufende FuE-Projekt legt gezielt den Fokus auf die Entwicklung technisch einheitlicher Fertigteillösungen für den Neubau massiver Verkehrswasserbauwerke und ist ins BMDV-Expertennetzwerk eingebunden. Nach der Identifikation geeigneter Anwendungsbereiche zum standardisierten Einsatz von Fertigteilen müssen alle relevanten Bemessungsansätze und dementsprechend konstruktive Lösungen erarbeitet werden. Hierzu gehören sowohl die Geometrien und Herstellfolgen der Fertigteile als auch die Regeldetails zur Ausbildung von Fugen, Verankerungen sowie zur Bewehrungsführung. Das Ziel ist die Entwicklung einer wirtschaftlichen und gleichzeitig im Hinblick auf Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit optimierten Bauweise unter Verwendung von Fertigteilen. Dazu werden die Ergebnisse in einen Leitfaden zum Einsatz von Fertigteilen beim Neubau massiver Wasserbauwerke überführt, der als Arbeitshilfe für Planung, Ausschreibung und Herstellung dienen soll.

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

Die WSV steht als Bauherrin und Betreiberin von Wasserbauwerken vor der Herausforderung, die notwendigen Neubaumaßnahmen unter Berücksichtigung heutiger und zukünftiger Randbedingungen zu gewährleisten. Der genannte Aspekt der Dauerhaftigkeit unterliegt maßgeblich einer hohen Oberflächengüte, die mittels hochwertiger Betone erreicht wird. Die Beanspruchungen wiederum erfordern häufig massige Betonquerschnitte zur Gewährleistung der Tragfähigkeit. Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit stehen sich bei massigen Bauteilen diametral gegenüber. Die benötigten Betone führen bei massigen Bauteilen zu starken Hydratationswärmeentwicklungen und konterkarieren somit bei wirtschaftlicher Bauweise die gewünschte Oberflächengüte durch mögliche Rissbildung in Folge von Zwangs- und Eigenspannungen. Aktuell kann dies durch Verwendung von Flugasche auf ein

#### Auftragsnummer:

B3951.01.04.70008

#### Auftragsleitung:

 Stefan Lühr  
 stefan.luehr@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

 Marcel Hasselder  
 marcel.hasselder@baw.de

#### Laufzeit:

2020 bis 2026



technisch akzeptables Maß reduziert werden. Allerdings wird Flugasche durch den Kohleausstieg voraussichtlich nicht langfristig verfügbar bleiben. Neben den betontechnologischen Herausforderungen hat ein Neubau in der Regel Teil- oder Vollsperrungen betroffener Streckenabschnitte zur Folge. Besonders bezüglich des Gütertransports müssen aus volkswirtschaftlicher Sicht Sperrzeiten auf ein Minimum reduziert und notwendige Baumaßnahmen möglichst vollständig unter Betrieb durchgeführt werden. Daher spielen die Faktoren Bauzeit und Bauausführung ebenfalls eine sehr relevante Rolle.

Fertigteile können hinsichtlich der Dauerhaftigkeit und der Minimierung von Sperrzeiten eine effiziente und robuste Lösung darstellen. Zum einen lässt sich mit Fertigteilen eine hohe Oberflächengüte entkoppelt vom massigen Betonquerschnitt herstellen (vgl. Lühr et al. 2020). Zum anderen kann je nach konstruktiver Ausgestaltung der Fertigteile ein wesentlicher Anteil der Bauzeit ins Fertigteilwerk ausgelagert und Bauvorgänge bei Bedarf im Nassen in Betriebspausen durchgeführt werden. Hinzukommt, dass sich durch die dezidierte Planung und Vorproduktion ein reibungsloser Bauablauf erzielen lässt. Darüber hinaus könnten Fertigteilösungen je nach Konstruktion auch zu einem reduzierten Verbrauch endlicher und emissionsintensiver Ressourcen beitragen und sich somit positiv auf den gesamtökologischen Fußabdruck sowie auf die Wirtschaftlichkeit der Wasserstraßeninfrastruktur auswirken. Beispielsweise lässt sich der von Fertigteilen geschützte massive Kernbeton voraussichtlich in geringerer Qualität und folglich unter reduziertem Zementverbrauch herstellen. Gleichzeitig würde weniger Bewehrungsstahl zur Rissminimierung durch Zwangsspannungen benötigt. In bestimmten Bereichen kann sogar die Verwendung recycelter Betone in Betracht gezogen werden.

### 3 Untersuchungsmethoden

Zu Projektbeginn lieferte die Literaturrecherche zum Einsatz von Fertigteilen für massive Betonbauteile wichtige Grundbausteine für das laufende FuE-Projekt. Zusätzlich erfolgten Experteninterviews, um die Entwicklung praxisrelevanter und bedarfsgerechter Lösungen zielgerichtet voranzubringen. Unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse werden aktuell mögliche Fertigteilgeometrien und wirklichkeitsnahe Abbildungen ihrer Beanspruchungen erarbeitet, um erste Berechnungsmodelle abzuleiten. Anhand dieser Modelle können statische Berechnungen und numerische Parameterstudien durchgeführt werden. Offene Fragestellungen bezüglich der Bemessung und Konstruktion sollen mithilfe von Laborversuchen beantwortet werden. Anschließend können die Ergebnisse aus Theorie und Praxis in Pilotanwendungen umgesetzt, validiert und mit der Ortbetonbauweise in Relation gesetzt werden. Es wäre wünschenswert, die Pilotmaßnahmen mittels BIM und gezieltem Monitoring zu begleiten und den gesamten Bauprozess und damit das Lebenszyklusmanagement für zukünftige Bauwerke zu optimieren.

### 4 Ergebnisse

Erste Ideen für die Planung und Bemessung von Fertigteilen wurden am System „Teilfertigteil als verlorene Schalung“ in Lühr et al. (2020) vorgestellt. Dort werden mögliche Bemessungsansätze für die Verankerung von Fertigteilen für den Spaltwasserdruck und die Eisbildung im Spalt sowie für die Zwangsbeanspruchungen aufgezeigt. Weiter hat eine Literaturrecherche gezeigt, dass mit Fertigteilen bereits positive Ergebnisse erzielt werden konnten. Die bisherigen Einsätze von Fertigteilen reichen von Instandsetzungs- bis hin zu umfangreichen Neubaumaßnahmen für Schleusen und Wehre. Obgleich sich daraus Ansätze und Einsatzgebiete zur Standardisierung ableiten lassen, handelt es sich dabei um Individuallösungen. Die Ergebnisse der Experteninterviews machen deutlich, dass besonders das Fehlen standardisierter Lösungen und Regeldetails den Einsatz von Fertigteilen im massiven Wasserbau hemmen. Aktuell werden nur selten Fertigteilösungen im Rahmen von beauftragten Nebenangeboten ausgeführt, da bisher der Einsatz von Fertigteilen in der Regel nicht ausgeschrieben wird. Aus den Überlegungen zu möglichen Fertigteilgeometrien und Einsatzgebieten zeichnet sich neben dem Einsatz von Teilfertigteilen als verlorene Schalung die Zellenbauweise aus kombinierbaren Hohlprofilen mit Kernbetonage als eine weitere Fertigteilösung ab (vgl. Bild 1). Statische Berechnungen zur Querschnittsoptimierung sowie Versuchsplanungen haben in Kooperation mit der TU Kaiserslautern begonnen.

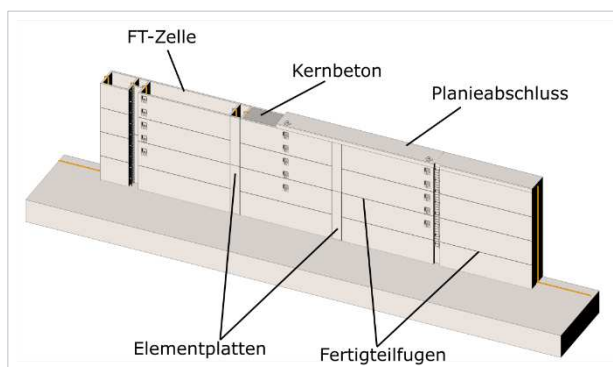


Bild 1: Qualitative Darstellung kombinierbarer Hohlprofile als Zellenbauweise mit Kernbetonage (S. Lühr, M. Hasselder, BAW).

#### Literatur:

Lühr, Stefan; Westendarp, Andreas; Stephan, Christoph; Kunz, Claus (2020): Einsatz von Fertigteilen im massiven Verkehrswasserbau. In: Bautechnik 97 (6), DOI 10.1002/bate.202000010.



## 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 Verschlussstyp 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.

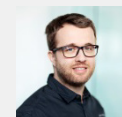
### 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)

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 2022

### 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 Gewebeeinlagen aus Polyester oder Polyamid können nur auf Zug belastet werden. Der Beschichtungsstoff (beispielsweise EPDM) ist vergleichsweise zugschlaff und dient hauptsächlich zum Schutz der Gewebeeinlagen 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 Elastomereinlagen. 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:

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.

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).





## 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 Überschutzzustände (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 Korrosionsschutzanlagen (KKS) betrieben. Ein Teil dieser KKS-Anlagen basiert auf dem galvanischen Prinzip der Metallauflösung im Wasser, wodurch diese Stahlbauwerke temporär vor der Korrosion geschützt werden. Für die Auslegung

#### Auftragsnummer:

B3951.02.04.70008

#### Auftragsleitung:



Dr. Matthias Schmid  
 matthias.schmid@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2022



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.

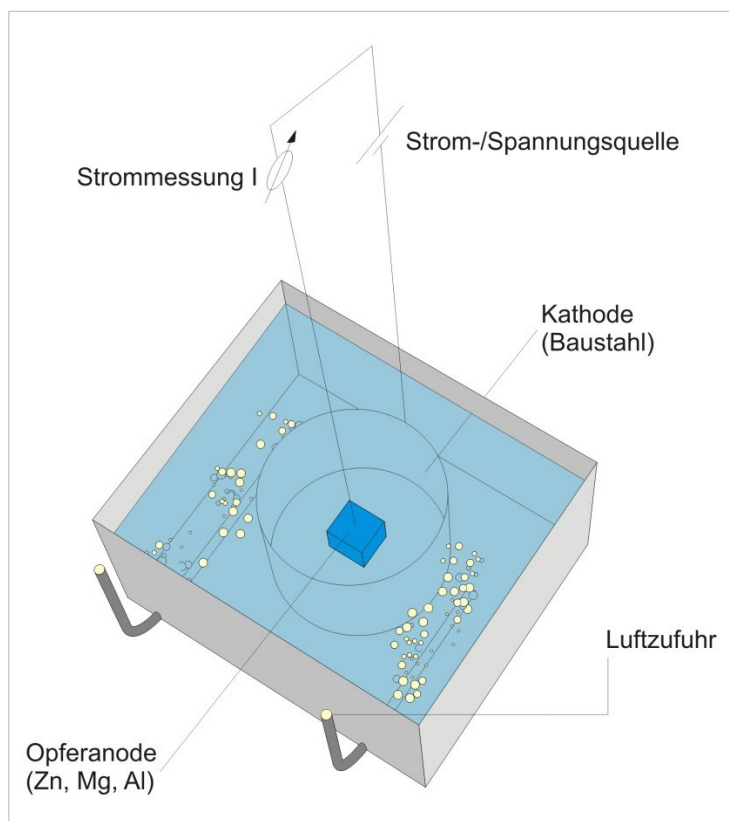
### 3 Untersuchungsmethoden

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 Anodenpotenzial 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

Der praktische Energiegehalt von Magnesiumanoden wurde in Laborversuchen mit unterschiedlichen Stromdichten ermittelt. Erste Auswertungen zeigen, dass der angesetzte Literaturwert zumindest unter den Versuchsbedingungen als konservativ betrachtet werden kann. Für eine abschließende Aussage sind mehr Versuche auch unter anderen Versuchsbedingungen, insbesondere Strömungsbedingungen, notwendig.



#### Literatur:

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

Bild 1: Schematische Zeichnung des Versuchsaufbaus.



## Mikrobiell induzierte Korrosion

### Ermittlung von Ursachen, Nachweismöglichkeiten und Vorhersage

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

In den vergangenen Jahren konnte eine Reihe von ungewöhnlichen 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 z. B. 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 Forschungsvorhaben 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 in Vorhäfen sowie entlang von Kanälen. Da MIC zu einer vorzeitigen Schädigung von Stahlwasserbauwerken führen kann, welche in vielen Fällen erst spät

#### Auftragsnummer:

B3951.02.04.70010

#### Auftragsleitung:



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

#### Laufzeit:

2018 bis 2023

erkannt wird, ist eine verbesserte Vorhersage/Identifikation der Materialschädigung, wie auch die Ermittlung von Korrosionsraten an potentiell durch MIC gefährdeten Standorten wünschenswert und von großem wirtschaftlichem Interesse.

### 3 Untersuchungsmethoden

Die nationale sowie die internationale Fachliteratur zum Thema der mikrobiell induzierten Korrosion wird intensiv gesichtet (z. B. Little und Lee 2014; Little et al. 2020) und im Verlauf des Forschungsvorhabens kontinuierlich verfolgt. Hierbei ist eine Fokussierung auf in der Fachliteratur dokumentierte Schadensfälle sinnvoll. Aus dieser Literaturrecherche heraus ist es Ziel, Parameter abzuleiten, welche für das Auftreten mikrobiell induzierter Korrosion von Stahlwasserbauwerken dominant sein können. Weiterhin werden Begehungen von aktuellen und bereits bekannten Schadensfällen mit einer genaueren Augenscheinnahe und Beprobung der Standorte durchgeführt, um Lücken in Messdaten zu schließen bzw. neue aus der Literaturrecherche abgeleitete Parameter ebenfalls in die Vorortuntersuchungen mit einfließen zu lassen. Kontinuierlich werden die bei der Begehung gewonnenen Daten ausgewertet und die genommenen Proben näher charakterisiert, u. a. durch Kohlenstoff/Schwefel-Bestimmung, (z. B. Nachweis von bakteriellen Stoffwechselprodukten), chemische Analytik (u. a. Nachweis elementaren Schwefels) von Bodenproben und Korrosionsprodukten. In Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG, RimiK-Projekt) werden zudem an beprobten Bauwerken vorgefundene Bakterienkonsortien mikrobiologisch charakterisiert. Um Aussagen über das Abrostungsverhalten bei mikrobiell beeinflusster Korrosion zu generieren, ist zudem geplant, an nachweislich von MIC betroffenen Standorten Auslagerungsversuche mit geeigneten Probekörpern durchzuführen.

Ein zweiter Aspekt des Forschungsvorhabens betrifft die Durchführung von ausgewählten Laborversuchen, um mikrobielle Korrosionsprozesse unter definierten Bedingungen nachzustellen und zu untersuchen. Hierbei ist vorgesehen, auch neue elektrochemische Messmethoden, z. B. elektrochemische Impedanzspektroskopie, anzuwenden. Bei der Entwicklung der Versuche sollen zukünftig 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

Nach Begehung und Untersuchung von Schadensfällen an Stahlwasserbauwerken der WSV zeigt sich, dass MIC an verschiedenen Standorten am Korrosionsgeschehen mit beteiligt ist und zu erhöhten Materialabträgen führen kann. Neben dem Nachweis von MIC durch die Beschreibung der Phänomenologie der Korrosionsprodukte und der Charakterisierung derselben mittels unterschiedlicher Laborverfahren (z. B. C/S-Analyse, FTIR) konnten in Kooperation mit der BfG an verschiedenen Standorten mit MIC assoziierte Ordnungen von sulfatreduzierenden Bakterien mikrobiologisch nachgewiesen werden.

Des Weiteren deutet sich aus den vor Ort gewonnenen Erkenntnissen an, dass an nicht durch Beschichtungen geschützten Stahlwasserbauwerken (z. B. Spundwände) an nachweislich von MIC betroffenen Standorten schon nach relativ kurzen Einsatzzeiten (< 10 Jahre) großflächig ein beginnender, unerwartet hoher Materialverlust an der Wasserseite festgestellt werden kann (Bild 1). Um zukünftig an solchen Standorten genauere Aussagen über auftretende Korrosionsraten treffen zu können, wurde an einem aktuell betroffenen Bauwerk mit der Auslagerung von Stahlplatten begonnen. Durch diese und weitere im Projekt geplanten Auslagerungen sollen mittelfristig Planer bei der Auslegung von neuen Bauwerken mit realistischeren Abschätzungen des am Standort zu erwartenden Materialabtrags unterstützt werden.



Bild 1: Durch MIC verstärkter Korrosionsangriff an einer unbeschichteten Spundwand (Einsatzzeit ca. 10 Jahre), Foto: WSA Spree-Havel.

#### Literatur:

Little, B. J.; Lee, J. S. (2014): Microbiologically influenced corrosion: an update. In: International Materials Reviews 59, 384–393.

Little, B. J.; Blackwood, D. J.; Hinks, J.; Lauro, F. M.; Marsili, E.; Okamoto, A.; Rice, S. A.; Wade, S. A.; Flemming, H.-C. (2020): Microbially influenced corrosion – Any progress? In: Corrosion Science 170, 108641.





## Ermittlung der Systemtragfähigkeit unter Berücksichtigung von Schädigungsgraden an Stahlwasserbauten

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die normative Nachweisführung für Stahlwasserbauten ist auf die Bemessung von Neubauten ausgerichtet (vgl. DIN 19704). Die Sicherheit des Bauwerks wird u. a. über die Tragfähigkeitsnachweise der einzelnen Bauteile des Tragwerks und die Einhaltung konstruktiver Regeln gewährleistet. Darüber hinaus ergeben sich je nach Konstruktionsweise Möglichkeiten zur Lastumlagerung zwischen den Bauteilen, die die Systemtragfähigkeit des Tragwerks bestimmen. Je robuster das Bauwerk gestaltet ist, desto weniger Einfluss hat ein lokaler Schaden auf die Beanspruchbarkeit des gesamten Tragwerks. Im Verfahren zur Zustandsbewertung von Bauwerken an den Bundeswasserstraßen wird diesbezüglich zwischen Haupttragelementen und sekundären Bauteilen unterschieden. Während Schäden an Haupttragelementen die Beanspruchbarkeit des gesamten Bauwerks beeinflussen, beeinträchtigt das Versagen von sekundären Bauteilen lediglich lokal begrenzte Bereiche. Ziel der Ermittlung der Systemtragfähigkeit ist die Identifizierung der Haupttragelemente eines Bauwerks, deren Beschädigung weitreichende Konsequenzen für die Beanspruchbarkeit des Bauwerks hat. Mit Kenntnis über die Auswirkungen der Schäden an den Haupttragelementen sind im Rahmen einer Bauwerksbewertung Aussagen über das gesamte Bauwerk möglich.

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

Durch die Ermittlung der Systemtragfähigkeit in Abhängigkeit der betroffenen Bauteile lassen sich die Bereiche eines Bauwerks identifizieren, die besonders wichtig für die Tragfähigkeit des Bauwerks sind. Im Rahmen einer Bauwerksinspektion wird durch dieses Wissen die Entscheidungsfindung hinsichtlich des Inspektionsumfangs und der Schadensbewertung erleichtert. Durch die Bereitstellung der entwickelten Methodik zur Ermittlung der Systemtragfähigkeit können beauftragte Dritte aussagekräftige Bewertungen von Bestandsbauwerken liefern.

#### Auftragsnummer:

B3951.02.04.70011

#### Auftragsleitung:



Andreas Panenka  
 andreas.panenka@baw.de

#### Laufzeit:

2019 bis 2022

### 3 Untersuchungsmethoden

Die Systemtragfähigkeit wird mithilfe von kalibrierten numerischen Berechnungsmodellen bestimmt. Ausgehend von den Einzelnachweisen an den Bauteilen ermöglicht die schrittweise Steigerung der Modellkomplexität eine realitätsnahe Einschätzung der Systemtragfähigkeit und deren Auswirkung auf die Beanspruchbarkeit eines Bauwerks. Aus einer Variantenstudie werden die maßgebenden Parameter und der Schädigungseinfluss auf die Systemtragfähigkeit ermittelt. Als Vergleichsgröße für die Beanspruchbarkeit wird der Laststeigerungsfaktor bis zum Erreichen eines Versagensmechanismus herangezogen. Je weniger die Last unter Berücksichtigung einer Schädigung gesteigert werden kann, desto geringer ist diesbezüglich die Robustheit des Tragwerks. Untersucht werden die Auswirkungen von geometrischen Abweichungen von der planmäßigen Form und Querschnittsverluste infolge von Korrosion oder Abrasion. In der numerischen Berechnung kommt das Bogenlängenverfahren zum Einsatz, das für das Erfassen des Nachbeulverhaltens von Bauteilen geeignet ist. Darüber hinaus wird die Anwendung probabilistischer Verfahren zur Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit als Kennwert der Systemtragfähigkeit am Beispiel von Wehrwalzen erörtert.

### 4 Ergebnisse

Unter ruhender Belastung wird die Tragfähigkeit eines Bauteils durch die Festigkeit im maßgebenden Querschnitt und die Stabilität von druckbelasteten Querschnittsteilen begrenzt. Die Beanspruchbarkeit eines einzelnen Bauteils hängt u. a. von dessen Schlankheit ab. Je schlanker ein Bauteil ist, desto geringer fällt der zulässige Auslastungsgrad der Festigkeit aus. Berechnungsmodelle für die Systemtragfähigkeit müssen demnach sämtliche Einflussgrößen berücksichtigen, die für beide Grenzzustände maßgebend sind. Neben geometrischer und materieller Nichtlinearität gehören dazu auch geometrische und strukturelle Imperfektionen, die in der Regel mittels geometrischer Ersatzimperfektionen im Berechnungsmodell berücksichtigt werden (vgl. Schneider 2006). Anders als in den numerischen Analysen von Stabtragwerken und plattenförmigen Bauteilen führt das multimodale Beulverhalten von Schalentragwerken bei der Identifikation geeigneter geometrischer Ersatzimperfektionen zu einer umfangreichen Parameterstudie, in der die maßgebende Kombination aus Imperfektionsform und deren Amplitude und Richtung ermittelt werden muss (vgl. Rotter 2018). Eine abschließende Kalibrierung stellt die Zulässigkeit der Modellannahmen sicher und schränkt die Wahl der Eingangsgrößen auf die Kombinationen ein, die zu realistischen Ergebnissen führen.

Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse über das Systemtragverhalten von stab-, platten- und schalenbasierten Tragwerken lassen sich die Auswirkungen von Schäden durch die gezielte Abänderung der kalibrierten Berechnungsmodelle untersuchen. Als Grundlage für die Bewertung der Auswirkungen von Schäden dient die Traglastreserve eines Tragwerks (vgl. Wisniewski 2018). Aus dem Vergleich der Traglast des Bauwerks zwischen Soll- und Ist-Zustand ergibt sich der Schädigungsgrad als Kennzahl für den Zustand des Tragwerks. Ein Schädigungsgrad von 100 % bedeutet eine vollständige Aufzehrung der Traglastreserve durch das untersuchte Schadensbild und den Kollaps des Bauwerks.

Der Schädigungsgrad als Kennzahl für die Auswirkungen eines Schadensfalls ermöglichen eine Kategorisierung von Bauteilen nach deren Bedeutung für das Tragsystem. Beispielsweise spielen die Querrahmen in Kastenschützen eine wichtige Rolle für die Erhaltung der Querschnittsform, um eine Berechnung nach der Stabtheorie durchführen zu dürfen. Auf die Traglast eines Tragsystems, das durch Schubbeulen im Auflagerbereich versagt, hat der Verlust von Querrahmen jedoch keinen Einfluss (Bild 1). Der Schädigungsgrad beträgt in diesem Fall demnach 0 %. Während der geringe Schädigungsgrad somit eine Kategorisierung der Querrahmen als sekundäre Bauteile rechtfertigt, ist der Auflagerbereich als Ort des Versagensmechanismus von primärer Bedeutung. Durch das zusätzliche Wissen über das Tragwerksverhalten beim Ausfall von Querrahmen, ist sowohl eine gezieltere Durchführung der Bauwerksinspektion als auch eine nachvollziehbare Schadensklassifizierung möglich.

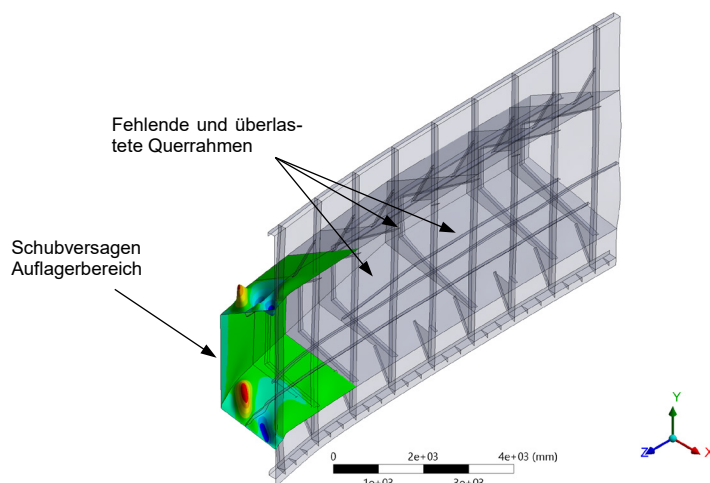


Bild 1: Schubversagen im Auflagerbereich eines exemplarischen Kastenschützes bei 2,27-facher Belastung trotz fehlender Querrahmen.

#### Literatur:

Rotter, J. Michael (2018): Challenges and their resolution in both philosophy and process to exploit advanced computation in shell structure design. DOI: 10.1201/9781315166605-5.

Sadowski, Adam J.; Fajuyitan, O. Kunle; Wang, Jie (2017): A computational strategy to establish algebraic parameters for the Reference Resistance Design of metal shell structures. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2017.02.012.

Wisniewski, Dawid; Casas, Joan R.; Ghosn, Michel (2018): Load Capacity Evaluation of Existing Railway Bridges based on Robustness Quantification. DOI: 10.2749/101686606777962440.



## Beständigkeit von Korrosionsschutzbeschichtungen

### Zeitlicher Verlauf der Unterrostung im Salzsprühnebel

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Da Bauwerke starken mechanischen, thermischen, chemischen, hygrischen sowie biologischen Beanspruchungen ausgesetzt sind, führen die Verwitterungsprozesse neben einer verminderten Beständigkeit auch zu einer verstärkten Freisetzung verschiedener (Schad-)Stoffe sowie Transformationsprodukte.

Das FuE-Vorhaben „Beständigkeit von Korrosionsschutzbeschichtungen“ ist Teil der zweiten Phase des BMDV-Expertenetzwerks, das 2016 durch das Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur (BMVI) initiiert wurde. In einer ersten Phase des Expertenetzwerks wurde die Eignung verschiedener Reparaturmaterialien untersucht, die für frühzeitige und kleine Ausbesserungsarbeiten eingesetzt werden sollen, um kostspieligere und zeitintensivere Instandhaltungsarbeiten hinauszuzögern. In der zweiten Phase soll nun die Dauerhaftigkeit von Korrosionsschutz- und Reparaturbeschichtungen untersucht und die ökologische Relevanz von Abbau- bzw. Transformationsprodukten der Reparaturprodukte analysiert werden. Insgesamt sind drei Arbeitspakete geplant. Zunächst soll in Laborversuchen durch Bewitterung die chemische Beständigkeit untersucht werden. Anschließend sind Untersuchungen zur mechanischen Beständigkeit geplant. In einem letzten Arbeitspaket sollen physiko-chemische Analysen von Beschichtungsstoffen und realen Schadensfällen durchgeführt werden.

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

Die erwarteten Erkenntnisse helfen der WSV bei der Auswahl geeigneter Korrosionsschutzsysteme bei gestiegenen Anforderungen an die Dauerhaftigkeit sowie bei Anforderungen an die ökologischen Auswirkungen.

Neben der Analyse und Bewertung der Korrosionsschutzsysteme sollen auch etablierte Laborverfahren re-evaluiert und deren Einfluss auf die Ergebnisse der Zulassungsprüfungen analysiert werden. Durch erneute genaue Untersuchung von Zulassungsverfahren können Versuchsparameter angepasst und optimiert werden. Außerdem wird geprüft, ob zusätzliche Prüfverfahren in die Zulassungsprüfung aufgenommen werden können.

#### Auftragsnummer:

B3951.02.04.70012

#### Auftragsleitung:



Dr. Katharina Wetzel  
 katharina.wetzel@baw.de

#### Laufzeit:

2020 bis 2023



### 3 Untersuchungsmethoden

Die Beständigkeit von Korrosionsschutzbeschichtungen wird in einem der zentralen Zulassungstests, dem Salzsprühnebeltest nach DIN EN ISO 9227:2017-07 (2017) und der BAWRichtlinie Prüfung von Beschichtungssystemen für den Korrosionsschutz im Stahlwasserbau (RPB 2011) genauer betrachtet. Dazu wird der zeitliche Verlauf der Unterrostung anhand typischer Stahlwasserbaubeschichtungen mit Schichtdicken um 500 µm untersucht. Von vorherigen Untersuchungen an zyklischen Kurzzeittests ist bekannt, dass insbesondere der Salzsprühnebeltest großen Einfluss auf die Unterrostung hat (LeBozec et al. 2015). Untersuchungen an Stahlwasserbaubeschichtungen sind allerdings nicht literaturbekannt (Pietsch et al. 2002).

Zusätzlich zur visuellen Auswertung sollen mechanistische Untersuchungen von Korrosionsprozessen mithilfe von Raster-Kelvinsonden Messungen durchgeführt werden, die vertiefende Einblicke in die chemischen Vorgänge bieten. Analysen mittels Raster-Kelvinsonde sind zerstörungsfrei und ermöglichen eine hohe Ortsauflösung, sowie Sensitivität, was die Methode für Forschungszwecke besonders attraktiv macht.

Mechanische Prüfungen von Korrosionsschutzbeschichtungen sollen anhand von Abrieb- und Schlagprüfungen durchgeführt werden. Bei der Abriebprüfung soll neben der typischerweise verwendeten BAW Abriekammer (nach RPB 2011) auch das Fallrohr (angelehnt an DIN 53233) als weniger zeitintensives Prüfverfahren validiert werden. Im Rahmen der Schlagprüfung werden 10 verschiedene Beschichtungssysteme in unterschiedlichen Prüfserien untersucht, um Grenzwerte zu ermitteln. Diese sollen es anschließend ermöglichen, die Schlagprüfung als zusätzliches Standardprüfverfahren anbieten zu können. Neben den genormten Laborverfahren ist eine Langzeitauslagerungskampagne an 2 Standorten geplant, bei der erstmalig Reparaturmaterialien unter Realbedingungen geprüft werden.

### 4 Ergebnisse

Im Salzsprühnebeltest wurden zwei Stahlwasserbaubeschichtungssysteme (mit und ohne Zinkstaubgrundierung) mit einem Reparaturmaterial hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs der Unterrostung verglichen. Dazu wurde über einen Zeitraum von insgesamt sechs Monaten bewittert. Die Auswertung erfolgte zunächst visuell. Der Kurvenverlauf der drei untersuchten Systeme verläuft ähnlich: Nach einer kurzen Initiierungsphase nimmt die Unterrostung im weiteren Verlauf deutlich zu. Für sehr lange Belastungszeiten verlangsamt sich die Korrosion deutlich, sodass die Kurve langsam abflacht. Das Reparaturmaterial bietet insbesondere zu Beginn der Bewitterung eine gute Performance, die im weiteren Verlauf hingegen nicht mit der Schutzwirkung der beiden Stahlwasserbaubeschichtungen mithalten kann. Dadurch ist der Reparaturstoff insbesondere für kurzfristige Instandhaltungsarbeiten ideal geeignet. Die Stahlwasserbaubeschichtung mit Zinkstaubgrundierung zeigt erwartungsgemäß eine etwas bessere Performance im Vergleich zur gleichen Beschichtung ohne Zinkstaubgrundierung.

Bei den mechanischen Untersuchungen wurde die etablierte BAW-Abriekammer nach RPB 2011 (Bild 1) mit dem Fallrohrtest verglichen. Dazu wurden vier Beschichtungssysteme (Stahlwasserbaubeschichtungen und Reparaturmaterialien) untersucht, um die relativen Abriebwerte miteinander zu korrelieren. Die Auswertung erfolgte über die Ermittlung des Masseverlustes. In den Versuchen zeigte sich, dass eine gute Korrelation zwischen den Abriebwerten der Abriekammer und des Fallrohrs besteht. Für eine dauerhafte Verwendung des kostengünstigeren und weniger zeitintensiven Fallrohrs bedarf es allerdings einer Optimierung des Versuchsstands, um die Durchführung zu vereinfachen, welche in Anbetracht der vielversprechenden Ergebnisse auch erfolgen soll.



Bild 1: Versuchsstand zur Prüfung des Abriebwiderstands: BAW-Abriekammer.

#### Literatur:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2011): BAWRichtlinie Prüfung von Beschichtungssystemen für den Korrosionsschutz im Stahlwasserbau (RPB), Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

DIN EN ISO 9227:2017-07: Korrosionsprüfungen in künstlichen Atmosphären – Salzsprühnebelprüfungen.

LeBozec, N.; Thierry, D.; Le Calvé, P.; Favennec, C.; Pautasso, J.-P.; Hubert, C. (2015): Performance of marine and offshore paint systems: Correlation of accelerated corrosion tests and field exposure on operating ships. In: Materials and Corrosion 66 (3), S. 215–225.

Pietsch, S.; Kaiser, W.-D.; Stratmann, M. (2002): Korrosionsschutzwirkung von Beschichtungen am Defekt – Einfluss der Oberflächenvorbereitung und der Pigmentierung der Grundbeschichtung. In: Materials and Corrosion 53 (5), S. 299–305.



## 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:

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

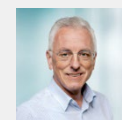
### 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)

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.spoerel@baw.de

#### Laufzeit:

1998 bis 2022



### 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. Messaufnehmer für die Bestimmung von Temperaturen und Sättigungsgraden 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 (XF1) grundsätzlich wesentlich stärker ausgeprägt als mit hoher Sättigung (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, analog zu den Bauwerksmessungen mit Temperatursensoren und MRE ausgestattet und auf dem Gelände der BAW ausgelagert. Auswertungen zum Elektrolytwiderstand während des CIF-Tests in unterschiedlicher Messtiefe liefern zusätzlich neue Erkenntnisse zu Gefriervorgängen und frostinduzierten tiefenabhängigen Wasseraufnahmen (Spörel 2019) sowie den Zusammenhang mit der Entwicklung der durch den relativen dynamischen E-Modul abgebildeten inneren Schädigung des Betons (Bild 1). Diese werden zum Abgleich mit den Vorgängen unter Praxisbedingungen und zu einer Einordnung der Beanspruchungsintensität herangezogen.

Die Ergebnisse werden derzeit in einem Abschlussbericht zusammengefasst.

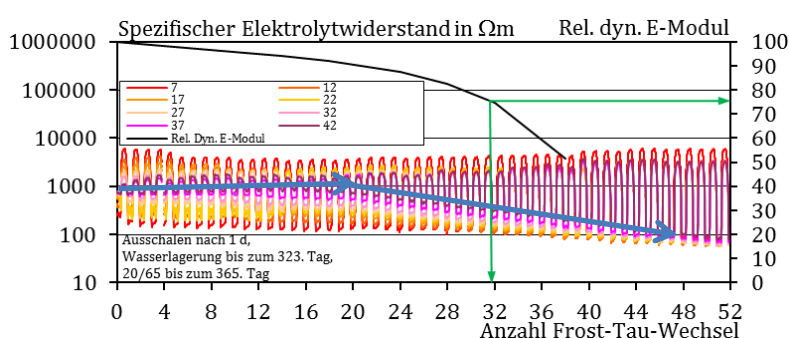


Bild 1: Innere Schädigung, Gefriervorgänge und Wassereindringen in den Prüfkörper während des CIF-Tests.

#### Literatur:

Siebel, E. et al. (2005): Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse. Schriftenreihe des Deutsch. 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. Lungby: 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.

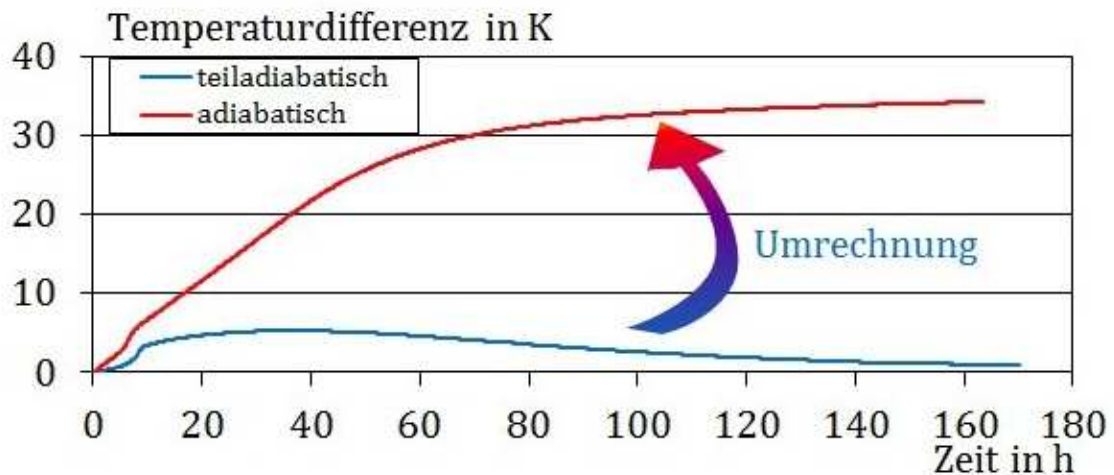
Spörel, F. (2010c): Dauerhaftigkeit Bauwerke: Frostwiderstand zementgebundener Baustoffe. In: Tagungsband BAW-Kolloquium „Forschung und Entwicklung im Küstenverkehrswasserbau“, S. 51–58.

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 Zwangsspannungen in massigen Bauteilen von Bedeutung. Die adiabatische Temperaturerhöhung geht als Eingangsparameter direkt in die Zwangsbemessung 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 stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Sie benötigen als wesentlichen Eingangsparameter die Hydratationswärmeentwicklung des Zementes. Diese wird bei der Zementherstellung im Rahmen der werks-eigenen Produktionskontrolle (WPK) bestimmt.

#### Auftragsnummer:

B3951.03.04.70004

#### Auftragsleitung:

Dr. Frank Spörel  
 frank.spoerel@baw.de

#### Laufzeit:

2008 bis 2022

Die Hydratationswärmeentwicklung des Zementes kann mit drei verschiedenen Methoden experimentell ermittelt werden. 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 Streuungen beim wesentlichen Eingangsparameter für die Hydratationswärmeberechnung nicht auszuschließen sind. Vor diesem Hintergrund wurden Untersuchungen an fünf Zementen und daraus hergestellten Betonen durchgeführt, um die Aussagequalität verschiedener Bestimmungsmethoden und Rechenverfahren 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 worden sind. Die Abweichungen zum Referenzverfahren betragen bis zu etwa 60 J/g. Für die eigentliche Aufgabe der Prüfverfahren – die Einstufung der LH-Eigenschaft – war dies eher unkritisch, für die Verwendung der Messwerte als Eingangsparameter zur Berechnung der adiabatischen Temperaturerhöhung resultieren hieraus doch signifikante Einschränkungen hinsichtlich der Aussagequalität.

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 konnte die adiabatische Temperaturerhöhung nach sieben Tagen mit annähernd gleichwertiger Genauigkeit wie mit kommerziell erhältlichen komplexen Rechenprogrammen abgeschätzt werden. Ursachen hierfür sind neben Schwankungen aus den vorgenannten Prüfverfahren die für die Berechnungen erforderlichen, auf Basis von Literaturdaten zu treffenden Annahmen. Diese Annahmen können nur eine Abschätzung sein.

Mit der DIN EN 12390-15:2019-10 ist erstmals eine europäische Norm zur Bestimmung der adiabatischen Temperaturerhöhung von Beton erschienen. Die dort beschriebene Vorgehensweise wurde mit dem adiabatischen Betonkalorimeter der BAW nachvollzogen. Bild 1 zeigt den Mittelwert der gemessenen Temperaturerhöhung  $\Delta T_m$  aus 5 Messungen an einem Beton. Der Variationskoeffizient lag am Ende der Messung bei etwa 3 % und damit in der in DIN EN 12390-15 angegebenen Größenordnung. Adiabatische Kalorimeter nach DIN EN 12390-15 weisen eine Abweichung von der Adiabasie auf, welche in Versuchen bestimmt werden muss. Im Temperaturbereich zwischen 20 und 60 °C ergab sich für das Kalorimeter eine Abweichung von der Adiabasie von etwa  $\alpha=0,003$  K/h, welche deutlich geringer als die Mindestanforderung der DIN EN 12390-15 (0,05 K/h) ist. Mithilfe von  $\alpha$  sowie der Wärmekapazität des Betons und des Kalorimeters wurde die Eigentemperatur  $\Delta T_c^*$  nach DIN EN 12390-15, Anhang B, berechnet. Diese berücksichtigt Wärmeverluste sowie die Erwärmung der Probe und des Kalorimeters.

Derzeit wird der Abschlussbericht erstellt.

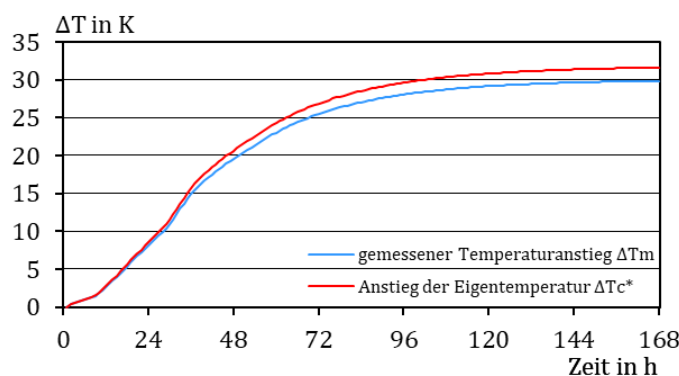


Bild 1: Temperaturerhöhung von Beton nach DIN EN 12390-15.

#### 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 Hydroabrasion 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 Hydroabrasion angemessen beschreibt, ist oft Gegenstand von Diskussionen. Die Untersuchungen verfolgen daher folgende wesentliche Ziele hinsichtlich der Beschreibung der Einwirkungs- und Widerstandsseite infolge Hydroabrasion:

- 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 Hydroabrasion
- 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 Hydroabrasion 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 Betonersatzsysteme 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 2022

### 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) der Zielsetzung 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 grundsätzlichen 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 hinsichtlich Hydroabrasion gleichermaßen abbilden und differenzieren können. Weiterhin zeigten die Untersuchungen, dass die Anwendung existierender Modelle zur Beschreibung des Fortschritts von Abrasionschäden unter Einbeziehung der Einwirkungsseite derzeit aufgrund zahlreicher zu treffender Annahmen mit großen Unsicherheiten versehen ist. Darüber hinaus wurde deutlich, dass teilweise Präzisierungen der Prüfandbedingungen erforderlich sind.

Als wesentliches Ergebnis wurde herausgearbeitet (Spörel 2018, Spörel 2019), 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. Die Druckfestigkeit des Betons, welche wesentlich durch die Zementsteineigenschaften beeinflusst wird, übt ebenfalls einen, wenn auch geringeren Einfluss aus.

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

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

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).

Die Erkenntnisse ergänzen aufgeworfene Fragestellungen im Rahmen einer aktuellen Übersicht zur Thematik (Omoding et al. 2020). Die Untersuchungen werden in einem Abschlussbericht dargestellt.

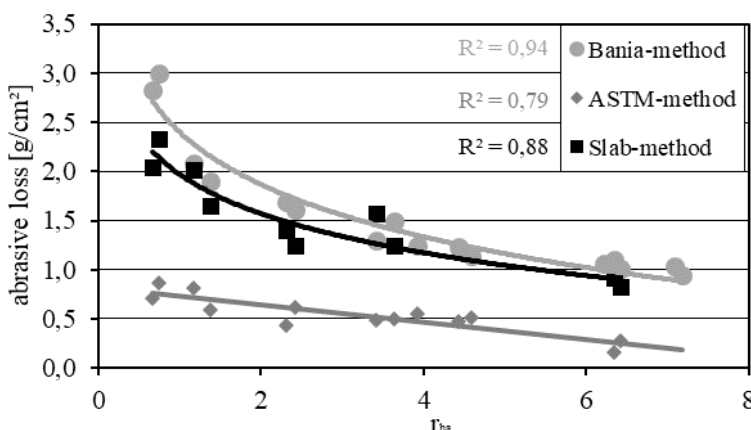


Bild 1: Zusammenhang zwischen  $r_{ha}$  und dem Hydroabrasionsverschleiß des Betons (Spörel 2019).

#### Literatur:

Omoding, N., Cunningham, L. S.: Lane-Serff, G. F.: Review of concrete Resistance to Abrasion by Waterborne Solids. *ACI Materials Journal* 117 (3), 2020, S. 41–52.

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, TU 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 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 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 Gesamtperrung 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:



Marc Schmitz  
marc.schmitz@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Thomas Hesse  
thomas.hesse@baw.de  
Wladimir Klein  
wladimir.klein@baw.de  
Dr. Thorsten Reschke  
thorsten.reschke@baw.de  
Elisa. Schwarzweiler  
elisa.schwarzweiler@baw.de  
Anna Leicht  
anna.leicht@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, Austausch Ausrüstung 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 ist ein modulares System mit Instandsetzungslösungen („Modulbaukasten“) für die wesentlichen Bauteile und Randbedingungen bei Einkammerschleusenanlagen entwickelt worden. Dieses steht der WSV als Informations-, Planungs- und Ausschreibungsbasis (vgl. Waleczko et al. 2019) zur Verfügung.

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, soll im Rahmen eines Pilotprojekts die komplette Grundinstandsetzung einer Schleuse unter Betrieb erfolgen.

Das Gesamtvorhaben wird in Kooperation zwischen der BAW, dem Wasserstraßen-Neubauamt Heidelberg (WNA-HD) 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 Schleusenammern
- Begleitung der Vorplanung der beauftragten Ingenieurbüros für die Instandsetzung der Schleuse Schwabenheim unter Betrieb
- Begleitung und Gestaltung des „Verfahrensverfahrens“ 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 WNA-HD
- Informationssammlung zu geplanten bzw. ausgeführten Maßnahmen, Integration der Erfahrungen in den Modulbaukasten (u. a. Schleuse Hollage/NBA Hannover, Schleuse Rahe/NLWKN, Toraustausch Mainschleusen/WSA Schweinfurt sowie Schleuse Wusterwitz/WSA Brandenburg)
- Planung und Durchführung von Bauteilversuchen an der rechten Kammer der Doppelschleuse Oberesslingen zur partiellen Trockenlegung und zur Reprofilierung der Kammerwand durch Fertigteile und Ortbetonvorsatzschale in Zusammenarbeit mit dem WNA-HD.
- Aufnahme von internationalen Kontakten zum Austausch von Erfahrungen zum Einschwimmen von Ersatzhäuptern

Im Oktober 2017 wurde der Stand der Erkenntnisse und Ergebnisse im Rahmen eines eigenen BAW-Kolloquiums zur Thematik vorgestellt. Die erste Ausgabe des kontinuierlich weiter zu entwickelnden IuB-Modulbaukastens wurde im April 2021 der WSV und der Fachöffentlichkeit auf einer internetbasierten Plattform zur Verfügung gestellt (<https://izw.baw.de/wsv/planen-bauen/instandsetzung-unter-betrieb>).

### Literatur:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2017): Instandsetzung von Schleusen unter Betrieb. Tagungsband. 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.; Westendarp, A. (2019): Die Bewertung und Auswahl von Instandsetzungsverfahren für Schleusenammern 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 (z. B. Grenzwerte der Konzentration der Stoffe zur Definition und Einteilung der Expositionsklassen XA1 bis XA3) und insbesondere für die Anwendung im Spezialtiefbau (z. B. Besonderheiten der Gründungselemente in der Herstellungsweise und Tragwirkung; Zielnutzungsdauer 100 statt 50 Jahre) mit Unsicherheiten und Unklarheiten behaftet.

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 zementgebundenen Baustoffe.

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

#### 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 2024

- 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)
- Aufbereitung der Ergebnisse des Vorhabens, sodass 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. Durch Gefügeuntersuchungen sollen wesentliche Parameter der Dauerhaftigkeit ermittelt werden. Neben im Labor hergestellten verpressten Zementsteinproben werden ebenfalls Untersuchungen an Bohrkernen von Bohrpfählen 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 Technischen Universität Hamburg.

## 4 Ergebnisse

Um die Baustoffeigenschaften von Verpressankern zu charakterisieren, wurden Untersuchungen am Versuchsstand der BAW an in Fein- bis Mittelsanden hergestellten Verpressankern durchgeführt. Die betrachteten Verpresskörper wurden aus einem CEM I 42,5 R mit einem initialen w/z-Wert von 0,5 hergestellt und mit 3 bar verpresst.

Durch den Verpressvorgang wird die Porosität des Zementsteins erheblich reduziert. Jedoch zeigen die Ergebnisse, dass sich beim Verpressen sowohl über den Radius als auch über die Höhe des Verpresskörpers ein Gradient einstellt. Die Porosität nimmt radial von innen nach außen ab. Über die Höhe nimmt die Porosität hingegen mit Zunahme der Entfernung vom Ort der Druckaufbringung zu.

Das ausgebildete Gefüge der Verpresskörper weist einen geringen Kapillarporenanteil auf und kann als dicht beschrieben werden. Die mittels Quecksilberdruckporosimetrie ermittelten Porositätskennwerte weisen im Vergleich zu im Labor hergestellten verpressten (mittels Filterpresse gemäß DIN 4127:2014-02) und unverpressten Zementsteinen geringere Porenradien auf (vgl. Bild 1). Dies ist zum Teil auf höhere Hydratationsgrade (ermittelt mittels DTA/TGA) der im Boden verpressten Zementsteine ( $\alpha = 0,80-0,89$ ) im Vergleich zu etwas jüngeren verpressten ( $\alpha = 0,68$ ) und unverpressten ( $\alpha = 0,78$ ) zurückzuführen. Die Ergebnisse bestätigen somit die zuvor mittels Filterpresse im Labor durchgeführten Untersuchungen an Zementsuspensionen hinsichtlich des Filtrationsverhaltens und der Gefügeeigenschaften von verpresstem und unverpresstem Zementstein.

In derzeit laufenden Versuchen wird der Widerstand von sowohl im Boden verpressten Proben als auch von mittels Filterpresse verpressten Zementsteinen gegenüber einem Angriff durch kalklösende Kohlensäure ermittelt. Untersucht werden Steuerungsmöglichkeiten wie der w/z-Wert und die Zementart.

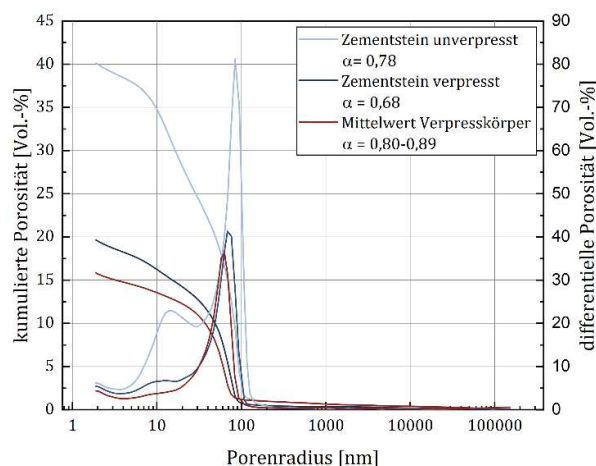


Bild 1: Porenradienverteilung von verpressten und unverpressten Zementsteinen und Verpresskörpern aus CEM I 42,5 R (w/z = 0,5) mit unterschiedlichen Hydratationsgraden  $\alpha$ .





## 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 beispielsweise 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. gegebenenfalls 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 Bauwerkssituationen 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

Die Depassivierung und der Korrosionsverlauf des Betonstahls in mit Süßwasser durchströmten Trennrissen werden möglicherweise maßgeblich durch die anstehende Wasserdruckhöhe und den daraus resultierenden Durchfluss beeinflusst. Dies wird derzeit anhand experimenteller Laborversuche der Hochschule für angewandte Wissenschaften München untersucht (Pollner und Dauberschmidt 2021). Die Untersuchungen zur auslaugungsinduzierten Korrosion in wasserführenden Trennrissen erfolgen an balkenförmigen Prüfkörpern aus Stahlbeton, in denen zur Messung elektrochemischer Kenngrößen Elektroden installiert sind (Bild 1). Die Prüfkörper wurden aus Portlandzement- und Hochofenzementbeton hergestellt und nach hinreichender Erhärtung bis zu einer mittleren Rissbreite von  $w_m = 0,25$  mm belastet. Durch die Risse der Prüfkörper wird demineralisiertes Wasser mit einem hydrostatischen Druck von näherungsweise 0 bar, 0,2 bar oder 1,0 bar geleitet. Die elektrochemischen Vorgänge werden durch entsprechende Messungen über mehrere Monate erfasst. Nach dem Ausbau der Probekörper am Ende des Versuchs werden die Auslaugungseffekte am Betongefüge sowie Korrosionserscheinungen an den Bewehrungsstäben untersucht.

Die bisherigen Ergebnisse zeigen eine erwartungsgemäß starke Abhängigkeit des Anfangsdurchflusses durch die Trennrisse von der anstehenden Wasserdruckhöhe. Der Durchfluss nimmt bei allen Versuchsreihen mit der Zeit stark ab, was bei der Versuchsreihe mit 0 bar besonders stark ausgeprägt ist und nach etwa drei Monaten mit Faktoren zwischen  $10^{-5}$  und  $10^{-7}$  unter den Anfangsdurchflüssen liegt. Bei allen Versuchsreihen wurde bereits kurz nach Beginn der Wasserbeaufschlagung ein Abfall der Potentiale sowie eine Zunahme der Elementströme gemessen, was auf eine Depassivierung der Bewehrung und einen Beginn der Korrosion hindeutet. Die Wasserdruckhöhe spielt hierbei eine untergeordnete Rolle. Der Korrosionsverlauf zeigt jedoch eine gewisse Abhängigkeit vom Durchfluss: Während die Potentiale der annähernd drucklos beaufschlagten Prüfkörper mit andauernder Laufzeit der Versuche wieder zunehmen und der Elementstrom dementsprechend zurückgeht, bleiben die Potentiale und Elementströme der Versuchsreihen 0,2 bar und 1,0 bar kontinuierlich auf einem kritischen Niveau. Unabhängig von der Wasserdruckhöhe sind die gemessenen Elementströme der Portlandzementbetone etwa doppelt so hoch wie die der Hochofenzementbetone, was vermutlich auf die höheren Elektrolytwiderstände der Hochofenzementbetone zurückzuführen ist.



Bild 1: Prüfkörper mit Elektroden (Pollner und Dauberschmidt 2021).

### Literatur:

Pollner, T.; Dauberschmidt, C. (2021): Untersuchungen zum Einfluss der Wasserdruckhöhe im Trennriss auf die Depassivierung und Korrosionsrate der Bewehrung. Zwischenbericht, Hochschule für angewandte Wissenschaften München, Institut für Material- und Bauforschung Labor für Baustoffe.



## 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 cm bis 20 cm (Spritzbetonvorsatzschalen) errichtet werden, bilden die Standardinstandsetzungslösung für die Grundinstandsetzung vieler Wasserbauwerke und hier insbesondere von Schleusenammerwänden. Bei einigen Bauteilen, beispielsweise Wehrpfeilern, haben derartige Vorsatzschalen jedoch 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 cm 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 dünnere Instandsetzungssysteme aus Mörtel oder Beton in Schichtdicken von etwa 40 mm bis maximal 60 mm, ihre Eignung vorausgesetzt, 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 Entfall der

#### Auftragsnummer:

B3951.03.04.70017

#### Auftragsleitung:



Dr. Amir Rahimi  
 amir.rahimi@baw.de

#### Laufzeit:

2017 bis 2022



korrosionsgefährdeten Bewehrung und die geringen Dicken. Die bisherigen 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>“

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 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.

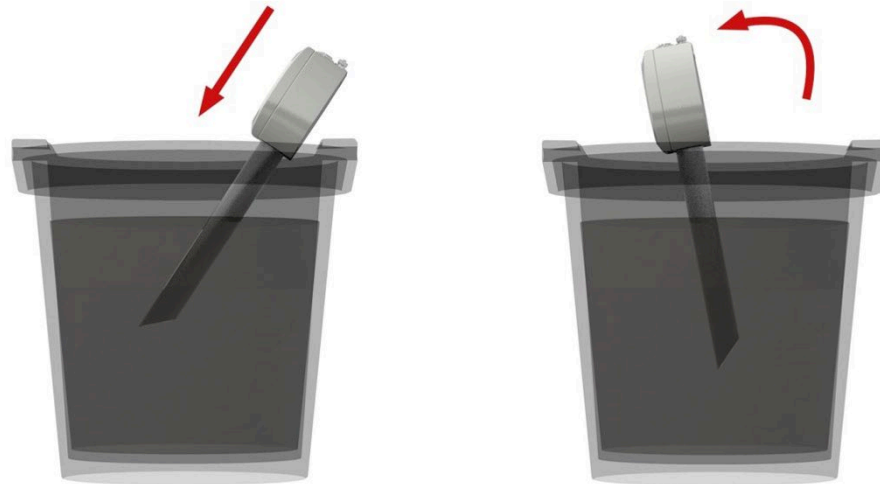
Auf Basis der aus früheren gemeinsamen Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse (Westendarp et al. 2016) wurde im Arbeitspaket 2 (AP 2) in Zusammenarbeit mit dem ibac das BAW-Merkblatt „Flächige Instandsetzung von Wasserbauwerken mit textilbewehrten Mörtel- und Betonschichten (MITEX)“ erarbeitet, welches im März 2020 veröffentlicht worden ist. 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.

Derzeit wird die Instandsetzung des Umlaufkanals einer Schiffsschleuse mittels eines textilbewehrten Instandsetzungssystems im Rahmen einer Probemaßnahme geplant. Die instand zu setzenden Flächen sind sowohl hydrostatischem Wasserdruck als auch Risswasser- und Porenwasserdruck ausgesetzt (entsprechend Lastszenario 3, s. o.). Eine rd. 30 mm dicke textilbewehrte Spritzbetonschale soll den abzutragenden Altbeton im beinahe gesamten kreisförmigen Querschnitt des Umlaufkanals ersetzen. Der Verbund des Instandsetzungssystems zum Altbeton soll durch Ankerelemente zusätzlich zur Adhäsion gesichert werden. Hierbei sollen zwei verschiedene Ankertypen eingesetzt und es soll deren Wirksamkeit untersucht werden. Die Ausführung der Probeinstandsetzung ist für 2022 geplant und wird als Pilotprojekt zur Erweiterung des BAW-MITEX angesehen. Die Planung der Maßnahme wird durch Laborversuche des ibac zur Untersuchung des Einflusses des Risswasserdrucks auf die Funktionalität und die Dauerhaftigkeit des textilbewehrten Systems (in Anlehnung an Morales Cruz 2020) sowie mit Untersuchungen der Hochschule Augsburg, Institut für Technologie- und Wissenstransfer, über die Biegetragfähigkeit des Systems und die Tragfähigkeit der Anker begleitet. Für die Überwachung der Rissbreitenänderungen im Untergrund und die Rissbildung und -entwicklung in der Instandsetzungsschicht wird ein Monitoringsystem konzipiert.

### Literatur:

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

Morales Cruz, C. (2020): Crack-distributing carbon textile reinforced concrete protection layers. Dissertation an der RWTH Aachen University.



## Frischbetonfeuchtesonden

### Anwendbarkeit bei ZTV-W-Betonen

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Der Wassergehalt im Frischbeton hat entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften des Frisch- und die Qualität des Festbetons. Bisherige Prüfverfahren (i. d. R. Darren) sind umständlich, zeitintensiv und nur bedingt genau. Neue am Markt befindliche Messsonden messen angeblich schneller, einfacher und genauer. Es gibt bisher aber keine neutralen und vergleichenden Untersuchungen zu diesen Aussagen.

Die am Markt befindlichen mobilen Systeme sollen daher an verschiedenen Betonrezepturen für Neubaumaßnahmen nach ZTV-W LB 215 erprobt werden. Die Randbedingungen für die Anwendung der Verfahren sollen ausgetestet werden. Ziele des FuE-Vorhabens sind die Bestimmung der Messpräzision der Verfahren und deren Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen im ZTV-W-Bereich. Für als geeignet identifizierte Verfahren sollen Arbeitsanleitungen erstellt werden.

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

Die einfache und schnelle Überprüfung des Wassergehalts im Frischbeton würde die baubegleitende Qualitätssicherung nach ZTV-W LB 215 und 219 deutlich vereinfachen und beschleunigen. Die Ausführungsqualität bei massiven Wasserbauwerken könnte gesteigert werden. Der Aufwand der Bauaufsicht/-überwachung könnte reduziert werden.

#### 3 Untersuchungsmethoden

Im Laboratorium für Bau- und Werkstoffprüfungen der Technischen Hochschule Köln und auf Baustellen wurden Messungen unter den üblichen Praxisrandbedingungen und unter Laborbedingungen durchgeführt und miteinander verglichen. Dabei wurden ermittelt:

- Prüftechnische Einflussfaktoren
- Betontechnologische Einflussfaktoren

Baupraktische Einflussfaktoren sollen in einem zweiten Untersuchungsschritt auf Baustellen untersucht werden.

#### Auftragsnummer:

B3951.03.04.70018

#### Auftragsleitung:



Hilmar Müller  
 Hilmar.mueller@baw.de

#### Laufzeit:

2020 bis 2022

## 4 Ergebnisse

Die Untersuchungen haben bisher gezeigt:

- Steigerungen des  $w/z$ -Wertes um 0,02 sind kaum zu messen.
- Bei bestimmten Betonen kann eine Steigerung des  $w/z$ -Wertes um 0,04 bzw. eine Zugabe von Fließmittel deutlich an den Messwerten erkannt werden.
- Bei in der Eignungsprüfung kalibrierten Messungen kann zwischen einem Konsistenzanstieg aus Wasser- oder Fließmittelzugabe unterschieden werden.
- Bei den beiden untersuchten LP-Betonen waren Änderungen im Wassergehalt fast nicht zu bestimmen.
- Gleiche Wassergehalte an unterschiedlichen Betonmischungen mit unterschiedlichen Ausgangsstoffen ergeben deutliche Unterschiede in den Messwerten.

Weitere Untersuchungen zum Einfluss bei Messungen auf Baustellen stehen noch aus.

### Literatur:

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



## Entwicklung und Anpassung von AKR-Performance-Prüfungen

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Ein besonders hohes Risiko für das Auftreten einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton (AKR) besteht bei Meerwasserbauwerken, da hier eine permanente Alkalizufuhr erfolgt. AKR-Schäden und damit verbundene sehr aufwändige Instandsetzungen (siehe Titelbild; Instandsetzung Wehrpfeiler Eidersperwerk) sind nur zu vermeiden, wenn die Alkaliaktivität der verwendeten Gesteinskörnung im Vorfeld sicher beurteilt werden kann. Daher werden i. d. R. nur als alkaliunempfindlich geltende Gesteinskörnungen eingesetzt. Wegen der regionalen Verfügbarkeit kommen im Meerwasserbau oftmals Festgesteine (Splitte) aus Skandinavien zum Einsatz. In den letzten Jahrzehnten hat sich jedoch anhand von Schadensfällen gezeigt, dass es auch mit Festgesteinen zu einer AKR kommen kann. Darüber hinaus ist nicht sicher geklärt, inwieweit gegebenenfalls auch feine Gesteinskörnungen bei langer Nutzungsdauer zu einer AKR beitragen können.

Zur besseren Bewertung der Verwendbarkeit und Verträglichkeit der Betonausgangsstoffe wurden daher sogenannte Performance-Prüfungen entwickelt (Stark et al. 2006, Borchers et al. 2014), welche neben einer Simulation der Einwirkungen auch die tatsächliche Betonzusammensetzung berücksichtigen. Diese sowie weitere AKR-Prüfverfahren (Prüfung feiner Gesteinskörnungen, Schnellprüfverfahren) sollen im Rahmen des Forschungsvorhabens gezielt weiterentwickelt und optimiert werden.

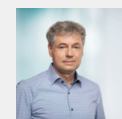
### 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)

Eine Reihe bestehender Meerwasserbauwerke haben ein Alter und einen Zustand erreicht, welcher aktuell verschiedene Ersatzbaumaßnahmen erforderlich macht. Im Zusammenhang mit diesen Baumaßnahmen besteht ein hohes Interesse, die im Küstenbereich verfügbaren Betonausgangsstoffe wirtschaftlich und sicher einsetzen zu können. Dies setzt eine belastbare Einschätzung der Alkaliempfindlichkeit dieser Gesteinskörnungen sowie darauf abgestimmte Verwendungsregeln voraus, um die für Verkehrswasserbauwerke aus Beton erforderliche hohe Dauerhaftigkeit über den gesamten Nutzungszeitraum gewährleisten zu können.

#### Auftragsnummer:

B3951.03.04.70019

#### Auftragsleitung:



Dr. Thorsten Reschke  
 thorsten.reschke@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Anka Frentzel-Schirmacher  
 anka.frentzel-schirmacher@baw.de

#### Laufzeit:

2020 bis 2024



### 3 Untersuchungsmethoden

Die Weiterentwicklung der zur Verfügung stehenden AKR-Prüfverfahren umfasst die Überprüfung, Anpassung und Entwicklung von Performance-Prüfungen für verschiedene Festgesteine und feine Gesteinskörnungen sowie die Optimierung von Schnellprüfverfahren. Dafür sind folgende Untersuchungsschritte vorgesehen:

1. Identifikation und Erprobung geeigneter Verfahren zur Charakterisierung der Alkaliempfindlichkeit feiner Gesteinskörnungen:
  - a. Mörtelschnelltest (Alternativverfahren nach Alkali-Richtlinie)
  - b. Natronlaugetest nach Alkali-Richtlinie
  - c. Mineralogische Charakterisierung
  - d. Petrographische Charakterisierung am Dünnschliff (Streupräparat, Erprobung „point counting“)
2. Modifikation der Schnelltestverfahren für grobe Gesteinskörnungen im Hinblick auf wasserbautypische Randbedingungen.
3. Optimierung der im Rahmen von Betoneignungsprüfungen erforderlichen Performance-Prüfverfahren (siehe Bild 1) durch Anpassung der Prüfrandbedingungen an die praxisrelevanten Einwirkungen von Meerwasserbauwerken.

Die Arbeiten erfolgen im Rahmen einer Kooperation mit dem F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde (FIB) der Bauhaus-Universität Weimar.

### 4 Ergebnisse

Es wurden zunächst anhand der Informationen zu aktuell in Norddeutschland laufenden Baumaßnahmen der WSV typischerweise verwendete grobe und feine Gesteinskörnungen ausgewählt. Für die Auswahl feiner Gesteinskörnungen mit unterschiedlicher Alkaliempfindlichkeit wurde dabei zusätzlich auf Voruntersuchungen des FIB Weimar zurückgegriffen.

Auf Basis der so getroffenen Materialauswahl wurden anschließend Betonrezepturen für die typischen Expositionen im Meerwasserbau konzipiert, der Versuchsablauf in den Laboren der BAW und des FIB Weimar im Detail geplant, und die ausgewählten Betonausgangsstoffe (feine und grobe Gesteinskörnungen, Zemente, Zusatzmittel und -stoffe) in den erforderlichen Mengen beschafft.

Die üblichen Standarduntersuchungen zur Bewertung der Eignung der Betonausgangsstoffe wurden erfolgreich durchgeführt, nun folgen die verschiedenen Prüfungen zur Charakterisierung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen. Dafür werden im nächsten Schritt die Betonprüfkörper für die verschiedenen Performance-Prüfverfahren hergestellt und die über einen längeren Zeitraum andauernden Performance-Prüfungen begonnen.



Bild 1: Prüfkörper Performance-Prüfung mit AKR-typischen Netzrisse.

#### Literatur:

Borchers, I; Müller, C. (2014): Praxisgerechte Prüfung der Alkaliempfindlichkeit von Betonen für die Feuchtigkeitsklassen WF und WA in AKR-Performance-Prüfungen. In: Beton 64, Verlag Bau+Technik, Heft 10, S. 403–409.

Stark, J; Freyburg, E.; Seyfarth, K.; Giebson, C. (2006): AKR-Prüfverfahren zur Beurteilung von Gesteinskörnungen und projektspezifischen Betonen. In: Beton 56, Verlag Bau+Technik, Heft 12, S. 574–581.





# 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.

### 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.

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

### 3 Untersuchungsmethoden

Es wurde eine Methodik gewählt, die eine Einstufung des Risikos einer Vernachlässigung von Instandhaltungsmaßnahmen an Wasserstraßeninfrastrukturen ermöglicht. Die Methodik besteht aus den folgenden Schritten:

1. Der Risikobegriff für Infrastruktursysteme wird definiert. Diese Systeme sind oft durch eine hierarchische Struktur gekennzeichnet, was bedeutet, dass sie Subsysteme umfassen. Haimes (2008) hat sie „Systeme von Systemen“ (SoS) genannt. In SoS finden Ereignisse auf der unteren hierarchi-

**Auftragsnummer:**

B3951.04.04.70006

**Auftragsleitung:**



Dr. Francesca Marsili  
francesca.marsili@baw.de

**Laufzeit:**

2018 bis 2022

schon Ebene statt und breiten sich in einem Kaskadeneffekt über die höheren Ebenen aus. Es wird ein Werkzeug entwickelt, das als „Risiko-Helix“ bezeichnet wird und die Simulation von Kaskadenausfällen und die Abschätzung negativer Folgen ermöglicht. Das Werkzeug basiert auf einem reduktionistischen Ansatz, nach dem die Funktionsweise des Systems durch die Funktionsweise seiner Teile erklärt werden kann. Das Werkzeug ermöglicht auch die Analyse und das Verständnis historischer Schadensfälle.

2. Es wird ein integraler Ansatz verwendet, um die Risikowahrnehmung der Experten und die aus den Datenbanken (WSVPruf, WADABA, TRAVIS, Elwis) gewonnenen Informationen zu kombinieren. Um die Risikokriterien zu aggregieren und Erhaltungsmaßnahmen einzustufen, werden multikriterielle Entscheidungsmethoden angewendet (De Almeida et al. 2015). Die bisher angewendeten Methoden sind MAUT, SMARTS und WINGS, wobei die erste Methode die Einbeziehung der Risikowahrnehmung der Experten durch die Definition von Nutzfunktionen ermöglicht. WINGS ermöglicht die Bewertung des Risikos in hierarchischen Systemen. SMARTS ist eine vereinfachte Version von MAUT, die verwendet werden kann, wenn mehrere Versagensszenarien berücksichtigt werden müssen.
3. Jeder Schritt in der Anwendung von multikriteriellen Entscheidungsmethoden bringt jedoch einige Herausforderungen mit sich, die beachtet werden müssen. Beispiele für wiederkehrende Herausforderungen sind die Sicherstellung der Datenkonsistenz, die Begrenzung der Dimensionalität der Daten und die Durchführung einer Problemregularisierung. Es werden KI-Techniken eingeführt, um den Einsatz von multikriteriellen Entscheidungsmethoden zu unterstützen, und insbesondere um eine Datenvor- und -nachverarbeitung durchzuführen. Der k-medoids-Algorithmus wurde speziell zur Klassifizierung von Wasserstraßenobjekten nach ihren baulichen Eigenschaften verwendet. Es werden Visualisierungswerkzeuge eingesetzt, um die Kommunikation über Risiken zu erleichtern. Beispiele für die implementierten Visualisierungsstrategien sind kognitive Karten, Diagramme und GIS-Karten. Da die meisten Risikofaktoren eine geografische Bedeutung haben, eignen sich kollaborative GIS-Karten besonders gut, um Risikowahrnehmung und Daten zu integrieren.

#### 4 Ergebnisse

Der in diesem Bericht beschriebene Ansatz ermöglicht die Klassifizierung der Objekte, da das Risiko aus einer Vernachlässigung der Instandhaltung von mehreren Faktoren abhängt. Die Methode integriert die Risikowahrnehmung von Experten und Informationen, die aus Datenbanken extrahiert werden. In einigen Fällen können weitere Daten oder Simulationen notwendig sein, um eine verfeinerte Analyse durchzuführen. Daher befasst sich der vorgeschlagene Ansatz auch mit der Sammlung weiterer Informationen, wenn präzisere Risikobewertungen erforderlich sind. PREVIEW ist ein Verbundprojekt der BAW mit der Hochschule Karlsruhe, dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) sowie den Firmen antwortING – Beratende Ingenieure PartGmbH und 4Flow AG. 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 (siehe auch [www.sifo.de](http://www.sifo.de)) angesiedelt.

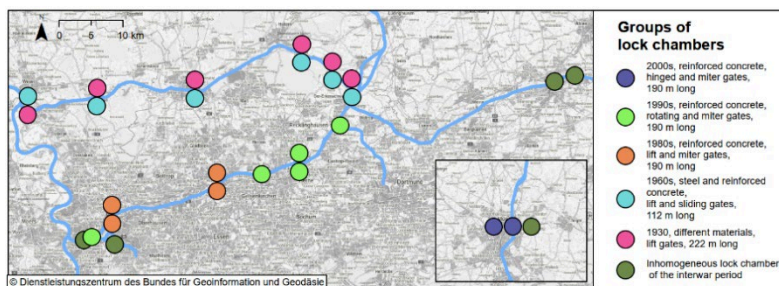
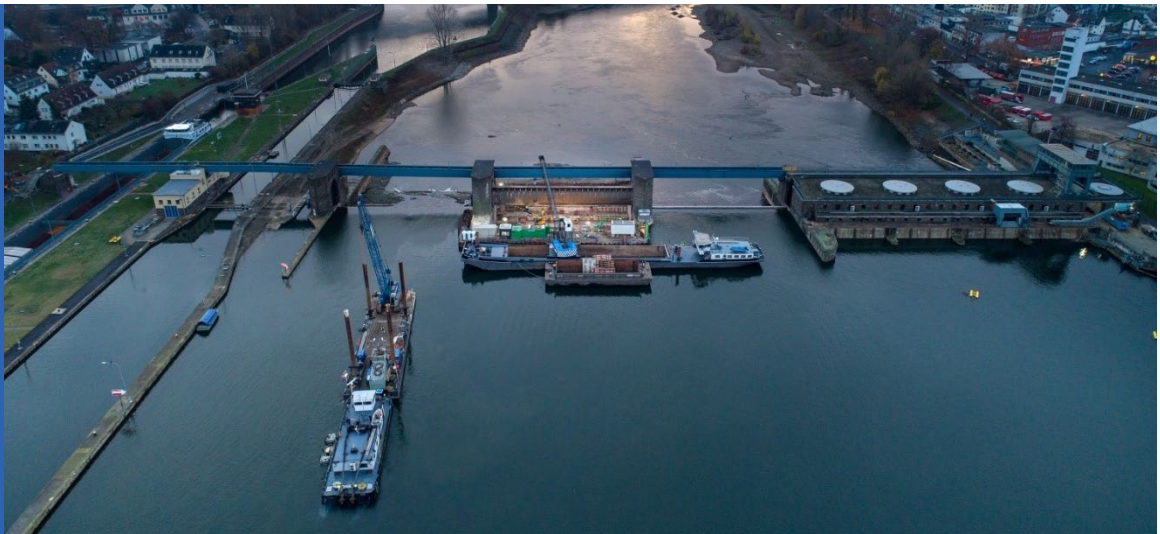


Bild 1: GIS-Karte, die die Klassifizierung nach baulichen Eigenschaften der Schleusenammern im westdeutschen Kanalnetz darstellt, die unter Anwendung des Clusteralgorithmus K-medoids durchgeführt wurde.

#### Literatur:

- De Almeida, A. T.; Cavalcante, C. A. V.; Alencar, M. H.; Ferreira, R. J. P.; de Almeida-Filho, A. T.; Garcez, T. V. (2015): Multicriteria and Multi-objective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis. International Series in Operations Research & Management Science.
- Haimes, Y. Y. (2008): Models for risk management of systems of systems. International Journal of System of Systems Engineering, 1(1/2), 222.



## Ausschreibung, Vergabe und Abrechnung von Bauleistungen im Verkehrswasserbau

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Zahlreiche Bauwerke der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes weisen einen hohen Instandsetzungszustand und einen daraus resultierenden schlechten Bauwerkszustand auf. Um die erforderlichen baulichen Maßnahmen zukünftig beschleunigt abzuwickeln, sollen die Prozesse in der Ausschreibung, Vergabe und Abrechnung der WSV optimiert werden.

Zur Optimierung soll die derzeit laufende Zentralisierung der Datenbank der Ausschreibungssoftware iTWO unterstützt und in das IT-Konzept der WSV integriert werden. Weiterhin soll durch die Bereitstellung einer einheitlichen Kostengliederung und die Berechnung von Kostenkennwerten die Kalkulation zukünftiger Baumaßnahmen in der Entwurfsphase unterstützt werden.

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

Im Rahmen des Projektes wird eine einheitliche Kostengliederung erstellt, welche einen Vergleich einzelner Kostenpositionen von verschiedenen Baumaßnahmen ermöglicht. Zudem sollen auf Basis abgerechneter und geplanter Baumaßnahmen dynamische Kostenkennwerte für die verschiedenen Ebenen der Gliederung erstellt werden. Durch eine laufende Fortschreibung dieser Kennwerte können zukünftige Maßnahmen vereinfacht kalkuliert werden, was langfristig zu einer größeren Kostenstabilität laufender Maßnahmen führt.

Auf Basis einer einheitlichen Gliederung mit dynamischen Kostenkennwerten können zukünftige Kalkulationen schnell, transparent und nachvollziehbar gestaltet werden. Dies soll die Prüf- und Genehmigungsprozesse nach der Verwaltungsvorschrift VV-WSV 2107, BMVI (2016) innerhalb der WSV nachhaltig verbessern und beschleunigen. Durch eine Verknüpfung der Gliederung und der Preisdaten mit iTWO soll das Projekt zudem in das bestehende IT-Konzept der WSV integriert werden.

#### Auftragsnummer:

B3951.04.04.70007

#### Auftragsleitung:

Katrin Kloé  
 katrin.kloe@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

André Kirchner  
 andre.kirchner@baw.de

#### Laufzeit:

2019 bis 2022



### 3 Untersuchungsmethoden

Eine zentrale Rolle innerhalb des Projekts spielt die Software iTWO. Hierbei handelt es sich um ein von der WSV genutztes Programm, mit dem die Ausschreibung, die Vergabe und die Abrechnung von Bauleistungen digital erfasst und umgesetzt werden können. Derzeit erfolgt die Zentralinstallation der Software standortübergreifend für die WSV. Da innerhalb von iTWO Gliederungen und Preisdatenbanken generiert werden können, soll die Installation ebenfalls begleitet und unterstützt werden.

Im Ergebnis des Projekts soll ein Konzept generiert werden, um Prozesse im Bereich des Kostenmanagements zu beschleunigen und transparenter zu gestalten. Um eine Anwendung in der Praxis zu gewährleisten, ist es unumgänglich, die derzeitigen Strukturen und Prozesse im Bereich der Ausschreibung, Vergabe und Abrechnung innerhalb der WSV zu analysieren. Auf Basis eines standardisierten Fragebogens werden daher diverse Neubau- und Unterhaltungsämter der WSV vor Ort besucht und die Ergebnisse der Umfragen statistisch ausgewertet.

Neben den Umfrageergebnissen bilden bereits abgerechnete und geschätzte Baumaßnahmen eine weitere Untersuchungsgrundlage. Auf deren Basis soll mittels analytischer Methoden eine Kostengliederung ähnlich zu DIN 276-1:2018-12 auf mehreren Ebenen erstellt werden. Zudem werden mittels statistischer Untersuchungsmethoden dynamische Kostenkennwerte für die Teilbereiche der Kostengliederung berechnet und fortlaufend aktualisiert. In diesen Kennwerten soll ebenfalls die Baupreisentwicklung für den Wasserbau in der WSV berücksichtigt werden. Das Projekt wird gemeinsam mit der WSV, dem ITZBund sowie der Hochschule Karlsruhe bearbeitet.

### 4 Ergebnisse

Die Ergebnisse dieser Arbeit werden in Form eines detaillierten Konzepts dargestellt. Dies soll Anwendungshinweise und -möglichkeiten aufzeigen, mit denen die geplanten Ziele im Kostenmanagement umgesetzt werden können.

Neben möglichen Anwendungshinweisen zur Software iTWO sollen die Schwerpunkte der Ergebnisse eine Kostengliederung sowohl für Wehranlagen als auch für Schleusen bilden. Mit diesen Gliederungen können zukünftig die Kostenschätzungen für die verschiedenen Planungsstadien der VV-WSV 2107 auf diversen Ebenen kalkuliert und transparent dargestellt werden.

Über ein Berechnungstool sollen auf Basis abgerechneter Baumaßnahmen dynamische Kostenkennwerte automatisiert ermittelt und zur Verfügung gestellt werden. Dies führt neben Kostentransparenz zur Beschleunigung von Prozessen innerhalb der Ausschreibung, Vergabe und Abrechnung von baulichen Maßnahmen der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes.

Im Zuge des Projekts wurde für Wehranlagen eine Kostengliederung (s. Bild 1) erstellt. In Anlehnung an die DIN 276 umfasst diese ebenfalls drei Detaillierungsebenen und soll den Entwurfsprozess der VV-WSV 2107 vereinheitlichen und transparent gestalten. Zur vereinfachten Anwendung der Kostengliederung wurden bestehende Strukturen aus den Systemen iTWO und SAP berücksichtigt und implementiert. Dadurch soll eine Kompatibilität mit den bestehenden Systemen und Strukturen der WSV erreicht werden.

Entwurf Kostengliederung – 1. Ebene	
01-00-00	Allgemeine Kosten der Baumaßnahme
02-00-00	Vorbereitende bauliche Maßnahmen
03-00-00	Wehrvorfeld einschl. Dämme
04-00-00	Massivbau – Wehrvorfeld und Wehrbauwerk
05-00-00	Wehrverschlüsse inkl. Antriebe und Steuerung
06-00-00	Betriebsgebäude
07-00-00	Zusätzliche Ausrüstung
08-00-00	Außenanlagen
09-00-00	Nebenkosten des Baus

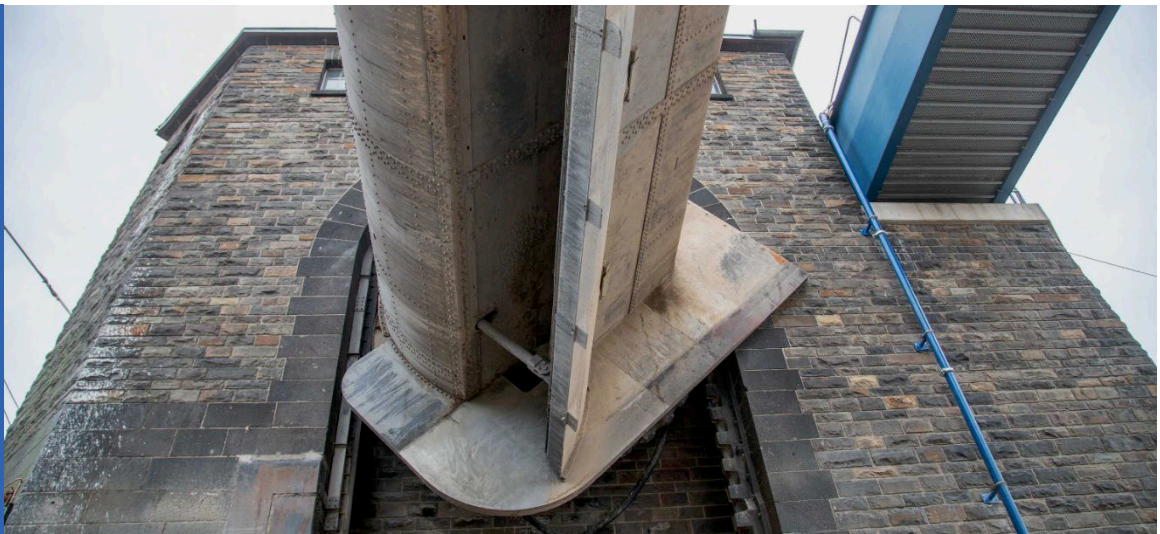
**Literatur:**

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2016): Verwaltungsvorschrift der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (VV-WSV). Entwurfsaufstellung VV-WSV 2107, Juni 2016.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2020): Technisches Regelwerk-Wasserstraßen (TR-W) 8-W3 Baupreisindizes, Ausgabe 2020-03.

DIN 276:2018-12: Kosten des Bauwesens. Berlin: Beuth Verlag.

Bild 1: Entwurf einer Kostengliederung – 1. Ebene.



## 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- und Neubaumaßnahmen erfordern eine Priorisierung sowie Optimierung des Erhaltungsmanagements. Der aktuelle Erhaltungszustand kann auf die historisch gewachsene Altersstruktur und den entstandenen Instandhaltungsrückstau zurückgeführt werden. Fachkundige Ingenieurinnen und Ingenieure führen die regelmäßige Überprüfung und Dokumentation des Zustands durch und inspizieren die Bauwerke hinsichtlich der Gesichtspunkte Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Verkehrssicherheit (siehe Bild 1). 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. Die Entwicklungen erfolgen basierend auf dieser Objektart und werden anschließend auf das restliche Objektportfolio der WSV übertragen.

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 liegt auf Schäden am Massivbau mit besonderer Relevanz für die Tragfähigkeit. Die Ergänzung des Merkblatts zielt auf die Aspekte Erkennung und Benotung 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)

Auf der Basis der Ergebnisse dieses Forschungsprojekts erhält die WSV eine Unterstützung bei der Steigerung der Verkehrssicherheit sowie bei der Priorisierung von Erhaltungs- und Neubaumaßnahmen. Die Qualität der Bauwerksinspektion kann durch zusätzliche Handlungsempfehlungen gesteigert und Schäden mit Relevanz für die Tragfähigkeit können sicherer identifiziert und einheitlich bewertet werden. Somit wird eine fundierte Grundlage für Entscheidungen im Erhaltungsmanagement geschaffen.

## 3 Untersuchungsmethoden

Ausgangsbasis für die anstehenden Untersuchungen sind Inspektionsergebnisse der Objekte der Inspektionskategorie A nach VV-WSV 2101, Bestandsdaten sowie von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) erstellte Gutachten und Nachrechnungen. Für Bauwerke im Zuständigkeitsbereich der WSV werden 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 für die Klassifizierung der Auswirkungen von Schäden auf die Tragfähigkeit sollen Informationen zu Schäden am Massivbau der Wehranlagen zusammengestellt werden. Die Analyse der Bauwerksinspektionsergebnisse, Nachrechnungen und Gutachten ist erforderlich, 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. Ansätze zur Clusterbildung und zur Beurteilung der Robustheit der Bauwerke dienen der Schärfung der Ergebnisse und Identifikation typischer Bauarten von Wehranlagen.

## 4 Ergebnisse

Die Analyse der Inspektionsergebnisse zeigt, dass sich ein großer Anteil der Bauwerke in einem kritischen Zustand befindet. Rund 30 % der Wehranlagen sind in einem nicht ausreichenden bzw. ungenügenden Zustand (Zustandsnote 3,5 bis 4,0). Weitere 50 % der Anlagen erreichen nur noch einen ausreichenden Zustand (Zustandsnote 2,5 bis 3,4).

Im Rahmen der Schadensanalysen werden die Bauwerke hinsichtlich ihrer Konstruktionsart in pfeiler- und sohlgelagerte Verschlussysteme differenziert. Zu den pfeilergelagerten Verschlussystemen zählen z. B. Walzen, Schütze sowie Druck- und Zugsegmente. Sektoren und Klappen zählen zu den sohlgelagerten Verschlussystemen. Die Untersuchung des Zusammenhangs von Schadensbildern mit dem Schadensort und dem Konstruktionstyp spiegelt die große Vielfalt der Wehranlagen im deutschen Wasserstraßennetz wider. Zur Klassifizierung der Schäden werden diese zu typischen Schadensbildern zusammengefasst. Dies ist aufgrund der großen Anzahl und Vielfalt an Schäden erforderlich. Schadensbilder mit Einfluss auf die Tragfähigkeit einzelner Tragwerksbereiche oder des gesamten Bauwerks sind z. B. Korrosion der Tragbewehrung mit einhergehenden Betonabplatzungen, Risse, Setzungen und Unterspülungen. Basierend auf diesen Erkenntnissen kann die maßgebende Schadensart für den jeweiligen Konstruktionstyp identifiziert werden. Potenzielle Schadensursachen über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks sind zu untersuchen, um den Einfluss auf die Tragfähigkeit differenzierter beurteilen zu können.



Bild 1: Zur Bauwerksinspektion trockengelegtes Wehrfeld der Wehranlage Dietfurt.

### Literatur:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2018): BAWMerkblatt Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV). Karlsruhe: BAW (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).

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hg.) (2010): VV-WSV 2101: Bauwerksinspektion. Ausgabe September 2010. (Verwaltungsvorschrift der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes).



## Innovative Methoden zur Zustandserfassung

Eine Handlungsempfehlung für den Einsatz im Rahmen der Bauwerksinspektion

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Das Gebot des wirtschaftlichen Handelns einerseits und die Verpflichtung zur Verkehrssicherung andererseits erfordern die Notwendigkeit regelmäßiger Bauwerksinspektionen. Ihre Durchführung ist jedoch mit einem hohen Zeit- und Kostenaufwand verbunden. Ein alternder Bauwerksbestand, wechselnde Anforderungen und begrenzte personelle Ressourcen erhöhen die Herausforderungen. Eine Chance bietet jedoch der rasante Fortschritt auf dem Gebiet der Digitalisierung in Form von kostengünstigen und hochauflösenden Sensoren, leistungsfähigen Datenspeichergeräten und intelligenten Algorithmen.

Während die ergänzende digitale Zustandserfassung bei Brückeninspektionen erfolgreich getestet wird (Holst et al. 2016, Hallermann et al. 2018, Moreu et al. 2017), bleibt ihre praktische Anwendung an Verkehrswasserbauwerken eine Seltenheit. Doch gerade bei Wasserbauwerken, die häufig große Dimensionen und Bauteile unter Wasser aufweisen, ist eine gewinnbringende Anwendung der Methoden vorstellbar. Es fehlen jedoch ein systematischer Überblick über die verschiedenen Untersuchungsmethoden und eine Bewertung ihres Potenzials unter Beachtung der spezifischen Randbedingungen im Wasserbau. Um dieser Problematik Rechnung zu tragen, ist das Projekt in vier Phasen unterteilt:

- Ist-Analyse zur Zustandserfassung von Wasserbauwerken
- Recherche zu innovativen Methoden zur Zustandserfassung
- Praxiserprobung ausgewählter Methoden
- Formulierung einer Handlungsempfehlung für den Einsatz der Methoden im Rahmen der Bauwerksinspektion

Das Vorhaben findet in Kooperation mit dem geodätischen Institut der RWTH Aachen von Universitätsprofessor Dr.-Ing. Jörg Blankenbach statt.

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

Das Forschungsvorhaben zielt darauf ab, die Qualität und Effizienz der Inspektionen von Wasserbauwerken zu erhöhen. Die Datenerhebung mit modernen Sensorsystemen könnte eine Identifikation bestimmter Schäden auch

#### Auftragsnummer:

B3951.04.04.70009

#### Auftragsleitung:

Annemarie Seiffert  
 annemarie.seiffert@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Benedikt Heimig  
 benedikt.heimig@baw.de

#### Laufzeit:

2020 bis 2022

jenseits der handnahen Prüfung ermöglichen. Beispiele hierfür sind die Anwendung von ferngesteuerten Unterwasserfahrzeugen oder von drohnengestützten Sensorsystemen. Bei der Klassifikation von Schäden kann das Erfahrungswissen der Prüfer vermutlich auch langfristig nicht ersetzt werden. Denkbar ist aber die Zuarbeit durch innovative Sensorik und Ansätze der künstlichen Intelligenz, zum Beispiel zur Vorklassifizierung oder unterstützenden Bewertung von Schäden. Die Vermessung des Schadens auch hinsichtlich einer effizienten Georeferenzierung ist eine Aufgabe, die vor allem bei größeren Massivbauteilen großen Aufwand und damit ein hohes Innovationspotenzial darstellt. Die Dokumentation der Schäden wäre ein möglicher Anwendungsfall für Mixed-Reality-Systeme.

Zusammengefasst sind mögliche Zugewinne eine Inspektion bisher nicht zugänglicher Bauteile, eine Erhöhung der Arbeitssicherheit, eine Verkürzung der erforderlichen Sperrzeiten und eine Optimierung der Schadensdokumentation bzw. -auswertung. Einen konkreten Erkenntnisgewinn würde die Auswahl geeigneter Untersuchungsmethoden und die Identifizierung ihrer Anwendungsfälle bzw. -grenzen bringen. Auf diese Weise soll die WSV bei der Erfüllung ihrer bauaufsichtlichen Verantwortung und in ihrem Bemühen um wirtschaftliches Handeln unterstützt werden.

### 3 Untersuchungsmethoden

Im Zuge eines Wissensmanagement-Ansatzes wurde in einem ersten Schritt das institutionelle Wissen der WSV und der BAW zu Inspektionen von Wasserbauwerken gesammelt und im Rahmen einer Prozessdokumentation systematisch erfasst. Eine anschließende Literaturrecherche diente der Erfassung des Standes der Technik hinsichtlich anwendbarer Innovationen bei der Wasserbauwerksinspektion. Das Ergebnis der Recherche ist ein Katalog innovativer Methoden für Bauwerksinspektionen im Wasserbau. Die im Rahmen der Recherche identifizierten innovativen Methoden wurden hinsichtlich ihrer technischen Machbarkeit und des Effizienzsteigerungspotenzials bewertet. Diese Bewertung ist Basis für die Selektion einzelner vielversprechender Technologien für den Praxistest. Ziel der Praxisanwendung ist der Vergleich der innovativen mit den konventionellen Methoden hinsichtlich ihrer Genauigkeit und Handhabbarkeit. Die Ergebnisse sollen in einer Handlungsempfehlung für die WSV zusammengetragen werden. Um eine enge Abstimmung mit der Praxis zu gewährleisten, unterstützt ein Beratungsgremium bestehend aus Bauwerksinspektionskoordinatoren, Bauwerksinspektoren und erfahrenen Wissenschaftlern aus der Bundesanstalt für Gewässerkunde und der Bundesanstalt für Wasserbau das Vorhaben in beratender Funktion.

### 4 Ergebnisse

Im Rahmen der Praxistests ausgewählter Methoden fanden Anfang Mai umfangreiche Testanwendungen an der trockengelegten Schleuse Sülfeld in Wolfsburg statt. Diese umfassten:

- Die drohnengestützte Zustandserfassung mit anschließender algorithmusbasierter Schadenserkenkung im Innen- und Außenbereich
- Die Erstellung von Punktwolken mit einer Bodenauflösung von 0,5 cm der Bauwerksoberfläche mittels terrestrischem Laserscan
- Die Schadensvermessung mit Handscannern
- Die Schadenserkenkung mit Thermalkameras

Im Zuge der ausstehenden Auswertung der erhobenen Daten sollen sowohl Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Datenerhebung als auch die Nutzungserfahrung und konkrete Verbesserungspotenziale hinsichtlich Zeit und Ressourcennutzung in die Bewertung mit einfließen.

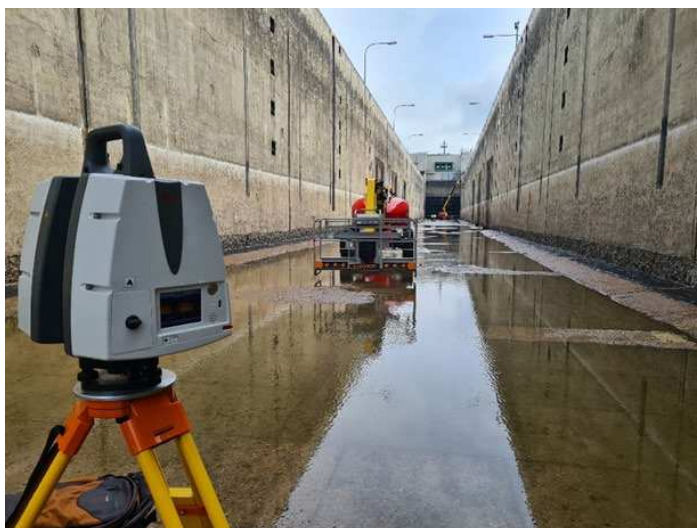


Bild 1: Der Laserscanner im Einsatz in der Schleusenammer.

#### Literatur:

Hallermann, Norman; Helmrich, Marcel; Morgenthal, Guido; Schnitzler, Elke; Rodehorst, Volker; Debus, Paul (2018): UAS-basierte Diagnostik von Infrastrukturbauwerken. In: Bautechnik 95 (10), 720–726.

Holst, Ralph; Sperber, Martin; Gößmann, Rainer (2016): Bauwerksprüfung unterstützt durch neuartige Besichtigungstechniken – Erste Erfahrungen. In: Bautechnik 93 (10), S. 742–746.

Moreu, Fernando; Bleck, Brian; Vemuganti, Shreya; Rogers, David; Mascarenas, David (2017): Augmented Reality Tools for Enhanced Structural Inspection. In: Structural health monitoring 2017.





## Fuzzy-FMEA zur Steigerung der Aussagefähigkeit von Inspektionsergebnissen

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Bei der Zustandsbewertung eines Bauwerks werden die Auswirkungen von Einzelschäden auf die an Bauwerke gestellten Anforderungen nicht ausreichend einbezogen. Auf Grundlage verfügbarer Inspektionsergebnisse wurde in der ersten Phase des BMDV-Expertennetzwerks (2016 bis 2019) die Fehlermöglichkeiten- und Ausfallanalyse (FMEA), ein in verschiedenen Industriebranchen umgesetzter qualitativer Ansatz zur Zuverlässigkeitsanalyse eingeführt. Zur Beurteilung der Auswirkungen verschiedener Schädigungsmechanismen auf die Nachweisbarkeit der normativ vorgegebenen Anforderungen wurden die Ursache-Wirkungsketten (UWKs) entwickelt. Basierend auf der Risikoprioritätszahl (RPZ), die sich aus den drei Risikokriterien Bedeutung der Schadensfolge (B), Auftretenshäufigkeit der Schadensart (A) und Entdeckungswahrscheinlichkeit der Schadensursache (E) zusammensetzt, wurden die UWKs bewertet. Die abgeleiteten Kennzahlen dienen als ergänzende Kenngrößen zu bestehenden Zustandsnoten für die Priorisierung von Erhaltungsmaßnahmen an Bauwerken. Die bei Bauwerksinspektionen immanenten Unsicherheiten, die im Rahmen der Datenerfassung entstehen, sowie die Einschränkungen der FMEA-Methodik erfordern eine Verbesserung des Ansatzes. Die Zielsetzung des Forschungsvorhabens besteht darin, unter Berücksichtigung der Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung (MCDM) und der Unsicherheitstheorie (Fuzzy-Mengen-Theorie) die Aussagefähigkeit der bisher erzielten Ergebnisse (UWK, RPZ) zu erhöhen.

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

Die Ausarbeitung der Wirkzusammenhänge zwischen Einzelschäden und deren Auswirkungen auf die funktionalen Anforderungen ermöglicht eine Kategorisierung von tragfähigkeits-, dauerhaftigkeits- und gebrauchstauglichkeitsrelevanten Schäden. Die überarbeitete RPZ bietet einen Überblick über die an einem Bauwerk maßgeblichen UWKs und kann zur Identifizierung kritischer Bauwerke mit höheren RPZ dienen. Weiterhin kann eine Handlungshilfe für eine strukturierte und fundierte Entscheidungsfindung im Hinblick auf die Priorisierung der UWKs und damit der erforderlichen Erhaltungsmaßnahmen erstellt werden. Durch die Erweiterung des Bewertungssystems mit

#### Auftragsnummer:

B3951.04.04.70010

#### Auftragsleitung:



François Nyobeu  
 francois.nyobeu@baw.de

#### Laufzeit:

2020 bis 2022



zusätzlichen Kennzahlen lassen sich Einzelbauwerke größerer Bauwerksbestände anhand ihres Zustands vergleichen und unterscheiden. Dadurch wird die Datengrundlage für Entscheidungsprozesse in der überregionalen Planung von Instandsetzungsmaßnahmen vergrößert und die Entscheidungsfindung erleichtert.

### 3 Untersuchungsmethoden

Angesichts der Vielzahl an Handlungsalternativen (Anzahl und Typen von Bauwerken) und Entscheidungskriterien (B, A, E, etc.), die bei der Priorisierung von Erhaltungsmaßnahmen berücksichtigt werden sollen, werden im Zuge der Strukturierung und Lösung des Entscheidungsproblems MCDM-Methoden eingesetzt. Mithilfe der MCDM-Methode wird durch eine strukturierte Problemaufbereitung die Grundlage für transparente und fundierte Entscheidungen eingerichtet. Ebenso werden die Unsicherheiten verfügbarer qualitativer Daten und angewandter Methoden einbezogen (Zimmermann und Gutsche 1991). Seit den 1960er Jahren haben MCDM-Methoden eine umfangreiche Anwendung im Umgang mit komplexen Entscheidungsproblemen in verschiedenen Bereichen erfahren, einschließlich der Ökonomie, Operations-Research, Informatik, des Bauwesens usw., um nur einige zu nennen. Obwohl einige MCDM-Methoden eine Umsetzung im Bereich des Bauwesens gefunden haben, fand nach derzeitigem Kenntnisstand keine konkrete Anwendung im Bereich des Erhaltungsmanagements von Wasserbauwerken statt. MCDM werden in zwei Klassen unterteilt: in Multi-Attribute Entscheidungen (MADM) und Multi-Objektive-Entscheidungen (MODM) (siehe Bild 1). MADM impliziert die Auswahl der „besten“ Alternative aus vorgegebenen Alternativen, die mit mehreren Attributen beschrieben sind. MADM-Ansätze dienen zur Lösung von Problemen, die eine endliche, meist kleine Anzahl von Handlungsalternativen haben. MODM beinhaltet den Entwurf von Alternativen, die die Vielzahl von Zielen des Entscheidungsträgers (DM) optimieren. Die Auswahlmöglichkeiten sind gewöhnlich unendlich oder sehr groß und die beste ist diejenige, die die Einschränkungen und Präferenzen des Entscheidungsträgers befriedigt (Zimmermann und Gutsche 1991). Da im Rahmen des Forschungsvorhabens die Suche nach einer optimalen Entscheidung bzw. nach einer vollständigen Rangordnung sämtlicher Alternativen im Vordergrund steht, werden ausschließlich MADM-Ansätze berücksichtigt. Jedes Entscheidungsproblem ist mit verschiedenen Unsicherheitsarten behaftet (Stewart und Durbach 2016). Neben den Unsicherheiten aufgrund begrenzter Informationen müssen auch die Unsicherheiten, die mit Unschärfe (Subjektivität) bezüglich der semantischen Bedeutung der Aussagen selbst verbunden sind, berücksichtigt werden.

### 4 Ergebnisse

Die Auswahl der geeigneten MADM-Ansätze beruht auf der Komplexität und den charakteristischen Merkmalen des Entscheidungsproblems, den verfügbaren Informationen und den gegensätzlichen Interessen verschiedener Akteure. Für die Übertragung diverser MADM-Ansätze aus anderen Disziplinen (Ökonomie, Operations-Research etc.) im Bereich des Erhaltungsmanagements von Wasserbauwerken wurden einige Auswahlkriterien (Aggregationsmethoden, Sensitivitätsanalyse etc.) festgelegt. Eine hybride MADM-basierte Fuzzy-FMEA wird derzeit entwickelt, die sowohl nutzen-wertbasierte Methoden, Kompromisse als auch andere Methoden kombiniert. Basierend auf Fuzzy-MADM-Ansätzen werden zunächst der Fuzzy-Analytic Hierarchy Process und die Fuzzy-TOPSIS/Fuzzy-DEMATEL angewendet, um die Wichtigkeit einzelner Kriterien unter Einbeziehung von Expertenmeinungen zu analysieren und eine vollständige Rangordnung relevanter Handlungsalternativen zu ermitteln. Als Ergebnis wird eine Rangreihenfolge für die Priorisierung der Erhaltungsmaßnahmen an Wasserbauwerken (Schleusen und Wehre) vorgeschlagen.

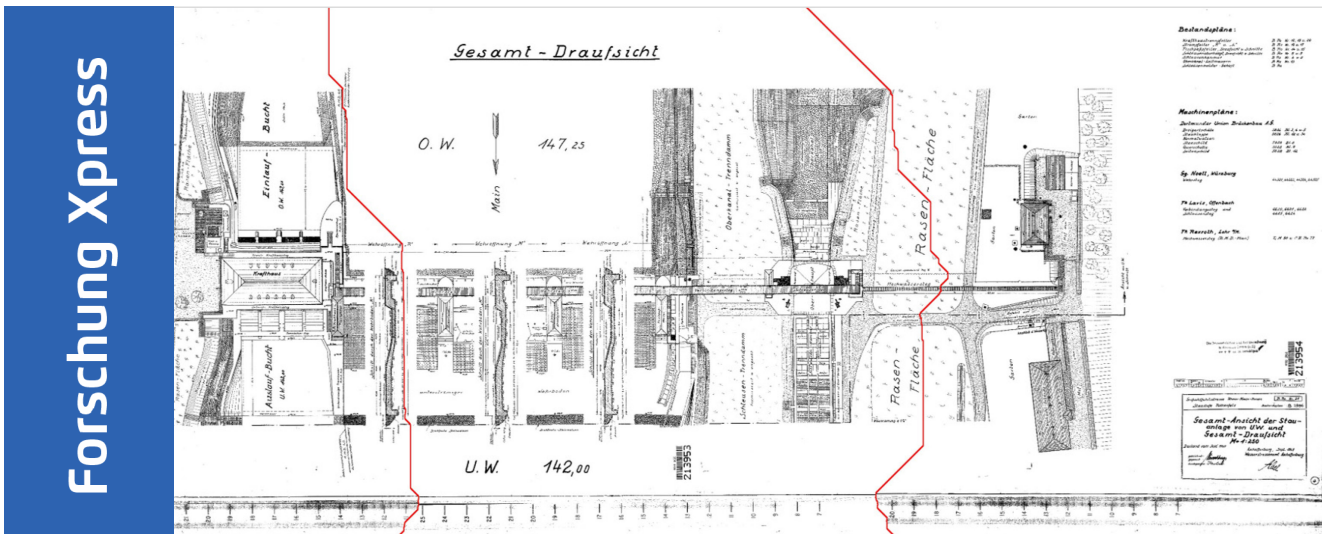


#### Literatur:

Stewart, Theodor J.; Durbach, Ian (2016): Dealing with uncertainties in MCDA. In: Greco, Salvatore; Ehrgott, Matthias; Figueira, José Rui (Hg.): Multiple criteria decision analysis. State of the art surveys. Second edition. New York, Heidelberg, Dordrecht, London: Springer-Verlag, S. 467–496.

Zimmermann, Hans-Jürgen; Gutsche, Lothar (1991): Multi-Criteria Analyse. Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Bild 1: Klassifizierung von MCDM-Methoden.



## Strukturierung und Verbesserung von Bestandsunterlagen der DVtU mit maschinellem Lernen und KI

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Der Archivbereich des IT-Systems Digitale Verwaltung technischer Unterlagen (DVtU) ist ein enormer Wissensschatz. Zu allen Objekten der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) sind dort Dokumente der Kategorien Schriftgut, Plangut und Bildgut abgelegt; die Anzahl der Dokumente geht in die Millionen. Bisherige Analysen rund um die Empfehlungen zu einem Masterplan Digitalisierung zeigen, dass die Metadaten der Dokumente nicht ausreichen, um diese im Rahmen von Betrieb und Unterhaltung sowie bei Neu- baumaßnahmen im Bestand automatisch und prozessorientiert bereitzustellen. Dies ist jedoch ein wichtiger Schritt, um die entsprechenden Prozesse zu beschleunigen (Bödefeld et al. 2019). Aufgrund der großen Datenmengen in der DVtU stellt sich die Frage, wie die Strukturierung und Verbesserung der Dokumente automatisiert erfolgen kann. Methoden des maschinellen Lernens (ML) als Teilbereich der künstlichen Intelligenz (KI) erzielten in den letzten Jahren enorme Erfolge bei der Verarbeitung großer Datenmengen. Dieses Projekt untersucht erstmals, welches Potenzial diese Methoden zur Qualitätsverbesserung des Daten- und Metadatenbestands der DVtU hat.

Ziel dieses FuE-Vorhabens ist zu zeigen, wie die Auffindbarkeit von Unterlagen in der DVtU verbessert und vereinheitlicht werden kann. Dazu ist die Überführung von relevanten Informationen aus Dokumenten in (Meta-) Daten erforderlich, um diese maschinenlesbar zu machen. Im Fokus liegen dabei Planunterlagen zu Schleusen und Wehren. Das langfristige Ziel wäre ein Suchsitz, der z. B. nach Anfrage nach „Grundriss Wehranlage Heidelberg“ den entsprechenden Plan digital angezeigt. Dazu sind Synergien mit dem FuE-Vorhaben Semantic Web (B3951.04.04.70012) vorgesehen.

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

Durch die Neustrukturierung der Metadaten kann der Rechercheaufwand für Dokumente der WSV minimiert werden. Mit dem angestrebten prozessorientierten Ansatz können Dokumente automatisch an Nutzer weitergegeben werden, ohne dass diese Zeit zum Recherchieren der Daten im System investieren müssen. Mit der automatisierten Verbesserung von Dokumenten kann die Gesamtqualität des Baubestandwerks noch einmal verbessert werden.

#### Auftragsnummer:

B3951.04.04.70011

#### Auftragsleitung:

Lukas Weber  
lukas.weber@baw.de

#### Laufzeit:

2020 bis 2022

### 3 Untersuchungsmethoden

Der initiale Datenbestand der DVtU im Jahr 2005 bildete sich aus dem Scan aller auf Mikrofilm bzw. -fiche vorliegenden Dokumente. Am Beispiel von Wehrplänen am Neckar hat sich gezeigt, dass fast 20 % (1000 von 5500) der Dokumente nicht an einem Stück vorliegen, sondern in mindestens zwei Teilpläne mit überlappenden Bereichen zerteilt wurden. Hochgerechnet sind etwa 16.000 zerstückelte Pläne an Wehren und Schleusen zu erwarten. Eine automatische Methode zum Zusammenfügen dieser Pläne hätte somit großes Potenzial, die Nutzung dieser Pläne zu erleichtern. Mit Image Stitching wurde eine solche Methode identifiziert. Mit einem merkmalsbasierten Ansatz können die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Bildern modelliert werden. Dazu werden Merkmale in den Bildern erkannt und mit Merkmalen in anderen Bildern abgeglichen (Bild 1). Die Transformationsparameter einer Ähnlichkeitstransformation werden für jedes Bildpaar mit einer robusten Kleinsten Quadrate Schätzung ermittelt. Mit den ermittelten Parametern können zusammenhängende Bilder in eine gemeinsame Bildebene verschoben, rotiert und skaliert werden. In diesem Anwendungsfall wurde zum Zusammenfügen eine nahtbasierte Methode gewählt. In dieser wird mit der Minimierung einer Kostenfunktion ein Pfad im Überlappungsbereich der Bilder gefunden, der möglichst wenig Bildelemente schneidet. Entlang dieser Pfade werden die Bilder aneinander ausgerichtet. Im Sinne eines objektzentrierten Image Stitchings wird so sichergestellt, dass die Elemente im Plan möglichst gut erhalten bleiben. Ein Beispielergebnis mit visualisierten Nähten ist im Titelbild gezeigt.

Als Datengrundlage wurden etwa 600 Pläne anhand einer Metadatenanalyse identifiziert. 100 dieser Pläne sind in mehrere Dokumente zerstückelt. Auf diese wurde der beschriebene Image Stitching Prozess angewandt. Dazu wurde die Open Source Software OpenCV verwendet und weiterentwickelt.

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IPA wurde die automatische Erkennung zentraler Plantypen wie Grundriss, Ansicht, Längsschnitt, sowie von Textfeldern und Barcodes untersucht. Dazu wurden die genannten Elemente in den übrigen 500 Plänen markiert (engl. gelabelt). Die Zuweisung wurde in zwei Qualitätssicherungsstufen abgestimmt, um Voreingenommenheit (Bias) im Datensatz zu verhindern. Anschließend wurden mit zwei dem aktuellen Stand der Technik entsprechenden Objekterkennungsarchitekturen (Efficientdet und YOLOv3) Modelle erstellt, die mit diesen Daten trainiert und validiert wurden.

### 4 Ergebnisse

Bei der Objekterkennung liefert die Efficientdet-Architektur bessere Ergebnisse als YOLOv3. Bei Längsschnitten wird eine Genauigkeit von 91 % erreicht. Optimierungsbedarf liegt noch bei Ansichten/Querschnitten, wo die Genauigkeit bei 60 % liegt. Dabei wird das Ergebnis einer Klassifizierung als korrekt gewertet, wenn 50 % des ermittelten Begrenzungsrahmens mit dem markierten übereinstimmt. Diese Arbeit zeigt, dass eine standardisierte Zuordnung von Planinhalten zu Plantypen möglich ist. Solch eine eindeutige Zuordnung kann die Auffindbarkeit von Plänen z. B. über semantische Methoden signifikant erhöhen. Es wurde auch gezeigt, dass Algorithmen mit einem relativ kleinen Trainingsdatensatz diese Zuordnung bis zu einer gewissen Genauigkeit automatisiert durchführen können. Es wird erwartet, dass größere Datenmengen die Ergebnisse weiter verbessern. Jedoch müssen die Prozesse zur Generierung der erforderlichen Trainingsdaten beachtet werden. Es ist nicht erstrebenswert, historische Daten im Nachhinein manuell zu labeln. Vielmehr könnte eine Zuweisung bei der Einstellung neuer Pläne dazu genutzt werden, ältere Pläne entsprechend aufzubereiten.

Der Image Stitching Algorithmus war bei zwei Drittel der 100 zusammenzufügenden Pläne auf Anhieb erfolgreich. 31 von 33 fehlerhaften Ergebnissen sind auf während des Scans auf den Plan gelegte Elemente wie Symbole, Lineale oder Barcodes zurückzuführen. Nach der Entfernung der Störelemente werden auch diese Pläne korrekt zusammengeführt. Bei zwei Plänen ist noch ein Fehler im Algorithmus zu beheben. Zusammengefasst hat der vorgestellte Image Stitching Algorithmus ein großes Potenzial, um die zerstückelten Pläne automatisiert zusammenzufügen. Da die Störfaktoren immer ähnlich sind, wird empfohlen diese mittels Objekterkennung im Vorfeld der Merkmalsextraktion zu entfernen.

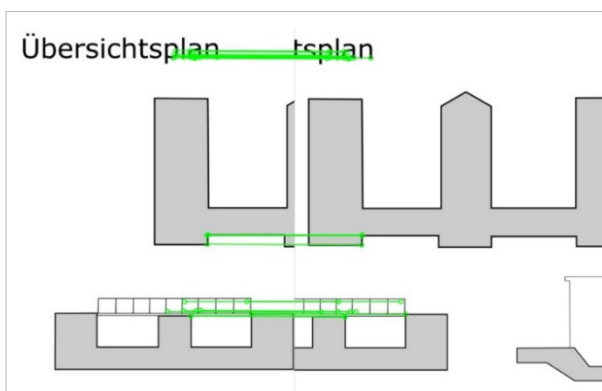


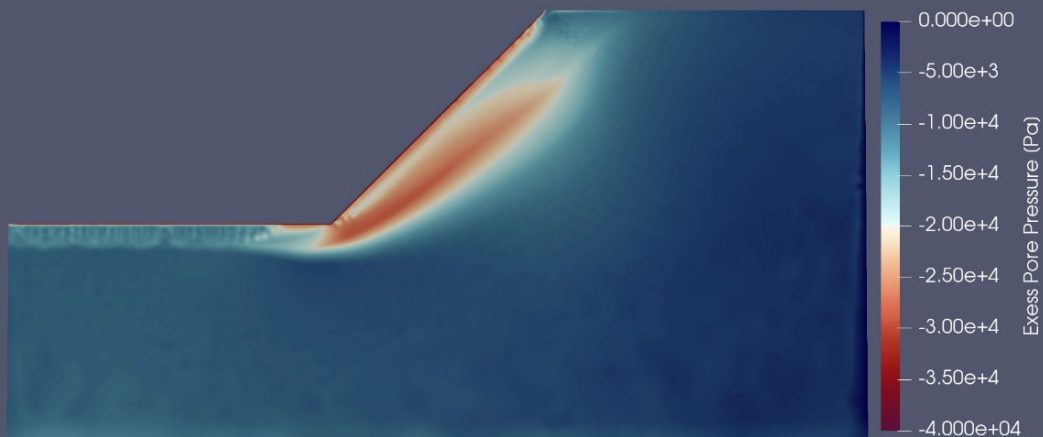
Bild 1: Zugeordnete Merkmale, die im Überlappungsbereich eines in zwei Teile getrennten (schematischen) Plans automatisch gefunden wurden.

#### Literatur:

Bödefeld, J.; Damrau, T.; Duric, Z.; Schenk, D.; Weinmann, P. (2019): Plänen, Bauen und Betreiben der Wasserstraßeninfrastruktur – Empfehlungen zur Erstellung eines Masterplans Digitalisierung.

Wei, Lyu; Zhong, Zhou; Lang, Chen; Yi Zhou (2019): A survey on image and video stitching. In: Virtual Reality & Intelligent Hardware 1 (1), S. 55–83. DOI: 10.3724/SP.J.2096-5796.2018.0008.

## Forschung Xpress



## Numerik für Boden-Wasser-Wechselwirkung

Numerische Modellbildung der Interaktionen von Bodenverhalten, Porenwasserströmungen und angrenzender Oberflächenwasserströmung

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Strömungen und schnelle Wasserstandsänderungen im Gewässer können im angrenzenden Gewässerbett (bzw. mineralische Schutz- und Filterschichten) rasche Änderungen von Porenwasserdruck sowie vom Spannungszustand bewirken. Im Grenzfall können diese Einwirkungen zum Verlust der Festigkeit (Geländebruch, Fluidisierung) und/oder Bodentransportvorgänge wie Erosion, Suffusion oder Kolmation auslösen. Obwohl das Verständnis dieser Vorgänge für Sicherheit, Unterhaltung und Weiterentwicklung von Wasserstraßen grundlegend ist, ist der gegenwärtige Kenntnisstand unbefriedigend. Neuere theoretische, messtechnische und numerische Entwicklungen erlauben eine bodenmechanisch und geohydraulisch gekoppelte Analyse der im Porenraum interagierenden Strömungs- und Verformungsprozesse. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es das derzeitige Prozessverständnis im numerischen Modell abzubilden, Bemessungsansätze zu überprüfen und diese gegebenenfalls auf der Basis neuer Erkenntnisse weiter zu entwickeln.

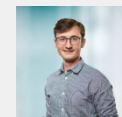
### 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)

Eine fundierte Beratung der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) zu den Auswirkungen von Baumaßnahmen auf Bauwerke an Bundeswasserstraßen erfordert Analysemethoden, die in der Lage sind, die Wechselwirkungen zwischen Oberflächenwasserströmung, Grundwasserströmung, Bodenverformung und Materialtransport hinreichend zu berücksichtigen. Dies betrifft sowohl Erdbauwerke, wie z. B. Dämme, Fluss- oder Baugrubenböschungen sowie auch die Übergangsbereiche zwischen Flächengewässern, Massivbauwerken und dem anschließenden Boden. Ein fundiertes Analyseinstrumentarium ermöglicht darüber hinaus ein besseres Monitoring zur Überwachung der Auswirkungen baulicher Maßnahmen.

#### Auftragsnummer:

B3952.00.04.70001

#### Auftragsleitung:



Denis Maier  
 denis.maier@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2022



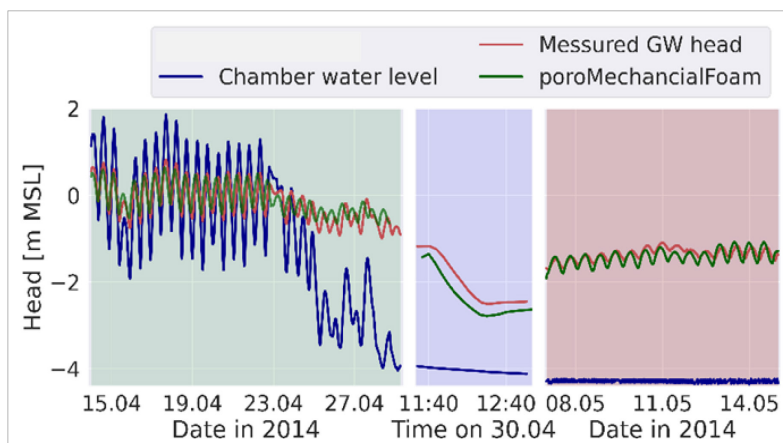
### 3 Untersuchungsmethoden

In vorliegendem Forschungsvorhaben stehen die Interaktionen zwischen Strömung, Bauwerk und Bodenverhalten im Fokus. Für diese Untersuchungen hat sich der Begriff FSSI (fluid structure soil interactions) etabliert. Hierbei werden die Wechselwirkungen zwischen einem Bauwerk, sei es aus Beton und/oder Stahl (Schütze, Kaimauern, Pfähle usw.) oder aus Geomaterialien (z. B. Ufersicherung), sowie dem Boden/Baugrund untersucht. Im Verkehrswasserbau ergeben sich vielfältige Beanspruchungen aus der Strömung im Gewässer. Die theoretische Basis für die numerische Abbildung hydro-mechanisch gekoppelter Verformungs- und Strömungsprozesse in porösen Medien bildet die von Terzaghi begründete und später durch Biot erweiterte Konsolidierungstheorie. Diese Ansätze wurden in einem 3D-Modell mit zellzentrierter Finite-Volumen-Diskretisierung auf der Basis der Plattform OpenFoam implementiert. Das Bodenverhalten basiert auf der Theorie kleiner Verformungen und kann wahlweise linear-elastisch oder elastisch-plastisch mit Bruchkriterien nach Mohr-Coulomb bzw. gemäß des Bounding Surface Plasticity Ansatzes angenommen werden. Eine wesentliche Rolle bei hydro-mechanisch gekoppelten Problemen spielt der Sättigungsgrad im Porenraum, denn der Kontrast zwischen Wasser- und Gaskompressibilität bestimmt die Intensität der kinematischen Interaktion zwischen Matrix und Porenfluid.

### 4 Ergebnisse

In der ersten Projektphase wurde die Implementierung der hydromechanischen Kopplung unter Teilsättigung anhand analytischer Lösungen und Vergleichsrechnungen veröffentlichter Datensätze überprüft. Erste Anwendungen bei der Analyse projektbezogener Fragestellungen erfolgten anhand von Untersuchungen im Rahmen von Instandsetzungsarbeiten am Eidersperrwerk. Die unter der Bodenplatte des Sperrwerks gemessenen Porenwasserdrücke konnten mithilfe eines 2D vertikal-ebenen Modells nachvollziehbar abgebildet werden. Bild 1 zeigt die Ganglinie sowohl des gemessenen als auch des nachmodellierten Porenwasserdrucks unter der Gründungssohle des Sperrwerks während drei unterschiedlichen Phasen mit jeweils veränderten Randbedingungen. Das OpenFoam-Modell war in der Lage, sowohl die Reaktion des Porenwasserdrucks auf kurzfristige Tideschwankungen abzubilden als auch die Einflüsse von Wasserstandsänderungen der Eider (grüner Bereich), die Druckentlastung infolge Betriebes eines Entlastungsbrunnens zu reproduzieren (blauer Bereich) und den langfristigen Druckausgleich infolge Dissipation (roter Bereich) wiederzugeben. Eine ausführliche Darstellung der hydraulisch-mechanisch gekoppelten Analyse wurde zur Präsentation auf einem internationalen Kongress angenommen (Montenegro et al. 2022).

Zum Zeitpunkt der Berichterstellung erfolgen Untersuchungen zur Interaktion von Porenwasserdruck und volumetrischer Verformung in der Scherfuge beim Böschungsversagen in wenig durchlässigen Böden. Erste Ergebnisse zeigen den Einfluss von Dilatanz bzw. Kontraktanz auf den Versagensprozess. Das Titelbild zeigt die Verteilung des Porenwasserdruckdefizits beim Versagen (Abscheren eines Bodenkörpers). Bei einem dilatanten Bodenverhalten (Vergrößerung des Volumens bei scherinduzierten Dehnungen) entsteht ein Porenwasserdruckdefizit im Bereich der Scherzone. Dieser Druckabfall vergrößert die effektiven Spannungen und induziert zur Scherzone gerichtete Strömungskräfte, welche sich stabilisierend auf das sich anbahnende Böschungsversagen auswirken. Abhängig von der Ausprägung des dilatanten Bodenverhaltens und der hydraulischen Durchlässigkeit variiert die Dissipationszeit des Porenwasserdefizits und damit die stabilisierende Wirkung des Bodenverhaltens erheblich. Im Fall eines kontraktanten Bodenverhaltens erhöht sich der Porenwasserdruck in der Scherzone, was die Böschung zusätzlich destabilisiert und den Versagensmechanismus beschleunigt. In der nächsten Phase soll das Versagen einer Böschung mit einem detailgetreuen Dilatanzverhalten (höherwertiges Stoffmodell) untersucht werden.

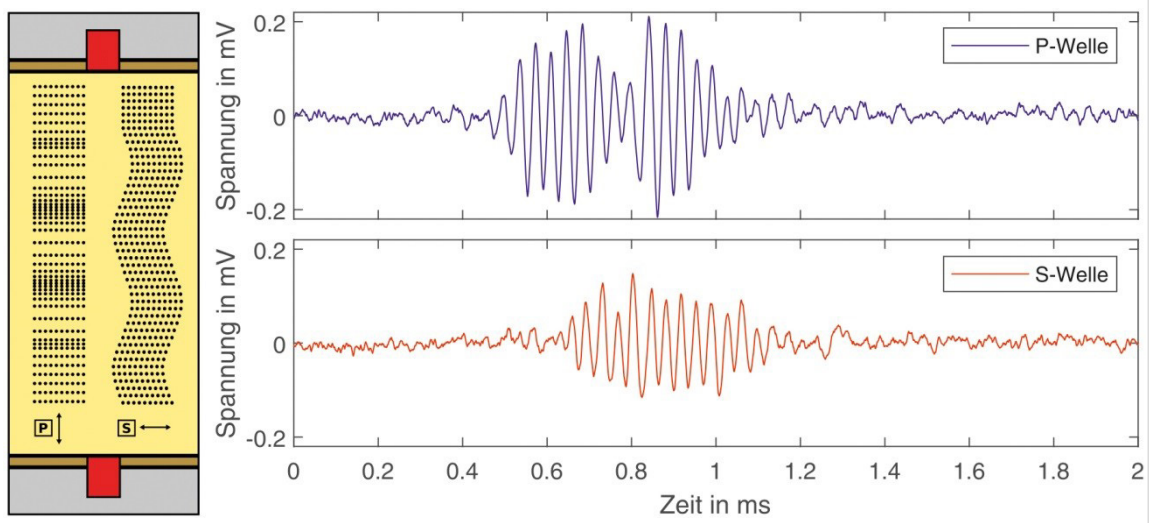


#### Literatur:

Montenegro H.; Maier D.; Nuber T., Odenwald B. (2022): Hydromechanical analysis of structure-soil-interactions at the flood barrier "Eidersperrwerk" in Germany. Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Sydney 2022 (in Vorbereitung).

Bild 1: Porenwasserdruckreaktionen unter der Bodenplatte des Eidersperrwerks. Gemessene Werte in Rot, Ergebnisse der Modellierung mittels des hier vorgestellten Modells (poroMechanicalFoam) in Grün. Der Wasserstand der Eider (oberhalb der Bodenplatte) ist in Blau dargestellt.

## Forschung Xpress



# 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).

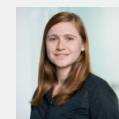
## 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)

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 zum Teil normativ gefordert, weshalb Verbesserungen dringend erforderlich

### Auftragsnummer:

B3952.01.04.70003

### Auftragsleitung:



Cornelia Kaufmann  
 cornelia.kaufmann@baw.de

### Laufzeit:

2016 bis 2022

sind. Gelingt es, Zusammenhänge zwischen der Messung von seismischen Wellengeschwindigkeiten und den genannten Parametern herzustellen, entfallen außerdem Einflüsse aus dem Entnahmevorgang, 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.

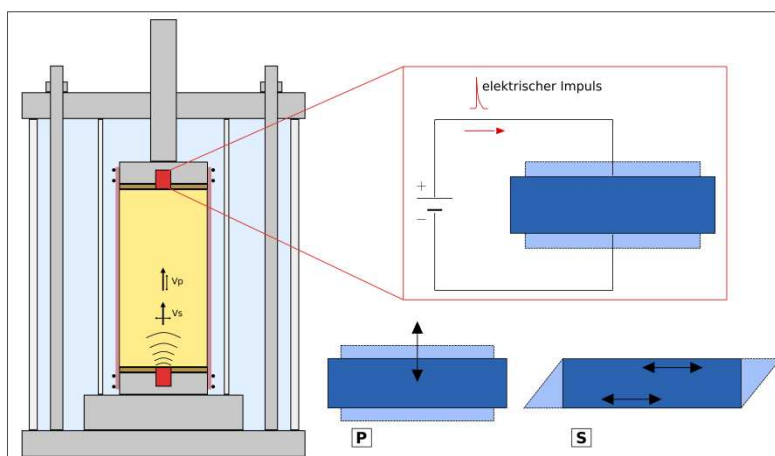


Bild 1: Triaxialdoppelwandzelle mit in die Kopf- und Fußplatte integrierten Sensoren (links) zur Durchschallung von Bodenproben mit P- und S-Wellen; Funktionsprinzip piezoelektrischer Sensoren (rechts).

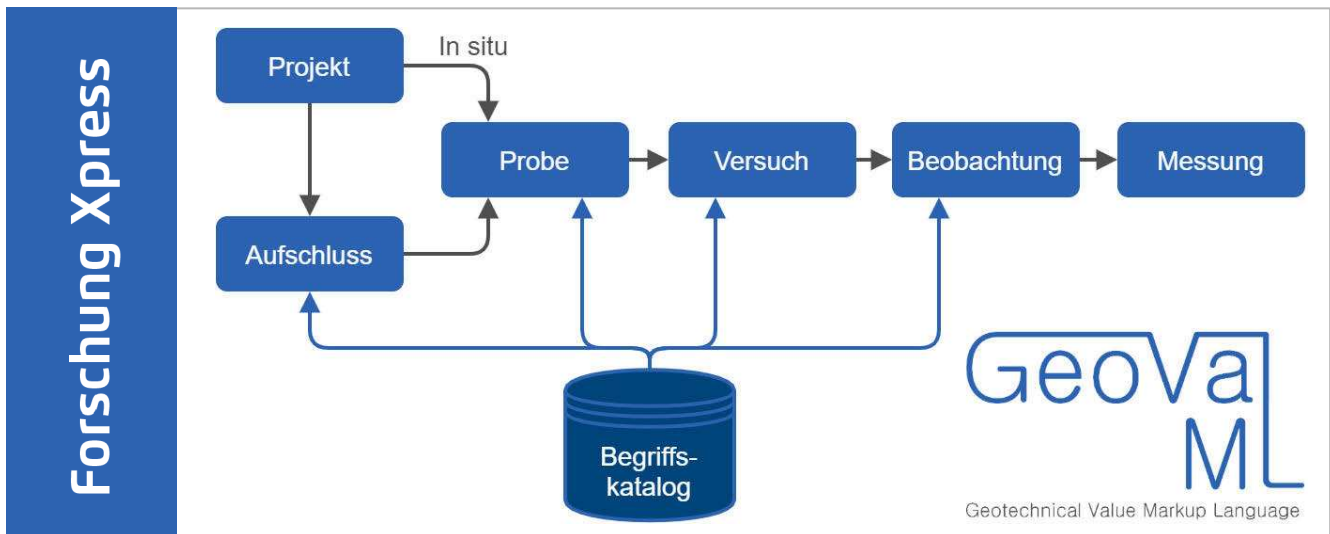
#### Literatur:

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 – 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 für boden- und felsmechanische Kennwerte und die Sammlung heterogener, verteilt vorliegender geotechnischer Kennwerte 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 GeoValML wird der Bereich Open Data und Open Access entscheidend unterstützt. 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 genutzt werden, wenn sie auf einer Plattform gebündelt aufgefunden 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 Neubauten wertvolle Grundlagen liefert. Auch für mögliche Folgen des Klimawandels und für die Abschätzung von Georisiken ist die Kennwertdatensammlung von unschätzbarem Wert,

#### Auftragsnummer:

B3952.01.04.70004

#### Auftragsleitung:



Eberhard Kunz  
eberhard.kunz@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Dominik Stütz

#### Laufzeit:

2017 bis 2022



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. Dadurch wird auch das FAIR-Prinzip (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) erfüllt, welches darauf abzielt, Daten maschinenauffindbar und -lesbar zu machen (Wilkinson et al. 2016).

### 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.

Daraus wurde das im Titelbild dargestellte Datenbankschema abgeleitet. Die Hierarchieebene reicht vom Projekt über Aufschlüsse, Versuche und Proben bis hin zur Einzelmessung. Eine Visualisierung der Objekte in der Örtlichkeit ist in Bild 1 dargestellt. Alle im Modell enthaltenen Daten haben einen Raumbezug. Bei den Versuchen sind Informationen über die angewendeten Methoden zur Ermittlung der geotechnischen Kennwerte hinterlegt.

Eine Besonderheit des Modells ist die Datenkonsistenz, die durch einen Begriffskatalog gewährleistet wird. Dieser ist als Sub-Datenbank in der Datenbank verortet. Die Erstellung eines solchen Begriffskatalogs ist sehr aufwendig, muss aber vor der Datenbefüllung zwingend erfolgen. Nur Begriffe, wie zum Beispiel eine Versuchsnorm, die im Begriffskatalog vorhanden sind, dürfen in die Datenbank geschrieben werden. Aktuell umfasst der Begriffskatalog schon mehr als 3300 Definitionen.

Das Datenmodell 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, ...)

Zur Veröffentlichung der Daten wird der Service OGC API Features eingesetzt. Der Service ist ab Mitte Oktober 2021 unter der Adresse <https://baugrund-daten.baw.de/> erreichbar.

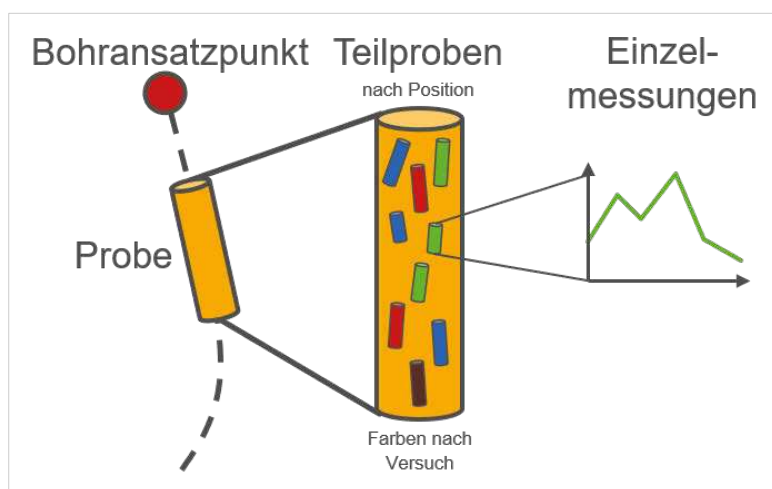


Bild 1: Zuordnung der Daten vom Aufschluss zur Einzelmessung.

#### Literatur:

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

Wilkinson, Mark D.; Dumontier, Michel; Aalbersberg, IJsbrand Jan; Appleton, Gabrielle; et al. (15.03.2016). "The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship". Scientific Data. 3: 160018



## 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 Anfahrgeschwindigkeit 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 2022

### 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 wurden 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 Spitzbugschiffes 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.

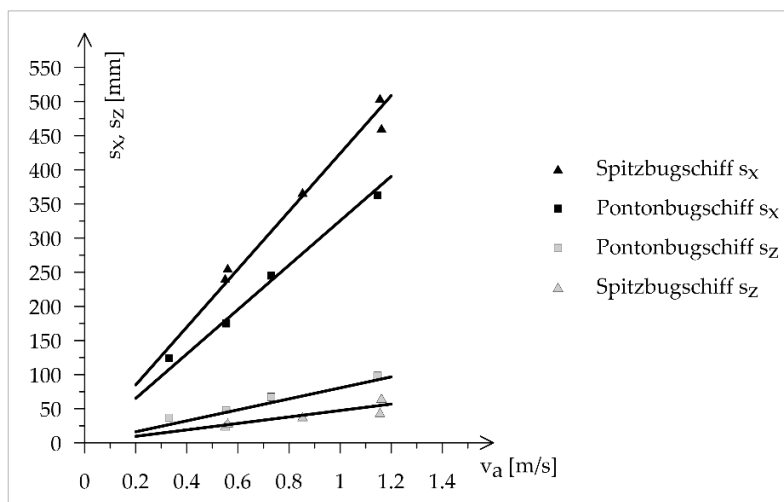


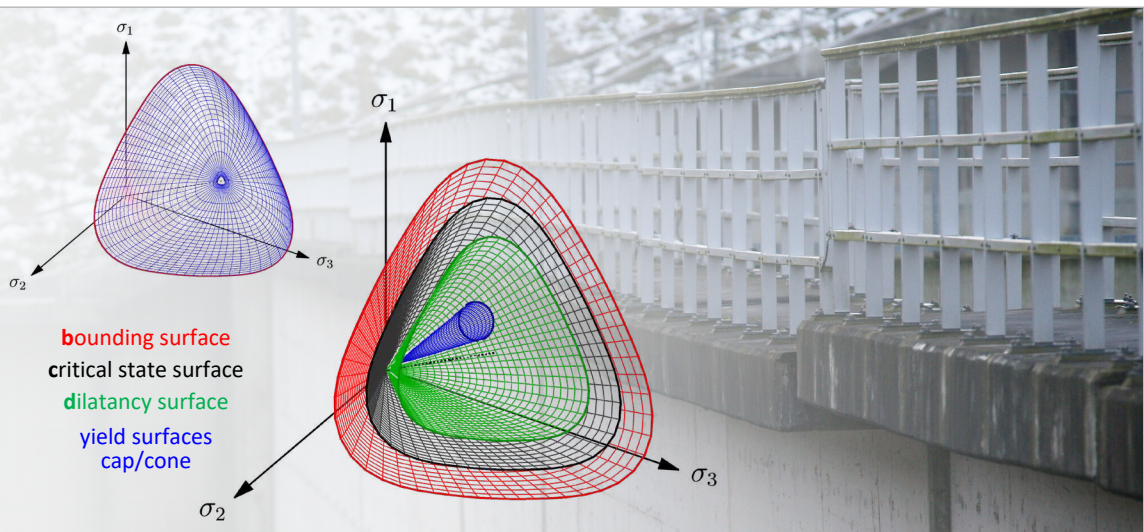
Bild 1: Im Modellversuch gemessene Bremswege für das Ponton- und das Spitzbugschiff in Abhängigkeit der Anfahrsgeschwindigkeit

#### Literatur:

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

Kauther, R.; Schuppener, B. (2007): Physical Modelling of Ship Collisions with Embankments of Waterways, IC-CGS 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:



Dr. Katharina Bergholz  
 katharina.bergholz@baw.de

#### Laufzeit:

2006 bis 2022



### 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 Integrationsschema 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) 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, rechts), sowie einer kappenartigen, isotrop verfestigenden Fließfläche (cap, links). 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. dehnungsrichtungabhängigen 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 (Bergholz 2020). 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. Das entwickelte Materialmodell wird aktuell als benutzerdefiniertes Stoffgesetz (UMAT/UDSM) zum Einsatz in FE-Programmen implementiert und soll, dem Open-Source-Gedanken folgend, im Anschluss frei verfügbar sein.

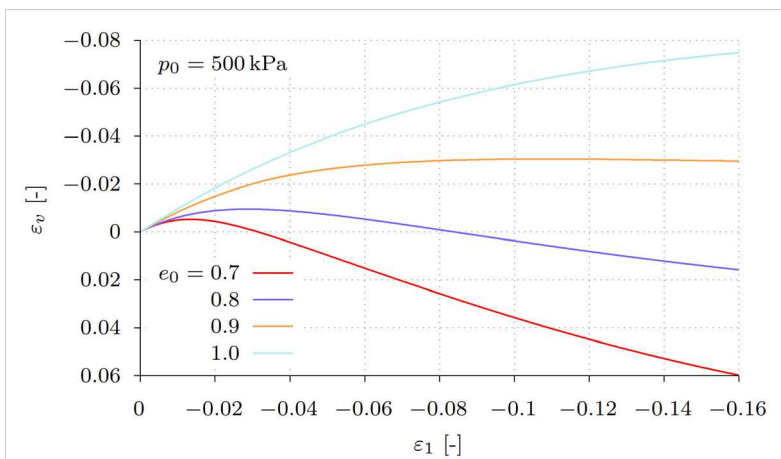


Bild 1: Dilatanz und Barotropie: volumetrisches Verformungsverhalten bei triaxialer Kompression unterschiedlicher Ausgangsdichten.

#### Literatur:

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

Bergholz, K. (2020): An extended bounding surface model for the application to general stress paths in sand. Dissertation, Technische Universität Dresden.

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



## 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 für veränderlich-feste Gesteine von der Probenahme in situ bis zur experimentellen Untersuchung im Labor und der Auswertung der Versuche erarbeitet. Dies umfasst die Wahl geeigneter Probenahmetechniken und -behandlungen, die zu möglichst ungestörten Proben führen sollen, sowie die Identifikation der Faktoren, welche die Probenahme beeinflussen. Weiter 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:



Regina Kauther  
 regina.kauther@baw.de

#### Laufzeit:

2015 bis 2022

### 3 Untersuchungsmethoden

Vorab wurde durch eine Literaturstudie der gegenwärtige Wissensstand erarbeitet und aktuelle Entwicklungstendenzen im Themenbereich der veränderlich-festen 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 Bohrkerne 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 und der Dichte sowie die Ergebnisse geophysikalischer Feldmessungen. Die anschließende Durchführung von undrännierten und drännierten Triaxialversuchen mit Porenwasserdruckmessungen dient zur Bestimmung charakteristischer Festigkeits- und Steifigkeitsparameter. Zusätzliche Mikrostrukturuntersuchungen 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 zum Sättigungsgrad und die Auswertung von Mikrostrukturaufnahmen zeigen, dass das Gestein in situ vollständig gesättigt ist. Diese Beobachtungen bestätigen sich in der Sättigungsphase des Triaxialversuchs, wo nach deren Durchführung keine Hinweise auf eine erhöhte Probensättigung zu erkennen sind. So kann die Sättigungsphase begrenzt bzw. ausgelassen werden. Eine Konsolidierungsphase sollte durchgeführt werden. Bei geringen effektiven Manteldrücken sind drännierte Versuche zu empfehlen. Bei undrännierten Versuchen steigt während des Abscherens der Porenwasserdruck so stark an, dass dieser effektive Manteldrücke bis 800 kPa neutralisiert. Alternativ bestünde die Möglichkeit, die Abscherrate stark zu verringern.

In Bild 1 sind die aus Triaxialversuchen ermittelten Bruchwerte von Tonsteinproben mit verschiedenen Kombinationen der Bohrspülung und der Lagerungsvarianten dargestellt. Unterschiede zwischen den einzelnen Probenahmevarianten hinsichtlich der ermittelten Festigkeitsparameter sind baupraktisch nicht relevant, was sich in der starken Überlappung der Punktwolken der Bruchwerte aller Untersuchungsvarianten widerspiegelt. Anhand von Untersuchungen an Proben, die 10 Minuten bzw. sieben Tage in Laborumgebung getrocknet waren, kann gezeigt werden, dass die Erhaltung des In situ-Wassergehaltes wichtiger als der Einfluss der Bohrspülung oder Lagerungsvariante ist. Auffällig ist das von Beginn des Abscherprozesses an nicht-lineare Spannungs-Verformungs-Verhalten der Tonsteinproben. Dies sollte bei der Durchführung von numerischen Berechnungen berücksichtigt werden.

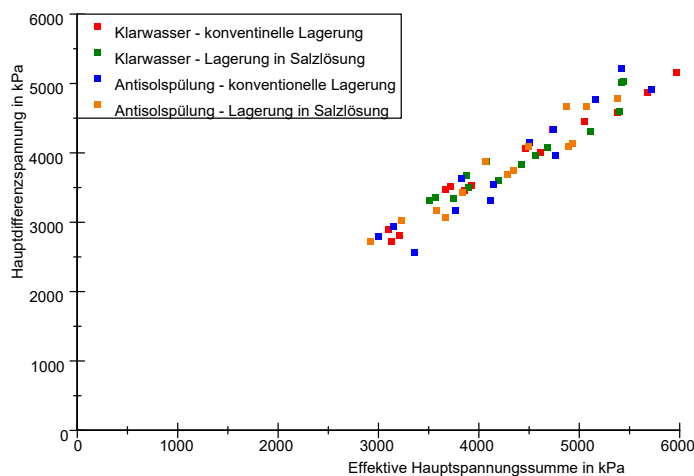


Bild 1: Spitzenfestigkeiten der Proben des Mindener Tonsteins im p-q-Diagramm.

#### 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 Kohlendioxidangriffs auf Verpressanker. Zur Tragfähigkeit von Ankern und Verpresspfählen unter Einwirkung von kalklösender Kohlendioxid 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 verlangsamt. 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 2022



## 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 Auftriebssicherungen von Schleusen- und Wehrsohlen, bei Rückverankerungen von Ufereinfassungen 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 gestiegener 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.

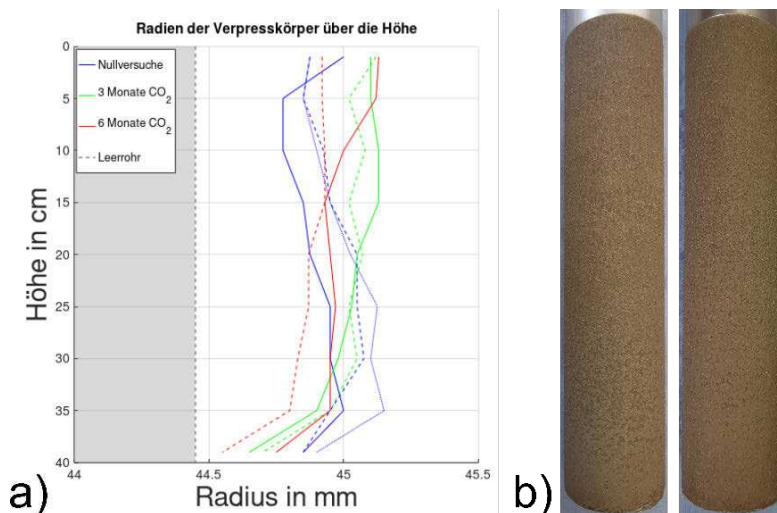
In Verbindung mit der Ruhr-Universität Bochum und der Firma Schudy Sondermaschinenbau erfolgte in der ersten Forschungsphase die Entwicklung eines Versuchsstandes, der im Frühjahr 2019 in Betrieb genommen wurde. Eine Erweiterung auf insgesamt sieben Versuchscontainer fand im Februar 2020 statt (siehe Titelbild). Seit November 2020 laufen Langzeitversuche mit einem kalklösenden Kohlensäureangriff mit einer Dauer von bis zu zwölf Monaten. 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.

## 4 Ergebnisse

Wiederholte Ankerprüfungen an Einstab- bzw. Litzentankern im Bereich erhöhter Konzentrationen an kalklösender Kohlensäure an den Schleusen Gleesen (2017-2021) und Bevergern (2011 und 2018), die am Dortmund-Ems-Kanal liegen, haben bisher keine Hinweise auf eine Abminderung der Tragfähigkeit ergeben.

Im Labor hergestellte Modellanker wurden nach drei- bzw. sechsmonatiger Einwirkung von kalkaggressivem Wasser hinsichtlich ihrer maximalen Tragfähigkeit geprüft. Als Referenzwerte für die Ausziehungskraft dienen sieben Tage alte Verpressanker ohne chemischen Angriff. Die Zwischenergebnisse an diesen Modellankern in einem Mittel- bis Grobsand weisen bis zu dieser Angriffsdauer auf keinen Tragfähigkeitsverlust hin. Differenzen gegenüber den Nullversuchen ergeben sich aber sowohl beim Durchmesser sowie in der Oberflächenstruktur. Die radiale Ausdehnung des Verpresskörpers in Relation zu den Nullversuchen (Bild 1a) tendiert zu nächst über die Zeit im oberen Bereich anzuwachsen, was auf ein Quellen des Zementsteins in Wasserlagerung zurückzuführen sein könnte. Der untere Bereich weist eine Verringerung des Durchmessers auf, die aufgrund des lösenden Angriffes der kalklösenden Kohlensäure auf die Zementoberfläche herleitbar wäre. Erkennbar ist dies auch an einer zeitlich voranschreitenden Verringerung der Oberflächenrauheit des Zementsteins in Fließrichtung des Wassers von unten nach oben (Bild 1b).



### Literatur:

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.

Bild 1: a) Radien über die Höhe der Zementkörper, b) Zementkörper nach drei (links) bzw. sechs (rechts) Monaten chemischen Angriffs.



## Untersuchung des Bodeneintrags in den Frischbeton von Ort betonbohrpfählen

### 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 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 Ort betonbohrpfählen zu reduzieren.

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

Im letzten Jahrzehnt fanden vermehrt gebohrte Ort betonpfähle bei Bauvorhaben der WSV Verwendung. Überschnittene Bohrpfahlwände wurden z. B. an den Schleusenbaugruben der Schleusen Fankel, Zeltingen und Trier an der Mosel und an der Schleuse Bolzum am Stichkanal Hildesheim, sowie an der Schleuse Minden an der Weser als temporäre Baubehelfe ausgeführt. Des Weiteren wurden sie an der Weser bei der Schleusenkammer Dörverden oder als Uferwand bei den Schleusen Lehmen und Trier an der Mosel in das Bauwerk integriert und dienen zur dauerhaften Lastabtragung. Für die nächsten Jahre sind an den Schleusenbaugruben des Dortmund-Ems-Kanal (DEK) Nord, in Erlangen und in Kriegenbrunn am Main-Donau-Kanal (MDK) 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 2024

### 3 Untersuchungsmethoden

Untersuchungen mithilfe von in situ Messungen und Modellversuchen sollen dazu beitragen, die Wechselwirkung zwischen Frischbeton, Boden und Porenwasser beim Herstellungsprozess abzubilden. Im ersten Schritt wurde im Rahmen einer Literaturrecherche der aktuelle Stand der Technik erfasst. Bei den nachfolgenden auf mehreren Baustellen durchgeführten Untersuchungen lag 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 vorab im Labor getesteten Drucksensoren dienen den Messungen zur Frischbetondruckentwicklung auf der Baustelle. Auf Grundlage der Messergebnisse erfolgt dann die Planung und Durchführung von Modellversuchen. Es ist geplant, die beobachteten Phänomene parallel mit numerischen Methoden zu simulieren. Als Werkzeug steht z. B. OpenFOAM (CFD) zur Verfügung.

### 4 Ergebnisse

Messungen auf Baustellen in Gleesen, im Inntal, in Karlsruhe und in Lehmen ermöglichen eine erste Abschätzung der Frischbetondruckentwicklung bei verrohrten, im Kontraktorverfahren hergestellten Bohrpfählen mit Wasserauflast. Für die Messung sind Sensoren verteilt über die Pfahllänge (von bis zu 21,50 m) am Bewehrungskorb befestigt worden (vgl. Titelbild). Wann und in welchen Abschlüssen die Verrohrung und das Kontraktorrohr gezogen werden, hat dabei einen entscheidenden Einfluss auf die Druckentwicklung, vgl. Nissen et al. (2020). Deutlich wird dies an den in Bild 1 abgebildeten Druckänderungen. Dargestellt ist die Messebene 1 m über dem Pfahlfuß (UK), in der bei diesem Pfahl die größten Druckänderungen beobachtet wurden. Der zu beobachtende erste schlagartige Druckanstieg, gefolgt von einigen Druckschwankungen, entstand durch das Ziehen der Verrohrung ab ca.  $t = 17.75$  min nach dem Betonagestart. Der zweite Druckanstieg (ca.  $t = 20.50$  min), der vorwiegend in der dargestellten Sensorebene zu beobachten ist, resultiert aus dem Abschlagen des Kontraktorrohrs. Bei den Messungen auf anderen Baustellen konnten ebenfalls Druckabfälle und Druckschwankungen beobachtet werden. Die Intensitäten und Zeitpunkte der gemessenen Druckänderungen sind jedoch unterschiedlich.

Aktuell wird die Fragestellung untersucht, wie sich die gemessenen Druckschwankungen im Frischbeton auf den Boden und das Porenwasser auswirken. Hierfür stehen zwei Versuchsstände der BAW zur Verfügung. In der Wechseldurchströmungsanlage (WDA) (vgl. Kayser et al. 2016) kann der Einfluss der im Frischbeton gemessenen Druckänderungen auf den Boden untersucht werden. Dadurch können die durch die Druckänderung verursachten Veränderungen in Boden und Porenwasser beobachtet werden. Der Einfluss der Wechselwirkung zwischen Frischbeton, Boden und Porenwasser wird im zweiten Versuchsstand untersucht. In diesem werden Modellpfähle im Boden hergestellt und im Boden die totalen Spannungen und die Porenwasserdrücke während der Pfahlherstellung gemessen. Die Kombination der Untersuchung in beiden Versuchsständen soll eine möglichst ganzheitliche Betrachtung der Fragestellung ermöglichen. In beiden Versuchsständen wurden bereits Vorversuche gemacht.

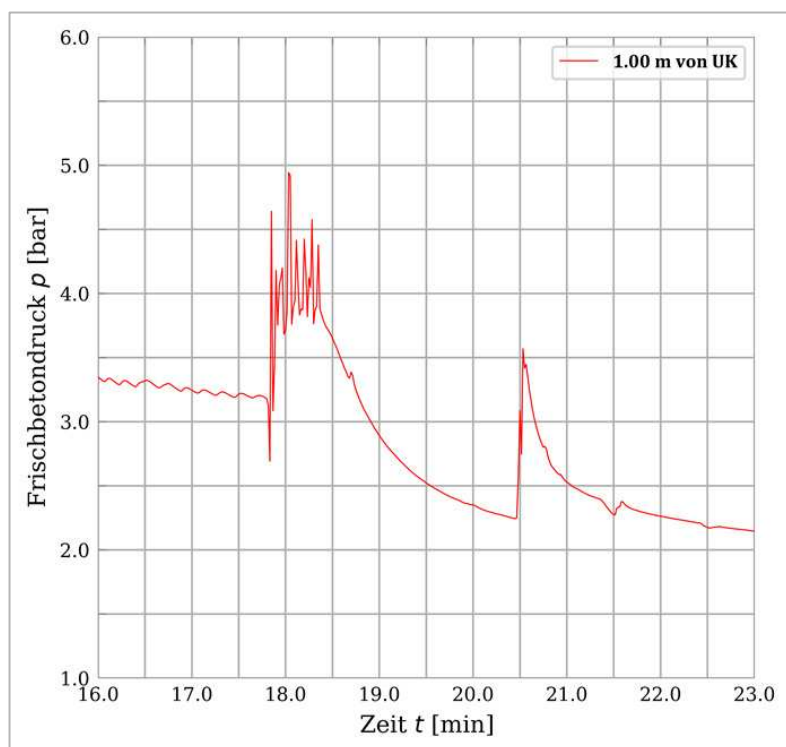
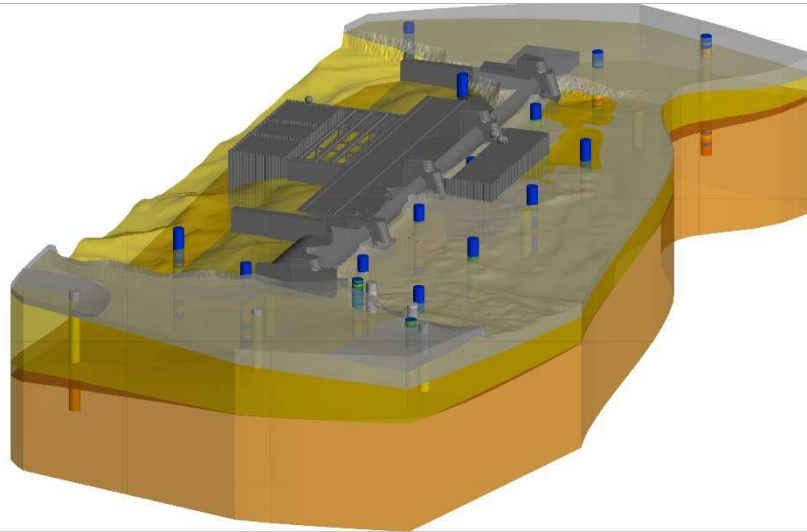


Bild 1: Druckänderungen im Frischbeton infolge des Ziehens der Verrohrung bei der Pfahlherstellung.

#### Literatur:

Kayser, J.; Karl, F.; Schürenkamp, D.; Schwab, N.; Oumarci, H. (2016): A Test Apparatus for Alternating Flow in Geotechnical Engineering. In: Geotechnical Testing Journal, 39 (5), S. 865–878.

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, S. 357–364.



## 3D-Baugrundsichtenmodell

### Softwaretest zur Visualisierung des Baugrunds

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Gemäß dem „Stufenplan Digitales Planen und Bauen“ des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) sollen künftige Infrastrukturprojekte nach der BIM-Methode (Building Information Modeling) erstellt werden (BMVI 2015). Als Basis für die Infrastrukturbauwerke ist unter anderem ein 3D-Modell des Baugrunds notwendig. Als Eingangsdaten liegen Bohrlöcher und das digitale Geländemodell (DGM) vor. Daraus soll ein 3D-Baugrundsichtenmodell erstellt werden. Ziel des Forschungsvorhabens ist eine Analyse der Leistungsfähigkeit intern und extern aktuell vorhandener Methoden und Softwarepakete zur Lösung der Aufgabenstellung.

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

Das Forschungsvorhaben bildet die Grundlage für die Generierung von 3D-Baugrundsichtenmodellen in der BAW. Durch die Nutzung von Algorithmen sollen möglichst viele Bearbeiter bei gleicher Datengrundlage auf ein möglichst ähnliches Ergebnis kommen und somit eine hohe Transparenz schaffen.

Volumenkörper der Erdschichten sind auch unabhängig von BIM für weitere Planungen und Berechnungen relevant. Bereits im Voraus kann damit eine präzise Abschätzung der Erdaushubmasse und ihres Materials erfolgen. Dies ist wichtig für die Bauplanung und Baukostenschätzung für den Erdbau und für die Bohrarbeiten. Beispielsweise verursachen kontaminierte Erdvolumen hohe Entsorgungskosten.

#### 3 Untersuchungsmethoden

Zu Beginn des Projekts wurde eine Analyse intern und extern vorhandener Methoden und Softwarepakete durchgeführt. Intern vorhandene Methoden und Programme ermöglichen gegenwärtig nur die Visualisierung des Baugrundmodells. Darum lag der weitere Fokus auf externen Lösungen zur Modellierung. Die Hauptkriterien zur Bewertung (Stütz 2020) werden im Folgenden erläutert:

#### Auftragsnummer:

B3952.02.04.70008

#### Auftragsleitung:



Dominik Stütz  
 dominik.stuetz@baw.de

#### Laufzeit:

2020 bis 2023



### Datenimport und -export

Die im Rahmen der Baugrunderkundung gewonnenen Daten müssen importiert werden. Bei den Aufschlüssen beinhaltet dies die stilisierten Aufschlussinformationen und beim DGM i.d.R. eine Punktwolke.

Zur Weiterbearbeitung des Baugrundsichtenmodells und zur Bereitstellung des Modells für andere Projektpartner ist die Möglichkeit eines verlustfreien Datenexports von essentieller Bedeutung.

### Interpolation

Da Aufschlüsse nur punktuell vorliegen, müssen Schichtenverläufe zwischen diesen auf Grundlage mathematischer bzw. geologischer Annahmen festgelegt werden. Bei einer geringen Anzahl von Aufschlüssen wird zu meist ein linearer Verlauf der Schichtgrenzen bevorzugt. Erhöht sich jedoch die Anzahl, kommt es bei der Erstellung von Schnitten zu unplausiblen Schichtverläufen (siehe Titelbild). Um dies zu vermeiden und den in der Natur häufig vorkommenden nichtlinearen Verlauf von Schichtgrenzen zutreffend zu beschreiben, finden Interpolationsverfahren aus der Geologie Anwendung (siehe Bild 1, unten).

### Geologische Schichtermittlung und Anpassung

Durch die Erdentstehungsgeschichte gibt es eine Reihe von geologischen Prozessen, welche den Untergrund geprägt haben. Einzig durch Nachahmung dieser Prozesse kann von Seiten der Software das Baugrundsichtenmodell aus den Bohrlochdaten erstellt werden. Algorithmen, welche Ablagerung, Erosion, Schichtabhängigkeit, Verwerfungen und Bohrlochenden bei der Erstellung des Baugrundsichtenmodells berücksichtigen, minimieren den Arbeitsaufwand erheblich.

Ortsspezifische Besonderheiten oder Eingriffe durch den Menschen können durch die Software nicht automatisiert erfasst werden. Diese in das Modell einzupflegen, ist die Aufgabe der Nutzerin bzw. des Nutzers. Dazu ist die Benutzeroberfläche entscheidend. Ein wesentliches Merkmal ist, ob die Bearbeitung im 3D-Modell oder in 2D-Schnitten erfolgt. Auch bei den Modellierungswerkzeugen gibt es erhebliche Unterschiede: Manche Programme bieten eine direkte Bearbeitung der berechneten Schichtkontaktflächen, andere erlauben es, Zwangselemente einzufügen. Der größte Vorteil der letzteren Methode besteht darin, dass diese Elemente explizit dargestellt werden können und auch bei späterer Modellaktualisierung bestehen bleiben.

### Attribuierung

Nach Erstellung des Baugrundsichtenmodells inkl. der Aufschlüsse sind dem Modell zur Durchführung der Arbeitsmethode BIM Attribute wie Schichtinformationen und Bodenkennwerte des Baugrunds hinzuzufügen (Fachmodell Baugrund).

## 4 Ergebnis und Ausblick

Vor allem aufgrund der einfachen Bedienbarkeit und der vorhandenen Im- und Exportmöglichkeiten fiel die Entscheidung auf Leapfrog Works. Dieses wird nun zunächst in den kommenden Jahren zur Erstellung der 3D-Baugrundsichtenmodelle an der BAW verwendet.

Da jedoch die BAW, gemäß den Open-Data-Richtlinien, freie Software fördern möchte und ein großes Potential in GemPy erkannt hat, wird eine Kooperation mit den Entwicklern, der RWTH Aachen und der Terranigma Solutions GmbH, angestrebt. Ziel ist die Erstellung einer auf einer Reihe von Open-Source-Paketen (insbesondere GemPy) basierenden eigenständigen Open-Source-Softwareanwendung, die es ermöglicht, geologische 3D-Daten und 3D-Modelle über eine vertraute und einfach zu bedienende grafische Benutzeroberfläche zu bearbeiten. Dazu ist auch eine Erweiterung der Funktionalitäten von GemPy zur Anwendung in der Geotechnik nötig. Außerdem soll rund um diese Anwendung eine Open-Source-Community von Nutzern, Mitwirkenden und Unterstützern geschaffen und langfristig ausgeweitet werden.

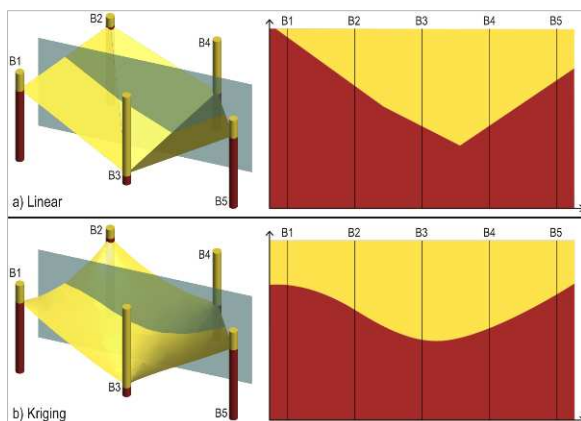
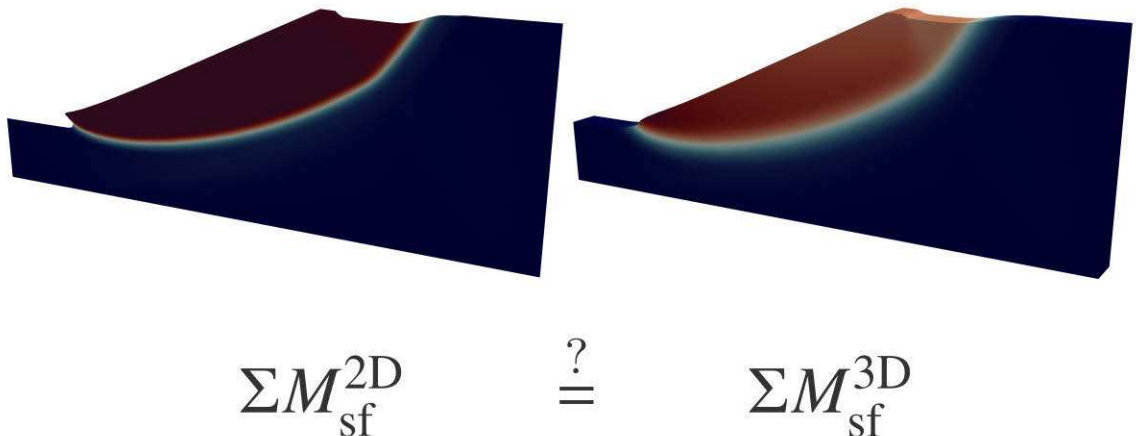


Bild 1: Vergleich der linearen Interpolation (a) mit Kriging (b) im 3D-Modell und im Schnitt.

### Literatur:

BMVI (2015): Stufenplan Digitales Planen und Bauen – Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken.

Stütz, D.; Herten, M. (2020), Evaluation von Software zur Generierung von Baugrundsichtenmodellen. Geotechnik, 43: 275–282.



## Erfassung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit mittels dreidimensionaler FE-Berechnungen in der Geotechnik

### Probate dreidimensionale Simulationsmethoden

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die FEM (Finite-Element-Methode) ist ein häufig genutztes Werkzeug zur Analyse geotechnischer Fragestellungen. Diverse Fragen können mit den bislang verwendeten zweidimensionalen (2D) FE-Modellen nicht hinreichend beantwortet werden (z. B. Standsicherheit von Brückenwiderlagern in Böschungen, Einzellasten an Geländesprüngen, etc.). Auch der geplante Einsatz von BIM (Building Information Modeling) im Verkehrswegebau wird den Bedarf an dreidimensionalen Standsicherheitsberechnungen deutlich erhöhen. Zurzeit liefert jedoch die Modellierung von räumlichen Bruchzuständen wegen zahlreicher numerischer Einflussfaktoren unsichere Ergebnisse.

Es zeigt sich beispielsweise bei Böschungen unter einfachen Randbedingungen, für die auch analytische Lösungen vorliegen, dass die Berechnung der Standsicherheit in 3D viel sensitiver reagiert als bei den entsprechend dem Stand der Technik durchgeführten zweidimensionalen Nachweisen. Nicht nachvollziehbare Differenzen zwischen Ergebnissen von 2D- und äquivalenten 3D-Simulationen zur Beantwortung derselben Fragestellung reduzieren die Akzeptanz numerischer Ergebnisse. Dies ist besonders relevant, wenn die FEM zur Beurteilung der Standsicherheit von Bauwerken unter dreidimensionaler Belastung genutzt wird. Die Ursachen hierfür müssen systematisch analysiert werden, um entsprechende Handlungsempfehlungen für die 3D-FE-Modellierung abzuleiten.

Darüber hinaus sollen die Grundlagen für geotechnische Standsicherheitsberechnungen, die räumlichen Einflüssen unterliegen, mithilfe von 3D-FE-Berechnungen erarbeitet werden. Ziel wäre es beispielsweise, beim Nachweis des Kreuzungsbauwerks eines Dammes nicht nur die Grundwasserströmung, sondern auch den Bodenwiderstand dreidimensional zu berücksichtigen. Hierbei sind u. a. die räumlichen Belastungen aus Einwirkungen und die mobilisierbaren räumlichen Widerstände zu bestimmen. Insbesondere die Definition des Bruchkriteriums ist für den Nachweis in 3D kritisch zu überprüfen.

#### Auftragsnummer:

B3952.02.04.70009

#### Auftragsleitung:



Siegfried Galkin  
 siegfried.galkin@baw.de

#### Laufzeit:

2020 bis 2024

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

Durch verbesserte numerische 3D-Analysen können Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit von vorhandenen und neuen komplexen Bauwerken besser beurteilt werden. Das hat besondere Bedeutung für Bauvorhaben im oder neben dem Bestand, z. B. für tiefe Baugruben neben sensiblen Bestandsbauwerken.

## 3 Untersuchungsmethoden

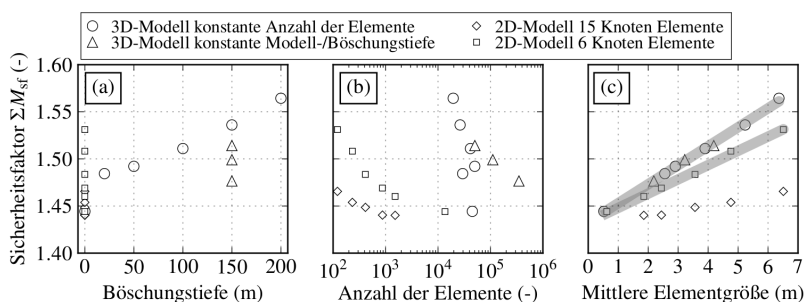
Es sind umfangreiche numerische Untersuchungen und ein Vergleich mit analytischen Lösungen vorgesehen. Hierbei sollen die besonderen Aspekte bei der Verwendung von dreidimensionalen Simulationsmodellen im Vergleich zu 2D-Modellen systematisch analysiert werden. Dazu zählt die Analyse der Vernetzung, des verwendeten Elementtyps, der Randbedingungen (bspw. Symmetrie) sowie des Einflusses der geometrischen Abmessungen und der unterschiedlichen Auswertungsmethoden. Sofern vorhanden, sollen die numerischen Ergebnisse in 2D und 3D mit analytischen Ansätzen verglichen werden. Die ermittelten Wechselwirkungen und Zusammenhänge sollen bei der Modellierung von realen Fragestellungen (bspw. Pfahlprobelastungen) angewendet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen unabhängig von der verwendeten FE-Software anwendbar sein, daher werden in unterschiedlichen Softwaretools die gleichen Szenarien und Herangehensweisen analysiert.

## 4 Ergebnisse

Durch die Vernetzung einer Geometrie wird die numerische Lösung beeinflusst. Sind die kritischen Bereiche (bspw. Spannungskonzentrationen an Ecken/Pfahlenden/Böschungsfuß) einer Geometrie bekannt, gelingt es mittels lokaler Verfeinerung der Vernetzung in diesen Bereichen, den Einfluss der numerischen Berechnung auf das Ergebnis zu minimieren. Diese kritischen Bereiche sind jedoch im Allgemeinen nicht bekannt. Vielmehr werden die für die Vernetzung kritischen Bereiche von den jeweiligen Randbedingungen bestimmt. Für eine 1:3 geneigte Böschung in homogenem Baugrund (siehe Titelbild), ist hingegen der Bereich, in dem die Böschung versagt, durch die analytische Lösung bekannt. Wird in diesem Fall jedoch das dreidimensionale Modell der Böschung entlang der Tiefe (senkrecht zu der im Titelbild dargestellten Schnittebene) unterschiedlich fein vernetzt, kann sich hierdurch eine von der analytischen Lösung abweichende Bruchfuge einstellen. In diesem Fall würde sich der Böschungsbruch im 3D-Modell trotz überall gleicher Materialeigenschaften und Lasten nicht einheitlich ausbilden. Daher sollte insbesondere bei der Vernetzung ein besonderes Augenmerk auf eine in kritischen Bereichen ausreichend genaue und feine Vernetzung und zusätzlich in homogenen Bereichen auf eine einheitliche Feinheit gelegt werden, um physikalisch plausible Lösungen zu erhalten.

In einem weiteren Schritt wurde anhand einer Böschung der Einfluss der räumlichen Ausdehnung des Modells auf die berechnete Standsicherheit untersucht. Hierfür wurde ein 3D-Modell mit abnehmender Tiefe bei nahezu konstanter Anzahl der Elemente und ein 3D-Modell mit einer festgelegten Tiefe mit variabler Anzahl der Elemente (s. Bild 1) gegenüber gestellt. Es lässt sich festhalten, dass bei unterschiedlicher Böschungstiefe im Wesentlichen die mittlere Elementgröße die entscheidende Rolle spielt (s. Bild 1c). Bei der Bewertung der numerischen Konvergenz sollte daher der Fokus stets auf die mittlere Elementgröße statt auf die oft als alleiniges Bewertungskriterium herangezogene Anzahl der Elemente (s. Bild 1b) gelegt werden.

Zusätzlich wurde anhand dieser Böschung auch der Einfluss der mittleren Elementkantenlänge und der Elementansatzfunktion näher untersucht. Hierbei wurden die Elementansatzfunktion des 2D-Modells und die Elementgröße (in 2D und 3D) variiert. Die Ansatzfunktion aus dem 2D-Modell mit 6-Knoten-Elementen entspricht dem Grad der Ansatzfunktion für 3D-Modelle. Mit abnehmender mittlerer Elementgröße konvergieren die 2D- und 3D-Modelle auf denselben Wert (s. Bild 1c). Für die höherwertige Ansatzfunktion der 2D-Modelle (15-Knoten-Elemente) wird die gleiche Standsicherheit bei bereits wesentlich größeren mittleren Elementgrößen erreicht. Für eine Gegenüberstellung von 2D- und 3D-Simulationsergebnissen muss demnach beachtet werden, dass die Elementansatzfunktion und die mittlere Elementgröße zwei entscheidende Faktoren sind, die einen Unterschied in den Ergebnissen erzeugen können.



### Literatur:

Plaxis - Validation & Verification (2018): Phi-c reduction and comparison with Bishop's method.

Bild 1: Resultierender Sicherheitsfaktor einer zwei- und dreidimensional modellierten Böschung, der sich aus den unterschiedlichen Einflussfaktoren ergibt.



## 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. dem Eintrag und der 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 2022



## 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. Dieses FuE-Vorhaben soll eine wissenschaftlich fundierte Grundlage liefern, um zukünftig verbesserte Prognosen zu ermöglichen und damit im Rahmen von Genehmigungsverfahren präzisere Aussagen zur vorhabenbedingten Beeinflussung der GW-Verhältnisse zu ermöglichen. Weiter ist zu erwarten, dass auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse Beweissicherungskonzepte wirtschaftlicher und zielführender gestaltet werden können.

## 3 Untersuchungsmethoden

Am Versuchsstandort Potsdam wurden im Zeitraum zwischen September 2012 und März 2013 zwei Transekte zur kontinuierlichen tiefenorientierten Untergrundtemperaturmessung installiert. Durch die Verwendung der Temperatur als natürlichem 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, beispielsweise 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. Die Ergebnisse zeigen eine Veränderung der Austauschprozesse am Standort. 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.; Goeppert, 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-Ästuare

Methodenentwicklung zur In-situ-Bestimmung vertikaler Wasserflüsse im Gewässerbett

### 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 wichtige Rollen. In den tidebeeinflussten Ästuaren der deutschen Nordseeküste werden die Grundwasserverhältnisse zusätzlich durch 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

#### Laufzeit:

2016 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 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

Zur Untersuchung und Quantifizierung der Austauschprozesse in der Gewässersohle wird eine Methode benötigt, die in der Lage ist, vertikale Wasserflüsse über einen Zeitraum integriert zu erfassen. Hatfield et al. (2004) stellen eine Methode vor, die für die Erfassung horizontaler Grundwasserströme Anwendung findet. Dabei wird ein Sorbent (hier: Aktivkohle) mit verschiedenen Markierungsstoffen (hier: Alkohole) beladen, die dann durch das durchströmende Wasser gleichmäßig ausgewaschen werden. Anhand der Abnahme der Stoffmenge auf dem Sorbent und der verstrichenen Zeit seit Versuchsbeginn kann auf das durchströmte Volumen geschlossen werden.

Auf der Grundlage dieser Arbeit wurde ein Gerät konzipiert, das das Prinzip in die Vertikale überträgt. Zunächst wurden Laborversuche mittels eines Säulenversuchs unternommen, um die grundsätzliche Eignung des Messprinzips für die angedachte Verwendung zu überprüfen sowie die Materialparameter und den Optimierungsbedarf zu bestimmen (Roth 2021).

### 4 Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigten die grundsätzliche Eignung der Methodik für die Bestimmung vertikaler Wasserflüsse. Bild 1 zeigt den verbleibenden Anteil der Markierungsstoffe auf dem Sorbent (in Prozent der Ursprungsmasse) gegenüber dem seit Versuchsbeginn durchströmten Volumen an Wasser durch die Säule. Deutlich zu erkennen sind die unterschiedlichen Eigenschaften der hier abgebildeten Stoffe 2-Propanol und *tert*-Butanol. Letzterer hat einen höheren Retardationskoeffizienten, wird also langsamer ausgewaschen als 2-Propanol. Dadurch sind die verbleibenden Anteile an *tert*-Butanol wesentlich höher als für 2-Propanol. Wenn 2-Propanol komplett ausgewaschen ist, bleibt zunächst noch *tert*-Butanol, das eine Auswertung erlaubt. Durch die Kombination verschiedener Stoffe können unterschiedliche Zeiträume bzw. Volumenströme abgedeckt werden, was die praktische Anwendbarkeit erhöht.

Neben dem unterschiedlichen Niveau der Restmassen der beiden Stoffe ist auch die Abnahme der Restmasse auf dem Sorbent für die einzelnen Stoffe bei zunehmenden Volumina zu erkennen. Hier zeigt sich allerdings auch eine Streuung der Werte, die zu Unsicherheiten bei der Auswertung der Versuche führt. Momentan werden Folgeversuche durchgeführt, welche die Genauigkeit der Methodik verbessern sollen und damit einen weiteren Schritt in Richtung Anwendung ermöglichen.

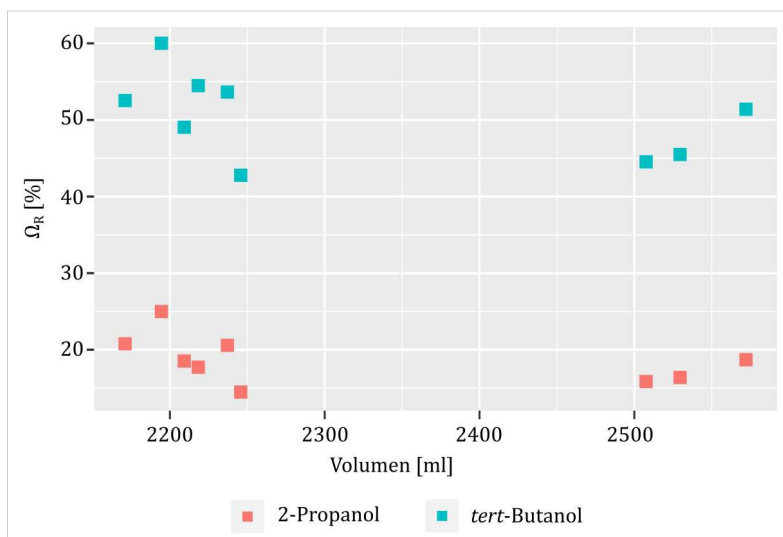


Bild 1: Verbleibender Anteil der Tracermasse auf dem Sorbent nach Durchströmung mit unterschiedlichen Volumina Wasser für zwei Alkohole.

#### Literatur:

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

Hatfield, K.; Annable, M.; Cho, J.; Rao, P. S., Klammler, H. (2004): A direct passive method for measuring water and contaminant fluxes in porous media. Journal of contaminant hydrology (75), S. 155–181.

Roth, T. (2021): Quantitative In-situ-Bestimmung vertikaler Volumenströme in porösen Medien – Laborversuche zur Entwicklung einer tracerbasierten Methodik, Karlsruher Institut für Technologie, Masterarbeit.





## 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)

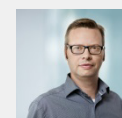
#### Auftragsnummer:

B3952.03.04.70005

#### Auftragsleitung:



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



Dr. Thomas Nuber  
 thomas.nuber@baw.de

#### Laufzeit:

2017 bis 2022



## 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 Anker tafeln und -wände zurückzugreifen. Infolgedessen ergeben sich für die zu erstellenden Bauwerke teils deutliche Kostensteigerungen, höhere Lärmbelastigungen, größere Erschütterungen und längere Bauzeiten.

## 3 Untersuchungsmethoden

Um im Vorfeld eine grobe Ersteinschätzung der zu erwartenden Betonaggressivität zu treffen und Laborana lysen auf ihre Plausibilität zu prüfen, wurden Karten zur potenziellen Betonaggressivität erstellt. Grundlage dafür sind die Hydrochemischen Hintergrundwerte, die von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe als „Web Map Service“ der Öffentlichkeit zugänglich gemacht wurden (Wagner et al. 2011). Für ins gesamt 186 hydrogeochemische Einheiten, die sich aus geologisch-genetischen, lithologischen und hydroche mischen Gesichtspunkten in Deutschland ergeben, wurden die räumliche Verteilung der jeweiligen Expositi onsklassen nach der DIN 4030, die sich aus den Hintergrundwerten für die Wasserinhaltsstoffe Ammonium, Magnesium und Sulfat ableiten lässt, dargestellt. Da keine Hintergrundwerte für die kalklösende Kohlensäure angegeben sind, wurden diese Werte mit dem hydrochemischen Programm PhreeqC (Parkhurst und Appelo 1999) für die hydrogeochemischen Einheiten berechnet.

## 4 Ergebnisse

Bild 1 zeigt exemplarisch die räumliche Verteilung der potenziellen Expositionsklassen, die sich auf der Grund lage der berechneten Konzentrationen an kalklösender Kohlensäure ableiten lässt. Für weite Teile der Nord deutschen Tiefebene sowie Mittel- und Süddeutschlands konnten calcitabscheidende Verhältnisse bzw. ge ringe Konzentrationen an kalklösender Kohlensäure ermittelt werden, so dass in diesen Gebieten das Auftreten von kalklösender Kohlensäure als gering eingestuft wird. Erhöhte Konzentrationen, die eine Einstufung in die Expositionsklasse XA 1 sowie XA 2 erfordern könnten, wurden für den westlichen Bereich der Norddeutschen Tiefebene einschließlich der Lüneburger Heide, sowie für die Niederrheinische Bucht und für weite Teile des Rheinischen Schiefergebirges berechnet. Die höchsten Konzentrationen an kalklösender Koh lensäure, die eine Einstufung in die Expositionsklasse XA3 erfordern würden, wurden für die Oldenburgisch Ostfriesische Geest berechnet. Ein Abgleich mit Analyseergebnissen, die im Rahmen von Baugrunderkundun gen zahlreicher WSV-Projekte gewonnen werden konnten, zeigt eine gute Übereinstimmung. Vor diesem Hin tergrund scheint eine Plausibilisierung von Analyseergebnissen sowie eine mögliche Ersteinschätzung zur Be tonaggressivität mit Hilfe dieser Karte zielführend.

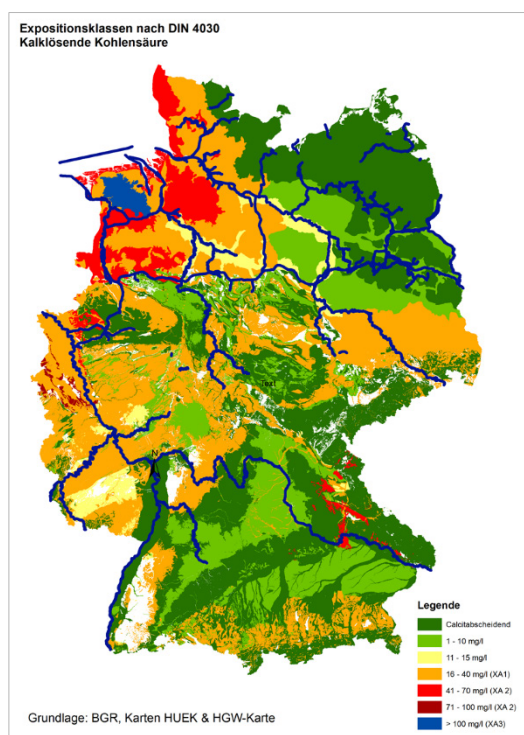
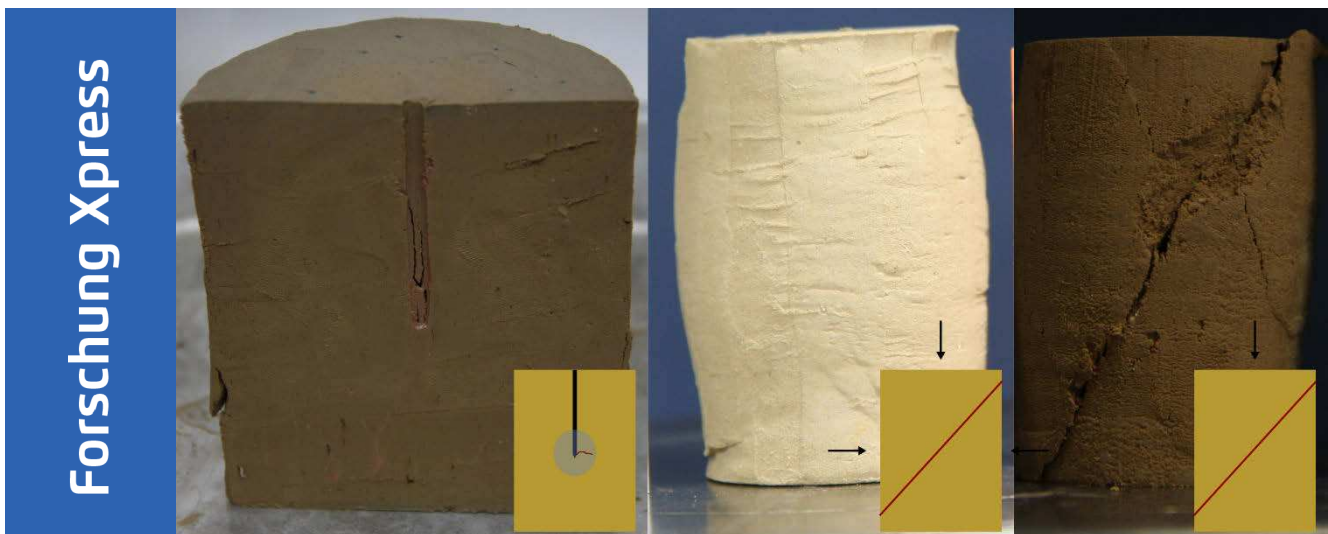


Bild 1: Potenzielle Expositionsklassen aufgrund kalklösender Kohlensäure.

### Literatur:

Parkhurst, D. L., Appelo, C. A. J. (1999): User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, U. S. Geological Survey.

Wagner et al. (2011): Hydrogeochemische Hintergrundwerte der Grundwässer Deutschlands als Web Map Service, Grundwasser (16), S. 155-166.



Forschung Xpress

## Hydraulischer Widerstand feinkörniger Böden

### Reproduzierbarkeit von Laborversuchen zur Rissentstehung

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Durch Laborversuche in Kooperation zwischen der BAW und der Bauhaus Universität Weimar konnte von Wudtke (2014) gezeigt werden, dass das hydraulische Versagen an unterströmten Spundwänden in bindigem Baugrund durch Rissbildung im Bereich des maximalen Gradienten initiiert wird. Darauf aufbauend wird in diesem Forschungsvorhaben eine Laborstudie mit einem modifizierten Triaxialversuch durchgeführt, um die hydraulische Rissentstehung in feinkörnigen Böden in Abhängigkeit verschiedener Einflussfaktoren zu untersuchen. Dafür wird über eine Kanüle in der Mitte der Probekörper der Porenwasserdruck bis zur Rissentstehung gesteigert. Aus den Versuchsergebnissen wird ein hydraulischer Widerstand gegen Rissbildung abgeleitet, der in einem für bindige Böden angepassten Nachweisverfahren gegen hydraulischen Grundbruch Verwendung finden soll. Dazu ist eine probabilistische Betrachtung der Rissentstehung erforderlich, um den Risswiderstand in dem Nachweis auf Grundlage des Teilsicherheitskonzepts des EC 7 integrieren zu können.

#### 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 Versagen 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.

#### 3 Untersuchungsmethoden

Um geeignete Teilsicherheiten für den Widerstand gegen Rissentstehung im feinkörnigen Boden zu bestimmen, ist einerseits zu untersuchen, unter welchen hydraulischen und bodenmechanischen Randbedingungen eine

#### Auftragsnummer:

B3952.03.04.70006

#### Auftragsleitung:


 Helen Machacek  
 helen.machacek@baw.de

#### Laufzeit:

2015 bis 2022

Rissbildung erfolgt und andererseits, mit welcher Unsicherheit der im Labor ermittelte Widerstand des Bodens gegen hydraulische Rissbildung behaftet ist. Für Letzteres wird die Reproduzierbarkeit des effektiven Aufreißdrucks  $p_{w,fr}' = p_{w,fr} - p_{w,0}$  bei Rissentstehung im modifizierten Triaxialversuch ermittelt, der maßgebend für den Risswiderstand ist. Zur Beurteilung wurden die Ergebnisse in Relation mit drainierten und undrainierten Scherfestigkeiten aus herkömmlichen Laborversuchen gesetzt. Für alle Versuche werden konsolidierte Probekörper aus Schluff verwendet (siehe Günther 2019). Aus der Versuchsreihe zur hydraulischen Rissentstehung wurde ein Referenzversuch bestimmt, der für die Reproduzierbarkeitsanalyse sechs Mal wiederholt wurde. Die restlichen Versuche der Studie wurden zwei bis vier Mal unter identischen Anfangs- und Randbedingungen durchgeführt. Für den statistischen Vergleich werden der Mittelwert  $MW$  und die Standardabweichung  $SD$  der Aufreißdrücke  $p_{w,fr}'$  berechnet und die bezogene Abweichung  $SD/MW$  bestimmt. Als Referenz dienen die undrainierte Scherfestigkeit  $c_u$  aus vier einaxialen Druckversuchen, wobei  $c_u$  der Hälfte der einaxialen Druckfestigkeit entspricht, und aus 19 Flügelsondierungen sowie die drainierten Scherparameter  $\varphi'$  und  $c'$  aus drei Versuchsreihen von undrainierten Triaxialversuchen mit je vier Einzelversuchen.

#### 4 Ergebnisse

Betrachtet wurden zunächst die effektiven Aufreißdrücke der sechs Referenzversuche. Es ergab sich ein  $MW$  von 356,7 kPa, eine  $SD$  von 62,4 kPa und damit eine bezogene Abweichung von 17,5 %. Für  $c_u$  aus der einaxialen Druckfestigkeit bzw. der Flügelsondierung betragen die Abweichungen nur 6,5 % bzw. 11,5 %. Bei den undrainierten Triaxialversuchen wird die lineare Grenzbedingung im  $p'$ - $q$ -Diagramm ( $p' = (\sigma_v' + 2\sigma_h')/3$  und  $q = \sigma_v - \sigma_h$ ) durch die Punkte beim maximalen Porenwasserdruck festgelegt, wie aus Bild 1 im rechten Diagramm ersichtlich ist. Aus Steigung und  $y$ -Achsenabschnitt lassen sich die Scherparameter  $\varphi'$  und  $c'$  je Versuchsreihe im Triaxialgerät bestimmen. Dabei wurden bezogene Abweichungen von 1,9 % bei  $\varphi'$  und 142,0 % bei  $c'$  zwischen den Versuchsreihen ermittelt. Auf den ersten Blick scheint nach der Kohäsion  $c'$  der Aufreißdruck  $p_{w,fr}'$  mit den größten Unsicherheiten behaftet. Allerdings werden  $p_{w,fr}'$  sowie  $c_u$  direkt aus den Messgrößen Porenwasserdruck an der Kanüle bzw. axiale Spannung oder Scherspannung bestimmt.  $\varphi'$  und  $c'$  hingegen werden aus linearer Regression aus den Hauptspannungen  $\sigma_v$  und  $\sigma_h$  bei maximalem Porenwasserdruck berechnet. Um eine Vergleichbarkeit zu schaffen, wurden Aufreißdrücke bei Versuchen unterschiedlicher mittlerer Ausgangsspannungen  $p'$  betrachtet. Mittels Regressionsanalyse ergibt sich der lineare Zusammenhang  $p_{w,fr}' = 1,36 \cdot p' + 67,5$  kPa. In Bild 1 ist links die lineare Regression für den Aufreißdruck in Abhängigkeit der mittleren Ausgangsspannung und rechts die lineare Regression zur Bestimmung der drainierten Scherparameter aus allen Einzelversuchen im Triaxialgerät dargestellt. Die Bestimmtheitsmaße  $R^2$  der Regressionsanalysen betragen 83,0 % und 95,9 %. Somit geht die Bestimmung des Risswiderstands mit größeren Unsicherheiten einher als die Bestimmung herkömmlicher bodenmechanischer Festigkeiten.

Dies lässt sich durch das lokale Versagen bei Rissbildung erklären. Bei den anderen Laborversuchen verteilt sich die Beanspruchung über die gesamte Scherfuge. Zwar spielen auch bei Scherung Inhomogenitäten im Boden eine Rolle, wie Untersuchungen zu lokalisiertem Versagen z. B. von Gylland et al. (2014) zeigen, doch handelt es sich um einen Elementversuch, bei dem bei ausreichender Probengröße der Einfluss von Fehlstellen gering bleibt. Risse hingegen entstehen an einer Fehlstelle und breiten sich von dort bei entsprechenden Spannungsverhältnissen aus. Im Titelbild wird durch die Aufnahmen der Probekörper nach modifiziertem und herkömmlichem Triaxialversuch sowie einaxialem Druckversuch (von links nach rechts) mit jeweils zugehörigen kleinen Skizzen dieser Unterschied zwischen lokalem Versagen und Gesamtversagen im Elementversuch veranschaulicht. Bezogen auf das hydraulisch bedingte Rissversagen im Triaxialgerät bedeutet dies, dass ab einem bestimmten Porenwasserüberdruck im Kanülenbereich die Existenz von Fehlstellen über die Rissentstehung bzw. Aufreißdruck entscheidet. Somit zeigt die Analyse, dass der hydraulische Risswiderstand stärker von der Homogenität des Bodens abhängt und deshalb im Nachweis mit höheren Teilsicherheiten berücksichtigt werden muss als die anderen Parameter der Bodenfestigkeit.

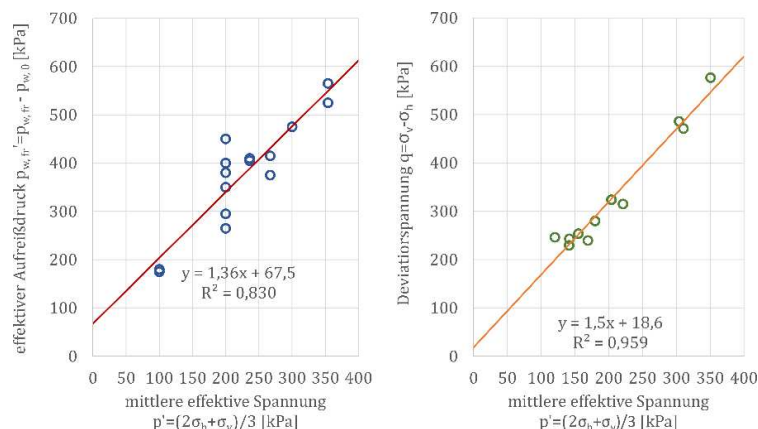
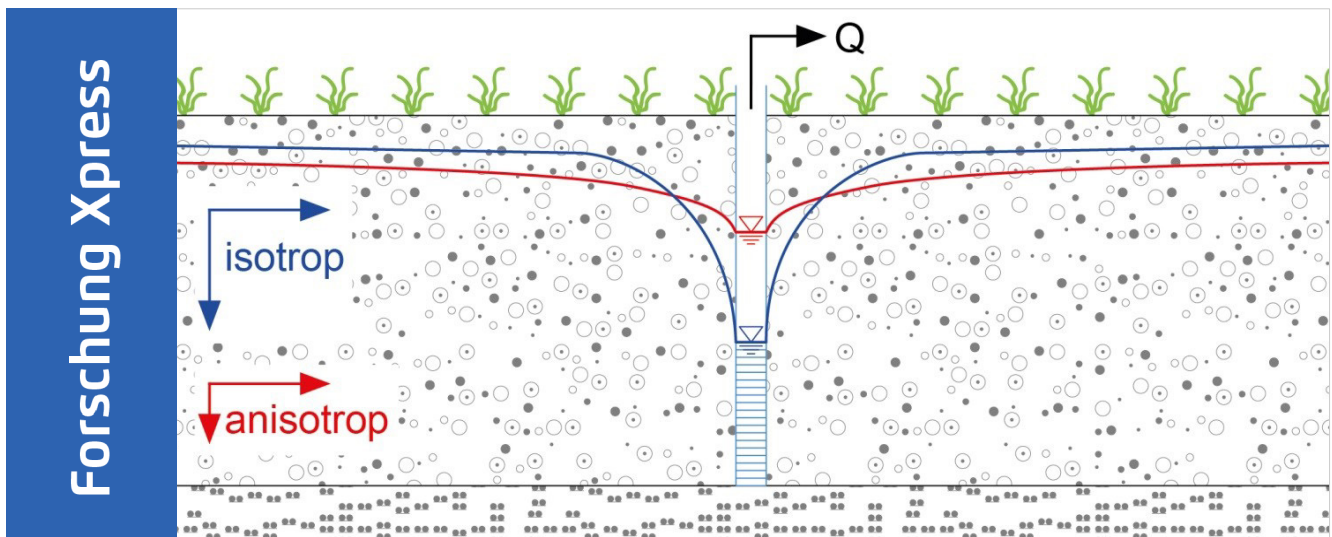


Bild 1: Lineare Regression zur Bestimmung des Aufreißdrucks in Abhängigkeit der Ausgangsspannung  $p'$  aus dem modifizierten Triaxialversuch (links) und zur Bestimmung der Scherparameter aus dem herkömmlichen Triaxialversuch (rechts).

#### 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.
- Gylland, A. S. et al. (2014): Experimental study of strain localization in sensitive clays. Acta Geotechnica, 9: 227–240, Springer-Verlag.
- 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 (räumlich) 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 natürlich abgelagerter Sedimente mit Werten zwischen 2 und 10 beschrieben wird. Je nach Standort kann der Wert der tatsächlich vorliegenden Anisotropie jedoch noch deutlich von diesen Größen abweichen bzw. räumlich stark variieren. Hierdurch entstehen bei der Planung von Wasserhaltungsmaßnahmen große Unsicherheiten, woraus gegebenenfalls 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 bedingtem Maß ein Rückschluss auf die Anisotropie des Untergrunds gezogen werden

#### 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 2022



(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 wurde im Jahr 2019 ein leistungsstarker Grundwasserentnahmebrunnen für die Durchführung von Pumpversuchen hergestellt. Außerdem wurde geeignete Messtechnik zur Bestimmung von Porenwasserdruck und Temperatur in hoher räumlicher Auflösung (vertikal und horizontal) im Untergrund installiert. Die Veränderung von Druckverhältnissen und Temperaturverteilung im Untergrund konnte hierdurch während mehrerer durchgeführter Pumpversuche an insgesamt 49 unterschiedlich tiefen Grundwassermessstellen bzw. Piezometerrohren erfasst werden.

### Numerische Methoden

Durch eine inverse Parameterschätzung auf Grundlage von numerischen Grundwasserströmungsmodellen sollen die geohydraulische Anisotropie sowie Informationen über deren räumliche Varianz auf Basis der Ergebnisse der Feldversuche 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 Bearbeitung des Projekts erfolgte gemeinsam mit dem universitären Partner. Im Jahr 2019 wurde auf einem neu eingerichteten Versuchsfeld (Maier et al. 2020) ein leistungsstarker Grundwasserentnahmebrunnen für die Durchführung von Pumpversuchen hergestellt. Für die Brunnenbohrung am Forschungsstandort wurden ein Bohrdurchmesser von 1.600 mm und ein Ausbaudurchmesser von 800 mm gewählt. Der große Bohr- und Ausbaudurchmesser war erforderlich, um unter den vorliegenden Randbedingungen bei der späteren Durchführung von geohydraulischen Versuchen im Brunnen eine ausreichend große Pumprate einstellen zu können, durch die im Brunnen eine signifikante Absenkung des Wasserspiegels erzielt werden kann. Diese war wiederum erforderlich, um eine Ausbreitung des Drucksignals im Grundwasserleiter sicher messen zu können. Mittlerweile wurden in diesem Brunnen mithilfe einer eigens für die Versuche entwickelten Packerkonstruktion 23 Pumpversuche mit unterschiedlichen Grundwasserentnahmetiefen und Pumpraten durchgeführt. Die Auswertung der Versuche erfolgte durch einen inversen Modellierungsansatz unter Verwendung eines homogenen anisotropen Grundwassermodellansatzes sowie eines geschichteten und anisotropen Modellansatzes. Wesentliche Zielgrößen der Modellkalibrierung waren die radialen und vertikalen hydraulischen Durchlässigkeiten der jeweils berücksichtigten Schichten. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Kombination von Pumpversuchen mit einer Grundwasserentnahme aus verschiedenen Tiefen und einer inversen numerischen Auswertung die vertikale Variabilität der hydraulischen Durchlässigkeit sowie die Anisotropie eines Grundwasserleiters bestimmt werden kann.

### Literatur:

Bagarello, V.; Sferlazza, S.; 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.

Maier, R.; Gonzalez-Nicolas, A.; Leven, C.; Nowak, W.; Cirpka, O. A. (2020): Joint Optimization of Measurement and Modeling Strategies with Application to Radial Flow in Stratified Aquifers. *Water Resources Research* 56 (7).

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.



## Mikroplastik als OW-GW-Indikator

### Beurteilung und Bewertung der Interaktion von Oberflächenwasser und Grundwasser an Bundeswasserstraßen

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Kunststoffe haben heute vielfältige Einsatzbereiche in unserer Lebensumwelt und sind aus dem alltäglichen Gebrauch nicht mehr wegzudenken. Mikroplastikpartikel (MP) (definiert als Kunststoffpartikel < 5 mm) stellen jedoch einen neuartigen Umweltschadstoff dar, der ubiquitär in allen Umweltkompartimenten (besonders aquatischen Systemen) vorhanden ist. Bisher ist über die gesundheitliche Relevanz und das Umweltverhalten von MP nur sehr wenig bekannt, jedoch nimmt das gesellschaftliche, wissenschaftliche und politische Interesse stetig zu. Die hohe Persistenz in der Umwelt stellt zwar eine große Herausforderung für die Vermeidung dar, ergibt aber gleichzeitig die Möglichkeit MP als einen ubiquitär vorkommenden Tracer einzusetzen.

Die Interaktion zwischen Oberflächenwasser (OW) und Grundwasser (GW) wird neben den räumlich und zeitlich variierenden hydrologischen Randbedingungen maßgeblich durch die geomorphologischen, geologischen und hydrogeologischen Eigenschaften der Gewässersohle gesteuert. Vor allem die Durchlässigkeitsabnahme in der Gewässersohle durch Kolmationsprozesse (z. B. Infiltration von feinem Material) wird hierbei als eine Schlüsselgröße angesehen. Bisher konnte aber noch kein eindeutiger Nachweis zu einer dauerhaften Verdichtung der Gewässersohle an Bundeswasserstraßen erbracht werden. Durch die geohydraulischen Standarduntersuchungsmethoden können die besonderen Randbedingungen an Bundeswasserstraßen (u. a. Umlagerungs- und Durchmischungsprozesse) nicht ausreichend erfasst werden.

Die an der BAW weiterentwickelte Gefrierkernmethodik ermöglicht die geohydraulische Charakterisierung in hoher räumlicher Auflösung (Straßer et al. 2015). Mit der ergänzenden Messung der MP-Verteilung im Sediment besteht die Möglichkeit, rezente Umlagerungsprozesse zu identifizieren und dynamische/zeitliche Effekte in die geohydraulische Bewertung einzubeziehen.

Ziel des FuE-Vorhabens ist es, über die Verlagerung und Tiefenverteilung von MP Rückschlüsse auf die Austauschprozesse und Hydrodynamik in der Gewässersohle an Bundeswasserstraßen zu ziehen, um die vorhabenbedingten Auswirkungen wasserbaulicher Unterhalts-, Ausbau- und Renaturierungsmaßnahmen besser bewerten und prognostizieren zu können.

#### Auftragsnummer:

B3952.03.04.70009

#### Auftragsleitung:



Marco Pittroff  
marco.pittroff@baw.de



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

#### Laufzeit:

2020 bis 2023

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

Die OW-GW-Interaktion an Bundeswasserstraßen kann durch Unterhalts-, Ausbau- und Renaturierungsmaßnahmen maßgeblich verändert werden. Die wasserbaulichen Auswirkungen auf die Gewässersohle und Grundwasserverhältnisse lassen sich mit den bestehenden Methoden nicht ausreichend genau erfassen. Im Rahmen des FuE-Vorhabens soll ein einfaches und kostengünstiges Prognose- und Bewertungswerkzeug zur Erfassung der geohydraulischen Ausgangsbedingungen an der Gewässersohle entwickelt werden. Die Einflüsse wasserbaulicher Ausbau- und Unterhaltsmaßnahmen auf den Wasser- und Stoffaustausch über die Gewässersohle und das Ufer sollen dadurch besser untersucht und bewertet werden können. Mögliche wasserwirtschaftliche Konfliktpotenziale und Anforderungen können so besser erkannt und ggf. reduziert werden. Außerdem kann dadurch die Planungssicherheit von WSV-Projekten verbessert werden, was mit relevanten Zeit- und Kostenvorteilen verbunden ist.

## 3 Untersuchungsmethoden

Geplant sind klar definierte Laborversuche zur Weiterentwicklung bereits bestehender Methoden und die anschließende praktische Anwendung in Feldversuchen. Die Säulenversuche werden unter definierten Randbedingungen durchgeführt und es werden unterschiedliche MP-Partikel für die Eignung als Tracer und zur Weiterentwicklung der Analysemethoden getestet. So können erste abschätzende Informationen über das Infiltrationsverhalten und die Tiefenverteilung von MP im Sediment erhalten werden (Bild 1).

Als Analyseverfahren werden zwei komplementäre Methoden an der Uni Potsdam (SWIR spectroscopy; Schmidt et al. 2018) und der BfG (Pyr-GC/MS; Dierkes et al. 2019) eingesetzt. Diese ermöglichen einen an die vorliegende Fragestellung angepasste, verhältnismäßig schnelle und praktikable Analytik. Auf diese Weise kann die MP-Verteilung im Sediment sowohl schichtweise als auch kontinuierlich hochaufgelöst im Sediment erfasst werden.

Als Versuchsstandorte werden bereits in vorangegangenen Projekten untersuchte Standorte an Bundeswasserstraßen genutzt. Die an der BAW etablierte Gefrierkernmethode (Straßer et al. 2015) wird als Erkundungsmethode der MP-Gehalte in der Gewässersohle eingesetzt und mit der MP-Analytik der externen Partner kombiniert. Für die Quantifizierung der Randbedingungen werden zusätzlich Wasserproben aus dem OW und GW entnommen. Diese Kombination liefert sowohl räumlich als auch zeitlich hochaufgelöste Informationen über die MP-Verteilung zur Beurteilung der Sedimentcharakteristik und -dynamik.

## 4 Ergebnisse und Ausblick

Im Zuge des bisherigen Projektverlaufs wurden die Sohlverhältnisse in verschiedenen Flüssen mit unterschiedlichen hydrologischen Randbedingungen und Mikroplastikbelastungen mithilfe der Gefrierkernmethode beprobt und exemplarisch untersucht. Aktuell findet die Probenvorbereitung und Analytik der Mikroplastik-Gehalte in den Sedimentproben durch die Projektpartner statt. Die Konstruktion des Versuchsstands der Bodensäulen für die Laborversuche wurde an der BAW erfolgreich abgeschlossen und erste Testläufe mit verschiedenen Sedimenten wurden durchgeführt. Die abschließende Konzeption und Durchführung der Laborsäulenversuche mit MP-Partikeln finden an der Uni Potsdam statt.

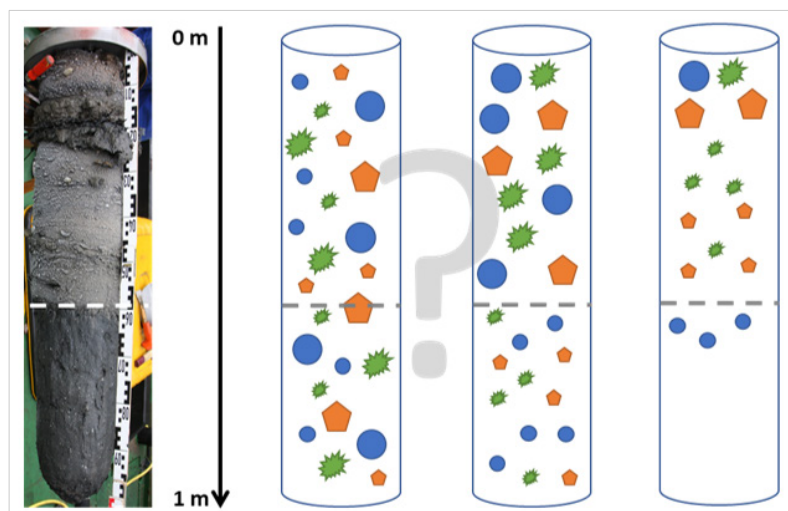


Bild 1: Verlagerung und Tiefenverteilung von Mikroplastik im Sediment zur Beurteilung der Sedimentcharakteristik und -dynamik.

### Literatur:

Dierkes, G.; Lauschke, T.; Becher, S.; Schumacher, H.; Földi, C.; Ternes, T. (2019) Quantification of microplastics in environmental samples via pressurized liquid extraction and pyrolysis-gas chromatography. *Anal Bioanal.Chem* (411), 6959–6968.

Schmidt, L. K.; Bochow, M.; Imhof, H. K.; Oswald, S. E. (2018). Multi-temporal surveys for microplastic particles enabled by a novel and fast application of SWIR imaging spectroscopy—Study of an urban watercourse traversing the city of Berlin, Germany. *Environmental Pollution* (239), 579–589.

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.





## 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 Kosten optimierten Bemessung der Deckwerke ein hoher Stellenwert zu.

#### Auftragsnummer:

B3952.04.04.10006

#### Auftragsleitung:



Petra Fleischer  
 petra.fleischer@baw.de

#### Laufzeit:

2006 bis 2022



### 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 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 im Jahr 2022 mit einer Gesamtauswertung abgeschlossen. Spezielle Fragestellungen zur Standsicherheit, Langzeitbeständigkeit und Wirtschaftlichkeit von Deckwerken werden seit 2016 in einem gesonderten Forschungsvorhaben (B3952.04.04.70009) weiterbearbeitet. 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 Schraubensstrahls 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 wieder mehr Lebensraum für Tiere und Pflanzen zu schaffen. Möglichkeiten für ökologische Aufwertungen im Uferbereich sind der Rückbau der vorhandenen Deckwerke oder deren Ersatz durch umweltfreundlichere technisch-biologische Uferschutzmaßnahmen. Dazu muss geprüft werden, wo auf Ufersicherungen verzichtet werden kann bzw. welche naturnäheren Schutzmaßnahmen das Ufer sichern können. Hierfür werden von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) im Rahmen des Forschungsprojektes Untersuchungen zur Anwendbarkeit, Dimensionierung und ökologischen Wirksamkeit technisch-biologischer Ufersicherungen durchgeführt.

Im Projekt arbeiten die Referate Erdbau und Uferschutz (federführend) und Schifffahrt der BAW und die Referate Landschaftspflege/Vegetationskunde und Tierökologie der BfG zusammen. Dadurch können sowohl technische als auch biologische und ökologische Aspekte berücksichtigt werden.

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

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

#### 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 2023



### 3 Untersuchungsmethoden

Da es sich bei Pflanzen um lebende Baustoffe handelt, sind bei Anwendung von technisch-biologischen Ufersicherungen wesentlich mehr Einflussfaktoren zu berücksichtigen als bei Steinschüttungen. Bereits vorhandene praktische Erfahrungen werden als Grundlage für weiterführende Untersuchungen ausgewertet. Zu speziellen Fragestellungen werden Labor- und Modellversuche durchgeführt. Von besonderer Bedeutung sind Naturversuche unter Wasserstraßenbedingungen. Dabei werden Messungen 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 Internet-Fachportal der BAW und BfG veröffentlicht (<https://ufersicherung-baw-bfg.baw.de/binnenbereich/de>). Aktuell bildet der Naturversuch am rechten Rheinufer von km 440,6 bis km 441,6 einen Schwerpunkt, bei dem in Zusammenarbeit mit dem Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt (WSA) Oberrhein seit 2011 neun technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen getestet werden. In vier Versuchsfeldern wurde die zuvor vorhandene Steinschüttung zwischen Mittelwasser und Böschungsoberkante durch Weidenspreitlagen, vorkultivierte Pflanzmatten und Röhrichtgabionen sowie Steinmattentzen ersetzt. In einem Abschnitt blieb das Ufer weitestgehend ungesichert. In vier Feldern wurde die Steinschüttung durch verschiedene Maßnahmen ökologisch aufgewertet – durch Begrünung mit Weidenetzstangen, Busch- und Heckenlagen, durch Strukturverbesserung mit Kies, großen Einzelsteinen und Totholzfaschinen 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.

Bereits 2018 wurden erste Monitoringergebnisse im Rahmen eines BAW/BfG-Kolloquiums in Worms einem breiten Fachpublikum vorgestellt (Kolloquiumsband und Vorträge abrufbar unter <https://ufersicherung-baw-bfg.baw.de/binnenbereich/de/veranstaltungen/kolloquium-2018>). Als maßgebende Belastung am Rhein haben sich die großen Wasserspiegelschwankungen bei gleichzeitigen schiffsinduzierten Einwirkungen erwiesen. Der Anfangszustand nach dem Einbau, wenn sich Wurzeln und Sprosse erst bilden müssen, ist in der Regel der kritische Zustand. Zur Gewährleistung der Stabilität sind häufig temporäre Hilfsmittel, wie Befestigungen oder biologisch abbaubare Geotextilfilter, erforderlich (siehe Forschungsprojekt B3952.04.04.70011).

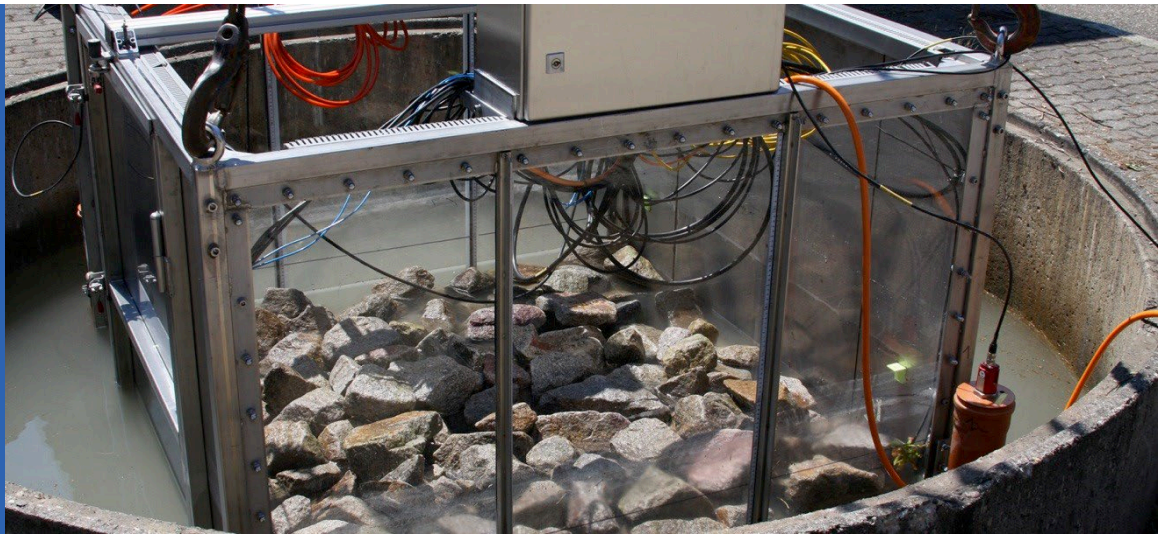
Nach weiteren Auswertungen wurden die Ergebnisse 2020 in einem umfassenden Abschlussbericht zusammengestellt ((BAW et al. 2020) abrufbar unter <https://ufersicherung-baw-bfg.baw.de/binnenbereich/de/publikationen/berichte>). Die einzelnen Maßnahmen wurden hinsichtlich der Kriterien Gewährleistung der Uferstandesicherheit, ökologische Wirksamkeit und Kosten im Vergleich zum konventionellen Schüttsteindeckwerk bewertet. Aus technischer Sicht konnten die unterschiedlichen Maßnahmen – mit und ohne technische Komponenten – den Uferschutz unter den Bedingungen am Rhein und in der gewählten Konstruktion und Ausführung nicht alle in gleicher Weise gewährleisten. Nach konstruktiven Optimierungen der Maßnahmen („lessons learned“) und unter Berücksichtigung der gefundenen Anwendungsgrenzen können jedoch alle getesteten technisch-biologischen Ufersicherungen grundsätzlich an Binnenwasserstraßen angewendet werden. Außerdem wurde nachgewiesen, dass sie das Ufer gegenüber Steinschüttungen ökologisch aufwerten können. Je nach Maßnahme werden unterschiedliche Tiergruppen bzw. Pflanzenarten gefördert. Die Herstellungskosten sind überwiegend höher als für technische Deckwerke. Für zukünftige Anwendungen an Binnenwasserstraßen werden Empfehlungen gegeben. Das Monitoring am Rhein wird mit dem Ziel fortgesetzt, die Langzeitentwicklung der Maßnahmen hinsichtlich Stabilität und Ökologie und mögliche Unterhaltungsstrategien zu untersuchen.

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>). Dazu steht ein erstes Bemessungskonzept für technisch-biologische Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen zur Verfügung, in das maßgebende Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt und Erfahrungen aus Fließgewässern ohne Schifffahrt eingeflossen sind (Fleischer et al. 2021). Es wurde bereits in die BAW-Software GBBSOFT+ integriert, so dass mit dieser Software jetzt neben Schüttsteindeckwerken auch technisch-biologische Ufersicherungen bemessen werden können. Diese Arbeitshilfen werden aktuell bei der Planung von umweltfreundlichen Ufersicherungen im Rahmen von Projekten des „Blauen Bands Deutschland“ und bei verschiedenen Renaturierungs- und Ufersanierungsprojekten angewendet. Die Forschungen werden fortgesetzt. Seit 2021 wird ein Leitfaden für die technische Planung und Ausführung dieser Ufersicherungen als BAW-Merkblatt erarbeitet.

#### Literatur:

BAW; BfG; WSA Oberrhein (2020): Versuchsstecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen. Rhein km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer. Abschlussbericht der Monitoringphase 2012–2017. Karlsruhe, Koblenz, Mannheim.

Fleischer, Petra; Gesing, Carolin; Stelzer, Oliver (2021): Technisch-biologische Ufersicherungen - Bemessungskonzept für die Ingenieurpraxis an Binnenwasserstraßen. In: Geotechnik 44 (3), S. 178–190.  
<https://doi.org/10.1002/gete.202000039>



## 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 ab bewegt und durchströmt. Als Filter werden sowohl filterstabile als auch instabile Körnungen untersucht. Die Porenwasserüberdrücke werden in mehreren Ebenen

#### Auftragsnummer:

B3952.04.04.70001

#### Auftragsleitung:



Dr. Jürgen Stein  
 juergen.stein@baw.de

#### Laufzeit:

2011 bis 2022



kontinuierlich von elektrischen Aufnehmern aufgezeichnet. Die Oberflächenverformungen werden durch 3D Scans bestimmt. Die Kornumlagerungen bzw. der Filtrationsvorgang an der Schichtgrenze von Filter zu Wasserbausteinen werden mithilfe von Sichtfenstern beobachtet und fotografiert.

#### 4 Ergebnisse

In der einer ersten Versuchsserie wurden drei Filterkörnungen mit Splitt und Kies untersucht. In einer zweiten aktuell durchgeführten Versuchsserie werden weitere Filterkörnungen eingebaut. Das Deckwerk hat jeweils 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 aufweist. Der Nachweis auf Kontakterosion nach dem Filterkriterium nach Myogahara (1993) entsprechend dem BAWMerckblatt Materialtransport im Boden MMB (2013) wird für alle Materialien geführt. Für jeden Versuch wird der Probekaste mit Deckwerk 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 versagte, 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. Mit Hilfe 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 Versuche zeigten deutliche Oberflächenverformungen. Die ersten Versuche der zweiten Serie mit neuen Körnungen werden zurzeit ausgewertet.

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 ermittelte Porosität 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 wurde anhand der Porenwasserdrücke ermittelt und die Strömungscharakteristik mittels bekannter rechnerischer Ansätze entsprechend Darcy, Forchheimer oder Ergun verglichen.

Auf Grundlage der hydrodynamischen Messergebnisse und der Korrelation mit den Verformungsbeobachtungen wird an einer Präzisierung des Erosionskriteriums gearbeitet. Mit dem FuE-Vorhaben sollen die physikalischen Vorgänge bei der Durchströmung von Deckwerk und Filter besser verständlich werden und eventuell ein Vorschlag für einen neuen Bemessungsansatz erarbeitet werden.

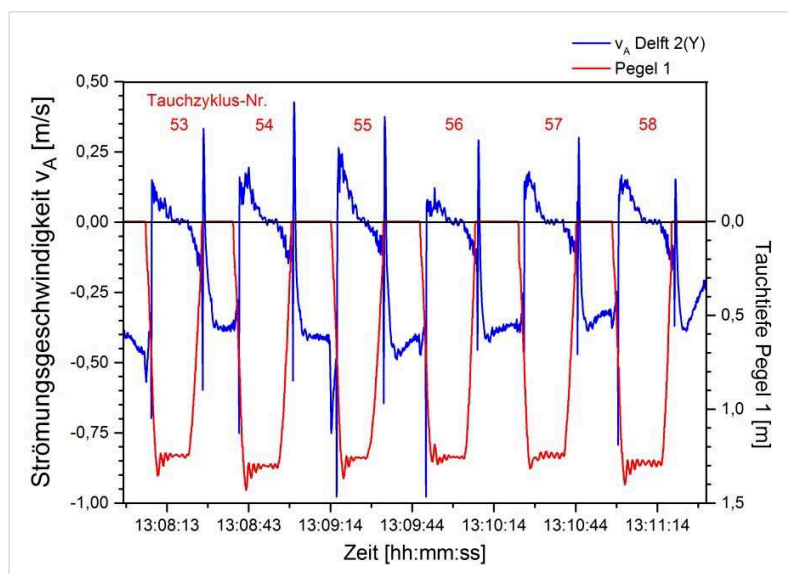


Bild 1: Strömungsgeschwindigkeit  $v_A$  (blaue Linie) in der Deckschicht und Tauchtiefe (rote Linie) des Deckwerks über 6 Zyklen mit Kornfilter Splitt 16/32 mm.

#### Literatur:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2008): BAWMerckblatt Anwendung von Regelbauweisen für Böschung- und Sohlsicherungen an Binnenwasserstraßen (MAR). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

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

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



## Wellen-induzierte Porenströmungen im Gewässerbett und ihre Auswirkungen auf Erosionsprozesse

### Videoanalyse der Sedimentmobilität

#### 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 und im 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, wird mit experimentellen Methoden analysiert.

Zunächst wurden Bodenprozesse, die durch Welleneinwirkung hervorgerufen werden, 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 hydraulischen 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 Genauigkeit mit den Laborversuchen überprüft wird.

#### Auftragsnummer:

B3952.04.04.70008

#### Auftragsleitung:



Jeanne Ewers  
 jeanne.ewers@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2022

Bei 7.300 km Binnenwasserstraßen in Deutschland kann eine Optimierung der Bemessung einen deutlichen 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

Im Jahr 2018 wurde der in der BAW entwickelte Gewässerbett-Simulator (GeSi) fertiggestellt. Mit dieser Versuchsanlage werden sandige 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, die Mobilität der Sedimentoberfläche und die mittlere Strömungsgeschwindigkeit analysiert werden.

Der Erosionsprozess an der Sedimentoberfläche wird während der Experimente von oben gefilmt. Die Videoanalyse basiert auf der Auswertung der Bilddifferenzen, unter der Annahme, dass eine erhöhte Sedimentmobilität eine erhöhte Bildänderung hervorruft. Berechnet wird die sogenannte „root mean square deviation“ (rmsd) der aufeinanderfolgenden Einzelbilder der Videoaufnahme, die ein Maß für die aufgenommene Änderung von einem Einzelbild zum nächsten ist. Bild 1a zeigt die Bildänderungen in rot markiert. Eine Erhöhung des rmsd-Wertes stellt eine qualitative Erhöhung der Erosionsrate oder der Sedimentmobilität dar. Die Videoauswertung ergänzt die Druckmessungen im Strömungskanal und in unterschiedlichen Tiefen der Bodenprobe. Diese zeigen die Abhängigkeit der Bodenreaktionen von Überströmung und von den Wasserdruckänderungen.

### 4 Ergebnisse

In einem Experiment an einer Fein- bis Mittelsandprobe wurde die in Bild 1b dargestellte Druckrandbedingung aufgebracht, die eine Wasserspiegelabsenkung und darauffolgende Erhöhung simuliert. Gleichzeitig wurde die Probe mit einer mittleren Fließgeschwindigkeit von etwa 0,2 m/s überströmt. Durch den vorhandenen Gasanteil von rd. 7 % in der Probe erzeugt die aufgebrachte Druckänderung Porenwasserüberdrücke und oberflächennahe Sickerströmungen. Dies geht aus den Druckmessungen hervor. Bild 1c stellt das Ergebnis des rmsd-Wertes dar. Während der Druckabsenkung, die mit einer vertikal nach oben gerichteten destabilisierenden Sickerströmung einher geht, erhöht sich demnach die Sedimentmobilität. Die Druckerhöhung erzeugt keine erkennbare Änderung der Sedimentmobilität.

Zusammenfassend zeigt die angewandte photogrammetrische Methode, dass schnelle Wasserdruckänderungen, wie sie an Wasserstraßen durch die Schifffahrt erzeugt werden, eine Auswirkung auf die Stabilität des Gewässerbetts haben. Bei einer Druckabsenkung erhöht sich demnach die Sedimenttransportrate.

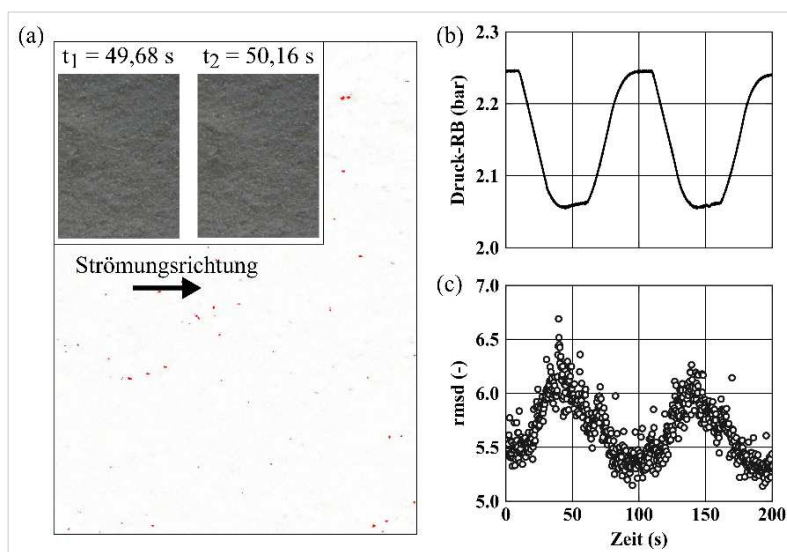


Bild 1: (a) Bilddifferenzen (rot markiert) zweier Einzelbilder. (b) Druckrandbedingung im Versuch und (c) Sedimentmobilität (rmsd-Wert).

#### Literatur:

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

Ewers, Jeanne (2020): Incipient motion of sand under combined flow and full-scale waves. In: Uijtewaal, W. M.; Franca, J.; Valero, D.; Chavarrias, V.; Ylla Arbós, C.; Schielen, R.; Crosato, A. (Hg.): River Flow 2020. Proceedings of the 10th Conference on Fluvial Hydraulics (Delft, Netherlands, 7–10 July 2020), Bd. 10: CRC Press.





## 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 – <https://ufersicherung-baw-bfg.baw.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 e. V. (FNR) gefördertes Kooperationsprojekt mit dem Fraunhofer-Institut UMSICHT Oberhausen und den Firmen BNP Brinkmann GmbH & Co. KG, FKUR Kunststoff GmbH und Trevira GmbH. Die BAW beteiligt sich als assoziierter Partner.

#### Auftragsnummer:

B3952.04.04.70011

#### Auftragsleitung:



Petra Fleischer  
 petra.fleischer@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2024



## 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 den ökologischen Zustand an Binnenwasserstraßen verbessern können. Das ist u. a. für die Uferumgestaltungen von Bedeutung, die in den nächsten Jahren im Rahmen des Bundesprogramms „Blaues Band Deutschland“ 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, Trevira 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 Geotextilfilter als Teil naturnaher Ufersicherungen unter Wasserstraßenbedingungen zu testen (BAW, WSA Oberrhein).

## 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 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 gut durchwurzelbar ist. Für diese Randbedingungen hat das Fraunhofer-Institut UMSICHT in Zusammenarbeit mit der FKUR Kunststoff GmbH und der Trevira GmbH geeignete Fasermischungen aus Sisal und dem Biopolymer Polylactid (PLA) entwickelt. Die Firma BNP Brinkmann GmbH & Co. KG hat daraus verschiedene Geotextilvliese hergestellt, die in der BAW hinsichtlich der technischen Eigenschaften geprüft wurden.

2018, 2019 und 2020 wurden in der BAW Versuchsreihen zur Prüfung der Durchwurzelbarkeit der Geotextilvliese durchgeführt. In drei mit kiesigem Sand gefüllten Versuchskästen wurden Geotextilproben und darüber Weidenäste verlegt und übererdet; in drei Kästen erfolgte zum Vergleich der Einbau ohne Geotextil. Die Wurzel- und Sprossentwicklung wurde jeweils nach einer Vegetationsperiode begutachtet. Die Ergebnisse zeigen, dass das Geotextil durchwurzelbar ist. Auch wenn sich mit Geotextil etwas weniger Wurzeln gebildet haben als ohne, erscheint es für den vorgesehenen Zweck gut anwendbar.

Für die Durchführung des Freilandversuchs am rechten Rheinufer (km 441,155 bis km 441,195) wurde 2019 von der BAW in Abstimmung mit dem WSA Oberrhein ein Konzept erstellt. Im Januar 2020 erfolgte der Einbau des neuen Geotextils auf einem 30 m x 6 m großen Böschungsabschnitt oberhalb Mittelwasser unter Steinmattens (Bild 1). Durch wechselnde Wasserstände kann der biologische Abbau bei unterschiedlichen hydraulischen Belastungen ermittelt werden. In definierten Zeitabständen werden Proben jeweils in verschiedenen Höhen auf der Böschung entnommen und geprüft, die erste Probennahme erfolgte im März 2021. Ziel ist der Nachweis der geforderten Eigenschaften des Geotextils in den ersten drei Jahren und die Dokumentation des Abbauprozesses unter Wasserstraßenbedingungen in Abhängigkeit von der Zeit. Parallel wurde im März 2021 an gleicher Stelle am Rhein eine Weidenspreitlage auf dem neuen Geotextil und zum Vergleich ohne Geotextil eingebaut, um die Entwicklung der Weiden auf dem Geotextil und dessen Durchwurzelbarkeit in situ zu untersuchen. Nach einer Vegetationsperiode werden Wurzel- und Sprossentwicklung begutachtet.

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



Bild 1: Einbau des neu entwickelten Geotextils am Rhein, Februar 2020.

### Literatur:

Fleischer, P. (2018): Umweltfreundliche Alternativen zum Schüttsteindeckwerk an Binnenwasserstraßen. In: Institut f. Wasserbau u. Wasserwirtschaft, RWTH Aachen University (Hg.): Tagungsband des 48. Internationalen Wasserbau-Symposiums IWASA „D3 – Deckwerke, Deiche, Dämme“. Aachen: 18.–19.01.2018. Online verfügbar unter <https://www.iww.rwth-aachen.de/cms/iww/Das-Institut/~mwhg/IWASA/>



## Erosion bindiger Böden

### Bestimmung der Erosionseigenschaften von Dichtungstonen

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Anders als bei natürlichen Flüssen werden Kanalhaltungen nicht dauerhaft mit Wasser nachgespeist. Zur ständigen Gewährleistung der Schiffbarkeit müssen oberhalb des Grundwassers liegende Kanäle daher abgedichtet werden, um Wasserverluste in den Untergrund zu minimieren. 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 diese einen modifizierten Pinhole-Versuch mit einer zulässigen maximalen Aufweitung des Strömungskanals um 100 % nach 200 h Durchströmung vor. Der Pinhole-Versuch soll in diesem Projekt weiterentwickelt und optimiert werden. Die mit dem neuen Versuchsaufbau gewonnenen bodenspezifischen Erosionsparameter können dann zur Klassifizierung eines potenziellen Dichtungstones im Rahmen einer Grundprüfung verwendet werden.

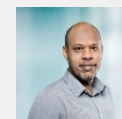
#### 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)

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

#### Auftragsnummer:

B3952.04.04.70012

#### Auftragsleitung:



Dr. Bahaeldeen Zaid  
 bahaeldeen.zaid@baw.de

#### Laufzeit:

2018 bis 2022

### 3 Untersuchungsmethoden

Zur Verbesserung des derzeitigen Erosionstests wurde der aktuelle Versuchsstand nach RPW anhand von Erfahrungen anderer Institutionen zum Hole Erosion Test (HET) (Wan und Fell 2002) abgeändert und weiterentwickelt. Im HET wird eine Bodenprobe im Probenzylinder verdichtet und ein axiales Loch (Durchströmungskanal) hergestellt. Die Probe wird mit einer kontrollierten Druckdifferenz durchströmt, was zur Aufweitung des Durchströmungskanals führt. Anhand der Aufweitung des Durchströmungskanals mit der Zeit und des hydraulischen Druckverlusts in der Probe können die Erosionsraten und die Schubspannung im Durchströmungskanal berechnet werden. Die in der BAW modifizierte HET-Anlage (Hark 2018) wurde weiter optimiert. Ein 3D-photogrammetrischer Scanner wurde erfolgreich verwendet, um die Geometrie eines Gипsgusses, der den Durchströmungskanal nach Beendigung des Versuches abbildet, zu erfassen. Ein neuartiger Ansatz zur Messung des Lochdurchmessers zu verschiedenen Zeitpunkten während des HET mittels Röntgen-Computer-Tomographie ( $\mu$ CT-Scan) wurde verwendet. Der HET wurde viermal unterbrochen, um den  $\mu$ CT-Scan durchzuführen und danach jeweils wieder fortgesetzt. Die  $\mu$ CT-Scans wurden am Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffkunde am KIT durchgeführt. Das Ziel der  $\mu$ CT-Scans ist, die Veränderung des Reibungsbeiwertes im Verlauf des Versuches zu untersuchen.

### 4 Ergebnisse

Die Analyse der bis jetzt verwendeten Auswerteverfahren 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 und eine Berechnungsmethode für den tatsächlich in Wand-schubspannung übergehenden 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 Strömungskanal-Versuchen (SETEG) an der Uni Stuttgart 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.

Die Erosionseigenschaften von drei bereits nach den RPW geprüften Dichtungstönen wurden untersucht. Um die Dichtungstone hinsichtlich der Erosionsstabilität zu klassifizieren, wird das Briaud-Diagramm verwendet, das eine Klassifikation der Böden in 6 Klassen von „sehr stark erodierbar“ bis „nicht erodierbar“ darstellt (Briaud et al. 2017). Die Untersuchungen mit dem  $\mu$ CT-Scan (Bild 1) ermöglichten, die Annahme bezüglich der Veränderung des Reibungsbeiwertes im Verlauf des Versuches näher zu untersuchen. Aufgrund der Ergebnisse wurden sowohl Verbesserungen für die vorhandenen Auswertemethoden als auch eine neue Auswertemethode für den HET vorgeschlagen (Zaid et al.).

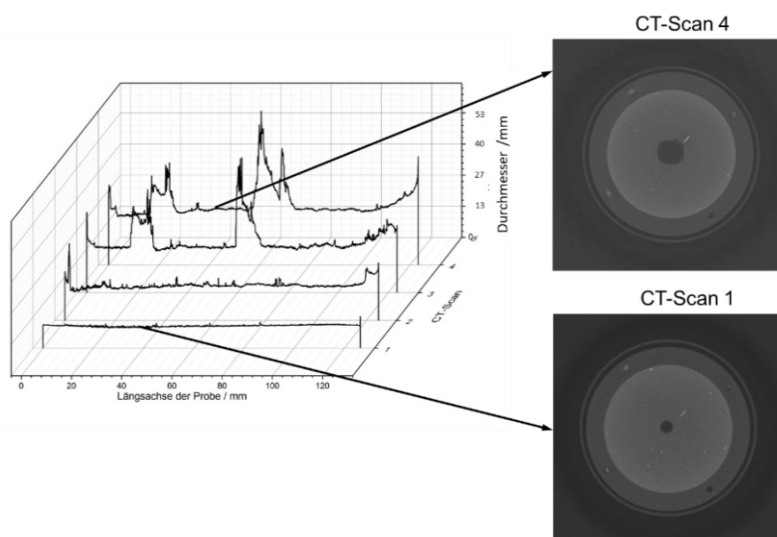


Bild 1: Lochdurchmesser zu verschiedenen Zeitpunkten eines HET an einer Probe aus Nottenkämper Ton (links) und Querschnitte von CT-Scan1 und CT-Scan4 (rechts).

#### Literatur:

Bundesanstalt für Wasserbau (2015): Prüfung von mineralischen Weichdichtungen und deren Einbauverfahren (RPW).

Hark, M. (2018): A modified Hole-Erosion-Test on high plastic clay with different soil structure. In: Keh-Chia (Ed.) Scour and Erosion IX, Taylor and Francis Group, London.

J. Briaud; A. V. Govindasamy; I. Shafii (2017): Erosion Charts for Selected Geomaterials. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol.143, p.4017072, 2017.

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.

Zaid, B.; Vollert, F.; Mengel, L.; Gibmeier, J.; Stelzer, O.; Schneider, A. (2022): Application of Micro-Computed X-ray Tomography for Improving the Hole Erosion Test Analysis on High Plastic Clay. Submitted to Acta Geotechnica.





## Porenwasserüberdruck im Gewässerbett

### Erste Versuchsergebnisse zu Porenwasserüberdrücken und Durchlässigkeiten

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Ufer von Bundeswasserstraßen unterliegen hydraulischen Einwirkungen. Schiffe z. B. erzeugen bei Vorbeifahrt am Ufer einen sogenannten Absenk, der im Boden Porenwasserüberdrücke und damit Porenströmungen erzeugt, die zur Verflüssigung einer oberflächennahen Schicht führen können. Bei konventionellen Deckwerken wird die lokale Standsicherheit der Böschungen durch das Aufbringen einer Flächenlast (Wasserbausteine) gewährleistet. Die Bemessung der Deckschicht erfolgt dabei anhand des BAW-Merkblatts „Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlsicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB)“ (Bundesanstalt für Wasserbau 2010).

Technisch-biologische Ufersicherungen (TBU) können dabei helfen, Wasserstraßen wieder naturnaher zu gestalten. Diese können aus einer Kombination von pflanzlicher und technischer Sicherung oder durch eine rein pflanzliche Sicherung hergestellt werden. Bei TBUs ohne technische Komponenten fehlt eine sichernde Auflast. Die Stabilität wird hier primär durch das Wurzelwerk der Pflanzen hergestellt. An bestehenden TBUs wurde beobachtet, dass besonders in den ersten Jahren nach dem Einbau Bodenerosion auftritt, obwohl die Fließgeschwindigkeiten gering sind (Fleischer und Soyeaux 2016). Möglicherweise wird der Erosionsprozess durch das Auftreten von Porenwasserüberdrücken bis hin zur Verflüssigung hervorgerufen bzw. begünstigt.

In dieser Arbeit werden Versuche zur Überprüfung des Ansatzes für den Porenwasserüberdruck bei der Bemessung der Deckschichtdicke für schluffige Sande unter Auflast an der Wechseldurchströmungsanlage (WDA) durchgeführt. Zudem werden auch Versuche mit freier Oberfläche durchgeführt, um das Verhalten der entsprechenden Böden für TBUs besser einschätzen und mögliche Verflüssigungsprozesse erkennen zu können.

Die Versuche werden dann nach dem BAW Merkblatt: „GBB“ (Bundesanstalt für Wasserbau 2010) sowohl mit analytischen als auch numerischen Methoden nachgerechnet, mit den Versuchsergebnissen verglichen und um eine Parameterstudie ergänzt. Hierbei steht die Überprüfung der Bemessungsgrundlagen und die Bewertung des Optimierungspotenzials der Deckwerksdicke im Vordergrund.

#### Auftragsnummer:

B3952.04.04.70013

#### Auftragsleitung:



Julia Rothschink  
 julia.rothschink@baw.de

#### Laufzeit:

2020 bis 2023



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

Als Dienstleisterin der WSV entwickelt die BAW im Referat Erdbau- und Uferschutz die Bemessungsregeln für Deckwerke an Bundeswasserstraßen und untersucht insbesondere die Standsicherheit und Weiterentwicklung naturnaher Ufersicherungen, welche zunehmend an Bedeutung gewinnen. Durch eine mögliche Optimierung der Bemessung von Deckschichtdicken könnten Ufersicherungen noch wirtschaftlicher und ressourcenschonender geplant werden. Zudem gilt es, für die weitere Planung von Wasserstraßen den immer wichtiger werdenden Aspekt einer umweltverträglichen und ökologisch sinnvollen Alternative zu Schüttsteindeckwerken voran zu treiben. Um die bereits eingesetzten technisch-biologischen Ufersicherungen weiter etablieren zu können, ist ein vertieftes Prozessverständnis der Verflüssigungsprozesse in Bereichen ohne Deckschicht für verschiedene Bodentypen (z. B. nach dem BAW-Merkblatt MAR B2, B3 und B4) notwendig.

## 3 Untersuchungsmethoden

Für die Erstellung des Versuchsprogrammes wurden zunächst die im MAR veröffentlichten hydraulischen Belastungsgrößen durch Schiffswellen in Regelquerschnitten von Schifffahrtskanälen sowie Messwerte aus Naturmessungen ausgewertet, um eine möglichst praxisnahe Messreihe mit typischen Belastungsgrößen aufzustellen. Es werden Sande (Boden B2), schwach schluffige Sande (B3) und stark schluffige Sande (B4 nach MAR) mit unterschiedlichen Durchlässigkeiten betrachtet. Für die Herstellung der Böden wurde dem Sand jeweils Schluff in unterschiedlich hohen Anteilen beigemischt, um die gewünschten Durchlässigkeiten herzustellen. Weitere bemessungsrelevante Randbedingungen nach MAR und GBB sind der Gasgehalt (10–15 %) sowie die typischen erzeugten Wellen (linearer Absunk). Die Ergebnisse sollen mit den Bemessungsansätzen des GBB sowie analytischen und numerischen Berechnungen verglichen werden.

Die Wechseldurchströmungsanlage kann während der Versuche unterschiedliche Druckniveaus auf die Probe aufbringen. Dabei gibt es die Möglichkeit, eine Druckplatte als Auflast auf der Probe abzusetzen, um eine Auflast durch z. B. ein Deckwerk zu simulieren (Kayser et al. 2016).

Nach den Versuchen mit Auflast wird die Probe ohne Auflast untersucht, um die Entstehung von hydrodynamischen Bodenbewegungen bzw. Verflüssigung beobachten zu können und um ein generell besseres Prozessverständnis dieser Beobachtungen zu erlangen. Für diese Versuche sind insbesondere die Verformung und die Größe der Bewegung innerhalb der Probe interessant.

## 4 Ergebnisse

Die Durchführung der bisher geplanten Versuche ist abgeschlossen und die Auswertung aller Ergebnisse in Arbeit. Es wurden, neben reinem Sand, Sand-Schluff Gemische mit 10 %, 15 % und 20 % Schluffanteil untersucht. Die Probenhöhe  $l$  beträgt je nach Einbau zwischen 0,74 m und 0,76 m, die Sensoren sind in Abständen von 5 bis 10 cm über die Tiefe  $z$  angebracht. In Bild a) werden die in einem Versuch mit Auflast ermittelten Porenwasserüberdrücke (im Verhältnis zur Druckänderung) über die Tiefe ( $z/l$ ) der Probe bei unterschiedlichen Schluffanteilen dargestellt. Der Versuch bildet eine Schiffswelle mit einem Absunk von 1,0 m in 55 s ab. Die Ergebnisse zeigen, dass die Entwicklungen der Porenwasserüberdrücke mit zunehmend höherem Schluffanteil und entsprechend geringeren Durchlässigkeiten größer werden. Die Proben mit 15 % und 20 % Schluff erreichen in diesem Versuch beide den maximal möglichen Porenwasserüberdruck ( $\sim 10 \text{ kN/m}^2$ ).

Bild b) zeigt die zugehörigen gemessenen Durchlässigkeitsbeiwerte  $k$  der hergestellten Proben mit entsprechenden Schluffanteilen. Diese wurden in der Wechseldurchströmungsanlage ermittelt. Die Durchlässigkeiten korrelieren entsprechend mit der Zunahme des Schluffanteils und der Höhe der Porenwasserüberdrücke in den Versuchen. Es konnten für die Proben mit hohem Schluffanteil geringere Durchlässigkeiten festgestellt werden, welche einen größeren Porenwasserüberdruck begünstigen.

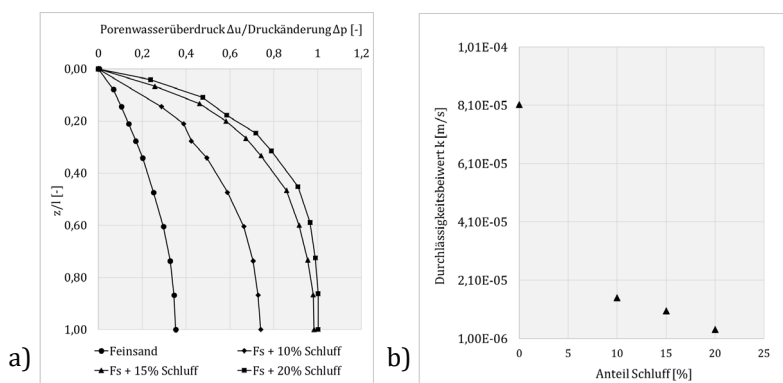


Bild 1: a) Ermittelte Porenwasserüberdrücke über die Tiefe der Probe in unterschiedlichen Sand-Schluff-Proben bei einem Absunk von 1,0 m in 55 Sekunden  
b) An der WDA ermittelte Durchlässigkeiten der Proben

### Literatur:

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

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

Kayser, J. et al. (2016): A Test Apparatus for Alternating Flow in Geotechnical Engineering. In: Geotechnical Testing Journal Vol. 39 (No. 5). S. 865–878.



## Wurzeln zur Ufersicherung an Binnenwasserstraßen

### Berücksichtigung im Nachweis der lokalen Standsicherheit

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Bei technisch-biologischen Ufersicherungen übernehmen Pflanzen bzw. eine Kombination aus Pflanzen und technischen Maßnahmen den Uferschutz. Dabei stabilisieren die Wurzeln der Pflanzen den Boden. Sie erhöhen die Scherfestigkeit und übernehmen Filterfunktionen. Die positiven Effekte wurden bisher nicht soweit quantifiziert, dass sie in Bemessungsverfahren berücksichtigt werden konnten. Stattdessen wird aufgrund der bisherigen Erkenntnisse u. a. aus dem BAW-Forschungsprojekt B3952.04.04.10151 ein Bemessungsverfahren empfohlen, das auf der sicheren Seite liegt. Bei diesem werden Wurzeln nicht zum Ansatz gebracht (Fleischer et al. 2021).

Die stabilisierende Wirkung der Wurzeln auf Böschungen an Wasserstraßen soll quantitativ untersucht und anschließend in geeignete Berechnungsmodelle integriert werden. Ziel ist es, die Wirkung der Wurzeln bei der Bemessung technisch-biologischer Ufersicherungen zu berücksichtigen. Dadurch sollen deren Anwendungsbereiche erweitert werden.

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

Bei all ihren Tätigkeiten muss die WSV die Ziele der Wasserwirtschaft beachten. Hierzu zählt seit der Einführung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie im Jahr 2000, dass bei Ausbau und Unterhaltung der Wasserstraßen deren ökologischer Zustand verbessert werden soll, um die ökologischen Potenziale der Binnenwasserstraßen auszuschöpfen.

Der Ersatz eines herkömmlichen Uferdeckwerks durch eine technisch-biologische Ufersicherung bietet die Möglichkeit, die ökologischen Verhältnisse auch dort zu verbessern, wo auf einen Uferschutz nicht verzichtet werden kann. Aus diesem Grund sollen zukünftig vermehrt Pflanzen zur Ufersicherung eingesetzt werden, wenn dies die hydraulischen Belastungen erlauben.

Kann die stabilisierende Wirkung der Wurzeln bei der Bemessung berücksichtigt werden, erweitert sich die Einsetzbarkeit technisch-biologischer Ufersicherungen, die kein signifikantes Flächengewicht aufweisen, wie z. B. Weidenspreitlagen oder Pflanzmatten. Hierdurch lässt sich das ökologische Potenzial an den Binnenwasserstraßen erhöhen.

#### Auftragsnummer:

B3952.04.04.70014

#### Auftragsleitung:



Volker Schlüter  
 volker.schlueter@baw.de

#### Laufzeit:

2020 bis 2023



### 3 Untersuchungsmethoden

Um Wurzeln in den Standsicherheitsnachweisen zu berücksichtigen, müssen deren Einflüsse quantifiziert werden. Hierfür sind verschiedene Labor-, Modell- und Naturversuche vorgesehen:

- Überprüfung der Modellansätze in Laborversuchen
- Aufzucht typischer Pflanzen technisch-biologischer Ufersicherungen, wie z. B. Weiden, Gräser oder Stauden unter definierten Bedingungen
- Ermittlung der Wurzelparameter durch Wurzelaufrabungen (Bild 1), Zug- und Scherfestigkeitsversuche
- Ermittlung von Wurzelparametern in-situ in Uferböschungen zum Vergleich mit den im Labor ermittelten Werten, Modellergebnissen und Literaturangaben
- Zusammenstellung der relevanten Wurzelparameter typischer Uferpflanzenarten für deren Integrierung in geeignete Berechnungsmodelle

### 4 Ergebnisse

Literaturrecherchen ergaben, dass die stabilisierende Wirkung der Wurzeln in Böschungen Gegenstand umfangreicher Forschungen ist. Dabei liegt der Fokus meist auf der Befestigung von Hängen, Straßenböschungen und dergleichen. Die dortigen Verhältnisse unterschieden sich in wesentlichen Punkten von Uferböschungen an Binnenwasserstraßen. Die Schifffahrt erzeugt hier zusätzliche hydraulische Belastungen und der Boden ist durch die Nähe zum Gewässer häufig wassergesättigt. Bestehende Berechnungsmodelle sind daher auf die Bedingungen an Bundeswasserstraßen zu erweitern. Eine Möglichkeit ist der Ansatz von Wurzelzugkräften im Bemessungsverfahren. Sie werden bei Bodenverschiebungen hervorgerufen, und geben dem Bodengefüge zusätzlichen Halt. Für deren Berechnung wurden in den letzten Jahrzehnten verschiedene Modellansätze entwickelt. Besonders vielversprechend erscheint ein Wurzelbündel-Modell, in das von Schwarz et al. (2013) eine Wahrscheinlichkeitsbetrachtung integriert wurde.

Obschon verschiedene Modelle vielversprechende Ansätze enthalten, ist mit ihnen eine verlässliche Bemessung bisher nicht möglich. Die im durchwurzelten Boden wirkenden Mechanismen lassen sich messtechnisch kaum erfassen. Daher sollen Versuchsanordnungen entwickelt werden, mit denen die Versagensmechanismen nachgebildet werden können. In verschiedenen Versuchen kann die Gültigkeit der Modellansätze und die Zuverlässigkeit der Ergebnisse geprüft werden.

Ferner mangelt es generell an belastbaren Daten zur Wurzelentwicklung der verschiedenen Pflanzen. Diese sind als Eingangsgrößen für eine Berechnung unerlässlich. Sie hängen nicht nur von der Pflanzenart, sondern z. B. auch von der Bodenart, der Lage auf der Böschung, den Grundwasserverhältnissen, dem Alter der Pflanzen und den klimatischen Bedingungen ab. Die Wurzeleigenschaften müssen daher statistisch abgesichert quantifiziert werden. Bisherige Versuche sind meist sehr aufwendig und erlauben daher nur eine begrenzte Anzahl an Versuchen. Passend zum gewählten Modell sind daher neue Messverfahren zu entwickeln, um mit vertretbarem Aufwand eine umfangreiche Datengrundlage zu erhalten.

Die Wirkung der Wurzeln hängt wesentlich davon ab, ob und wie diese den Boden durchwurzeln. Dabei kann insbesondere bei Gehölzen wie z. B. Weiden das Wurzelbild stark variieren. An Flussufern stellt dabei der Wasserstand bzw. das mit dem Wasserstand korrespondierende Grundwasser eine entscheidende Einflussgröße dar. Wie das Wurzelwachstum in der Böschung variiert, insbesondere bis zu welcher Tiefe Pflanzen eine Uferböschung durchwurzeln, wird daher an Weiden im Wellenbecken der BAW untersucht. Außerdem werden Auszugsversuche an den Wurzeln durchgeführt.



Bild 1: Freigespülte Weidenwurzeln eines Laborversuches.

#### Literatur:

Fleischer, Petra; Gesing, Carolin; Stelzer, Oliver (2021): Technisch-biologische Ufersicherungen. Bemessungskonzept für die Ingenieurpraxis an Binnenwasserstraßen. In: *Geotechnik* 44 (3), S. 178–190.

Schwarz, Massimiliano; Giadrossich, Filippo; Cohen, Denis (2013): Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 17 (11), S. 4367–4377.

Söhngen, Bernhard; Fleischer, Petra; Liebenstein, Hubert (2018): German guidelines for designing alternative bank protection measures. In: *Journal of Applied Water Engineering and Research* 6 (4), S. 298–305.



## 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 des Bundes (WSV)

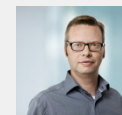
Für den Hochwasserschutz sind funktionstüchtige und widerstandsfähige Deiche gegenüber den Einwirkungen aus Sturmfluten unerlässlich. Im Rahmen der Unterhaltung von Bundeswasserstraßen fallen große Mengen an Baggergut an.

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 der mit Baggergut zu verstärkenden Deichquerschnitte auf bestehenden

#### Auftragsnummer:

B3952.05.04.70318

#### Auftragsleitung:



Dr. Thomas Nuber  
 thomas.nuber@baw.de

#### Laufzeit:

2010 bis 2022



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 (Strukturbildung) 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 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 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 Strukturbildung aufweisen und dass die jeweiligen Materialien unterschiedliche, tiefenabhängige natürliche Wassergehalte besitzen. Zudem weisen die jeweiligen Materialien sowohl unterschiedliche Festigkeiten als auch unterschiedliche wassergehaltsabhängige Spannungs-Dehnung-Verhalten auf (Nuber und Pohl 2014). Bei den Feldversuchen wurde festgestellt, dass die Deichkrone und die untere Außenböschung höhere Festigkeiten aufweisen als die obere Außenböschung und die Binnenböschung. Dies ist u. a. auf wiederholte Belastungen durch Gerätschaften und Spaziergänger zurückzuführen.

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 (Bild 1). Dafür wurden die Ergebnisse der bisher durchgeführten Feld- und Laborversuche hinsichtlich der Parameter, die für die entsprechenden Stoffmodelle erforderlich sind, ausgewertet. Insbesondere für Klei zeigte die Bestimmung des Exponenten  $m$  – der für die Formulierung des Steifigkeitsmoduls  $E50$  innerhalb des gewählten Stoffmodells entscheidend ist – teilweise unterschiedliche Werte als die, die in der Literatur für kohäsive Materialien genannt werden (Nuber et al. 2019).

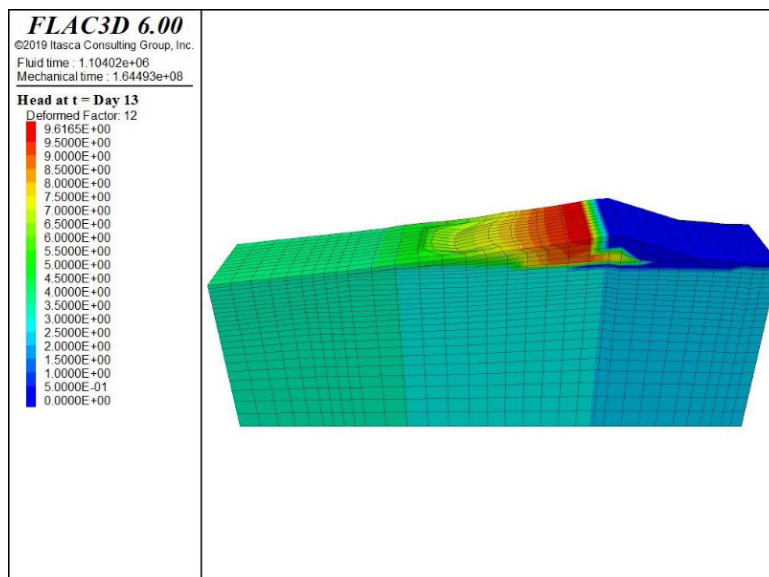


Bild 1: Grundwasserpotenziale in m NHN nach 13-tägiger Hochwasserbelastung.

#### Literatur:

Nuber, T.; Moreno, J; Pohl, M. (2019): A Comprehensive Numerical Approach for Stability Analyses of German Sea-Dikes. In: 7th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (IS-GSR). Taiwan, 2019.

Nuber, T.; Pohl, M. (2014): Geotechnical investigations on dike material as a basis for a holistic numerical model, In: Saathoff, F. (Hg.): DredgDikes: 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 zwar zerstörungsfrei, erfordern aber häufig Bohrungen, um die Messsonde vom Bohrloch aus einsetzen zu können. Während zur Kampfmitteldetektion aber ein möglichst enges Bohrraster benötigt wird, bedeutet die Vielzahl der abgeteuften Bohrungen für den Bauherrn 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 zur Dimensionierung von Bauteilen.

Ziel des FuE-Vorhabens ist es, Vorschläge zur Planung und Durchführung von Kampfmittelsondierungen zu erarbeiten, um den 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 Baufeld bescheinigen zu lassen. Die Freigabe erfolgt durch den Kampfmittleräumdienst des jeweiligen Bundeslandes oder durch qualifizierte Fachfirmen auf Grundlage länderspezifischer oder bundesspezifischer Vorschriften. Für die WSV ergeben sich daraus folgende Probleme, die über die der meisten anderen Bauherrn hinausgehen:

- Bauprojekte der WSV – wie z. B. der Ausbau von Wasserstraßen – sind häufig Landesgrenzen übergreifend. Zudem sind bei Bundesliegenschaften neben länderspezifischen 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 2022

- 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 zwischen 2013 und 2019 die Störung des Baugrundes im Rahmen von vier Feldtests für verschiedene Baugrundtypen (bindiger/nichtbindiger Boden unterschiedlicher Ausgangsfestigkeit über/unter Grundwasser) untersucht: In einem (kampfmittelfreien) Testfeld wurde mittels Sondierungen (überwiegend Spitzendrucksondierungen, untergeordnet Sondierungen mit der Leichten Rammsonde) die Vorherfestigkeit bestimmt, eine Kampfmittelerkundung simuliert und anschließend die Nachher-Festigkeit im Feld und unmittelbar im Bohrloch ermittelt. Aus dem Verhältnis von Nachher- zu Vorher-Festigkeit ergibt sich die quantitative Störung als „Strength Change Factor SCF“ des Baugrundes in Abhängigkeit verschiedener Einflussfaktoren, die je Feldtest in Einzelfeldern miteinander kombiniert wurden: Bohrverfahren (Endlos- bzw. Hohlbohrschnecke/verrohrte Trockenbohrung/Spülbohrung), Rasterabstand (0,5 m/1,5 m/3,0 m) und Bohrlochverfüllung (Bohrgut/Dämmer). 2019 wurden zusätzlich weitere Verfüllarten (Sand-Kies-Gemisch/Pellets/Geolit/unverfüllt) sowie die Selbstdichtung unverfüllter Bohr- und Sondierlöcher untersucht.

### 4 Ergebnisse

Eine Voruntersuchung ergab:

- SCF-Werte, die mittels Sondierung mit der Leichten Rammsonde bestimmt wurden, sind mit einem SCF-abhängigen Korrekturfaktor zu belegen, um so die Vergleichbarkeit mit den maßgeblichen SCF-Werten aus Spitzendrucksondierungen zu ermöglichen.
- Die Oberflächeneinflusstiefe liegt bei maximal 1,5 mGOK. Die Festigkeitsänderungen wurden deshalb für den oberflächennahen und für den „Haupttiefenbereich“ (= 1,5 mGOK bis Bohrendteufe) getrennt ausgewertet.
- Die Mächtigkeit von Einzelschichten hat keinen relevanten Einfluss; eine getrennte Auswertung bzw. die Berücksichtigung einer Mindestschichtdicke ist deshalb nicht erforderlich.
- Es sind drei Grundwasserszenarien getrennt zu betrachten: Böden über GW/Böden unter GW/Böden mit witterungsbedingt wechselnden GW-Ständen.

Die Auswertung der gemittelten SCF-Daten zeigt für den Haupttiefenbereich, dass das Bohrverfahren nur einen untergeordneten Einfluss hat. Folgende Trends zeichnen sich bisher darüber hinaus deutlich ab:

- Nichtbindige Böden reagieren stärker auf eine Kampfmittelerkundung als bindige.
- Je höher die Ausgangsfestigkeit (Lagerungsdichte, Konsistenz), umso niedriger ist der SCF-Wert.
- Im Grundwasser sind die Auflockerungen deutlich höher als oberhalb.
- Nur oberhalb des Grundwassers führt der Einsatz von Dämmer als Bohrlochverfüllung im Vergleich zu bohrgutverfüllten Bohrlöchern zu einer Verfestigung des Baugrundes; unter GW ist der Einfluss des Dämmers nahezu irrelevant.

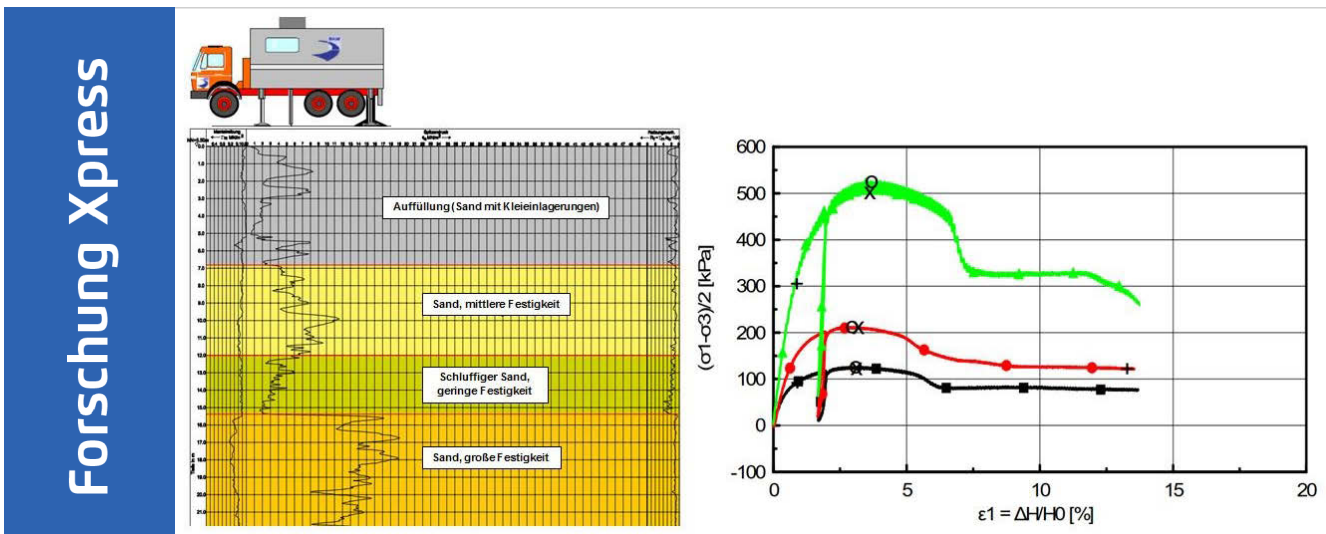
Die o. g. Trends führen im Ergebnis dazu, dass z. B. im in der Praxis gebräuchlichen 1,5-m-Bohrraster mit Schneckenbohrungen in nichtbindigen Böden

- bei Bohrgut-Verfüllung unter GW die größten Auflockerungen mit SCF-Werten bis 0,3 auftreten und
- bei Dämmer-Verfüllung oberhalb GW die größten Verfestigungen mit SCF-Werten bis zu 1,2.

Zudem zeigte sich, dass nicht nur unverfüllte oder mit Bohrgut verfüllte Bohrlöcher, sondern auch „zerstörungsfreie“ Drucksondierlöcher auch noch nach 100 Tagen nahezu stabil im Baugrund verbleiben und zu bevorzugten vertikalen Wasserwegigkeiten führen können. Daher sollte in Ausschreibungen bei Bedarf auch deren Verfüllung mit Dämmer gefordert werden.

Erste Ergebnisse wurden im September 2019 auf der ECSMGE in Reykjavik vorgestellt.





## 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 ausgeführt 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 2022



## 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 Baugrundes 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, Er-tüchtigung, 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 Tri-axial-, 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 ergänzen-den Charakter haben können.

## 4 Ergebnisse

Für die Durchführung der experimentellen Untersuchungen wird ein labortechnischer Druckbehälter, auch Kalibrierkammer genannt (Bild 1), in Kooperation mit dem Zentrum Geotechnik der TU München geplant. Derzeit findet die technische Konzeptionierung und Planung – insbesondere die Detailplanung zur mechanischen Konstruktion einschließlich der Mess- und Steuerungstechnik – statt. Hierfür wurde eine Fachfirma mit der Erstellung von Fertigungsunterlagen einschließlich der statischen Berechnungen der Versuchsanlage beauftragt, die als Grundlage für die Angebotserstellung durch potentielle Hersteller dienen soll.

Der Bodeneinbau in den Versuchsbehälter ist mittels der sog. Sandriesel-methode vorgesehen. Aufgrund der zentralen Bedeutung der Methode zur Probenherstellung werden anhand eines kleinformatigen Prototyps der geplanten Anlage Vorversuche durchgeführt, die die Grundlage für die weiteren Planungen bilden sollen. Es werden Vorversuche an unterschiedlichen Böden durchgeführt, mit dem Ziel, möglichst homogene Proben herstellen zu können.

Mithilfe der Kalibrierkammer sollen 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.

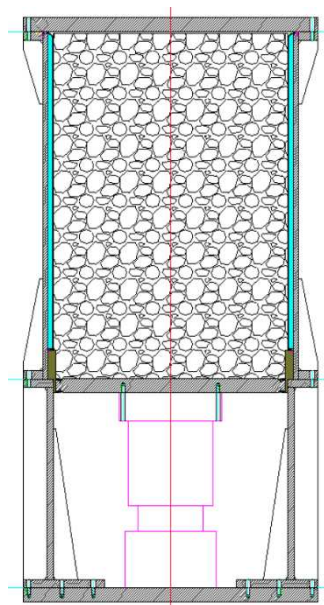


Bild 1: Druckbehälter

### Literatur:

Cudmani, R. O. (2001): Statische, alter-nierende 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 Test-ing in Geotechnical Practice. Routledge, London, New York: Blackie Academic & Professional.

Melzer, K.-J. (1968): Sondenuntersuchungen in Sand. Aachen: Technische Hoch-schule. 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 6 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 gröberen 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 Hafenbau. 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

#### Auftragsleitung:



Christian Puscher  
 christian.puscher@baw.de

#### Laufzeit:

2018 bis 2022

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 sowie der Herleitung spezifischer numerischer Stoffparameter. 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

Das Institut für Geotechnik und Baubetrieb der TU Hamburg von Prof. Grabe wurde beauftragt, die maßgebliche Forschungsleistung durchzuführen, um möglichst zeitnah belastbare Forschungsergebnisse für weitere WSV-Projekte zu erzielen.

Aus der Sichtung der Literatur und der Analyse der bisherigen Fakten und Untersuchungsergebnisse konnte keine Ursache für die festgestellten geringen Tragfähigkeiten der Stahlrammpfähle beim Bauprojekt Niederfinow abgeleitet werden.

Die Baugrunduntersuchungen in einem zusammen mit der WSV festgelegten Probefeld im Bereich des unteren Vorhafens mit den nachfolgenden Laboruntersuchungen sind bereits durchgeführt worden. Darauf baut das Konzept zu den begonnenen numerischen Simulationen und Modellversuchen auf.

Im Rahmen der weiteren Untersuchungen sollen unmittelbar bevorstehend statische und dynamische Probelastungen begleitet bzw. durchgeführt. Danach werden die Ergebnisse dargestellt und analysiert sowie numerische Simulationen und Modellversuche durchgeführt.



Bild 1: Ausgerüttelter Probepfahl.





## Wissensbasierte Prognose der äußeren Tragfähigkeiten von Rückverankerungselementen

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Zur Planung von Rückverankerungen muss deren Tragfähigkeit im Vorfeld einer Baumaßnahme auf der Grundlage von Erfahrungswerten abgeschätzt werden. Hierzu existieren in der Literatur unterschiedliche Angaben für Verpressanker (Ostermayer-Diagramme) und Mikropfähle (EA-Pfähle 2012), obwohl beide Systeme herstellungstechnisch vergleichbar sind. Auch normativ werden Verpressanker und Mikropfähle unterschiedlich behandelt.

Zusätzlich zu den o. g. Erfahrungswerten aus der Literatur liegen bei der BAW eine Vielzahl von einzeln dokumentierten Ankerprüfungen bzw. Probelastungen vor. Darüber hinaus gibt es Studien zu einzelnen Einflussfaktoren auf der Grundlage von Feld- und Modellversuchen sowie numerischen Simulationen, die jedoch keinen Eingang in die o. g. Bemessungshilfen gefunden haben. Dies gilt insbesondere für herstellbedingte Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit, die im individuellen Erfahrungsbereich der jeweils ausführenden Fachfirmen liegen.

Im Rahmen des hier vorgestellten Vorhabens sollen die bei der BAW und im Bereich der WSV vorliegenden Erfahrungen mit Verpressankern und Mikropfählen systematisch hinsichtlich der System-, Baugrund- und Herstellparameter ausgewertet werden. Lücken in der Datenlage hinsichtlich der Einflussfaktoren auf das Tragverhalten sollen mithilfe von Feldversuchen oder Berechnungen geschlossen werden.

Schließlich sollen Bemessungshilfen für die Prognose der Tragfähigkeit von Rückverankerungselementen sowie Empfehlungen zur Festlegung von Systemparametern für ein optimiertes Tragverhalten gegeben werden.

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

Rückverankerungen sind entscheidend für die Standsicherheit von Baugruben und Ufereinfassungen. Deren Ausführung erfolgt in der WSV vorwiegend als Verpressanker und Mikropfähle.

#### Auftragsnummer:

B3952.05.04.70420

#### Auftragsleitung:

Philipp Stein  
 philipp.stein@baw.de

#### Laufzeit:

2020 bis 2024



Die BAW gibt als geotechnischer Sachverständiger die prognostizierten äußeren Tragfähigkeiten dieser Elemente für jede charakteristische Bodenschicht im Baugrundgutachten an. Durch Untersuchungen in Form von Eignungsprüfungen bzw. Probelastungen werden die empfohlenen Werte kurz vor oder auch erst während der eigentlichen Baumaßnahme überprüft.

Unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit bzw. des Risikos eines Bauwerksversagens sollten die prognostizierten Tragfähigkeiten möglichst zutreffend angegeben werden. Andernfalls ist eine Umplanung (Mehrkosten, Bauzeitverlängerung) erforderlich bzw. werden überhöhte Kosten durch unwirtschaftliche Dimensionierung verwirklicht.

### 3 Untersuchungsmethoden

Die in der BAW, der WSV und gegebenenfalls extern vorliegenden Erfahrungswerte zur Tragfähigkeit von Verpressankern und Mikropfählen sowie die zugehörigen Baugrund- und Herstellparameter werden in maschinenlesbarer Form gesammelt und plausibilisiert. Bisher wurden Ergebnisse von ca. 400 Ankerprüfungen bzw. Probelastungen aus über 30 von der BAW begleiteten Projekten zusammengetragen. Zusätzlich sollen in den kommenden Jahren folgende Einflüsse auf das Tragverhalten systematisch in Probefeldern untersucht werden:

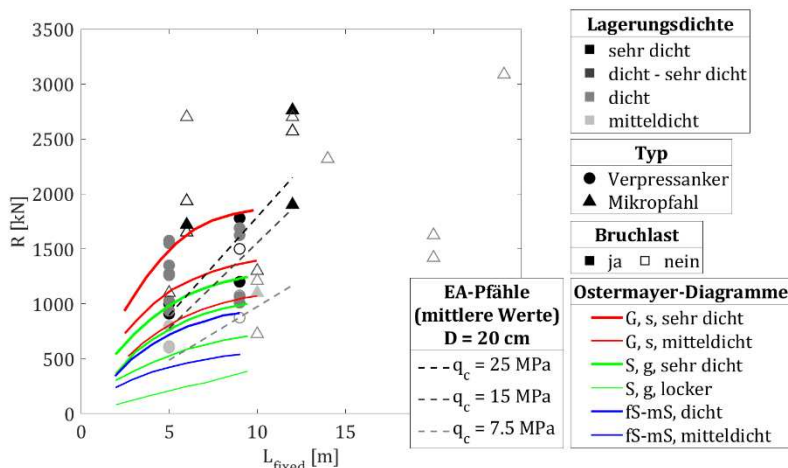
- Steifigkeit des Stahlzugliedes (Einstabanker/Litzenanker)
- Bauweise des Ankers (Verbundanker, Druckrohranker, Staffelanker)
- Anordnung der Nachverpressventile
- Maßnahmen zur Begrenzung der Krafteintragungslänge

Schließlich sollen in den aufbereiteten Daten Zusammenhänge zwischen Boden- und Herstellparametern, Eigenschaften der Tragglieder sowie deren Tragfähigkeiten ermittelt werden. Hierzu kommen verschiedene Verfahren der Datenanalyse (Machine Learning) sowie theoretische Betrachtungen zum Einsatz. Verpressanker und Mikropfähle werden dabei unabhängig von ihrer normativen Einordnung zusammen betrachtet. Unterschiede ergeben sich lediglich aus den System- und Herstellparametern, z. B. dem verwendeten Zugglied oder dem Verpressvorgang.

### 4 Ergebnisse

Derzeit läuft die Datenerhebung und -plausibilisierung innerhalb der BAW. Bild 1 zeigt Auszüge der bei der BAW vorliegenden Datensätze und Erfahrungswerte aus der Literatur. Der ermittelte Widerstand  $R$  ist über die Krafteintragungslänge  $L_{fixed}$  aufgetragen. Die durchgezogenen Linien bilden die Ostermayer-Diagramme ab, die gestrichelten Linien die mittleren Werte der EA-Pfähle. Die Symbole markieren Tragfähigkeiten von Verpressankern (●) und Mikropfählen (▲) in mitteldicht bis sehr dicht gelagertem Sand und Kies, die bei durch die BAW betreuten Ankerprüfungen bzw. Probelastungen bestimmt wurden.

Im Falle der Verpressanker liegen die untersuchten Krafteintragungslängen sowie die ermittelten Tragfähigkeiten im Erfahrungsbereich der Ostermayer-Diagramme. Es ist jedoch anzumerken, dass Tragfähigkeiten im Bereich sehr dicht gelagerter Kiese nach Ostermayer (dicke rote Linie) ermittelt wurden, obwohl die untersuchten Anker in Sand hergestellt wurden. Eine Vordimensionierung auf Grundlage der Ostermayer-Diagramme wäre hier also sehr konservativ. Bei den untersuchten Mikropfählen liegen sowohl die Krafteintragungslängen, als auch die aufgebrachten Prüfkkräfte zum Teil weit außerhalb der Erfahrungsbereiche der Ostermayer-Diagramme und der EA-Pfähle. Dabei ist auch zu beachten, dass bei vielen Mikropfählen kein Versagen eingetreten ist (△), die Grenztragfähigkeiten also noch höher liegen werden. Der Einfluss weiterer, hier nicht dargestellter Faktoren auf die Tragfähigkeit wird noch ausgewertet.



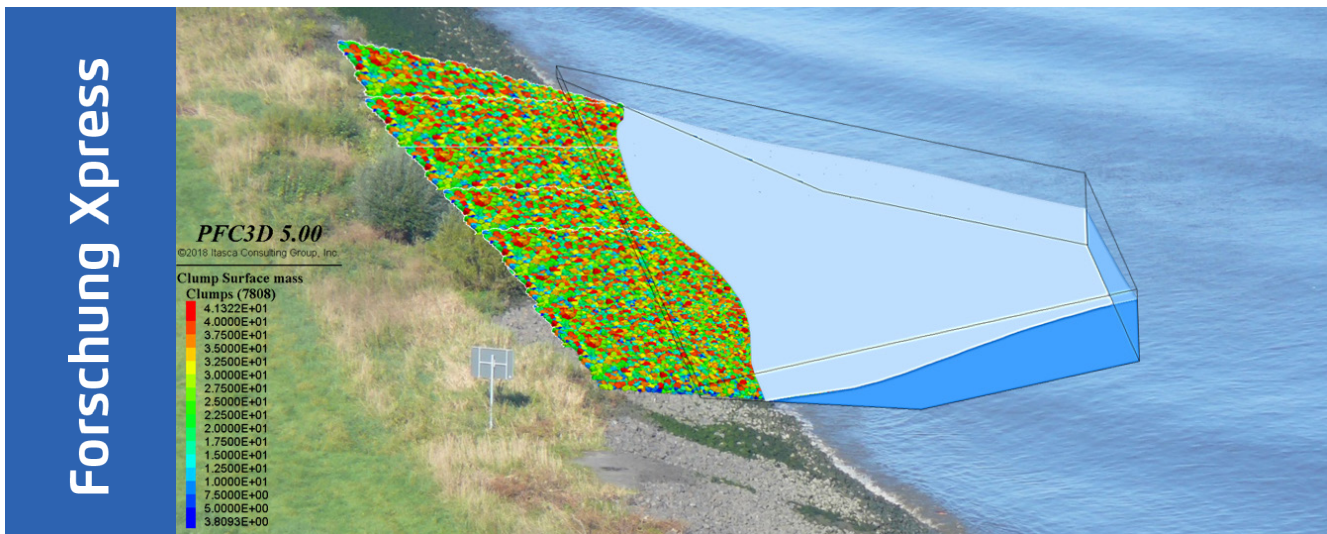
#### Literatur:

EA-Pfähle (2012): Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“. 2. Auflage, Berlin: Ernst & Sohn.

Jelinek, R.; Ostermayer, H. (1976): Verpreßanker in Böden. In: Bauingenieur 51 (3), S. 109–118.

Wichter, Lutz; Meiniger, Wolfgang (2018): Verpressanker, Bodennägeln und Zugpfähle. In: Witt, Karl Josef (Hg.): Grundbau-Taschenbuch. Teil 2: Geotechnische Verfahren. 8. Auflage, Berlin: Ernst & Sohn.

Bild 1: Erfahrungswerte aus der Literatur und aus Projekten der BAW für die Tragfähigkeit von Verpressankern in Sand.



## Deckwerksanalyse mit der Diskrete-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; Hansen 1985) basieren auf Erfahrungswerten, physikalischen Modellansätzen sowie zumeist kleinmaßstäblichen Modellversuchen und decken hauptsächlich entweder den Binnen- oder den Küsten(schutz)bereich (d. h. seegangbeanspruchte Küstenschutzwerke) ab. Die Interaktion aus hydraulischen Einwirkungen und Deckwerk für die speziellen Randbedingungen im Ästuarbereich mit Tideinfluss und Einwirkungen passierender Seeschiffe wurde bisher nur unzureichend untersucht.

#### Auftragsnummer:

B3952.06.04.70270

#### Auftragsleitung:



Dr. Martin Pohl  
martin.pohl@baw.de

#### Laufzeit:

2008 bis 2023

### 3 Untersuchungsmethoden

Die Projektbearbeitung gliedert sich in die Teile physikalische Modellversuche, Naturversuche sowie numerische 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 in Hamburg 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 (Beispiel siehe Bild 1) und mit den Simulationsergebnissen verglichen werden. Die somit gewonnenen Erkenntnisse werden für weitere Simulationen angewendet.

### 4 Ergebnisse

Die für die numerischen Deckwerkssteine erforderlichen Parameter wurden durch die Versuche in der Strömungsrinne 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. 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 in exponierter Lage Wellen- und Strömungsmessungen durchgeführt sowie im bestehenden losen Deckwerk instrumentierte Wasserbausteine platziert. Ergänzend wurden Videoaufzeichnungen der auftretenden schiffsinduzierten Wellenbilder vorgenommen.

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. Ferner wurde der Einfluss wiederkehrender Lastereignisse numerisch simuliert, um progressive Schadensmechanismen analysieren zu können.

Für die Durchführung der abschließenden numerischen Simulationen wurde die TU Freiberg beauftragt.

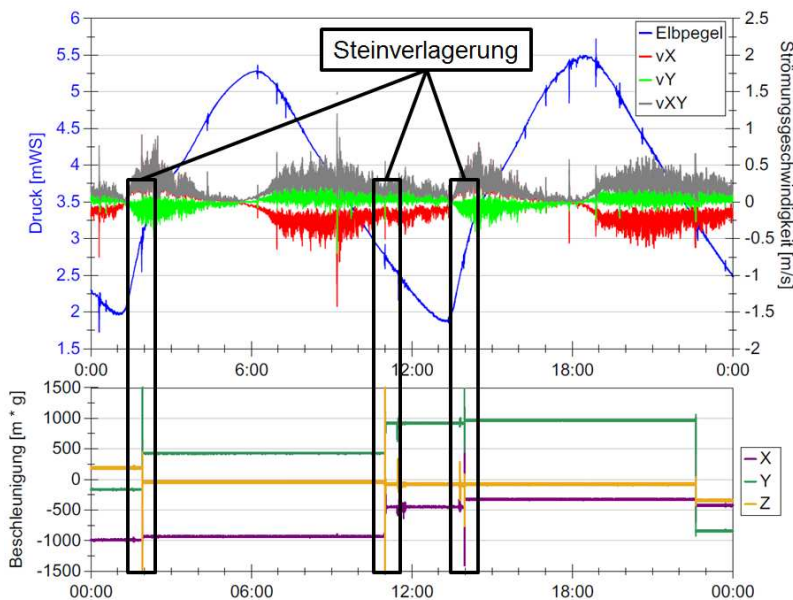


Bild 1: Beispiel für registrierte Steinverlagerungen im Zeitraum von 24 h.

#### Literatur:

BAW (Hg.) (2010): Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB). BAWMerkblatt.

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, Heft 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.

Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass die zeitliche Veränderung von Pfahltragfähigkeit und Pfahlsteifigkeit von mechanischen, chemischen und mikrobiologischen Bedingungen beeinflusst ist (Suarez 2012). Im Folgenden wird beispielhaft einer dieser möglichen Einflüsse beschrieben:

Nach der 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 Umfang wirksam. Aufgrund von Gewölbebildung sollen diese zunächst vom

#### Auftragsnummer:

B3952.06.04.70378

#### Auftragsleitung:



Mussie Kidane  
 mussie.kidane@baw.de

#### Laufzeit:

2013 bis 2022



Pfahlmantel abgeschirmt sein. Diese Gewölbebildung soll sich infolge von Kriechprozessen über die Zeit hinweg 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 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 Abmessungen 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 bis 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 ( $t = 28 \text{ d}$ ,  $180 \text{ d}$ ) 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 in einer Versuchsgrube eine Pfahlgruppe in Sand eingebaut werden, was für die Fragestellung typische und repräsentative Randbedingungen aufweist. Die Pfähle sollen zu unterschiedlichen Zeiten statischen sowie dynamischen Pfahlprobelastungen unterzogen werden. Ein zugehöriges Laborversuchsprogramm soll die zeitlichen Effekte im Labormaßstab untersuchen. Zusätzliche numerische Simulationen sollen helfen, ein besseres Verständnis für die beobachteten Phänomene zu erhalten.

## 4 Ergebnisse

Der Plan für die Ausführung von Probelastungen an einer Pfahlgruppe aus instrumentierten Stahlrohrpfählen in der geotechnischen Versuchsgrube des Zentrum Geotechnik der TU München wurde erarbeitet. In Vorversuchen wurde der Einsatz faseroptischer sowie weiterer Sensortechnik vergleichend untersucht und im Rahmen eines Zwischenberichtes zusammengestellt. Erste numerische Simulationen von Feld- und Laborversuchen wurden mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM), der Finite-Volumen-Methode (FVM) sowie der Distinkte-Elemente-Methode (DEM) durchgeführt. Teile dieser Simulationen wurden in Kidane et al. (2021) im Rahmen eines Beitrages für eine Konferenz vorgestellt. Vorversuche zur Untersuchung des Stahl-Sand-Verbundscherverhaltens im Kreisringschergerät wurden durchgeführt und mit einer bestehenden Datenbank von Laborversuchen aus Bauvorhaben für Offshore-Windparks verglichen. Darauf aufbauend konnten bestehende Korrelationen zwischen der Korngrößenverteilung und der Restscherfestigkeit überprüft sowie für eigene Anwendungsfälle verbessert werden.

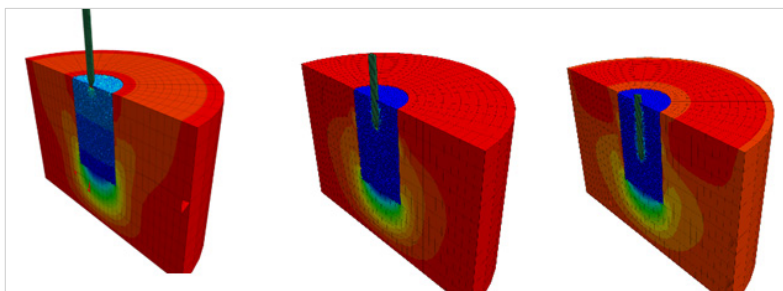


Bild 1: Simulationsergebnis einer Drucksondierung mittels gekoppelter DEM-FVM-Berechnung – farblich dargestellt ist die Größe der vertikalen Verschiebung.

### 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).

Kidane M.; Peña Olarte, A. A.; Cudmani, R. (2021): Coupled DEM-FDM simulations on cone penetration tests in coarse grained soils. Les Ulis, Frankreich: EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202124911012>.

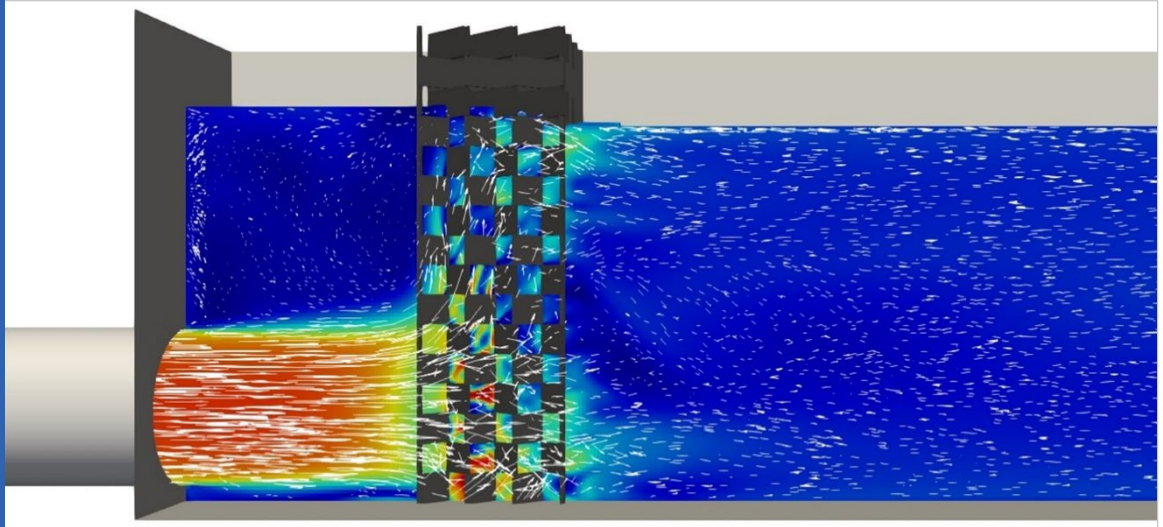
Long, J. H. (1999): Measured Time Effects for Axial Capacity of Driven Piling. Transportation Research Record 1663 (Paper No. 99-1183).

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 Goteborg handl. (7).

## Forschung Xpress



## Strömungsvergleichmäßigung in Dotationsbecken

Einleitung von Dotation in Fischaufstiegsanlagen mit geringem Platzbedarf

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

An den Staustufen großer Fließgewässer, wie Bundeswasserstraßen, müssen Fischaufstiegsanlagen eine starke Leitströmung aufweisen, damit sie von aufwandernden Fischen möglichst schnell gefunden werden können. Um dieses Ziel zu erreichen, ist es aus Kosten- und Platzgründen üblich, im unteren Bereich der Fischaufstiegsanlage den Durchfluss zu erhöhen (Dotation). Hierfür wird in der Regel Durchfluss aus dem Oberwasser der Staustufe entnommen und mit einer Rohrleitung zum unteren Bereich der Fischaufstiegsanlage geleitet. In der Rohrleitung wird der Durchfluss mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten transportiert, sodass es aus fischbiologischen Gründen notwendig ist, die Strömung vor der Einleitung in die Fischaufstiegsanlage zu vergleichmäßigen und zu beruhigen (Schütz et al 2021). Zu diesem Zweck wird die Strömung in ein Becken (Dotationsbecken) geleitet, in welchem der Strahl aus der Rohrleitung mit geeigneten Strukturen vergleichmäßigt wird. Der aktuelle Wissensstand für die Gestaltung dieser Dotationsbecken beinhaltet bisher nur wenig konkrete Empfehlungen, wie die Vergleichmäßigung technisch umgesetzt werden kann. Hinzu kommt die zusätzliche Herausforderung, dass an vielen Standorten stark begrenzte Platzverhältnisse vorliegen und die Vergleichmäßigung deshalb möglichst kompakt umgesetzt werden muss. Aus diesem Grund wurden an der BAW im vorliegenden Forschungsprojekt entsprechende Bauwerke in Modellversuchen entwickelt (siehe auch Fiedler et al. 2019).

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

Aktuell befinden sich etwa 70 von ca. 250 benötigten Fischaufstiegsanlagen an den Bundeswasserstraßen in der Planung. Die wenigsten dieser Anlagen erfüllen ohne Dotation die Anforderungen für die Auffindbarkeit. Die durch das Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse werden zur Dimensionierung der Anlagen dringend benötigt und fließen in Form von Bemessungsempfehlungen direkt in die Planungen der WSV ein.

#### Auftragsnummer:

B3953.01.04.70006

#### Auftragsleitung:



Dr. Martin Henning  
 martin.henning@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Gerrit Fiedler  
 gerrit.fiedler@baw.de

#### Laufzeit:

2015 bis 2022

### 3 Untersuchungsmethoden

Es wurde ein Kriterium entwickelt, anhand dessen die Gleichmäßigkeit in Dotationsbecken bewertet werden kann. Zu diesem Zweck wurde die Gleichmäßigkeit voll entwickelter Geschwindigkeitsprofile in schmalen rechteckigen Kanälen, zu denen auch Dotationsbecken zählen, als Referenz definiert. Dazu wurden voll entwickelte Geschwindigkeitsprofile anhand numerischer Modelle (CFD-Software: OpenFOAM) berechnet. Im nächsten Schritt wurden die Standardabweichungen der Strömungsgeschwindigkeiten im Querschnitt (Referenzgleichmäßigkeit  $\sigma_{Ref}$ ) bestimmt und in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl beschrieben. Die Bewertung der Hauptuntersuchungen erfolgte anhand des Vergleiches zwischen Versuchs- und Referenzgleichmäßigkeit  $\sigma/\sigma_{Ref}$ , sodass eine optimale Gleichmäßigkeit bei  $\sigma/\sigma_{Ref} = 1$  erreicht wurde.

In den Hauptuntersuchungen über die Vergleichmäßigung der Strömung in Dotationsbecken wurden insgesamt neun verschiedene Strukturen systematisch getestet. Die Randbedingungen wurden dabei so gewählt, dass typische Planungssituationen an Bundeswasserstraßen abgedeckt wurden. Bei der Durchführung der Untersuchungen wurden die Vorteile von numerischen und gegenständlichen Modellen miteinander kombiniert. Hierbei wurden Testreihen mit einer Vielzahl an Varianten, zum Beispiel mit vielen verschiedenen Geometrien oder hydraulischen Randbedingungen, mit numerischen Modellen (CFD-Software: OpenFOAM, RANS Turbulenzmodell) erzeugt. Da die Vergleichmäßigung der Strömung stark von der Turbulenz abhängt und RANS-Turbulenzmodelle methodische Vereinfachungen bedingen, wurden zur Absicherung gegenständliche Modellversuche (Maßstab 1:4) hinzugezogen. Die Daten aus den Modellen wurden anhand der oben beschriebenen Referenzgleichmäßigkeit automatisiert ausgewertet und hinsichtlich einer möglichst platzsparenden Vergleichmäßigung analysiert.

### 4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass sich für die Strömungsvergleichmäßigung in Dotationsbecken statische Mischer am besten eignen. Diese bestehen aus kreuzweise angeordneten Leitelementen (Bild 1), wurden ursprünglich für die laminare Vermischung hochviskoser Stoffe entwickelt und hier erstmalig für eine Vergleichmäßigung von turbulenten Strahlen in Becken getestet. Zwar konnte mit anderen Strukturen, wie z. B. Lochwänden auch eine gleichmäßige Strömung erzeugt werden, aber mit deutlich größerem Platzbedarf als mit statischen Mixern. Weiterführende Untersuchungen mit statischen Mixern haben gezeigt, dass die Leitelemente horizontal ausgerichtet werden sollten und die Wirkung vor allem von der Strömungsgeschwindigkeit im Rohr  $u_1$  abhängig ist (Bild 1). Ein Vergleich der numerischen und gegenständlichen Modellversuche zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Schlussendlich konnten anhand der Untersuchungen allgemeingültige Bemessungsregeln empirisch abgeleitet werden. Momentan werden die Ergebnisse im Rahmen einer Dissertation zusammengefasst. Im nächsten Schritt sollen diese anhand einer Bemessungsregel für die Projekte der WSV veröffentlicht werden. Das neuartige System mit statischen Mixern ermöglicht es, sehr gleichmäßige Geschwindigkeitsprofile mit kurzen Beckenlängen, etwa in der Größenordnung von fünf Beckenbreiten, zu erreichen.

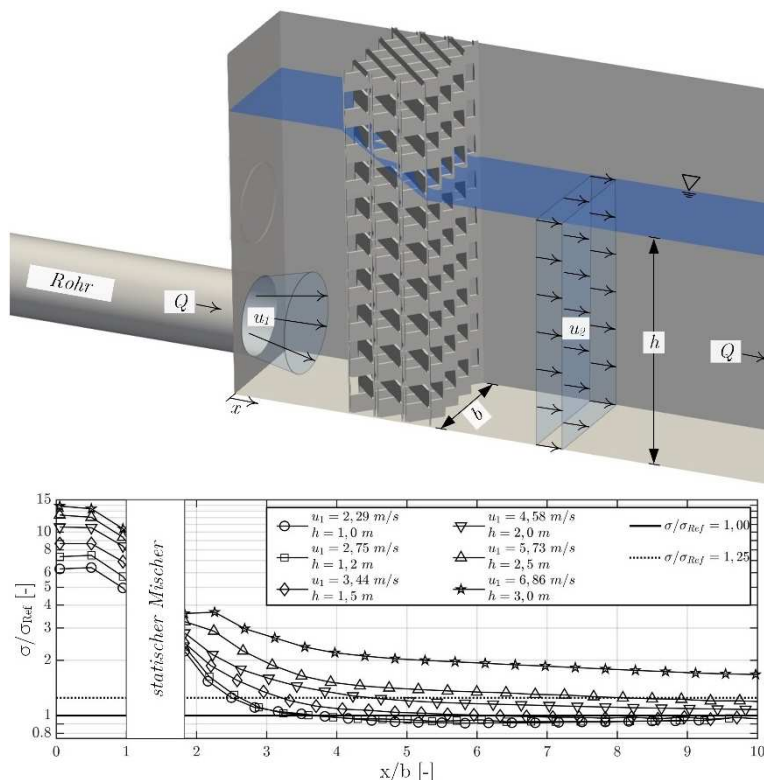


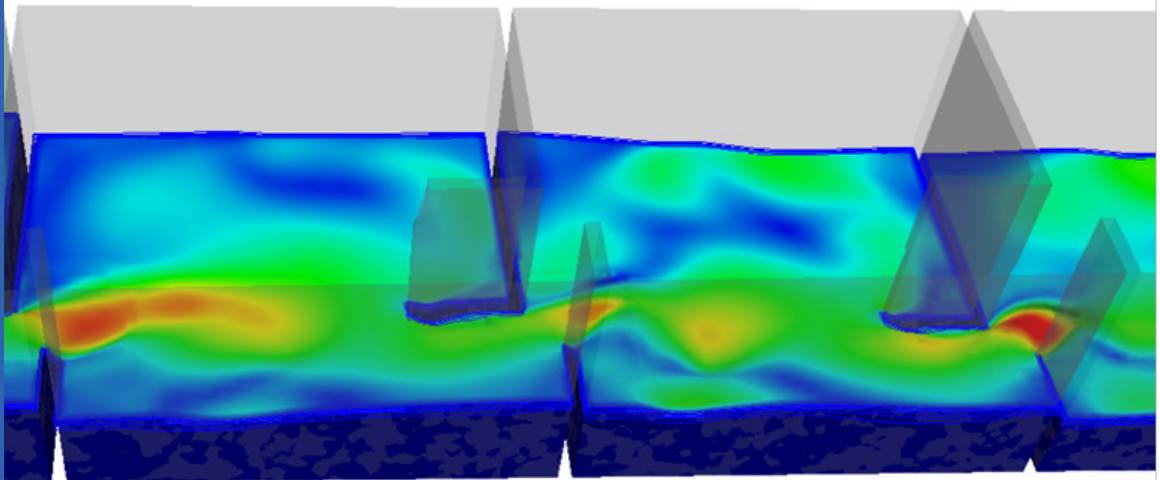
Bild 1: Vergleichmäßigung eines Strahls in einem Dotationsbecken mit statischem Mischer (exemplarisch).

#### Literatur:

Fiedler, G.; Bauerfeind, C.; Mahl, L. (2019): Modellversuche zur Gestaltung der Dotationsbecken in den Pilotanlagen Lauffen und Kochendorf am Neckar.6. Kolloquium zur Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der BWStr.

Schütz, C.; Henning, M.; Czerny, R.; Herbst, M.; Pitsch, M. (2021): Addition of auxiliary discharge into a fishway - a contribution to fishway design at barrages of large rivers (submitted). In: Journal of Ecological Engineering.





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

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Um die Hydraulik von Fischaufstiegsanlagen (FAA) zu beschreiben, 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, zeitabhängiger Strömung und auch keine anerkannten Berechnungsverfahren zur Beschreibung solcher Strömungen für die Beurteilung des Fischverhaltens. 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 der zeitabhängigen Strömung 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

#### Auftragsnummer:

B3953.01.04.70008

#### Auftragsleitung:



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

#### Laufzeit:

2016 bis 2022



Forschungsvorhabens an der zentralen Schnittstelle der BAW mit der 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 Entwicklung von Thesen bezüglich des Zusammenhanges von Hydraulik und Fischverhalten sind Untersuchungen mit lebenden Fischen notwendig, in denen die Fischbewegung bei unterschiedlichen, für FAA charakteristischen Strömungsschwankungen ermittelt werden kann.

Um eine entsprechende Strömung in der ethohydraulischen Versuchsrinne erzeugen zu können, werden zunächst maßstäbliche Versuche durchgeführt, in denen die komplexe zeitabhängige Strömung unterschiedlicher Versuchsgeometrien mittels Particle Image Velocimetry (PIV) in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung vermessen werden kann. Anhand der Messergebnisse wird, aufbauend auf bisherigen Untersuchungen (Sokoray-Varga 2016) sowie Methoden aus der Literatur (Lacey et al. 2012), die Parametrisierung zeitabhängiger Strömungsprozesse weiterentwickelt. Diese kann sowohl zur Festlegung der zu untersuchenden Varianten als auch zur Auswertung der ethohydraulischen Versuche genutzt werden.

Um für kommende Fragestellungen unabhängig von aufwändigen gegenständlichen Versuchen zu sein, werden anhand der Versuchsergebnisse numerische Methoden zur Vorhersage zeitabhängiger Strömungsschwankungen 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. Langfristig dienen die Ergebnisse der Entwicklung von Vorhersage- und Verhaltensmodellen (z. B. Gisen 2018) und der Formulierung allgemeiner Zusammenhänge zwischen zeitabhängigen Strömungsschwankungen und dem Fischverhalten.

### 4 Ergebnisse

Zur Ermittlung der Versuchsvarianten für die ethohydraulische Untersuchung wurde ein Maßstabsmodell des Versuchsaufbaus in den PIV-Versuchsstand der BAW eingebaut (Bild 1). Es wurden drei Varianten entwickelt, mit denen gezielt unterschiedliche charakteristische Strömungsschwankungen in einer Engstelle erzeugt werden können: eine turbulenzarme Vergleichsströmung, eine typische turbulente Strömung einer FAA, sowie eine künstliche Strömung, in der nur die großskaligen Schwankungen vorkommen. Um Referenzwerte für die Strömungsschwankungen zu erhalten, wurden Naturmessungen in bestehenden FAA sowie numerische Simulationen von FAA durchgeführt und ausgewertet. Zudem wurden spezielle Bauteile entwickelt, um die o. g. Strömungsvarianten ohne aufwändigen Umbau herstellen zu können.

Diese Varianten werden anschließend für die ethohydraulischen Versuche verwendet, um festzustellen, ob Versuchsfische auf die unterschiedlichen Strömungsschwankungen reagieren und sich z. B. die Passagerate durch Engstellen ändert.



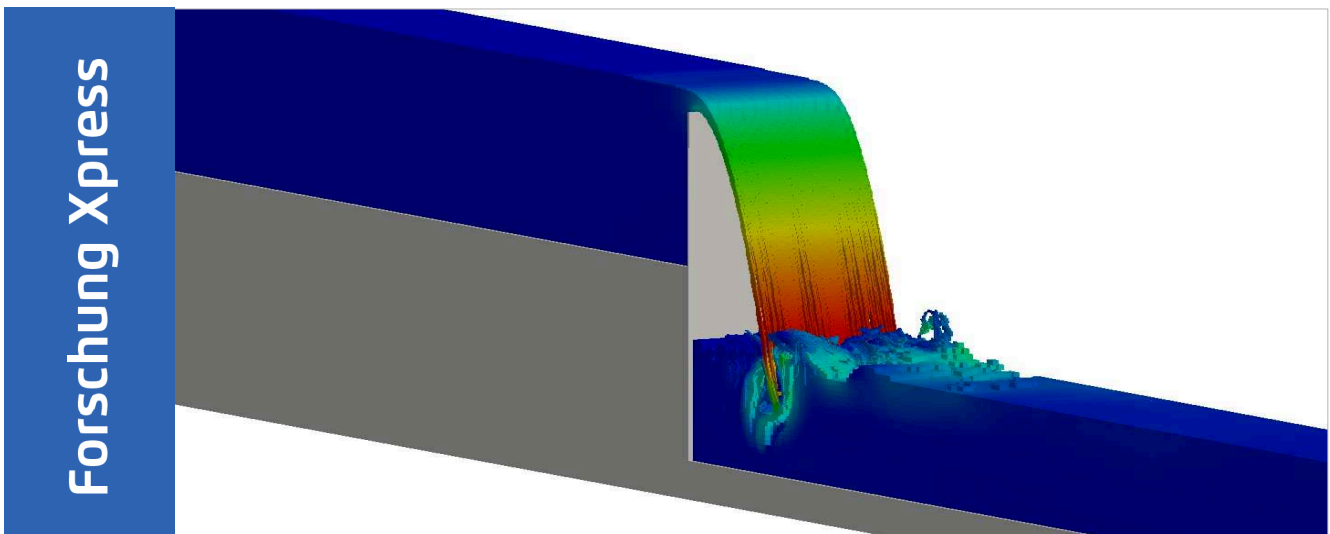
Bild 1: Ansicht des PIV-Versuchsstandes mit dem Maßstabsmodell des ethohydraulischen Versuchsaufbaus.

#### 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.

Lacey, R. W. J.; Neary, V. S.; Liao, J. C.; Enders, E. C.; Tritico, H. M. (2012): The IPOS framework: linking fish swimming performance in altered flows from laboratory experiments to rivers. *River Res. Applic.*, 28: 429-443.

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



## 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 werden kann.

Mit den aktuell zur Verfügung stehenden Zweiphasenlösern auf Basis der Volume-of-Fluid-Methode (VoF-Methode) ist jedoch die realitätsgetreue Abbildung großskaliger, frei in ein Tosbecken fallender Wasserstrahlen mit einer intensiven Luft-Wasser-Vermischung, wie sie zumeist an überströmten Wehren anzutreffen sind, nur eingeschränkt möglich. Die Ursache liegt in der Reproduktion der Strömung von Wasser-Luft-Gemischen. Eine exakte Simulation würde eine sehr feine Auflösung der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser erfordern, 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 Rechenressourcen, welcher diese Methode impraktikabel werden lässt. Benötigt werden daher für die Bewertung der ökologischen Durchgängigkeit von Wasserbauwerken mit frei fallenden Überfallstrahlen numerische Methoden, welche das Verhalten von Luft-Wasser-Gemischen auf größerer Skala approximieren können.

Ziel des Forschungsprojektes ist die Entwicklung eines numerischen Ansatzes zur Berücksichtigung des Lufteintragungs- und Aufweitungsprozesses frei fallender 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:

2018 bis 2022

## 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 „Luftetrug 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 die Detektion 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 aus dem Oberwasser eingetragene Turbulenz maßgeblich für den Aufweitungsprozess 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 im Rahmen der numerischen Modellentwicklung nötig sind. Daher ist zur Quantifizierung der Strahlaufweitung die Untersuchung eines Überfallstrahls mit Kenntnis der oberstrom herrschenden Strömungsbedingungen unabdingbar. In diesem Zusammenhang wird eine Kennzahl benötigt, welche sowohl für numerische als auch experimentelle Untersuchungen die Strahlaufweitung beschreibt. Die Berechnung des Massenträgheitsmoments des zeitlich gemittelten Strahls auf horizontalen Schnittebenen erweist sich hierbei bisher als sehr vielversprechend. Die für die Messung der Strahlaufweitung notwendigen Leitfähigkeitsmesssonden wurden bereits angefertigt und durch geeignete Belastungstests auf ihre Eignung hin überprüft. An einem großskaligen Versuchsstand einer anderen Forschungseinrichtung sollen nun Untersuchungen durchgeführt werden. Hierzu ist eine Kooperation mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in Vorbereitung.

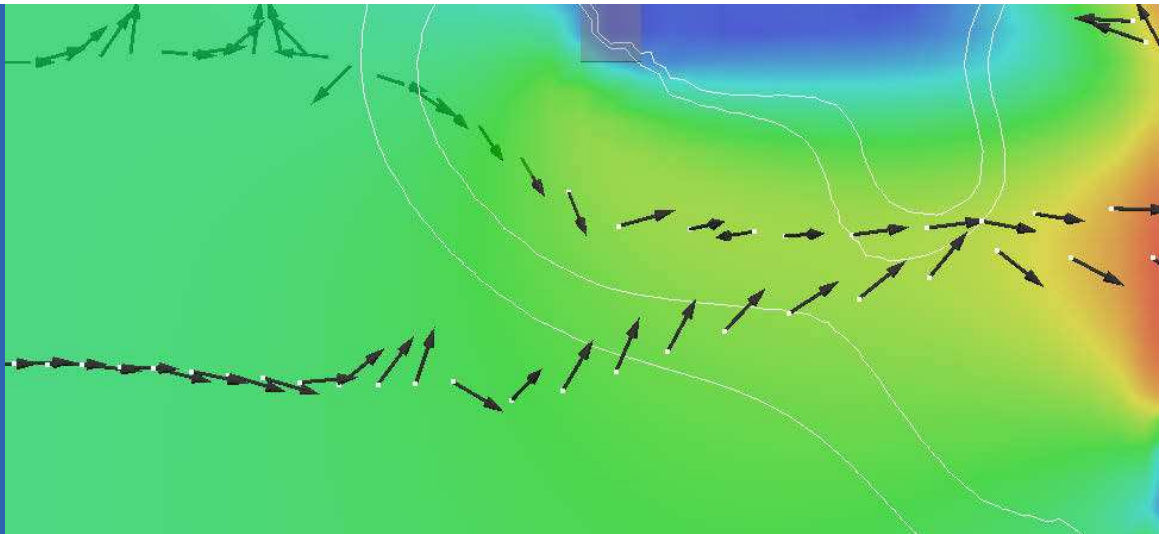
Erste Untersuchungen der numerischen Abbildbarkeit von Überfallstrahlen zeigen, dass aufgrund numerischer Fehler die Strahlaufweitung für kleine Überströmungshöhen der Wehrkante und hohe Fallhöhen des Strahls tendenziell überschätzt wird. Ursächlich ist hierbei die Limitierung der numerischen Auflösung der Wasser-Luft-Grenzschicht. Der Einsatz einer künstlichen Komprimierungsfunktion zur Schärfung der Wasser-Luft-Grenzschicht ist hier nicht zielführend, da diese zu einer künstlichen Verkürzung der Aufbrechlänge des Überfallstrahls führt. Lösungen bestehen hier lediglich in der Wahl geeigneter numerischer Transportschemata und in der Erzeugung geeigneter Rechengitterfeinheiten im Grenzbereich des Überfallstrahls.

Für große Überströmungshöhen der Wehrkante und hohe Fallhöhen wird die Strahlaufweitung bei gleicher Auflösung der Wasser-Luft-Grenzschicht tendenziell unterschätzt. Das angestrebte numerische Modell wird genau an diesem Punkt ansetzen. Die grundlegende Idee ist hierbei, den strahlaufweitenden Effekt der nicht-aufgelösten turbulenten Strukturen über einen physikalisch basierten Modellierungsansatz zu berücksichtigen.

Um die Strahlaufweitung in Korrelation mit der oberwasserseitigen turbulenten Intensität zu setzen, werden hoch aufgelöste Simulationen turbulenzreich und turbulenzarm angeströmter Überfallstrahlen betrieben. Aus diesen Untersuchungen können Randbedingungen zur Konditionierung des Unterwassers von Wehranlagen in numerischen Ausschnittsmodellen hinsichtlich der dort herrschenden Strömungssituation und der eingetragenen Luftmenge abgeleitet werden.

### 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 Wasserbauliche 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 einheimischen 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 in die FAA eingestiegenen Fische als auch ihr Zeit- und Energieaufwand verglichen werden. Diese Werte in der Natur zu erheben, ist mit immensm Aufwand und Unsicherheiten verbunden. Ziel des Projekts ist daher die Entwicklung eines numerischen Verfahrens, welches durch Berücksichtigung des Fischverhaltens einen 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)

An den Bundeswasserstraßen sind durch die WSV ca. 250 neue FAA zu errichten. Fragen nach der optimalen Position, baulichen Gestaltung und Anzahl der Einstiege in eine FAA und nach 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 2024



### 3 Untersuchungsmethoden

Als Untersuchungsstandorte wurden die Staustufen Eddersheim/Main und Dörverden/Weser gewählt, da die BfG dort umfangreiche 2D- und 3D-Fischtrack-Daten in unmittelbarer Nähe (ca. 350 m bis 0 m Abstand) der Wasserkraftanlage und des Wehrs erhoben hat, die für die Entwicklung benötigt werden. Für das Fischtracking im Kraftwerksunterwasser setzt die BfG akustische Telemetrie mit aktiven Sendern ein.

Zur Simulation des Strömungsfelds im Unterwasser der Staustufen werden 3D-hydrodynamisch-numerische Modelle verwendet, die mit OpenFOAM® erstellt werden. Das Strömungsfeld wird mittels der ELAM (Eulerian-Lagrangian-agent Method) mit einem zu entwickelnden Verhaltensmodell verknüpft. Die ELAM wird seit über 15 Jahren vom US Army Corps of Engineers zur Beschreibung der abwärtsgerichteten Wanderung von Jungsalmoniden entwickelt und angewandt (Goodwin et al. 2014). An der BAW wurde die ELAM bereits im vorangehenden FuE-Projekt „ELAM-Modellierung“ erfolgreich eingesetzt (Gisen 2018). Hauptbestandteil war ein neues, kleinskaliges (<0,1 m; <1 s) 3D-Verhaltensmodell für aufwandernde Bachforellen in einer Laborrinne. Dieses ELAM-Modell („ELAM-de“) ist die Basis für weitere Untersuchungen im Unterwasser der Untersuchungsstandorte.

### 4 Ergebnisse

Bislang wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Ein visueller Orientierungsstimulus wurde in das Verhaltensmodell eingebaut und erfolgreich auf den bestehenden Rinnendatensatz angewandt. Die Ergebnisse wurden gemeinsam mit der BfG in Form eines englischsprachigen Fachartikels bei einem Open-Access-Journal eingereicht.
- Es wurden zwei 3D-HN-Modelle des Unterwassers Eddersheim mit 100 m und 350 m Länge (Bereich vor der Wasserkraftanlage bzw. gesamter Bereich der Fischdetektionen) erstellt. Berechnet wurden Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen, advective Beschleunigungen, turbulente kinetische Energie und die Wasserspiegellage für jeweils drei Abflusszenarien mit den meisten Detektionen. In beiden Modellen fanden erste Testläufe mit dem bestehenden Verhaltensmodell statt (Bild 1). Wie erwartet, sind Änderungen am Verhaltensmodell nötig, um qualitative und quantitative Ähnlichkeit zu den Beobachtungsdaten zu erreichen.
- Als erstes quantitatives Verhaltensmuster („Pattern“) für die Modellentwicklung im Unterwasser wurde der minimal erreichte Abstand der Fische zur Achse der Stauanlage gewählt. Die BfG hat entsprechende Beobachtungsdaten von n = 90 Rapfen bereitgestellt. Die automatische Auswertung der Modelldaten ist ebenfalls fertiggestellt.

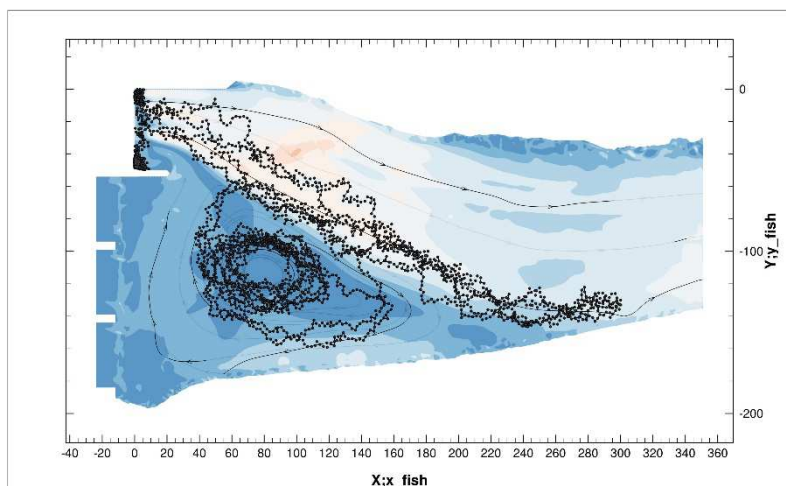


Bild 1: Funktionstest im Unterwasser Eddersheim. Drei ausgewählte Modellfische bewegen sich von rechts nach links. Modellierter Strömung fließt von links nach rechts. Kein Durchfluss über das Wehr; am Wasserkraftwerk laufen zwei der drei Turbinen mit je  $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### Literatur:

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hg.) (2014): Merkblatt DWA-M 509 – Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke. Hennef: Eigenverlag.

Gisen, David C.; Weichert, Roman B.; Nestler, John 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, David 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.

# MAKING River-Sea-Systems Work

[www.danubius-ri.eu](http://www.danubius-ri.eu)

## DANUBIUS-RI

Etablierung einer europäischen Forschungsinfrastruktur zu Fluss-Meer-Systemen

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Fluss-Meer-Systeme sind bedeutende Ökosysteme von großem ökologischem, gesellschaftlichem und ökonomischem 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. Seit nunmehr fünf Jahren wird die Einführung der pan-europäischen Forschungsinfrastruktur DANUBIUS-RI und ihrer Rechtsform (European Research Infrastructure Consortium – ERIC) offiziell vorbereitet. Diese sollen 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 (*Middle Rhine Supersite*) sowie das Elbe-Ästuar mit angrenzenden Bereichen der Nordsee (*Elbe-North Sea Supersite*).

### 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 Zustands sind dauerhafte Anstrengungen notwendig, um das Ziel einer nachhaltigen Gestaltung in der Abwägung unterschiedlicher Anforderungen zu erreichen. Nur mit einem tiefen Systemverständnis kann den damit verbundenen Herausfor-

#### Auftragsnummer:

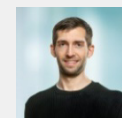
B3953.02.04.70007

#### Auftragsleitung:



Prof. Dr. Nils Huber  
[nils.huber@baw.de](mailto:nils.huber@baw.de)

#### Auftragsbearbeitung:



Dr. Martin Struck  
[martin.struck@baw.de](mailto:martin.struck@baw.de)

#### Laufzeit:

2019 bis 2022

derungen an die Fluss-Meer-Systeme wirkungsvoll begegnet werden. Die Schaffung einer hierfür bedeutende Beiträge liefernden Forschungsinfrastruktur, mit bereits mehr als 30 Partnern aus dem europäischen Raum, ermöglicht der WSV sowie den Bundesoberbehörden BAW und BfG einen intensiven Fachaustausch mit internationalen Experten. Die Koordination der *Middle Rhine Supersite* durch die BAW, unter Beteiligung der BfG, bzw. das Mitwirken beider in der *Elbe-North Sea Supersite* ermöglichen maßgeschneiderte Forschungsvorhaben, welche das Verständnis für bedeutende Herausforderungen und insbesondere ökologisch orientierte Lösungsansätze vertiefen. Eine enge Kooperation mit den niederländischen Partnern der *Rhine-Meuse-Delta Supersite* in DANUBIUS-RI ist besonders vielversprechend und wird bereits in konkreten Projekten umgesetzt. Im Rahmen der seit 2020 laufenden Implementierungsphase von DANUBIUS-RI vertritt das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) die Belange Deutschlands und nimmt damit eine zentrale unterstützende Rolle bei den Planungen für den langfristig orientierten Betrieb von DANUBIUS-RI ein.

### 3 Untersuchungsmethoden

Die Implementierungsphase dient dem Aufbau und dem Test der für DANUBIUS-RI vorgesehenen Strukturen und somit der Vorbereitung des Übergangs in den operativen Betrieb. Allerdings muss sie bislang weitgehend ohne europäische Projektfinanzierung bewältigt werden. In dieser Phase wurde die Zusammenarbeit zwischen den deutschen DANUBIUS-Partnern bezüglich einer koordinierten Strategie intensiviert. Zudem besteht ein fachlicher und administrativer Austausch mit der niederländischen DANUBIUS-Gemeinschaft. Im weiteren Verlauf sind verschiedene Austauschformate zu Fluss-Meer-Systemen im nationalen wie internationalen Rahmen zwischen Fachleuten, z. B. Vertretern von Flussgebietskommissionen, Wasserwirtschafts- und Umweltverwaltungen und Verbänden, vorgesehen. Im Rahmen der Implementierungsphase wird bereits der Aufbau der Supersites und der Probetrieb verschiedener Testfälle von Dienstleistungsanfragen aus der Forschungslandschaft umgesetzt, um Arbeitsabläufe zu verbessern und den Weg in den operativen Betrieb zu ebnen. Zur Erhöhung der Sichtbarkeit der deutschen DANUBIUS-Gemeinschaft und der im Land verorteten Komponenten – *Middle Rhine* und *Elbe-North Sea Supersites* sowie *Analysis Node* – wird der seit Mai 2021 bestehende gemeinsame Webauftakt kontinuierlich gepflegt und erweitert. Die BAW engagiert sich außerdem im von den italienischen Partnern koordinierten *Modelling Node*.

### 4 Ergebnisse

Neben der langfristigen Erhebung, Aufbereitung, Sicherung und Interpretation von Daten wird die BAW zusammen mit der BfG Expertise in vielen Bereichen flussbezogener Forschung anbieten. Im vergangenen Jahr wurde bereits mit der Durchführung mehrerer Pilotprojekte begonnen. Diese dienen zunächst dem Test der bestehenden Strukturen und als praktisch veranschaulichte Beispiele für mögliche Forschungsprojekte. Sie bieten außerdem einen Einblick in den Leistungsumfang an den beiden Supersites. Im Detail soll die Zusammenarbeit der Supersite-Partner für zukünftige DANUBIUS-Projekte optimiert werden, um einen reibungslosen Start in den operativen Betrieb zu erleichtern. Die Pilotprojekte decken im Grunde das gesamte Spektrum von der Erschließung bestehender und bedarfsorientierter Erhebung neuer Daten über weiterführende, auch modellgestützte, Analysen bis hin zur Identifikation möglicher Auswirkungen eines defizitären Fluss-Meer-Systems auf gesellschaftliche Belange ab. Der Fokus liegt hierbei auf folgenden, in der wissenschaftlichen Agenda von DANUBIUS-RI definierten Prioritäten der ersten 5 Jahre: 1) Sedimentgleichgewicht, 2) Nähr- und Schadstoffe und 3) Biodiversität. Die Pilotprojekte befassen sich mit folgenden Themen:

- Stofftransport in den deutschen Supersites (Aufbau eines Wissensportals und Forschung zu Sedimenttransport und partikelgebundenem Schadstoff- und Nährstofftransport)
  - Untersuchung der Transportkörperdynamik an Niederrhein-Abschnitten mit Hilfe von Dune Tracking
  - Geschiebedynamik und Sohlkornentwicklung am Oberrhein (Sohlbeprobung, Tracerversuche)
  - Transport und Umsatz von Schweb-, Nähr- und Schadstoffen im Elbe-Ästuar (Beitrag BAW: Schadstofftransportmodellierung)
- Monitoring im Renaturierungsprojekt „Monsterloch“ des Bundesprogramms „Blaues Band Deutschland“
- Vergleich von länderübergreifenden Sediment-Messmethoden im deutsch-niederländischen Grenzgebiet im Rahmen des INTERREG-geförderten Projektes „Living-Lab Rhine“ (LILAR) an den Supersites *Middle Rhine* und *Rhine-Meuse-Delta*.

Neue Erkenntnisse und neues Wissen aus den Pilotprojekten werden kontinuierlich für die beiden deutschen Supersites aggregiert und dem DANUBIUS-Nutzer zur Verfügung gestellt. Projektsteckbriefe und -fortschritt, ausgewählte Datensätze und Publikationen werden auf der Website der deutschen DANUBIUS-Gemeinschaft veröffentlicht.

Die Prüfung der im Rahmen des Horizon-2020-Programms EU-geförderten Vorbereitungsphase DANUBIUS-PP durch die EU-Kommission kam im März 2020 zu einem positiven Ergebnis. Der Antrag auf Zuerkennung eines ERIC-Status zu DANUBIUS-RI hat im April 2021 den ersten Schritt gemeistert, woraufhin die formale Antragstellung für 2022 vorbereitet wird und der Aufbau der Forschungsinfrastruktur formal begonnen werden konnte, um einen operativen Betrieb ab dem Jahr 2024 zu erreichen.

#### Literatur:

Projektseiten:  
<https://www.danubius-ri.de/>  
<https://www.danubius-ri.eu/>  
 (geprüft am 26.10.2021).





## Abbildung der Rauheitswirkung von Vorlandvegetation in 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. 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 Merkblatt 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 wesentlich. 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 und durch die neue gesetzliche Zuständigkeit hinsichtlich des wasserwirtschaftlichen Ausbaus der Bundeswasserstraßen gewinnen Ufer- und Vorlandbewuchs für die WSV zunehmend an Bedeutung. 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 konfrontiert. Die BAW wird daher verstärkt gefordert sein, den Einfluss von Vegetation auf die Hydro- und Morphodynamik an den Bundeswasserstraßen zu bewerten.

#### Auftragsnummer:

B3953.02.04.70008

#### Auftragsleitung:



Frederik Folke  
 frederik.folke@baw.de

#### Laufzeit:

2019 bis 2022



### 3 Untersuchungsmethoden

Im Rahmen des FuE-Vorhabens sollen sowohl gegenständliche als auch numerische Modelle für die Untersuchungen verwendet werden. Hintergrund hierfür ist, dass es zahlreiche Fragen auch grundsätzlicher Art gibt, insbesondere im Bereich der flexiblen Vegetation und der Interaktion von Mischbewuchs. 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 und für Mischbewuchs. Allerdings werden laufend neue Ergebnisse zum Thema Interaktion zwischen Vegetation und Strömungsfeld publiziert. Neben den Berechnungsansätzen selbst ist auch die Erfassung der erforderlichen Vegetationsparameter Voraussetzung für eine erfolgreiche Modellierung.

In Kooperation mit dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI) der Technischen Universität Braunschweig wird die Rauheitswirkung von terrestrischer Vegetation in einer speziell für diese Versuche ausgestatteten Laborrinne untersucht. Hierbei wurden sowohl Untersuchungen mit homogener flexibler Vegetation als auch mit Mischbewuchs durchgeführt, jeweils für den durch- und den überströmten Zustand. Beim Mischbewuchs wurden einerseits belaubte flexible Bewuchselemente mit unterschiedlicher Höhe und Dichte kombiniert und andererseits die Interaktion von flexibler und starrer Vegetation untersucht. Basierend auf den Labordaten wurde die Anwendbarkeit unterschiedlicher Vegetationsansätze zur Modellierung der Rauheitswirkung untersucht. Parallel zu den experimentellen Untersuchungen wurde ein 2D-HN-Modell des Labormodells aufgebaut und es wurden verschiedene Vegetationsansätze in Telemac-2D implementiert (Folke et al. 2019a und 2019b). Unter Verwendung des 2D-HN-Modells wurde das Verhalten der unterschiedlichen Vegetationsansätze untersucht und bewertet.

Zur Untersuchung des Einflusses der Vegetationsparameter und unterschiedlicher Vegetationsansätze auf die Hydraulik wurde eine numerische Zuverlässigkeitsanalyse durchgeführt (Folke et al. 2021b). Weiterhin wurde die Verwendung von Airborne Laser Scan (ALS) Daten zur Ableitung relevanter Vegetationsparameter als Eingangsdaten für die HN-Modellierung anhand eines praxisrelevanten Beispiels untersucht (Lange 2021).

Derzeit stehen nur sehr begrenzt Daten zur Validierung der Modelle zur Verfügung. Daher wurde in der BAW in einer 5 m breiten und 30 m langen Rinne ein skaliertes Labormodell mit einem gegliederten Querschnitt aufgebaut. Hierin soll die Rauheitswirkung von flexiblen und starren Vegetations-Patches untersucht und ein Datensatz zur Validierung der numerischen Modelle erzeugt werden. In Kooperation mit dem LWI wurden spezielle aus Silikon gefertigte Bewuchselemente entwickelt, die die Abbildung realer flexibler Vegetation in skalierten Labormodellen ermöglichen sollen.

### 4 Ergebnisse

Für überströmte flexible Vegetation existiert derzeit noch kein adäquater Ansatz zur Beschreibung der Rauheitswirkung. Für die durchströmte, flexible und belaubte Vegetation haben die experimentellen und numerischen Untersuchungen gezeigt, dass der 1-Schicht-Ansatz von Järvelä (2004) das Widerstandsverhalten gut abbildet. Zur Modellierung der Rauheitswirkung von überströmter Vegetation wurde dieser, analog zu dem Ansatz von Baptist et al. (2007), zu einem 2-Schicht-Ansatz erweitert (Folke et al. 2021). Die Ergebnisse zeigen, dass der weiterentwickelte Ansatz zu einer verbesserten Prognose der Widerstandsbeiwerte führt, auch wenn eine tendenzielle Unterschätzung zu beobachten ist.

Die Analyse der Labordaten des LWI und die numerische Zuverlässigkeitsanalyse haben gezeigt, dass die Vegetationsparameter eine entscheidende Rolle bei der Modellierung des vegetationsinduzierten Widerstands spielen. Die Unsicherheiten auf Grund der natürlichen Schwankungsbreiten können hierbei Unsicherheiten auf Grund des gewählten Vegetationsmodells überwiegen, sofern das Modell an sich prinzipiell für den jeweiligen Fall geeignet ist (z. B. Unterscheidung zwischen überströmtem und durchströmtem Bewuchs).

Die Verwendung von ALS-Daten zur Ableitung der benötigten Vegetationsparameter erscheint vielversprechend, insbesondere wenn große Gebiete untersucht werden sollen (wie z. B. viele Vorländer der Bundeswasserstraßen). Die Methode birgt u. a. den Vorteil, dass sie automatisierbar ist und die Ergebnisse reproduzierbar sind.

Im Rahmen der weiterführenden Untersuchungen innerhalb des FuE-Projekts soll mit Hilfe des skalierten Labormodells ein umfangreicher Datensatz zur Validierung der numerischen Modelle erzeugt werden.

#### Literatur:

Folke, Frederik; Attieh, Mohamad; Kopmann, Rebekka (2019a): In search of friction laws for vegetated flow within 2D large-scale applications. E-Proc. IAHR World Congress, Panama City, Panama.

Folke, Frederik; Kopmann, Rebekka; Dalledonne, Guilherme; Attieh, Mohamad (2019b): Comparison of different vegetation models using TELEMAC 2D. Proc. TELEMAC-MASCARET User Conference, Toulouse, France.

Folke, Frederik; Kopmann, Rebekka; Hohnschop, Amelie (2021b): Influence of uncertainties of vegetation parameters in a 2D model. Proc. TELEMAC-MASCARET User Conference, Antwerp, Belgium.

Folke, Frederik; Niewerth, Stephan; Aberle, Jochen (2021): Modelling of just-submerged and submerged flexible vegetation. IAHR Europe Congress, Warsaw, Poland.

Lange, Leonhard (2021): Ableitung von Vegetationsparametern aus ALS-Daten und deren Einsatz in HN-Modellen. Masterarbeit.

## Forschung Xpress



# Wirkungen veränderter klimatischer Randbedingungen auf die Bundeswasserstraßen

Forschungsphase 2 des BMDV-Expertennetzwerks

## 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die aktuell beobachtbaren und auch zukünftig zu erwartenden Veränderungen klimatischer Randbedingungen wirken sich über meteorologische Extremereignisse und schleichende Prozesse negativ auf Nutzung, Betrieb und Unterhaltung der Bundeswasserstraßen aus. Vor allem vor dem Hintergrund der langen Nutzungsdauer der Verkehrsinfrastruktur sind bereits jetzt entsprechende Anpassungsoptionen vorausschauend mitzudenken und in Planungsprozesse einzubinden. Voraussetzung für das Erkennen vordringlichen Handlungsbedarfs ist hierbei ein Systemverständnis für die Wirkungen klimatischer Veränderungen auf den Verkehrsträger Wasserstraße.

Aufbauend auf den Vorarbeiten aus KLIWAS und der ersten Forschungsphase des BMDV-Expertennetzwerks (BMVI-Expertennetzwerk 2020) ist es in der aktuellen Projektphase das Ziel, das Binnenwasserstraßennetz auf Grundlage von Klimawirkungsketten bezüglich möglicher Betroffenheit zu klassifizieren und ein Informationssystem zu schaffen, welches es ermöglicht, vordringlichen Handlungsbedarf bei der Anpassung an den Klimawandel herauszuarbeiten. Anpassungsoptionen sollen zielgerichtet entwickelt werden können. Das Projekt ist eingebunden in die Tätigkeiten des BMDV-Expertennetzwerks im Themenfeld 1 „Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen“.

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

Die Betrachtungen zu den Klimawirkungsketten werden in einem Gesamtsystem zusammengeführt. Die Informationen sollen der WSV als Entscheidungshilfe zur Verfügung gestellt werden. In der aktuellen Pilotphase ist somit eine dauerhafte Bereitstellung des Informationssystems bereits mitzudenken. Bereits zugängliche Daten werden eingebracht, und das System wird inhaltlich und strukturell fortlaufend erweitert und aktualisiert. Die Arbeiten im Projekt unterstützen die WSV und das BMDV bei der Entwicklung des deutschen Wasserstraßennetzes und somit auch des gesamteuropäischen Verkehrsnetzes TEN-T insbesondere vor dem Hintergrund veränderter klimatischer

### Auftragsnummer:

B3953.02.04.70009

### Auftragsleitung:



Dr. Regina Patzwahl  
regina.patzwahl@baw.de

### Auftragsbearbeitung:



Dr. Martin Hämmerle  
martin.haemmerle@baw.de

### Laufzeit:

2020 bis 2022

Randbedingungen. Darüber hinaus liefert dieser Ansatz grundlegende Hilfestellung im Workflow zum „Climate Proofing“, welches derzeit in der WSV u. a. mit Unterstützung des BMDV-Expertennetzwerks Themenfeld 1 erstellt wird, und den Sachbearbeitern der WSV eine Handreichung zur Berücksichtigung des Klimawandels bei zukünftigen Bauprojekten der WSV zur Verfügung stellen soll.

### 3 Untersuchungsmethoden

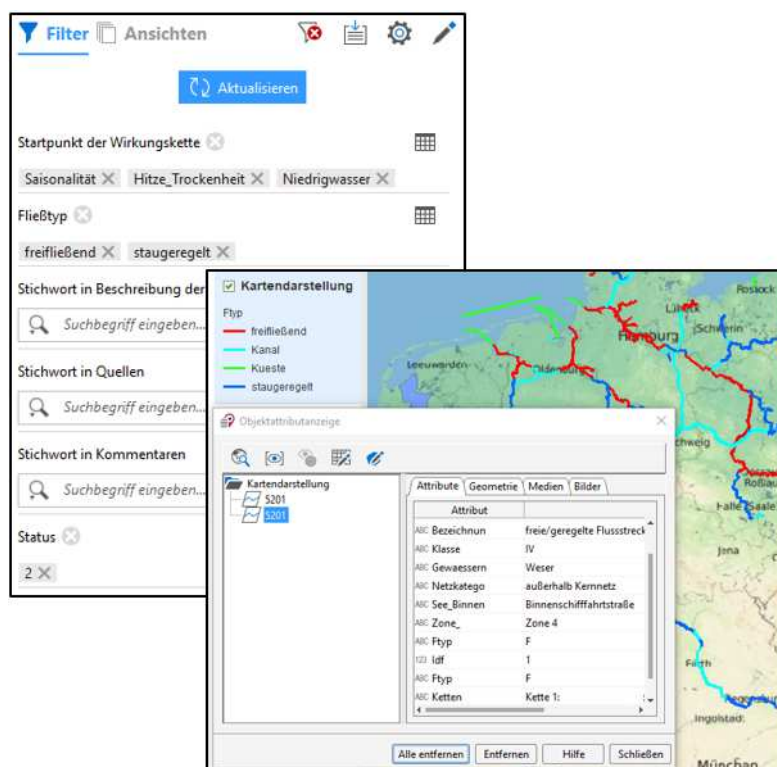
Zentral für die Arbeiten ist somit die Fragestellung, über welche Mechanismen sich veränderte klimatische Rahmenbedingungen auf das System Bundeswasserstraße auswirken. Ausgehend von Ereignissen oder Prozessen, deren Auftreten im Zuge der aktuellen klimatischen Veränderungen als häufiger und intensiver anzunehmen ist, werden auf Grundlage von Expertenbefragungen Klimawirkungsketten zusammengestellt. Die aktuell betrachteten Ereignisse und Prozesse sind Hitze- und Trockenphasen, Starkniederschläge und Sturzfluten, Meeresspiegelanstieg, Hoch- und Niedrigwasserereignisse, Stürme, Sturmfluten, veränderte mittlere Windverhältnisse, gravitative Massenbewegungen und der Aspekt stärkerer Ausprägung von Jahreszeiten und Jahreszeitenübergängen.

Die aus BAW-Expertise zusammengestellten Wirkungsketten werden in einer weiteren Stufe auf das Bundeswasserstraßennetz angewendet, um eine räumliche Differenzierung zu erlangen. Über GIS-gestützte Klimawirkungsanalysen werden damit von entsprechenden Wirkungsketten betroffene Elemente der Bundeswasserstraßen identifiziert und die Untersuchung zielgerichteter Anpassungsoptionen vorbereitet.

### 4 Ergebnisse

Zur Strukturierung und Vorhaltung des in den ersten Befragungen zusammengetragenen qualitativ-deskriptiven Systemverständnisses wurden eine Datenbank konzipiert sowie ein Prototyp implementiert und befüllt. Aus diesem Fundus können verschiedene Fragestellungen durch zielgerichtete Abfragen und inhaltliche Verknüpfungen beantwortet werden, z. B.: Welche für die praktische Arbeit der WSV wichtigen Kennwerte sind von welcher klimatischen Veränderung über welchen Mechanismus betroffen? Welche Klimawirkungen sind für einen bestimmten Wasserstraßentyp relevant? Welche weiteren Prozesse können eine Klimawirkungskette überlagern? Die Abfrageergebnisse können in einem Reportingsystem in Form von Wirkungsketten-Steckbriefen ausgegeben werden. Erste GIS-Anbindungen mit räumlichen Abfragefunktionen sowie einer Visualisierung von Abfrageergebnissen sind ebenfalls prototypisch implementiert (Bild 1).

Neben der kontinuierlichen Erweiterung der als lebendes Dokument zu sehenden Wissenssammlung ist eine Reihe weiterer Arbeiten vorgesehen: Eine Auswahl von Wirkungsketten soll zunächst in intensiver Diskussion begutachtet werden. Ein wichtiger Folgeschritt besteht darin, für diese Wirkungsketten Indikatoren zu entwickeln, die eine Abschätzung der jeweiligen Betroffenheit der Elemente im Bundeswasserstraßennetz ermöglichen. Ergänzend zur Prospektion potenziell betroffener Elemente wird die Verknüpfung mit Anpassungsoptionen durch die Erweiterung der Datenbank eingerichtet.



#### Literatur:

BMVI-Expertennetzwerk (2020): Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen. Ergebnisbericht des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk für die Forschungsphase 2016 – 2019, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin.

Bild 1: Abfragemaske und GIS-Funktion des prototypisch implementierten Reportingsystems.





## Hydraulische und morphodynamische Untersuchungen in Krümmungstrecken mit Geschiebetransport

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

In Krümmungstrecken der freifließenden Bundeswasserstraßen werden die hydrodynamischen Verhältnisse und der Geschiebetransport sekundärströmungsbedingt durch dreidimensionale Effekte und eine ggf. große lokale Sohlendynamik geprägt. Durch die vielfältigen Stromregelungsbauwerke und Überströmungen der Vorländer sowie instationäre Phänomene wird die Komplexität dieser Prozesse in Flusskrümmungen zusätzlich erhöht. Aufgrund noch vieler offener Forschungsfragen in Bezug auf das Prozessverständnis und die Wirkung flussbaulicher Maßnahmen in Flusskrümmungen hat das FuE-Vorhaben zum Ziel, unterschiedliche hydro- und morphodynamische Fragestellungen und Phänomene an Flusskrümmungen zu untersuchen. Im Fokus der Untersuchungen stehen insbesondere die Wirkung von Regelungsbauwerken verschiedener Gestalt und der Einfluss der Vorlandcharakteristik auf die Prozesse in Flusskrümmungen. Im Ergebnis sollen Wirkungszusammenhänge für Parametervariationen so beschrieben werden, dass sich möglichst allgemeingültige Empfehlungen und Handlungsoptionen für strukturverbessernde Maßnahmen in durch Krümmungen geprägten Flussstreckenabschnitten an den Bundeswasserstraßen ableiten lassen.

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

Im Hinblick auf die morphologische Entwicklung an Bundeswasserstraßen und für die unterschiedlichen Strategien der Flussregelung und des Geschiebemanagements erarbeitet die BAW Handlungsoptionen für die WSV. Beratung und Empfehlungen in diesen Bereichen erfordern vertiefte Kenntnisse über die Beeinflussung von Geschiebetransportprozessen durch Bauwerke und Managementstrategien. Mit dem Ziel, möglichst allgemeingültige Empfehlungen bzw. Grundlagen für numerische Untersuchungen von flussbaulichen Maßnahmen in Krümmungstrecken mit Geschiebetransport abzuleiten, besteht für die BAW ein hoher Bedarf, die komplexen Prozesse in Flusskrümmungen besser zu verstehen. Damit kann sie belastbarere Beratungsleistungen bereits in frühen Phasen einer Projektentwicklung, zum Beispiel bei potenziellen Maßnahmen wasserwirtschaftlichen Ausbaus, bei der Erarbeitung von Stromregelungskonzepten innerhalb des Gesamtkonzepts Elbe

#### Auftragsnummer:

B3953.02.04.70010

#### Auftragsleitung:



Dr. Irina Klassen  
 irina.klassen@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Bernd Hentschel  
 bernd.hentschel@baw.de  
 Eduard Schäfer  
 eduard.schaefer@baw.de

#### Laufzeit:

2020 bis 2023



(GKE) oder bei der Aufstellung von Entwicklungskonzepten an Wasserstraßen, erbringen. Die Modelluntersuchungen schaffen eine Schnittstelle zwischen anwendungsorientierter Forschung und WSV-Beratung und tragen wesentlich zur Verbesserung der flussbaulichen Beratungsleistung in durch Krümmungen geprägten und morphologisch aktiven Flussabschnitten bei.

### 3 Untersuchungsmethoden

Zur Untersuchung der Fragestellungen wurde im Rahmen des FuE-Vorhabens ein großflächiges gegenständliches Flussmodell als Geschiebetransportmodell mit vollbeweglicher Sohle aufgebaut. Im Gegensatz zu stark grundlagenorientierten Prinzipmodellen oder zu Studien, die sich auf konkrete Flusskrümmungsabschnitte beziehen, soll das Krümmungsmodell eine geeignete Abstraktion darstellen, mit der zu möglichst vielen unterschiedlichen Flusskrümmungsabschnitten entlang der deutschen Bundeswasserstraßen ein aussagekräftiger Bezug hergestellt werden kann. Durch Variation der Streckencharakteristik (z. B. durch Änderung des Modellmaßstabs, Wahl des Modellsediments, Bauwerksmodifikationen) soll die Wirkung unterschiedlicher flussbaulicher Maßnahmen/Regelungsbauwerke auf die hydrodynamischen und morphodynamischen Prozesse in ausgewählten Flusskrümmungstrecken beurteilt werden. Zudem wird anhand von Vorlandmodifikationen (durch unterschiedliche Vorlandhöhen und -breiten, Anschluss einer Nebenrinne) der Einfluss der Vorlandcharakteristik auf die Prozesse in Flusskrümmungen untersucht.

Das gegenständliche Geschiebetransportmodell ermöglicht die Untersuchung zahlreicher essentieller und komplexer hydro- und morphodynamischer Fragestellungen in Flusskrümmungen. Hinsichtlich der Untersuchungen und der Validierung der gewonnenen Erkenntnisse soll zusätzlich zum geplanten Geschiebetransportmodell ein breites Spektrum an weiteren Methoden eingesetzt werden:

- Theoretische Betrachtungen zu Wirkungsmechanismen, Modellkonzeption/-dimensionierung
- Analyse vorliegender Naturdaten
- Laborversuche in Laborrinnen der BAW
- Ergänzende numerische Modellierung
- Ergänzende Naturuntersuchungen / Messkampagnen zur Erfassung von hydro- und morphodynamischen Parametern in Krümmungen

Die erhobenen Daten aus dem gegenständlichen Geschiebetransportmodell dienen außerdem zur Validierung numerischer Modellergebnisse (hybride Modellierung) und tragen zur Qualitätssteigerung und Weiterentwicklung der in der BAW betriebenen gegenständlichen und numerischen hydro- und morphodynamischen Modelle bei.

### 4 Ergebnisse

Innerhalb der Planungsphase des Geschiebetransportmodells wurden charakteristische Flusskrümmungstrecken an den Bundeswasserstraßen Rhein, Elbe, Donau und Oder identifiziert und die entsprechenden hydro- und morphodynamischen Daten zusammengestellt. Zu Beginn der Untersuchungen wurde ein Abschnitt der unteren Mittel-Elbe als Referenz für die Wahl der Modellmaßstäbe und des Geschiebesatzmaterials gewählt. Voruntersuchungen an einer Laborrinne bestätigten die Eignung von Kunststoffgranulaten als Ersatz für das natürliche Geschiebematerial. Das ca. 60 m lange Modell wurde mit Polystyrolgranulat gefüllt, so dass ab Ende 2021 die hydraulische und morphologische Kalibrierung für 4 unterschiedliche stationäre Abflüsse zwischen einem mittleren Niedrigwasser und einem Ausuferungsabfluss erfolgen konnte. Mit Hilfe bewährter Messtechniken, wie zum Beispiel der Photogrammetrie zur Sohl- und Wasserspiegelvermessung, können physikalische Phänomene detailliert erfasst werden. Bei diesem speziellen und stark abstrahierten Modell sind im ersten Schritt Untersuchungen erforderlich, um das potenzielle Auftreten niederfrequenter Wasserspiegel- (potenzielle buhneninduzierte Schwingungen des WSP) und Geschiebetransportphänomene (Bänke mit einer Länge deutlich über der Gewässerbreite) zu erfassen.



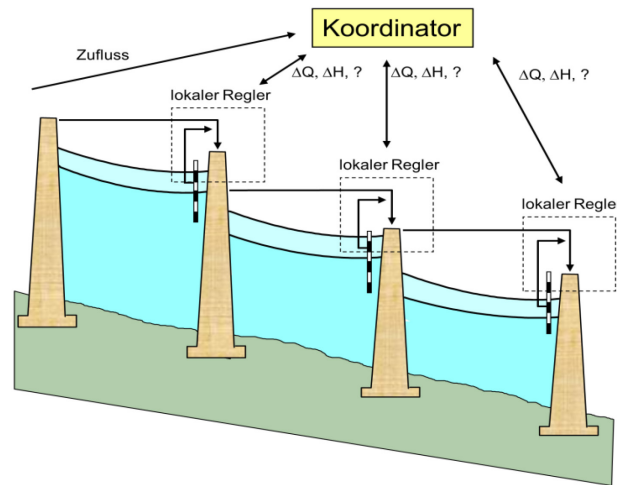
Bild 1: Mit Granulat gefülltes Krümmungsmodell mit Dünen und Buhnenkopfkolken. Blick gegen die Fließrichtung.

#### Literatur:

BAW (2001): Gutachten Oder - Hohenwutzen – Untersuchung von Unterhaltungs- und Regelungsmaßnahmen (BAW-Gutachten, B3953.02.30.10038).

BAW (2003): Gutachten über Regelungsmaßnahmen in der Elbe-Reststrecke (El-km 508–521) auf der Grundlage von Modelluntersuchungen, Teil 4: Morphologische Untersuchungen im physikalischen Modell, Karlsruhe (BAW-Gutachten, 3.02.10006.00).

Riesterer, J.; Wenka, T.; Oberle, P.; Brudy-Zippelius, T. (2014): Numerische Modellierung des Geschiebetransports in gekrümmten Gerinnen, 37. Dresdner Wasserbaukolloquium 2014, Technische Universität Dresden.



## Koordinierte Bewirtschaftung von Staustufenketten

### Modellierung und Betrieb

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die lokale OW/Q-Regelung einer einzelnen Staustufe 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 Staustufen, deren Betrieb gegenüber einer rein lokalen Regelung verbessert werden kann, wenn die lokalen Regler in vorgegebenen Grenzen „richtig (vor)gesteuert“ werden.

Die Verbesserung der Bewirtschaftung einer Staustufenkette 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 Staustufenketten, 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 Staustufenketten 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, sowie eine bessere Beherrschung extremer Wetterereignisse. Im Hinblick auf eine zukünftige zentrale Leitwarte, die die Wasserstände mehrerer Staustufen mit einem begrenzten personellen Aufwand führen soll, stellt eine koordinierte Bewirtschaftung die dafür notwendigen Informationen bereit.

#### Auftragsnummer:

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:

2012 bis 2022

### 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. 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 Staustufenketten beauftragt.

### 4 Ergebnisse

Eine modellprädiktive Vorsteuerung (engl. model predictive feedforward control, MPFFC) setzt sich aus einem linearisierten Modell der Fließstrecke, einer kurzzeitigen Abflussvorhersage und einem Optimierungsalgorithmus zusammen. Die Optimierung ermittelt mit dem linearisierten Modell der Fließstrecke und der Abflussvorhersage eine bestmögliche Regelung des Abflusses über die Regelorgane Kraftwerk und Wehr. Dazu darf der Sollwasserstand innerhalb vorgegebener Toleranzen angepasst werden. Die theoretischen Untersuchungen der BAW mit der MPFFC zeigen, dass die Wasserstände gut geführt und die Abflüsse mit der Nutzung der Toleranzen gleichmäßig abgegeben werden. Gerade bei Abflüssen bis MQ werden Abflussschwankungen gedämpft. Damit wird vermieden, dass sich diese Abflussänderungen in der Stauhaltungskette verstärken. Die Verstärkung von Abflussschwankungen ist bei der OW/Q-Regelung nur schwer zu vermeiden.

Wichtiger Bestandteil der MPFFC ist das interne Modell der Fließstrecke. Dazu werden die Saint-Venant-Gleichungen um stationäre Abflusszustände mit  $Q_0$  und  $H_0(x)$  linearisiert. In Litrico und Fromion (2004) ist die Herleitung beschrieben, die beweist, dass die Ableitung eindeutig ist. Dies führt zu folgendem Gleichungssystem in der Zustandsraumdarstellung, wobei  $h$  und  $q$  die Abweichungen von einem stationären Abflusszustand  $Q_0$  und  $H_0(x)$  beschreiben. Die obere Gleichung entspricht der linearisierten Kontinuitätsgleichung und die untere Gleichung der linearisierten Impulsgleichung für die Änderungen  $h(x,t)$  und  $q(x,t)$ . Die Parameter Wellengeschwindigkeit  $C_0(x)$ , mittlere Fließgeschwindigkeit  $V_0(x)$ , Wasserspiegelbreite  $B_0(x)$  sowie die Größen  $\beta_0(x)$  und  $\gamma_0(x)$  sind abhängig von der Fließstrecke.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial t} \\ \frac{\partial q}{\partial t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{B_0} & 0 & 0 \\ -(C_0^2 - V_0^2) \cdot B_0 & -2 \cdot V_0 & \gamma_0 & \beta_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial q}{\partial x} \\ h \\ q \end{bmatrix}$$

Das Gleichungssystem kann in Raum und Zeit diskretisiert werden. Die räumliche Diskretisierung erfolgt mit einem Differenzenquotient erster Ordnung. Das daraus resultierende Gleichungssystem ist linear und zeitinvariant. Die Zeitdiskretisierung entspricht einem expliziten Ansatz und die Zeitintegration folgt einem Runge-Kutta-Ansatz. Durch die Wahl kleiner Zeitschritte wird gewährleistet, dass die Dynamik in der Stauhaltung richtig wiedergegeben wird (Courant-Bedingung). Aufgrund der variablen Profilgeometrie können die Parameter des Gleichungssystems üblicherweise nicht analytisch abgeleitet werden. Daher werden die Parameter numerisch identifiziert durch Vergleich mit Ergebnissen aus 1D-HN Berechnungen (Amann et al. 2016). Bild 1 zeigt ein Beispiel für eine Anpassung an die Moselstauhaltung Grevenmacher um den stationären Abfluss  $Q_0 = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ . Das lineare Gleichungssystem kann unter bestimmten Voraussetzungen reduziert werden, um die Berechnungsgeschwindigkeit und auch die Stabilität zu erhöhen. Bisherige Untersuchungen an der Mosel zeigen, dass die Berechnungen auf einem Echtzeitsystem problemlos innerhalb des Taktes von einer Minute erfolgen.

Das FuE-Vorhaben wird mit der Dissertation von Kai-Uwe Amann umfänglich dokumentiert werden.

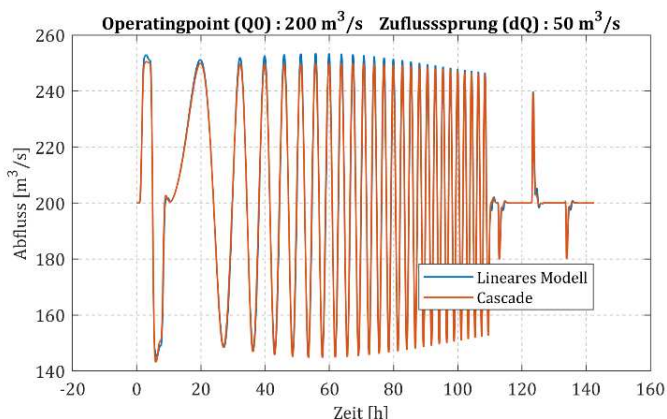


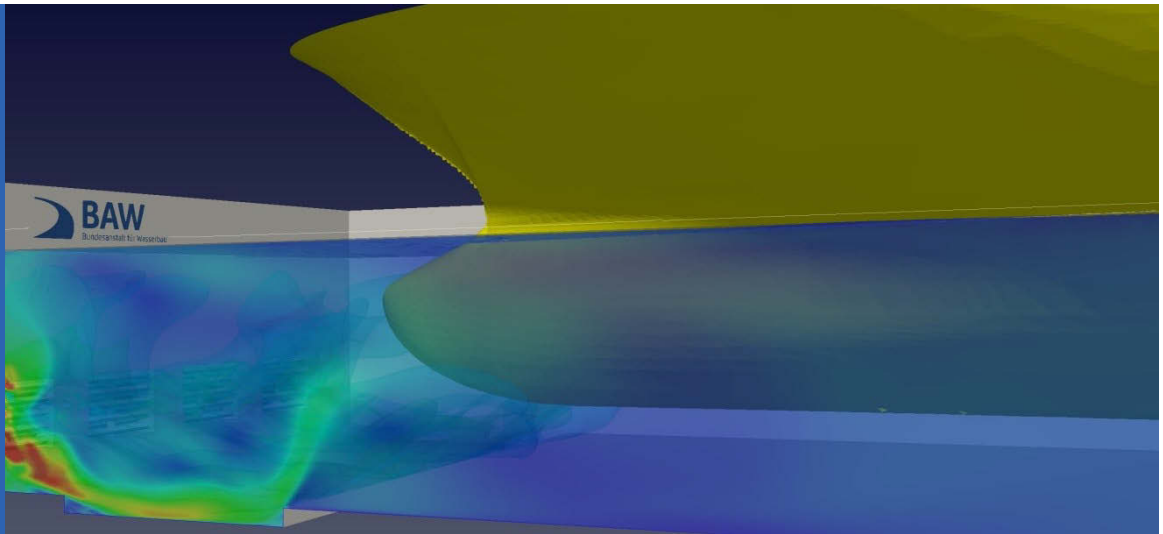
Bild 1: Vergleich eines linearen Modells der Moselstaustufe Grevenmacher mit den Berechnungen eines 1D-HN-Modells; Zufluss: Zwei Sprünge, gefolgt von einem Chirp-Signal (Sinusschwingung mit ansteigender Frequenz) und Änderungen im Wasserstand ( $t > 110 \text{ h}$ ).

#### Literatur:

BAW (Hg.) (2012): Automatisierte Abfluss- und Stauzielregelung (ASR). Karlsruhe (BAWMitteilungen, 96).

Litrico, Xavier; Fromion, Vincent (2004): Frequency Modeling of Open-Channel Flow. In: *J. Hydraul. Eng.* 130 (8), S. 806–815.

Amann, Kai-Uwe; Arnold, Eckard; Sawodny, Oliver (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), pp. 1276–1281. DOI: 10.1109/COASE.2016.7743554.



## 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 für den Modellierungsprozess. Aus diesem Grund werden zur Berücksichtigung wasserbaulich relevanter Objektbewegungen individuelle Modellierungskonzepte benötigt.

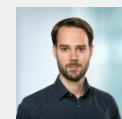
#### 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)

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 erfordert dabei einen hohen zeitlichen und personellen Aufwand, 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 Aufbau numerischer Modelle ist gegenüber gegenständlichen Modellen gering, während die Durchführung der Simulation vergleichsweise viel Zeit in Anspruch nimmt. Ein großer Vorteil numerischer Modelle besteht 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

#### Auftragsnummer:

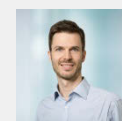
B3953.03.04.70004

#### Auftragsleitung:



Fabian Belzner  
 fabian.belzner@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Torsten Hartung  
 torsten.hartung@baw.de

#### Laufzeit:

2014 bis 2024



und gegenständliche Modelle 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 Effizienz und Qualität der Gesamtbearbeitung für die 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. In Kombination mit spezifischen Gitterverformungsmethoden können die realisierbaren Hubhöhen erweitert werden. Der entwickelte Workflow ermöglicht es dem Auftragsbearbeiter, solche Simulationen durchzuführen. 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 Masenerhaltung, die automatische Gitterverfeinerung im Bereich des bewegten Objektes und die dynamische Verteilung der Rechenlast (Load Balancing) besteht. Diese Entwicklungen wurden zusammen mit der Firma WIKKI Ltd. durchgeführt und der BAW zur Verfügung gestellt. Derzeit werden die Entwicklungen auf ihre Funktionalität und Anwendbarkeit im Projektalltag getestet. Erste Untersuchungen mit der Immersed-Boundary-Methode zeigten, dass sich Objekte nahezu beliebig durch den Simulationsraum bewegen lassen. Erste Versuche mit schwimmenden Objekten, die über mindestens einen Bewegungsfreiheitsgrad verfügen, verdeutlichten jedoch, dass die Genauigkeit der Lösung sehr sensitiv auf die Größe der umliegenden Gitterzellen und die Einstellungen des Druck- und Bewegungslösers ist. Hier müssen Erfahrungen gesammelt und ein Kompromiss aus Ressourcenaufwand und Genauigkeit gefunden werden. Die Tests der Deforming-Mesh-Methode wurden ebenfalls wieder aufgegriffen. Dazu wurden vergleichende Simulationen mit dem Labormodell der Schleusen Erlangen und Kriegenbrunn durchgeführt. Die Ergebnisse werden aktuell in einem Journal-Paper dokumentiert.

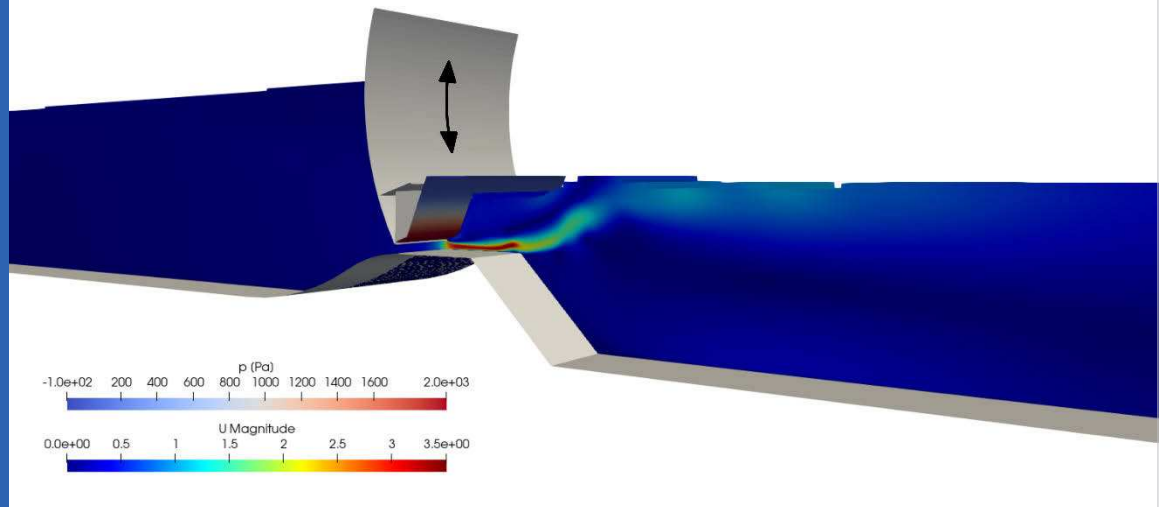


Bild 1: Gegenständliches Schleusenmodell zur Validierung numerischer Simulationsergebnisse.

#### Literatur:

Jasak, Hrvoje (2018): Immersed Boundary Surface Method foam-extend. In: BAW (Hg.): BAW-Workshop OpenFOAM® in Hydraulic Engineering. Karlsruhe: BAW, S. 9–10.

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.



## 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 zum Einsatz. Momentan entsteht ein Labormodell zur systematischen Untersuchung von Schwingungsursachen an Drucksegmenten.

#### 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. In Bezug auf die Standardisierung werden schwingungsfreie Geometrien, insbesondere von Drucksegmenten, erforscht.

#### 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. Mit den Messdaten werden numerische Modelle kalibriert, um diese für weitere Untersuchungen zu verwenden.

Basierend auf der Kopplung von Strömungssimulation und bewegter Struktur wurde eine Methode entwickelt, mit der die Schwingungsgefahr von Wasserbauverschlüssen eingeschätzt werden kann. Bei der Methode werden eine Vielzahl von Betriebszuständen simuliert und die Schwingungsgefahr auf Basis des Energieeintrags quantifiziert. Damit kann die Schwingungsgefahr in jedem Betriebszustand bewertet und entschieden werden, ob konstruktive Änderungen erforderlich sind oder betriebliche Maßnahmen ausreichen. Zur Reduzierung des nicht unerheblichen Rechenaufwandes wird die Bewegung des Festkörpers mit bekannter Amplitude und Frequenz vorgeschrieben. Zur Quantifizierung des Schwingungsrisikos werden dann die schwingungsanregenden Kräfte in der Strömung ausgewertet und die Arbeit bestimmt, die durch die hydrodynamische Kraft am Schütz verrichtet wird (Bild1). (Göbel et al. 2019)

Die in der Vergangenheit (z. B. Thang und Naudascher 1986) vorgeschlagene Untersuchungsmethode auf Basis der Galloping-Theorie wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit (Broß 2019) getestet, für die Anwendung im Wasserbau allerdings als unzureichend bewertet.

### 4 Ergebnisse

Unter Berücksichtigung der Festkörperbewegung wurde die Methode bisher erfolgreich zur Untersuchung von bestehenden Wehrverschlüssen eingesetzt. So konnte für ein Hubschütz an der Weser gezeigt werden, dass Schwingungen nur bei niedrigen Abflüssen und kleinen Öffnungsweiten auftreten und somit im Regelbetrieb keine Schwingungsgefahr besteht. Für ein neu in Betrieb genommenes Drucksegment an der französischen Mosel, welches bei kleinen Öffnungsweiten über ein breites Abflussspektrum starke Schwingungen zeigt, konnte eine neue Konstruktion der Schützunterkante getestet werden, welche in der Simulation über das gesamte Abfluss- und Öffnungsspektrum schwingungsfrei ist. Die Implementierung der geänderten Geometrie soll im Laufe des Jahres 2021 realisiert werden.

Zur weiteren Verifizierung des numerischen Modells und zur systematischen Untersuchung der Geometrie von modernen Drucksegmenten mit Hohlkästen entsteht derzeit ein Labormodell. Im Gegensatz zur Untersuchung am Prototyp kann dann, neben der Öffnungsweite und dem Abfluss, auch die Eigenfrequenz des schwingenden Schützes variiert werden. Die Variation der Eigenfrequenz geschieht mit Hilfe einer verstellbaren Blattfeder (Bild 1), welche in die Aufhängung des Schützes integriert ist. Die hydrodynamischen Kräfte auf das Schütz sollen mit Drucksensoren bestimmt werden, so dass ein Phasenvergleich zwischen Bewegung und Druckschwankung ermittelt werden kann. Neben technischen Fragestellungen wie der Ausformung von Schützunterkanten zur Schwingungsreduzierung und der Verifizierung des numerischen Modelles sollen auch wissenschaftliche Fragestellungen zum Anregungsmechanismus beantwortet werden.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde eine Vielzahl von Schwingungsmessungen an verschiedenen Anlagen durchgeführt und dokumentiert. Viele Schwingungsprobleme betreffen Schwingungen von Dichtungen oder Dichtungssystemen. Diese Problematik ist meist auf Missachtung von Entwurfgrundsätzen, unzureichende Unterhaltung oder mangelnde Ausführung zurückzuführen. Die aus dem Projekt hervorgehenden Erkenntnisse gehen in die Beratungstätigkeit der BAW ein und sollen bis 2022 in einem Mitteilungsblatt dokumentiert werden.

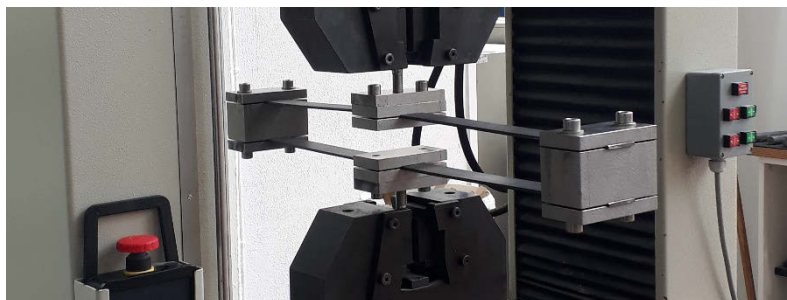


Bild 1: Die Einstellmöglichkeiten der Steifigkeit der Doppelblattfeder wurde auf der Zugmaschine verifiziert.

#### Literatur:

Broß, F. (2019): Numerische Untersuchungen zum Downpull-Effekt an unterströmten Verschlüssen. Bachelor-Thesis am Institut für Hydromechanik. Karlsruher Institut für Technologie (unveröffentlicht).

Göbel, G.; Gebhardt, M.; Deutscher, M.; Metz, W. (2019): Untersuchung strömungsinduzierter Schwingungen am Beispiel eines unterströmten Segment-schützes. In: Kolloquium Hydraulik der Wasserbauwerke – Neues aus Praxis und Forschung, 20 bis 21. Februar 2019. Bundesanstalt für Wasserbau. Karlsruhe

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.

Göbel, G.; Gebhardt, M.; Deutscher, M.; Metz, W.; Thorenz, C. (2019): Numerical simulation of flow-induced vibrations on gates with underflow. In: Proceedings of the 38th IAHR World Congress.





## 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 Partensky 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.

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 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 berücksichtigt wurden.

#### Auftragsnummer:

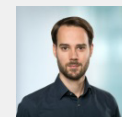
B3953.03.04.70007

#### Auftragsleitung:



Dr. Lydia Schulze  
 lydia.schulze@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Fabian Belzner  
 fabian.belzner@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2023



So können bspw. für den Füllprozess optimierte Schützfahrpläne ungünstig sein, wenn dabei Schwingungen an den Schützen auftreten, die die Stahlwasserbauten 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 die 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 wurden die Daten über Füllzeiten und Fallhöhen bestehender Schleusen ausgewertet und Ausreißer identifiziert, um bestehende Optimierungspotentiale bezüglich der Sicherheit und Leistungsfähigkeit der Bauwerke abzuleiten. Eine vergleichende Auswertung der technischen Daten 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 könnten. Gleichzeitig wurden Interviews mit Schichtleitern einzelner Schleusen durchgeführt, um Informationen über den tatsächlichen Betrieb der Bauwerke zu erhalten. Mit ein- und mehrdimensionalen Modellen können die Füllzeit und die wirkenden Schiffskräfte während des Füllvorgangs abgeschätzt werden. Die tatsächliche Bemessungsgröße ist jedoch die von der Trosse aufzunehmende Kraft, welche nicht der Schiffskraft entspricht, sondern die dynamische Antwort auf kleinste Bewegungen des festgemachten Schiffs ist (Bild 1, links). Sie ist damit von zahlreichen bekannten und variablen Randbedingungen, wie z. B. den Materialeigenschaften der Trosse, ihrer Länge oder dem Durchhang abhängig. Mit einer Modellierung des Systems „Schiff-Trosse“ kann die Trossenkraft in Abhängigkeit bekannter und variabler Randbedingungen ermittelt werden. Monte-Carlo-Simulationen erlauben die Variation variabler Randbedingungen und damit eine statistische Bewertung der wirkenden Trossenkräfte. Die Ergebnisse dieser Simulationen bilden die Grundlage für die Ermittlung zulässiger Schiffskräfte auf Basis einer semi-probabilistischen Betrachtung, bei der zwischen Einwirkungs- und Widerstandsseite getrennt wird und die Unsicherheiten auf beiden Seiten unabhängig betrachtet werden können. Diese Methodik wird bereits seit Einführung der aktuellen Generation der Eurocodes im konstruktiven Ingenieurbau verwendet.

## 4 Ergebnisse

Bild 1 (links) zeigt die in den beiden Trossen auftretenden Zugkräfte (orange und blau) bei nahezu sprunghaft einsetzender Schiffslängskraft (schwarz), wie sie sich bspw. aus einem Wasserspiegellängsgefälle ergeben kann. In Abhängigkeit der Vorspannung der Trosse bewegt sich das Schiff zunächst in Richtung der wirkenden Kraft, bis die Trosse gespannt ist. In diesem Moment muss die Trosse sowohl die quasi-statisch wirkende Schiffskraft als auch die Trägheitskraft des sich bewegenden Schiffs aufnehmen. Die dabei auftretenden Trossenkräfte können aufgrund dynamischer Verstärkungseffekte ein Vielfaches der wirkenden Schiffskräfte betragen. Monte-Carlo-Simulationen dieses Systems mit variablen Randbedingungen zeigen, dass die auftretenden Kräfte log-normal verteilt sind. Aus den Ergebnissen der Simulationen wird ein sogenannter Verstärkungsfaktor ermittelt, der das Verhältnis von Schiffs- zu Trossenkraft beschreibt. Aus der Häufigkeitsverteilung dieses Verstärkungsfaktors (Bild 1, rechts) können Quantilwerte errechnet werden, die ein Sicherheitsniveau auf der Einwirkungsseite ausdrücken. Damit kann ein Faktor bestimmt werden, der multipliziert mit der Schiffskraft einen Vergleich mit der Widerstandsseite (Trossenzugfestigkeit) bei einem zuvor festgelegten Sicherheitsniveau erlaubt.

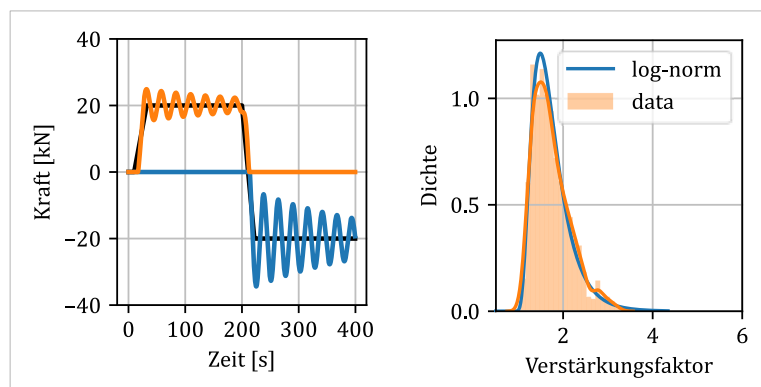


Bild 1: Links: Plötzlich aufgebrachte Schiffslängskraft (schwarze Linie) und dynamische Antwort der Trossen (orange und blaue Linie). Rechts: Verteilungsfunktion der wirkenden Trossenkräfte (10.000 Simulationen).

### Literatur:

InCom Working Group 155 (2015): Ship Behaviour in Locks and Lock Approaches. PIANC Report 155. PIANC Brussels.

Partenscky (1986): Binnenverkehrswasserbau Schleusenanlagen. Heidelberg: Springer.



## Resiliente Abfluss- und Stauregelung der Wasserstraßen bei extremen Niederschlagsereignissen

### Entscheidungsunterstützung durch Live-Simulationen

#### 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 möglichst konstant. Die Abfluss- und Stauregelung soll mehrere, miteinander 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. Das 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).

Im Rahmen des abgeschlossenen FuE-Vorhabens „Strategien zur Abfluss- und Stauregelung der Wasserstraßen bei extremen Wetterereignissen“ wurde ein Prognose- und Regelungssystem für die Neckarstauhaltung Hofen entwickelt, das anhand kurzfristiger Niederschlagsvorhersagen einen optimalen Wasserstands- und Abflussverlauf berechnet und die Folgen einer bevorstehenden Regen- oder Mischwassereinleitung kompensiert (Kasper und Simons 2019).

Ziel des hier vorgestellten Vorhabens ist es unter anderem, das entwickelte Prognose- und Regelungssystem als Entscheidungsunterstützung für die Fernsteuerzentrale in Rockenau zu implementieren. Darüber hinaus sollen weitere Staustufen identifiziert werden, die potenziell von starkregeninduzierten Einleitungen betroffen sind.

#### Auftragsnummer:

B3953.03.04.70008

#### Auftragsleitung:



Dr. Franz Simons  
 franz.simons@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Julia Kasper  
 julia.kasper@baw.de

#### Laufzeit:

2020 bis 2026

## 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 kompensiert die Wirkung stoßartiger Belastungen in Stauhaltungen, 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

Das FuE-Vorhaben „Resiliente Abfluss- und Stauregelung der Wasserstraßen bei extremen Niederschlagsereignissen“ ist Teil des BMDV-Expertenetzwerks. Sieben Ressortforschungseinrichtungen und Fachbehörden des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) haben sich 2016 zu einem Netzwerk zusammengeschlossen, um gemeinsam anwendungsorientierte Forschungsergebnisse zu drängenden Problemen der Verkehrsinfrastrukturen zu gewinnen.

Die Untersuchungsmethoden werden durch die Zusammenarbeit im Schwerpunktthema „Zuverlässigkeit, Risiko und Resilienz“ insbesondere mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) und der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) abgestimmt. Der DWD liefert dabei sowohl Nowcasting-Vorhersagen aus Extrapolationen von Radarniederschlagsdaten als auch probabilistische Ensemble-Vorhersagen. Staustufen, deren Abfluss- und Stauregelung potenziell von Regen- oder Mischwassereinleitungen nach Starkregen beeinträchtigt wird, werden mithilfe der Methode der Vulnerabilitätsanalyse identifiziert, die an der BASt bereits verwendet wird.

## 4 Ergebnisse

Ein Prototyp des Live-Prognosesystems wurde bereits in der BAW implementiert. Als Eingangsdaten dienen Radarniederschlagsmessungen und -vorhersagen des DWD, die als Open Data frei verfügbar sind. Dazu hat der DWD im Rahmen des Projekts ein Auswertungsskript bereitgestellt, das aus diesen Daten Niederschlagsmessungen und -vorhersagen für das relevante Einzugsgebiet im Umkreis der Stadt Stuttgart berechnet. Diese dienen wiederum als Eingangsdaten für die Live-Simulation der starkregeninduzierten Mischwassereinleitung in die Neckarstauhaltung Hofen. Die BAW nutzt dazu ein in Eigenentwicklung entstandenes, stark vereinfachtes Modell der Stuttgarter Kanalisation.

Durch die Einrichtung einer operationellen Datenübertragung hat das Personal der Leitzentrale in Rockenau Zugriff auf die Einleitungsprognosen (s. Bild 1) und es teilt mit der BAW seine Erfahrungen mit dem Prototyp. Auf diese Weise kann das System in den kommenden Jahren getestet und sukzessive verbessert werden.

Im nächsten Schritt soll das Live-Prognosesystem um eine modellprädiktive Regelung ergänzt werden, die anhand von Prognosen einen optimalen zukünftigen Abfluss- und Wasserstandsverlauf berechnet und der Entscheidungsunterstützung dient. Im Rahmen des BMDV-Expertenetzwerks sollen zusätzlich zu den kurzfristigen Nowcasting-Niederschlagsprognosen auch weitere Produkte und aktuelle Forschungsarbeiten des DWD eingebunden werden.

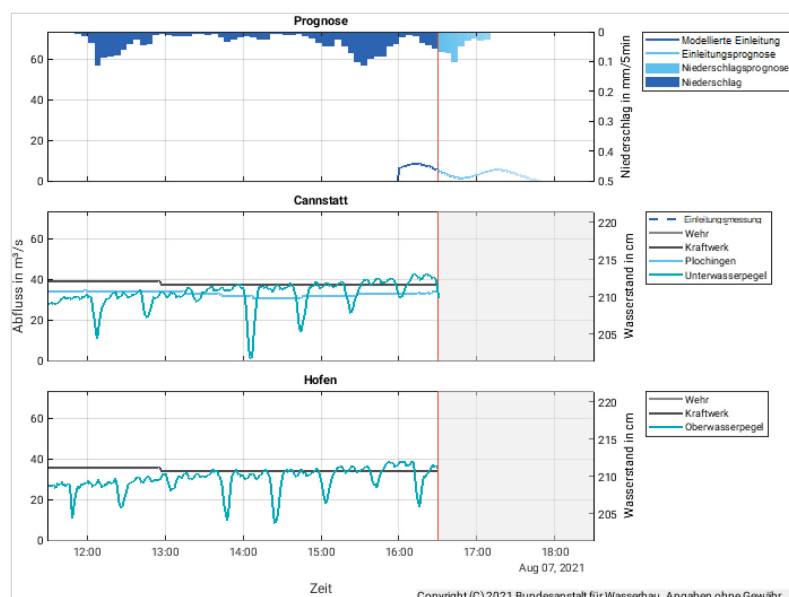


Bild 1: Screenshot des Prognosesystems mit Radarniederschlagsmessung und -vorhersage, daraus berechneter Einleitungsprognose (oben), Abfluss- und Wasserstandsmessungen für die Staustufen Cannstatt (Mitte) und Hofen (unten) und Markierung der aktuellen Zeit (rot).

### Literatur:

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.

Kasper, J.; Simons, F. (2019): Strategien zur Abfluss- und Stauregelung der Wasserstraßen bei extremen Wetterereignissen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2019. Karlsruhe: BAW, S. 11–12.





## 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 Sohlsediment 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 Kolkiefen 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 sohnahen 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 2022



## 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" (GGB) 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 Doppellruder). 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

Im Rahmen der Projektbearbeitung wurden neue komplexe Berechnungsformeln für die zeitliche Entwicklung lokaler Schraubenkolke und für die Endkolkentiefe erstellt, die zahlreiche empirische Koeffizienten enthalten, welche auf Grundlage der Modellversuchsergebnisse des LWI bestimmt wurden (LWI 2019). Für die Berechnung der Endkolkentiefe durch Schraubenstrahlen wurden in der Vergangenheit jedoch auch sehr einfach aufgebaute empirische Formeln vorgeschlagen. Darin wird die maximale Kolkentiefe in Abhängigkeit von den maßgebenden Einflussgrößen für den Erosionsvorgang unter Anwendung der Dimensionsanalyse ermittelt. Hieran anknüpfend wurde zum Abschluss der Projektbearbeitung die Eignung eines Ansatzes untersucht, der auf experimentelle und theoretische Untersuchungen von Rajaratnam (Aderibigbe und Rajaratnam 1996) zur Endkolkentiefe infolge kreisrunder turbulenter Strahlen beruht, wonach die mit dem Anfangsstrahldurchmesser normierte Endkolkentiefe  $\varepsilon_\infty$  im Wesentlichen von der densimetrischen Froudezahl sowie dem mit dem Anfangsstrahldurchmesser normierten Abstand der Strahlachse von der Gewässersohle abhängig ist. Die Prognose der Zeit  $t_\infty$  zum Erreichen der Endkolkentiefe erfolgte durch die Erweiterung der Beziehung mit dem für den lokalen Kolkvorgang aufgefundenen Zeitmaßstab. Für die Ermittlung der zeitabhängigen Kolkiefen konnte ein Ansatz herangezogen werden, der die degressive Kolkentwicklung unter Zugrundelegung der Endkolkentiefe  $\varepsilon_\infty$  und der Zeit  $t_\infty$  gut beschreibt (Spitzer 2021). Die Eignung des Berechnungsverfahrens konnte durch den Vergleich mit Messergebnissen verifiziert werden. Dies zeigt sich in Bild 1, in dem die gemessenen zeitlichen Propellerkolkiefen aus 21 Messreihen in Modellversuchen unter variablen Randbedingungen (Oebius und Schuster 1984) den Berechnungsergebnissen gegenübergestellt werden.

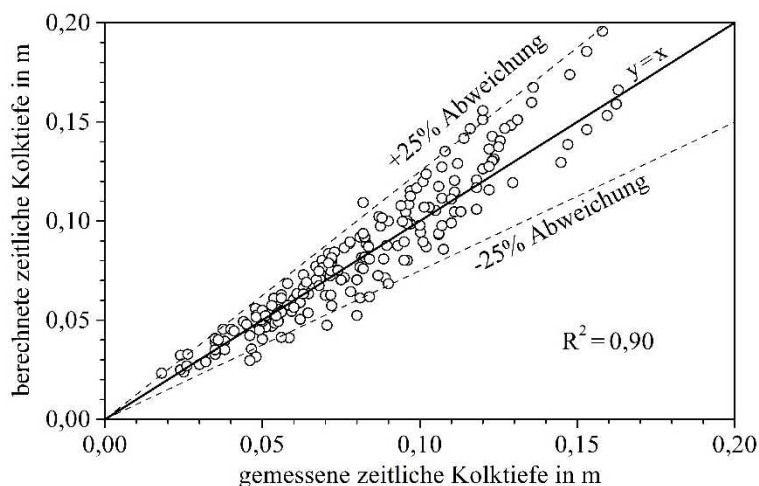


Bild 1: Gegenüberstellung von berechneten mit in Modellversuchen von Oebius und Schuster (1984) gemessenen Kolkiefen.

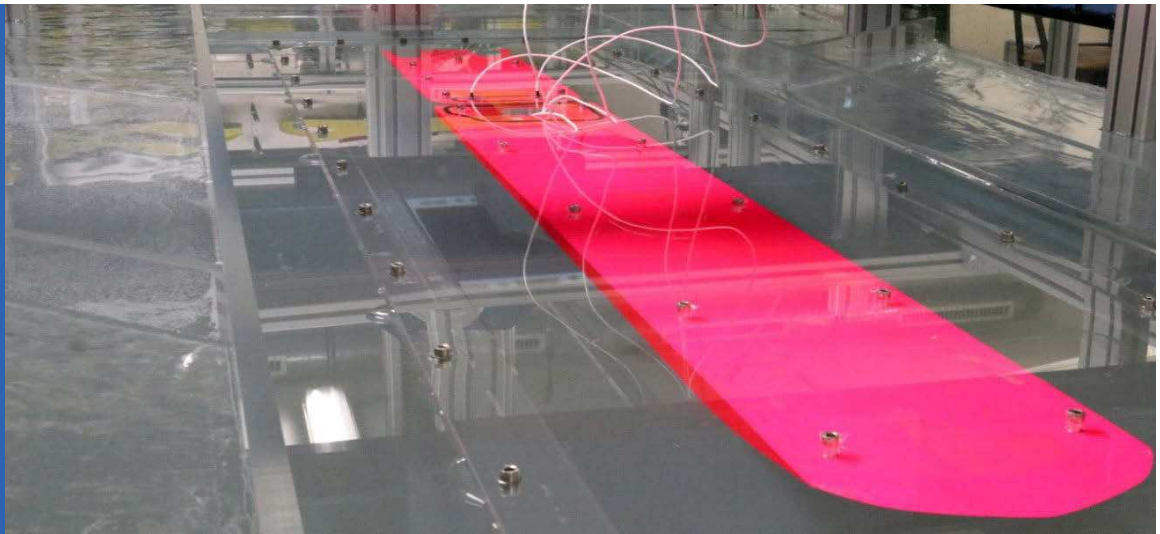
### Literatur:

Aderibigbe, O.O.; Rajaratnam, N. (1996): Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent jets. *J. Hydr. Res.*, 34, S. 19–34.

LWI (2019): Scour induced by inland ship propellers. Final Report, TU Braunschweig, LWI-Bericht Nr. 1098.

Oebius, H.; Schuster, S. (1984): Sohlenerosion durch Schiffspropeller. Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin, Bericht-Nr. 987/84.

Spitzer, D. (2021): Einwirkung des Propellerstrahls auf die Gewässersohle. FuE-Abschlussbericht (In Bearbeitung). BAW Karlsruhe.



## Binnenschiffsführungssimulation

### Referenzbinnenschiff und -schubverband

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Ende 2009 wurde durch die Bundesanstalt für Wasserbau für den Bereich Binnenschifffahrt der Schiffsführungssimulator ANS5000 beschafft. Im Jahr 2017 erhielt der Schiffsführungssimulator ein Upgrade zum ANS6000. Zentrales Ziel des Forschungsvorhabens war es, den Simulator, der seitens der implementierten Modellverfahren für die Ausbildung des nautischen Personals auf Seeschiffen ausgelegt ist, an die Anforderungen der BAW für die Binnenschifffahrt anzupassen und in Betrieb zu nehmen. Auch nach der erfolgten Inbetriebnahme des ANS6000 für die fahrdynamische Begutachtung von Manöversituationen muss der Simulator fortwährend weiterentwickelt und an den steigenden Untersuchungsbedarf angepasst werden. Neben der Implementierung der BAW-Modelle müssen zusätzlich verifizierte Schiffmodelle inklusive der Parametersätze, die die fahrdynamischen Eigenschaften eines Schiffes bestimmen, für den ANS6000 erstellt werden.

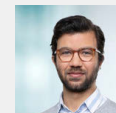
#### 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)

Basierend auf 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 beispielsweise nach dem Einfluss von Querströmungen auf die Fahrt eines Binnenschiffes (z. B. durch Schwall und Sunk im Schleusenvorhafen), 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, bei denen das Schiff durch einen Bahnregler oder durch Schiffsführer nach Sicht gesteuert wird. Die Bedeutung wird umso deutlicher, da schon heute und zukünftig verstärkt die wirtschaftliche Ausnutzung der vorhandenen oder dann angepassten Wasserstraßeninfrastruktur im Vordergrund stehen und somit eine kontinuierliche Weiterentwicklung der modularen Simulationssoftware für die Aufgaben der WSV erforderlich ist.

#### Auftragsnummer:

B3953.04.04.70003

#### Auftragsleitung:



Lahbib Zentari  
lahbib.zentari@baw.de

#### Laufzeit:

2010 bis 2023

### 3 Untersuchungsmethoden

Die Modellierung der fahrdynamischen Eigenschaften eines Binnenschiffes ist von besonderer Bedeutung, um die Qualität der späteren Simulationsergebnisse zu steigern. Auf der Grundlage von Messdaten fahrender Binnenschiffe wurden die Koeffizienten für die Maschinen- und für die fahrdynamischen Modelle ermittelt. Inzwischen wird diese Methode durch CFD-Berechnungsmethoden für Binnenschiffe und Schubverbände im Tief- und Flachwasser ergänzt.

Zur Validierung der CFD-Methode werden die benötigten Größen aus Schleppversuchen gewonnen. Das Schiffsmodell wird auf einer vorgeschriebenen Bahn durch einen Schlepptank bewegt, wobei die hydrodynamischen Kräfte und Momente gemessen werden. Auf Basis systematischer experimenteller Untersuchungen der Widerstands-, Antriebs- und Manövriereigenschaften wird derzeit die Validierung mittels Lösung der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (RANS) durchgeführt. Dazu wird auf die Erfahrungen aus dem Vorgängerprojekt „Referenzschiff“ zurückgegriffen.

Die Grundlage für das mathematische Modell bildet das nach Abkowitz (1964) eingeführte Koeffizientenmodell, mit dem sich die wirkenden Kräfte und Momente eines Schiffes anhand von hydrodynamischen Koeffizienten beschreiben lassen. Stand der Technik ist es, für Manövriervorgänge von Schiffen im Flachwasser nur die 3 Freiheitsgrade in der horizontalen Ebene zu betrachten. Mit der Erweiterung des Modells auf 6 Freiheitsgrade sollen künftig auch weitere Effekte, wie unter anderem Bankeffekt, *Sloshing*, *Squat* oder Schiff-Schiff-Interaktionen, modellierbar sein. Zur Validierung des Modells ist es notwendig, anhand von numerischen Berechnungen sowie Modell- und Feldversuchen die fehlenden Daten und Wechselwirkungen der Effekte zu erfassen. Sind alle Einflüsse einbezogen und das Modell validiert, soll es auch in den Quellcode des Fast-Time-Simulators FaRAO eingesetzt werden, um lange Streckenfahrten zu simulieren

### 4 Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes „Referenzschubverband“ wurde bereits eine robuste Methode zur Vorhersage der hydrodynamischen Kräfte für Schubverbände in verschiedener Anordnung im Tief- und Flachwasser entwickelt. Widerstand und Propulsionskräfte wurden mit der CFD-Software STARCCM+ unter Berücksichtigung der freien Oberfläche mit der *Volume-of-Fluid-Methode* (VOF) ermittelt. Driftkräfte und Ruderkräfte im Tief- und Flachwasser wurden mit der sogenannten Double-Body-Methode berechnet, bei der die freie Oberfläche vereinfachend als Symmetrieebene behandelt wird. Die Validierung der Kräfte mit den experimentellen Ergebnissen lieferte eine gute Übereinstimmung zwischen den numerischen und experimentellen Daten.

Die größte Herausforderung für die CFD-Simulation stellte die Spaltströmung zwischen den gekoppelten Schubleichtern dar. Die Verteilung des Druck- und Geschwindigkeitsfeldes um die Schiffskörper zeigte, dass das klassische Zweigleichungsmodell zur Modellierung der Turbulenzen aufgrund der ungenauen Ermittlung der hydrodynamischen Kräfte am Schiffsrumpf ungeeignet ist. Um belastbare Daten dieses Phänomens zu erhalten, wurde die Spaltströmung mittels *2D-Particle-Image-Velocimetry* (PIV) gemessen. Der Fokus lag auf der Turbulenzintensität sowie der Verteilung des Geschwindigkeitsfeldes im Spalt zwischen Schubschiff und Leichter. Parallel dazu werden zurzeit Strömungssimulationen mit einem modifizierten Ansatz zur Ermittlung der Turbulenzen durchgeführt. Es handelt sich um die *Improved Delayed Detached Eddy Simulation* (IDDES), eine hybride Methode, welche die *Large Eddy Simulation* (LES) im Fernfeld und ein statistisches Turbulenzmodell (RANS) in Körperrnähe einsetzt. Bild 1 zeigt eine Momentaufnahme der turbulenten Strukturen um den Schubverband in der IDDES-Simulation bei einer Umströmungsgeschwindigkeit von 2,029 m/s.

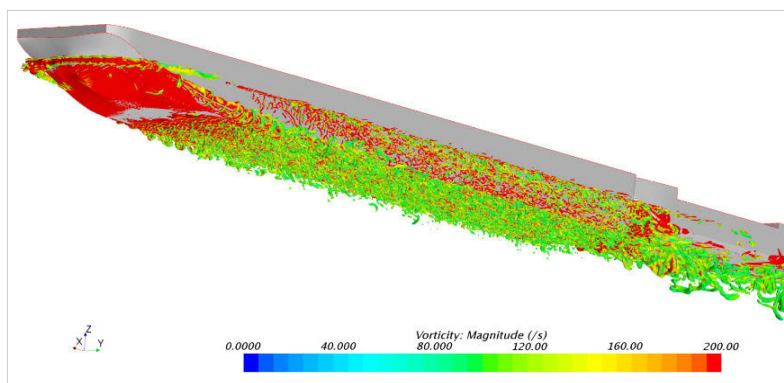
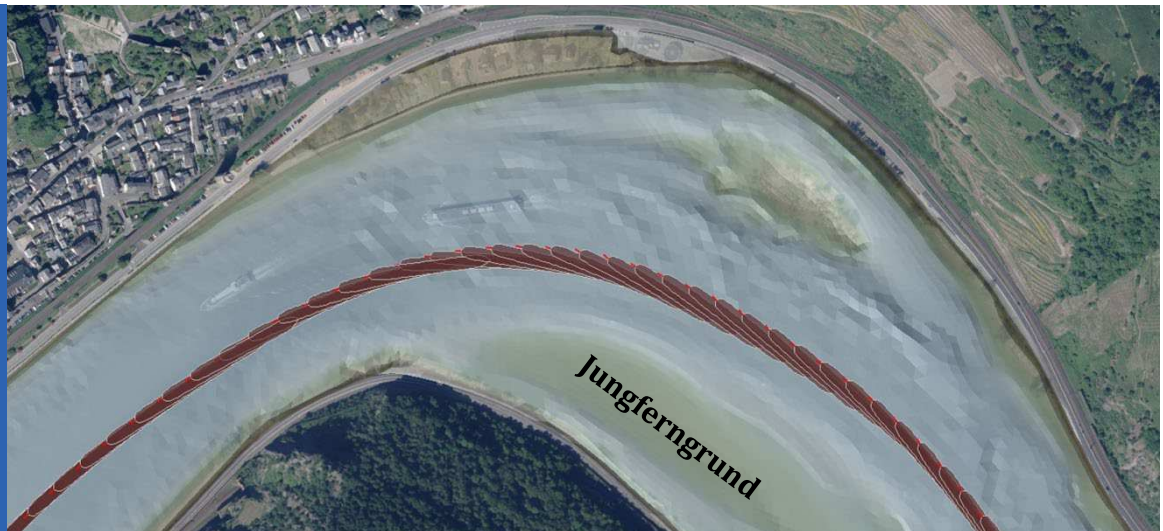


Bild 1: Momentaufnahme der turbulenten Strukturen um den Schubverband bei einer Umströmungsgeschwindigkeit von 2,029 m/s.

#### Literatur:

Zentari, L., el Moctar, O.; Lassen, J. Hallmann, R. (2021): Experimental and Numerical Resistance and Propulsion of a Pusher-Barge System in Deep and Shallow Water. In: Applied Ocean Research (Im Review Prozess).





## 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 Fahrrinnenentrassierung in Binnenschifffahrtskanälen 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 das Trassierungsverfahren wird aufgrund der eingeschränkten Gültigkeit der Methodik (Kanalfahrten bei sehr geringen Strömungsgeschwindigkeiten) den Anforderungen 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 2014 das Verfahren einem vollständigen Reengineering in der Programmiersprache C++ unterzogen. Der nun seit 2016 im Einsatz befindliche Fast-Time-Simulator FaRAO (*Fahrdynamische RoutenAnalyse und Optimierung*) wird im Rahmen dieses FuE-Projektes sukzessive verbessert und weiterentwickelt, wobei die Qualität und Rechengeschwindigkeit der Methodik bei der auftragsbezogenen Anwendung sowohl für Fragestellungen der WSV als auch im Forschungsbereich im Vordergrund stehen.

#### Auftragsnummer:

B3953.04.04.70008

#### Auftragsleitung:

Dr. Michael Schröder  
 michael.schroeder@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2022



Die geplanten und teilweise umgesetzten Weiterentwicklungen und Verbesserungen betreffen:

- Entwicklung von verbesserten Bahnführungsalgorithmen, die zum Beispiel mithilfe von Methoden der nicht-linearen Optimierung das simulierte Binnenschiff einer vorgegebenen Leitlinie folgen lassen.
- Verbesserung und Weiterentwicklung der physikalischen Grundlagen zur fahrdynamischen Simulation von Binnenschiffen in tiefen- und breitenbeschränktem Fahrwasser auf Kanälen und Flüssen.
- Implementierung des Simulationsverfahrens auf parallelen Hochleistungsrechnern.
- Entwicklung von geeigneten grafischen Benutzerschnittstellen für das Prä- 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 BMDV-Expertenetzwerks sowie im „Pilotprojekt Klima und Wasser - Projektionsdienst für Wasserstraßen und Schifffahrt (ProWaS)“ eingesetzt und weiterentwickelt.

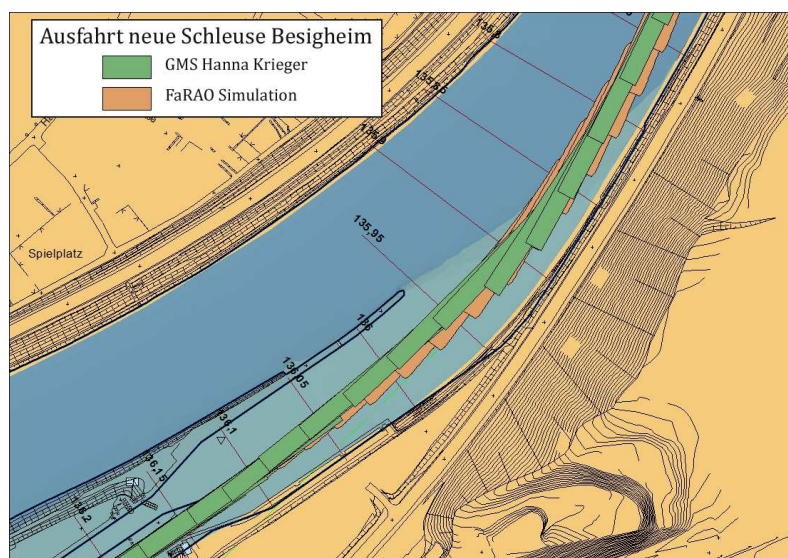
## 3 Untersuchungsmethoden

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 – 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.

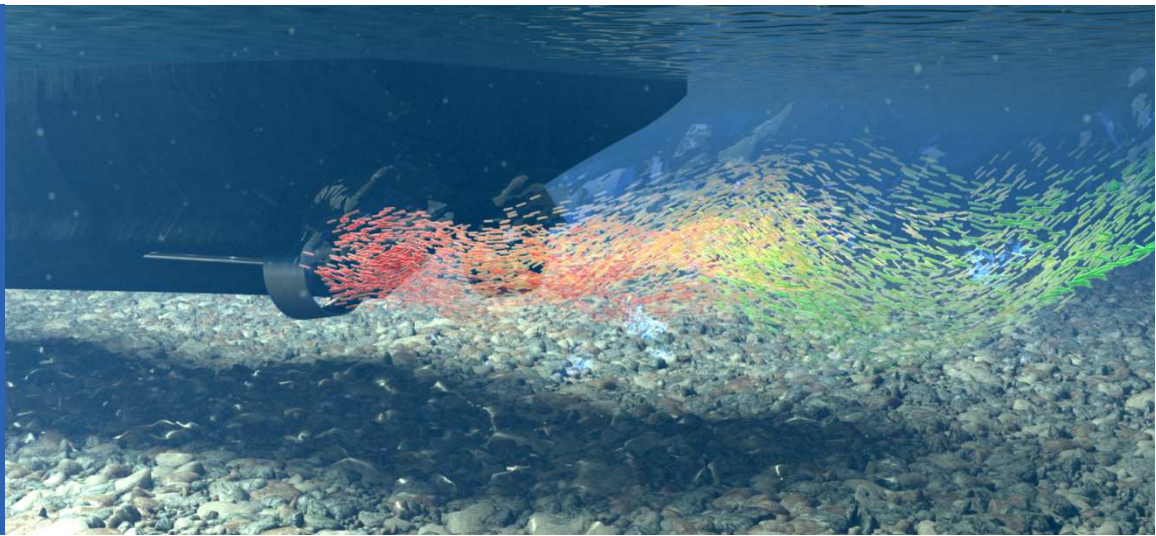


### Literatur:

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.

Bild 1: Validierung der fahrdynamischen Simulation mit FaRAO anhand der Ausfahrt des GMS Hanna Krieger aus der Neckar-Schleuse Besigheim ins Unterwasser.



## 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 Schiffsparametern (z. B. Schiffsgeschwindigkeit, Schraubstrahl- und Bugstrahlaustrittsgeschwindigkeit, Rudereinstellungen, Propellergeometrie) und den Böschungsparametern (z. B. Steingröße und Böschungsneigung) besteht zusätzlicher Forschungsbedarf insbesondere in den folgenden Bereichen:

- 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.

Die Anströmung von Schrauben und Ruder hat Einfluss auf deren erzeugtes Strömungsprofil. Daher sind zunächst HN-Simulationen einer reinen Umströmung der Schiffsgeometrie ohne Antrieb geplant, welche nach erfolgter Validierung um den Antrieb erweitert werden. Die Simulationsergebnisse sollen für weitere Parameterstudien und Untersuchungen zum Einfluss der Propulsionsorgane auf Sohle und Ufer genutzt werden. Wesentliche Ziele dieses Forschungsvorhabens sind:

- Validierung der 3D-HN-Modellierung eines Schiffkörpers zunächst ohne und anschließend mit Antrieb im Flachwasser,
- Erprobung von Simulationsmethoden, um freies Manövrieren des Schiffes (z. B. Wendekreis, Schleuseneinfahrt) zu ermöglichen,
- Studien zum Einfluss von Schiffs-, Böschungs- und Sohlparametern auf die Strahlausbreitung und Sohl-/Böschungsbelastung.

#### Auftragsnummer:

B3953.04.04.70009

#### Auftragsleitung:

Tarek Beck  
 tarek.beck@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Claudia Haug  
 claudia.haug@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 GBSSoft+.

## 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* Gitter) im Hinblick auf die Abbildung eines fahrenden Schiffes über einer realen Flusssohle überprüft werden. Zudem besteht die Möglichkeit, für die Betrachtung des Fernfeldes die Kraft auf das Ruder und den Impuls der Schraube als Impulsscheibe vorzugeben, um den Rechenaufwand im Vergleich zu einer detaillierten Modellierung zu verringern.

## 4 Ergebnisse

Im Gegensatz zum bisherigen Fokus auf die numerische Betrachtung des Propellerfernfeldes (Beck 2020) wurde nun die Umströmung einer Schiffsgeometrie ohne Antrieb in den Vordergrund gestellt. Als Referenzfall dienten experimentelle Modellversuche eines Containerschiffs (Duisburg Test Case, DTC) im Tiefwasser (el Moctar et al. 2012). Zur Berechnung des Reibungswiderstandes wurde eine empirische Korrelation der Reibungswiderstandsbeiwerte in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit und -geometrie verwendet (Morrall 1970) (vgl. Bild 1, gepunktete Linien). Diese Korrelation wurde anhand der Ergebnisse der Modellversuche bestätigt.

Im ersten Schritt der Modellierung der Umströmung einer Schiffsgeometrie ohne Antrieb wurde der DTC mit einem stationären *Solver* simuliert (vgl. Bild 1, gestrichelte Linien). Dabei wurde das ruhende Schiff mit der entsprechenden Relativgeschwindigkeit angeströmt. Neben der Überprüfung der Simulationsergebnisse anhand der empirischen Formeln bietet der DTC den Vorteil, dass durch die einfachere Schiffsgeometrie des Seeschiffes eine gute Grundlage für die weiteren Simulationen mit komplexen Rechengittern (*OverSet* oder Binnenschiffe) geschaffen werden konnte. Im zweiten Schritt wurden *OverSet*-Simulationen durchgeführt. Dafür wurde die Simulation um eine freie Wasseroberfläche mit besonders feiner Auflösung des Rechengitters in diesem Bereich erweitert. Neben der Anpassung des Rechengitters wurde bei den *OverSet*-Simulationen das Schiff mit der entsprechenden Geschwindigkeit durch das Modellgebiet gezogen (vgl. Bild 1, durchgezogene Linien).

Die großen Abweichungen im stationären Fall ergeben sich daher, dass sich zunächst ein gleichmäßiges Strömungsprofil einstellen muss. Der Widerstand nähert sich mit einer Abweichung  $< 5\%$  der empirischen Korrelation an, sobald die Strömung stationär ist. In der *OverSet*-Simulation wird das Schiff aus dem Ruhezustand mit der entsprechenden Geschwindigkeit gestartet, wodurch sich zu Beginn große Widerstandswerte ergeben. Sobald das Schiff in Bewegung ist, stellen sich Abweichungen  $< 10\%$  ein. Damit stellt die *OverSet*-Methode eine Möglichkeit zur Betrachtung eines fahrenden Schiffes dar. Im weiteren Verlauf soll das Containerschiff gegen ein Binnenschiff, das Referenzschiff der BAW, ausgetauscht werden. Zusätzlich sollen die Simulationen auf den Flachwasserbereich erweitert werden.

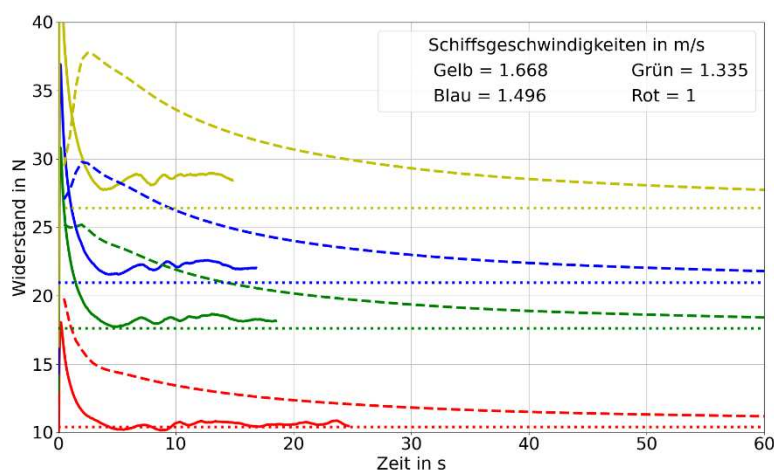


Bild 1: Vergleich der simulierten Reibungswiderstände eines Containerschiffes für unterschiedliche Schiffsgeschwindigkeiten (gepunktet: empirische Korrelation, gestrichelt: stationär, durchgezogen: *OverSet*).

### Literatur:

Beck, T. (2020): HN-Modellierung von Binnenschiffsbelastungen auf Ufer und Sohle. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) Forschung Xpress 43/2020.

el Moctar, O.; Shigunov, V.; Zorn, T. (2012): Duisburg Test Case: Post-Panamax Container Ship for Benchmarking, Ship Technology Research, vol. 59/3, pp. 50–64.

Morrall, A. (1970): 1957 ITTC Modelship Correlation Line Values of Frictional Resistance Coefficient, Ship report, National Physical Laboratory, Ship Division.





## Minderung verkehrsbedingter stofflicher Belastungen in Luft, Wasser und Boden – Betriebliche und technische Optimierungen in der Binnenschifffahrt

Im Rahmen des BMDV-Expertennetzwerkes „Wissen – Können – Handeln“

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Das Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur (BMVI) initiierte 2016 das BMDV-Expertennetzwerk. Sieben Ressortforschungseinrichtungen und Fachbehörden des BMDV greifen darin gemeinsam drängende Probleme der Verkehrsinfrastrukturen auf. Es beinhaltet Forschungsarbeiten zur Anpassung an den Klimawandel, zur umweltgerechten Gestaltung sowie zur Erhöhung der Zuverlässigkeit von Verkehr und Infrastruktur.

Das Themenfeld 2 des BMDV-Expertennetzwerkes hat das Ziel, Verkehr und Infrastruktur umweltgerecht zu gestalten. In einem Schwerpunktthema sollen die stofflichen Belastungen durch die einzelnen Verkehrsträger (Straße, Schiene, Wasserstraße und Luft) erfasst und mögliche Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen untersucht werden. Die BAW entwickelt Modelle und führt temporäre Onboard-Messungen an Binnenschiffen im realen Fahrbetrieb durch, um den Treibstoffverbrauch und den Ausstoß von Luftschadstoffen zu bestimmen. Darauf aufbauend soll gezeigt werden, inwieweit Treibstoffbedarf und Emissionen durch eine optimierte Fahrweise sowie technische Innovationen reduziert 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 der Binnenschifffahrt erhalten. Es werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie durch betriebliche und technische Maßnahmen Reduktionen des Treibstoffbedarfs und der Emissionen erreicht werden können. Auf dieser Grundlage lassen sich die wirtschaftlichen Auswirkungen einzelner Maßnahmen auf den Verkehrsträger Binnenschifffahrt hinsichtlich seiner Wettbewerbsfähigkeit bewerten und Handlungsempfehlungen ableiten.

#### Auftragsnummer:

B3953.04.04.70011

#### Auftragsleitung:

Dr. Christian Noß  
 christian.noss@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Dr. Daniel Weber  
 daniel.weber@baw.de

#### Laufzeit:

2016 bis 2022



### 3 Untersuchungsmethoden

Zur Bestimmung der Binnenschiffsemissionen werden Modelle mit einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung entwickelt (Walz 2019, Weber 2020). Sie basieren auf einer Verknüpfung von beobachteten bzw. modellierten Schiffsbewegungen mit Emissionsfaktoren, die repräsentativ für die auf den Binnenwasserstraßen fahrenden Schiffe sind. Bislang gibt es für diese jedoch nur wenige Messungen im realen Fahrbetrieb, sogenannte Real-Driving-Emissionsmessungen. Daher wurde ein übergroßes Großmotorgüterschiff (üGMS) während des normalen Regelbetriebs auf einer Tal- und Bergfahrt zwischen Mainz und Rotterdam von der BAW messtechnisch begleitet.

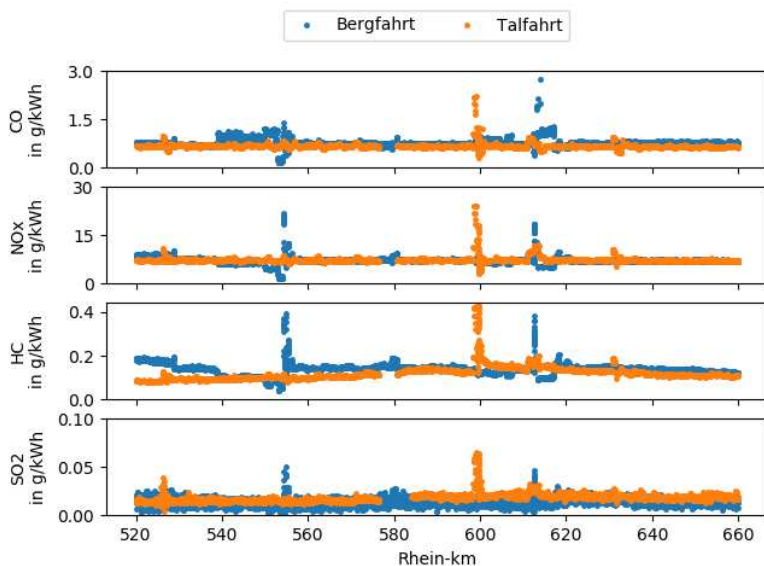
Das untersuchte Schiff wird von zwei baugleichen Motoren mit einer Leistung von jeweils 1119 kW angetrieben. An einem der beiden Antriebsmotoren wurden im Abgaskanal gas- und partikelförmige Emissionen unabhängig voneinander bestimmt. Die gasförmigen Emissionen wurden mit einem Flammenionisationsdetektor und einem Mehrkomponentenanalysator kontinuierlich gemessen und aufgezeichnet. Die Partikelmessung erfolgte mittels gravimetrischer Offline-Methode. Die Probenluft wurde isokinetisch aus dem Abgasstrom entnommen und die Partikel auf Quarzfaser-Planfiltern abgeschieden. Die geringe Masse von Ablagerungen in der Entnahmesonde wurde nach der letzten Probenahme über eine Spüllösung bestimmt und in den Ergebnissen ebenfalls berücksichtigt.

Zeitgleich zu den Emissionsmessungen wurden dynamische Schiffsdaten und Motorsteuerungsdaten wie Geschwindigkeit, Treibstoffverbrauch und Motorlast aufgezeichnet. Aus den beobachteten Luftschadstoff- bzw. Treibhausgaskonzentrationen und den Betriebsdaten des Motors werden Emissionsraten (z. B. pro Zeiteinheit) und drehzahl- oder leistungsabhängige Emissionsfaktoren abgeleitet.

### 4 Ergebnisse

Während der Real-Driving-Messung wurde kein Einfluss auf die Fahrweise genommen. Die begleiteten Fahrten auf dem Rhein sind von einer annähernd konstant gehaltenen Beanspruchung der Antriebsmotoren, im Sinne gleichmäßiger Drehzahlen, gekennzeichnet. Bedingt durch die Fahrtrichtung mit der bzw. gegen die Strömung läuft der Motor in zwei Lastbereichen. Auf den beobachteten Fahrten ist dieser Unterschied jedoch gering, sodass keine deutlichen Unterschiede in den Emissionen zu erwarten waren. Bild 1 zeigt die Emissionen von Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO<sub>x</sub>), Kohlenwasserstoffen (HC) und Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) in Form von leistungsbezogenen Faktoren in der Tal- und in der Bergfahrt. Markant sind eine verkehrsbedingte Langsamfahrt mit anschließender Beschleunigung zu Berg im Bereich der Loreley (um Rhein-km 555) sowie Halte bei Rhein-km 599 und 612, wo das Messteam abgesetzt wurde. Bei Rhein-km 555 ist zu erkennen, wie die NO<sub>x</sub>- und HC-Emissionsfaktoren in der Langsamfahrt erhöht und in der Beschleunigung geringer sind. Grund dafür ist, dass deren Ausstoß pro Kilowattstunde bei niedriger Motordrehzahl am höchsten ist (vgl. Walz 2019). Im Allgemeinen scheinen die Emissionsfaktoren unabhängig von der Fahrtrichtung zu sein. Bei den Kohlenwasserstoffen gibt es eine geringe Differenz zwischen Berg- und Talfahrt, wobei deren Konzentration zu Beginn der Talfahrt messtechnisch bedingt etwas unterschätzt wurde. Eine zweistufige Drehzahlreduktion am Ende der Bergfahrt führt zu einem leichten HC- und NO<sub>x</sub>-Anstieg. Da seit 2011 die Verwendung von schwefelfreien Kraftstoffen vorgeschrieben ist, wird nahezu kein Schwefeldioxid mehr ausgestoßen. Die punktuell gemessenen Partikelemissionen liegen jeweils zwischen 0,05 und 0,10 g/kWh.

Die genannten Ergebnisse sind vorläufig, da sie auf einer vereinfachten Annahme in der Bestimmung des Abgasvolumenstroms basieren. Eine genauere Betrachtung dessen sowie Aspekte der Schiffsführung sind Gegenstand anschließender Analysen.

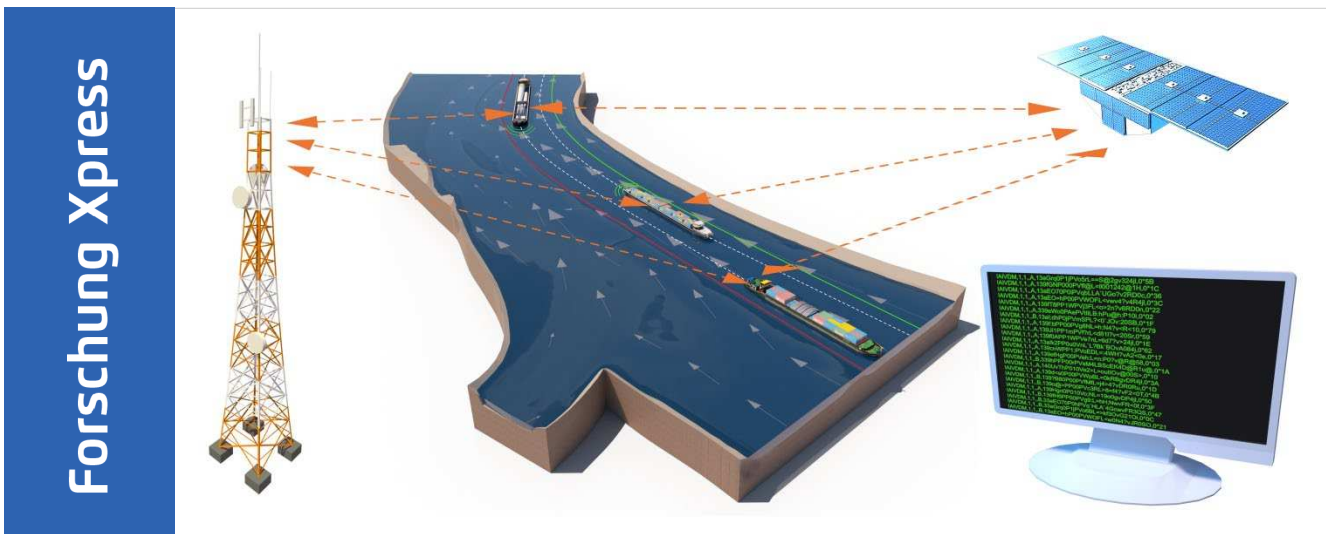


#### Literatur:

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.

Weber, D. (2020): Minderung verkehrsbedingter stofflicher Belastungen in Luft, Wasser und Boden – Betriebliche und technische Optimierungen in der Binnenschifffahrt, BAW (Hg): Forschung Xpress 58/2020.

Bild 1: Real-Driving-Emissionsfaktoren eines Binnenschiffsmotors.



## AIS-basierte Bewertung des Schiffsverkehrs

Datenerfassung – Mustererkennung – Bewertung

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Ziel der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen in der Binnenschifffahrt ist es, den Schiffsführer in schwierigen Verkehrssituationen sowie bei der Optimierung von Fahrroute und Fahrgeschwindigkeit zu unterstützen. Damit werden die Leichtigkeit und Sicherheit bzw. durch eine energieeffiziente Fahrweise die Wirtschaftlichkeit und Konkurrenzfähigkeit der Binnenschifffahrt erhöht. 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 einen Computer eine äußerst anspruchsvolle Herausforderung dar.

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 Analyse von statischen und dynamischen 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 des Bundes (WSV)

Mit der geplanten zentralen Datenbank erhalten das BMDV, die Oberbehörden sowie die Dienststellen der WSV einen einfachen Zugriff auf statistische Auswertungen von Verkehrsdaten, die für vielfältige wasserbauliche und verkehrstechnische Fragestellungen genutzt werden können. Neben dem

**Auftragsnummer:**

B3953.04.04.70012

**Auftragsleitung:**

Tarek Beck  
tarek.beck@baw.de

**Auftragsbearbeitung:**

Karim Böttger  
karim.boettger@baw.de

**Laufzeit:**

2016 bis 2023

Einsatz der Software zur adressierten, automatisierten Erkennung und Bewertung von Verkehrssituationen oder den bereits in früheren Projekten behandelten Fragestellungen, wie z. B. die Ermittlung von Flottenstruktur, Liegestellennutzung und Uferabständen, wurde aktuell mit einer neu entwickelten Methode zur Auswertung der Empfangsabdeckung gezielt auf die Anforderungen der GDWS, Bereich Verkehrstechniken, 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 für eine automatisierte, statistisch basierte Analyse der AIS-Daten entwickelt.

Zur Erweiterung der Datenbasis 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 durch KI-Modelle ermöglicht werden. Auf der Grundlage einer direkten Datenbankschnittstelle und projektspezifischer Auswertungen wird somit ein Werkzeug entwickelt, mit welchem sich über einfache statistisch basierte Auswertungen hinaus eine Mustererkennung sowie die Bewertung von Sicherheit und Leichtigkeit durchführen lassen.

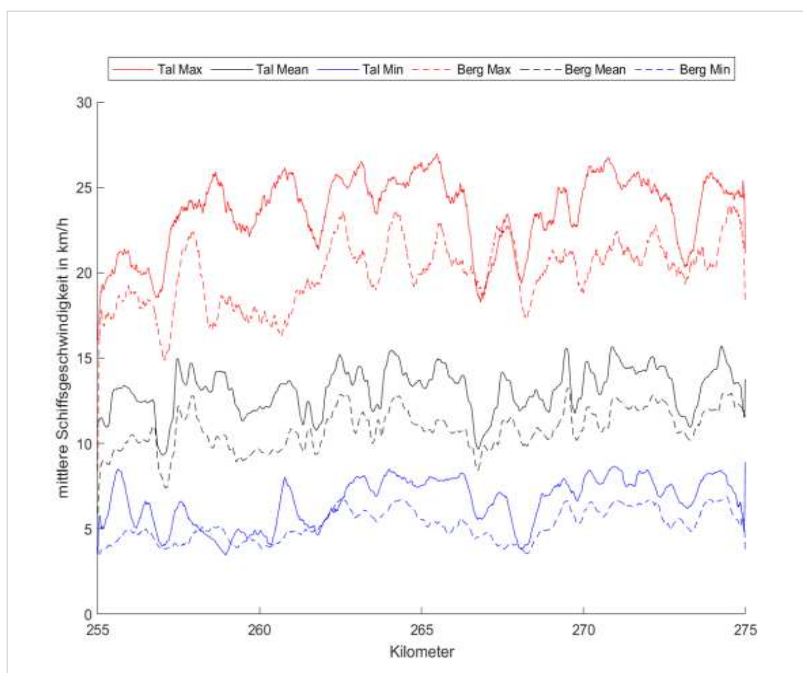
### 4 Ergebnisse

Bild 1 zeigt eine exemplarische statistische Auswertung von AIS-Daten von Güterschiffen in einer Teststrecke mit Bezug zu Schiffsgeschwindigkeiten zu Berg und zu Tal. Zusätzlich zu den Schleusungszeiten einschließlich der Ein- und Ausfahrtzeiten wurden die Auswertungen um streckenspezifische Passagezeiten erweitert. Des Weiteren wurde der Algorithmus zu Erkennung von Begegnungen und Überholungen verbessert. Neben diesen Entwicklungen wurde der Bestand von AIS-Daten stetig erweitert.

Einer der Hauptpunkte in diesem Berichtszeitraum war die grundsätzliche Verbesserung der Performance sämtlicher bereits vorhandener Analysen. Kleinere nutzerspezifische Anpassungen zur Verbesserung der Handhabung der Software wurden im Zuge von projektspezifischen Anfragen ebenfalls umgesetzt.

Neben der grundsätzlichen Verbesserung der Performance der AIS-Software wurden Routinen des BAW-Verkehrssimulationsprogramms ShTraSim (Ship-Traffic-Simulation) entwickelt und angewendet. Mit diesen lassen sich AIS-Daten in Bezug auf Flottenstruktur, Verkehrsaufkommen, Weg-Zeit-Verhalten, Schleusenbetrieb und Wartezeiten der Güterschiffahrt über einen längeren Zeitraum abbilden.

Neben der permanenten Erweiterung der Datengrundlage und der Verbesserung der Performance sind erste Testauswertungen bezüglich Mustererkennung geplant.



#### Literatur:

Feierfel, 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 Rheinschiffahrt (2015): Ausrüstungsverpflichtung mit Inland AIS Geräten und Inland ECDIS Geräten.

Bild 1: Beispielhafte statistische Auswertung der AIS-Daten anhand der Schiffsgeschwindigkeit einer Teststrecke.



## 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. Im Rahmen dieser Entwicklung erhält die BAW den 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) mit dem Zweck erweitern soll, 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:

Dr. Jacek A. Jankowski  
 jacek.jankowski@baw.de

#### Auftragsleitung Uni Trient/ Auftragsbearbeitung:

Prof. Michael Dumbser  
 michael.dumbser@unitn.it  
 Cristian Brutto  
 cristian.brutto@unitn.it

#### Laufzeit:

2019 bis 2023



### 3 Untersuchungsmethoden

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 Schiffsgeometrie angenommen.

**Arbeitspaket 3 (2021–22):** Erweiterung auf realistische Schiffsgeometrien. Software-Interface zum Import der Schiffsgeometrie 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

Bis Ende des Jahres 2021 wurden die Arbeitspakete 1 und 2 bereits einige Punkte aus dem Arbeitspaket 3 ausgeführt. In dieser Phase des Projekts wurde ein neues, semi-implizites Finite-Volumen-Verfahren auf versetzten Netzen für die numerische Lösung von Fluid-Struktur-Wechselwirkungsproblemen entwickelt. Dabei wurde insbesondere die Wechselwirkung von frei schwimmenden Schiffen mit der umgebenden Strömung realisiert.

Der bisher entwickelte Ansatz zur Lösung des geltenden strömungsmechanischen Systems partieller Differentialgleichungen basiert auf der Annahme des hydrostatischen Drucks. Das Schiff selbst wurde mit vereinfachter Geometrie und als starrer Körper mit sechs Freiheitsgraden betrachtet und seine Dynamik wurde anhand eines Systems gewöhnlicher Differentialgleichungen erster Ordnung beschrieben.

Die Differentialgleichungssysteme der Strömung und Schiffsbewegung kommunizieren über die nichtlineare Volumenfunktion und das (hydrostatische) Druckfeld mittels eines effizienten iterativen Verfahrens. Prozesse des Überflutungs- und Trockenfallens sind ein Bestandteil dieses nichtlinearen Algorithmus, wodurch eine wichtige Voraussetzung für die Anwendung des Verfahrens für natürliche Fließgewässer erfüllt wird. Die Masenerhaltung und Impulserhaltung sind sowohl global als auch zu allen Zeitpunkten gewährleistet.

Die Rechengenauigkeit wurde mithilfe von Subgrid-Techniken verbessert, die sowohl für die Gewässerbettsohle, als auch auf die Geometrie des Schiffes angewendet wurden (Casulli 2011). Diese Techniken erlauben eine für die Praxis wichtige Flexibilität zwischen der Genauigkeit und der Rechengeschwindigkeit. Ein wichtiger Teil der Modellentwicklung, die von räumlichen 1D- über 2Dxz- und 2Dxy-Mittelungen bis zum vollen 3D-Fall verlaufen, ist die Validierung mit theoretischen Lösungen anhand vereinfachter Beispiele.

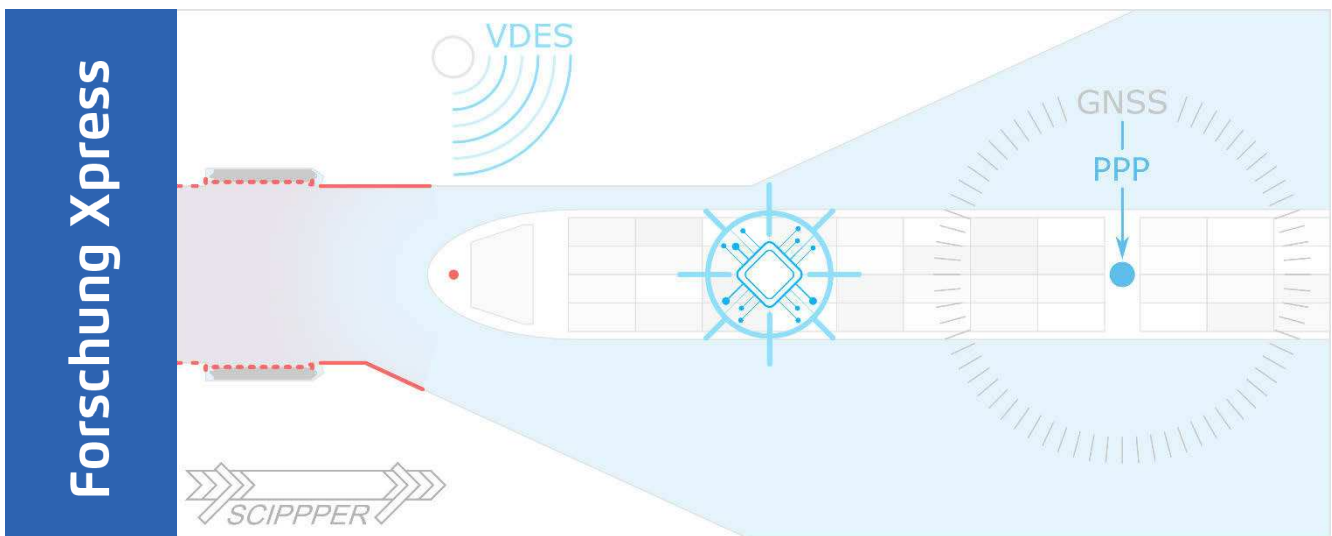
Weitere Arbeiten betrafen die softwaretechnischen Aspekte zwecks Vorbereitung für die Ausführung auf Hochleistungsrechnern, vor allem die konsequente Anwendung von Fortran (bisher Matlab), die Generalisierung der entwickelten Software und die vollständige Verifikation. Insbesondere wurde das Modul für die Dynamik des Schiffes mittels analytischer Lösungen für schwimmende Körper überprüft.

Die meisten bisherigen Entwicklungen wurden im Detail in der Master-Thesis von Brutto (2020) beschrieben. Aktuell wird an einer Veröffentlichung gearbeitet, die neben der mathematischen Theorie auch die formelle Verifikation des entwickelten Verfahrens beinhalten soll.

#### Literatur:

Casulli, Vincenzo; Stelling, Guus S. (2011): Semi-implicit subgrid modeling of three-dimensional free-surface flows. In: Int. J. Num. Meth. in Fluids, 2011 (67), 441–449.

Brutto, Cristian (2020): Simplified hydrostatic model for ship-river interaction. MSc Thesis, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica, Università degli Studi di Trento.



## Projekt SCIPPER

### Schleusenassistenzsystem 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 Technologien 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 m breite Schleusenkammer einfährt. Die Zeit, die das Schiff für die Schleuseneinfahrt 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 des Schiffsverkehrs und zum anderen auf eine Beschleunigung des gesamten Schleusungsvorganges ab.

Technologische Basis für das neue Assistenzsystem 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 durch seine Übertragungskapazität neue Perspektiven für die Binnenschifffahrt. Daher 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

#### Auftragsbearbeitung:

Miriam Leutz  
 miriam.leutz@baw.de

#### Laufzeit:

2019 bis 2022

#### Projektseite:

[www.scippper.de](http://www.scippper.de)

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

Ausgehend von den Ergebnissen im Projekt SCIPPER entstehen diverse Nutzungsmöglichkeiten für die WSV. So kann z. B. die Zuverlässigkeit des Assistenzsystems aus erster Hand beurteilt oder die störungsfreie Vereinigung von VDES-Infrastruktur und der bestehenden Infrastruktur für das Automatic Identification System (AIS) vorbereitet werden. Letzteres 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. Neben Schleuseneinfahrten kann das System auch bei der Passage von Brücken unterstützen und so die Anzahl von Brückenanfahrten verringern. Hierdurch werden die damit einhergehenden Kosten für die Binnenschifffahrt und für die WSV verringert. Darüber hinaus liefern die Arbeiten zum VDES wertvolle Erkenntnisse für den zukünftigen Infrastrukturausbau.

## 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 soll die Funktion des Reglers und des Mensch-Maschine-Interfaces validiert werden, bevor die Installation auf einem realen Schiff vorgenommen wird. Diese Aspekte des Assistenzsystems werden von den Projektpartnern Argonics GmbH und in-innovative-navigation GmbH entwickelt. Dies umfasst einen Sensorsimulator für Nahbereichsradar und Laserscanner in Form einer Erweiterung des Schiffsführungssimulators. Das System wird mit Daten aus dem Schiffsführungssimulator und dem Sensorsimulator beschickt. Hiervon leitet es Steuerbefehle für Ruder, Hauptmaschine und Bugstrahlruder ab und sendet diese an den Simulator zurück. Der Schiffsführer wählt lediglich die gewünschte Liegeposition und überwacht den Vorgang. Im Notfall kann er 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 arbeiten die Projektpartner Alberding GmbH, das Institut für Kommunikation und Navigation des DLR, die Fachstelle der WSV für Verkehrstechnik (FVT) sowie die Weatherdock AG an der PPP-Auswertung sowie der VDES-Kommunikation. Letztere muss zudem hinsichtlich ihrer Kompatibilität mit der bestehenden AIS-Infrastruktur getestet und optimiert werden. Zuletzt werden beide Teilsysteme in einer gemeinsamen Installation auf einem realen Schiff im Rahmen von Demonstrationsfahrten geprüft und bewertet.

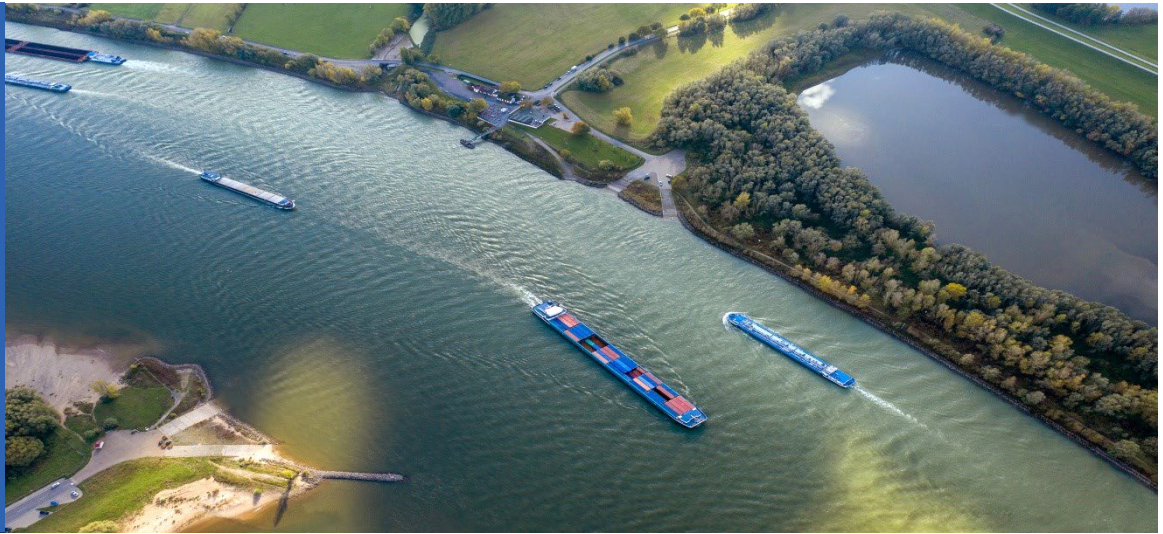
## 4 Ergebnisse

In der Vergangenheit wurden Anforderungen an das System definiert, die Systemarchitektur bestimmt und Schnittstellen spezifiziert. Weiterhin wurden verschiedene Nahbereichssensoren und GNSS-Empfänger im Rahmen von initialen Testfahrten auf ihre Eignung hin untersucht. Für die Arbeiten am Schiffsführungssimulator wurde ein Sichtmodell des Fahrtreviers Koblenz erstellt. Dieses umfasst Rhein und Mosel in einem Radius von circa 10 km vom Deutschen Eck. Zentrales Element ist die Staustufe Koblenz sowie umliegende Stadtgebiete von Koblenz. Für Schleusen- und Brückenbauwerke sowie diverse charakteristische Landmarken, wie beispielsweise das Deutsche Eck oder die Festung Ehrenbreitstein, wurden 3D-Modelle anhand von Plänen erstellt und mit Animationen für Beleuchtungseffekte versehen. Als Eingangsdaten wurden ein digitales Geländemodell, Orthofotos, digitale Bundeswasserstraßenkarten, offizielle IENC-Karten und Bebauungspläne herangezogen. Ein Strömungsmodell ist in Arbeit. Für die Befahrung des erstellten Fahrtreviers wurden neue Schiffsmodelle angefertigt und fahrdynamisch kalibriert. Der derzeitige Stand des Sichtmodells ermöglicht das Ein- und Ausfahren aus der Schleuse Koblenz. Bild 1 zeigt dies exemplarisch anhand der Einfahrt des üGMS Vigilia. Aktuell wird an der Implementierung der Schleusenfunktion gearbeitet, um schließlich den gesamten Schleusungsprozess am Simulator abbilden zu können.



Bild 1: Einfahrt des üGMS Vigilia in die Schleuse Koblenz.





## Entwicklung eines Verkehrssimulationsmodells auf Binnenwasserstraßen

Untersuchung des Verkehrsflusses mit KI-Anwendung

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Untersuchung von Verkehrsströmen ist eine wichtige Komponente für verkehrliche und wirtschaftliche Untersuchungen an Binnenwasserstraßen. Verkehrssimulationsmodelle ermöglichen es, auch unbeobachtete Verkehrsflüsse zu analysieren und zukünftige Entwicklungen zu prognostizieren. Als Beispiele sind Engstellenanalysen sowie Untersuchungen zu Flottenstrukturen, Verkehrskapazitäten und Transportmengen zu nennen. Eine Veränderung der Flottenstruktur kann durch unterschiedliche Faktoren begründet sein. Dies sind zum einen langzeitige Entwicklungen, wie die Tendenz zu größeren Schiffen oder mögliche Anpassungen an klimatische Änderungen und zum anderen kurzzeitige Einflüsse, wie extreme Wetterlagen und Wasserstände oder wirtschaftliche Konjunkturphasen. Verkehrliche Engstellen können durch Havarien, Baumaßnahmen, aber auch Fehltiefen verursacht sein. Alle diese Faktoren wirken sich auf die verkehrliche Leistungsfähigkeit der Wasserstraße und die Transportmengen aus.

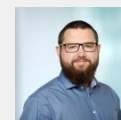
Das vorliegende FuE-Vorhaben „Entwicklung eines Verkehrssimulationsmodells auf Binnenwasserstraßen“ befasst sich mit der Entwicklung eines Verkehrssimulationsmodells für den Niederrhein. Die Fahrwasserbreite und Verkehrsdichte im Projektgebiet erfordern die Simulation eines nicht-spurbundenen Verkehrs und stellen zentrale Parameter für die Modellentwicklung dar.

In Kooperation mit der „Professur für Ökonometrie und Statistik, insbesondere im Verkehrswesen“ der TU Dresden wird das Mikrosimulationsmodell für Binnenwasserstraßen PERSIST (*Performant Simulation of Inland Ship Traffic*) entwickelt, welches vorrangig am Niederrhein, darüber hinaus aber auch an anderen Wasserstraßen angewendet werden soll. Ein Vorgängermodell von PERSIST wurde im Rahmen des Expertennetzwerks des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr vom genannten Lehrstuhl entwickelt.

#### Auftragsnummer:

B3953.04.04.70015

#### Auftragsleitung:



Hauke Stachel  
 hauke.stachel@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Fabian Hart  
 fabian.hart@tu-dresden.de

#### Laufzeit:

2019 bis 2023



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

Durch die Weiterentwicklung des Verkehrssimulationsmodells können auch an breiten, hochfrequentierten Abschnitten Breitenengstellen 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 erhält die WSV frühzeitig Informationen über potentielle verkehrliche Engstellen, die die Wirtschaftlichkeit der Binnenschifffahrt einschränken könnten. Die Verkehrssimulation ist darüber hinaus ein Werkzeug, mit dem sich z. B. im Rahmen einer Schleusenzulaufsteuerung voraussichtliche Ankunftszeiten (ETA = estimated time of arrival) von Schiffen an Schleusen ermitteln lassen.

## 3 Untersuchungsmethoden

Der Verkehrssimulator PERSIST beruht auf einem modularisierten Ansatz, um ein paralleles Entwickeln und späteres Austauschen der einzelnen Module zu ermöglichen. Zwei wesentliche Sub-Module stellen die *Longitudinal* und die *Lateral Control Policy* dar, welche für das longitudinale und das laterale Manövrieren eines Schiffes zuständig sind. Beide Module nutzen *Reinforcement Learning* (RL), ein Teilbereich von *Machine Learning*, um das Schiff möglichst sicher und komfortabel zu navigieren. *Reinforcement Learning*, welches in diesem Fall auf dem Einsatz neuronaler Netze beruht, hat den Vorteil, auch komplexe Verkehrsdynamiken simulieren zu können, inklusive notwendiger Entscheidungen wie zum Beispiel zum Überholen. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die resultierenden trainierten Modelle zur Ausführung sehr wenig Rechenzeit benötigen, was hinsichtlich der rechenintensiven Komplexität des Verkehrssimulators ein wesentlicher Faktor ist. Sowohl die *Longitudinal* als auch die *Lateral Control Policy* beruhen auf dem *Deep Deterministic Policy Gradient Algorithm* (Lillicrap et al. 2015) zum Trainieren der neuronalen Netze. Für das Training des selbstlernenden Systems ist die Modellierung der Belohnungsfunktion von entscheidender Bedeutung. Diese wurde so konzipiert, dass Sicherheitsabstände zu anderen Schiffen und Ufern eingehalten werden sollen sowie dass das Schiff möglichst komfortabel, d. h. unter Berücksichtigung weiterer mechanischer Randbedingungen, fährt. Beide Module nutzen eine Repräsentation ihrer Umgebung, in der andere Schiffe sowie die Wasserstraße als Merkmale modelliert werden. Diese Merkmale berücksichtigen die Flussgeometrie, Strömungsdaten, Abmessungen und dynamischen Eigenschaften von anderen Schiffen.

## 4 Ergebnisse

Mit dem derzeitigen Stand des Simulators lassen sich bereits komplexe Begegnungs- und Überholsituationen simulieren. Bild 1 zeigt beispielhaft ein Überholmanöver eines Schiffes, während gleichzeitig zwei Schiffe entgegenkommen. Dargestellt ist ein Ausschnitt des Niederrheins, bei dem die Wassertiefe farblich codiert ist. Die Wassertiefen dienen als Begrenzung der verfügbaren Wasserfläche (abhängig vom Squat des Schiffes) und stellen gleichzeitig die Eingangsdaten der neuronalen Netze dar. Die *Lateral Control Policy*, welche für jedes Schiff separat trainiert wird, navigiert die Schiffe so, dass genügend Sicherheitsabstand zu seichtem Wasser sowie zu anderen Verkehrsteilnehmern eingehalten wird. Die *Longitudinal Control Policy* sorgt dafür, dass bei einer Schiff-Folgefahrt genügend Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Schiff eingehalten wird. Als nächste Schritte sollen die Fahrdynamik der Schiffe auf der Wasserstraße mit verbesserten Methoden präzisiert und das individuelle Verhalten der „Schiffsführer“ modelliert werden.

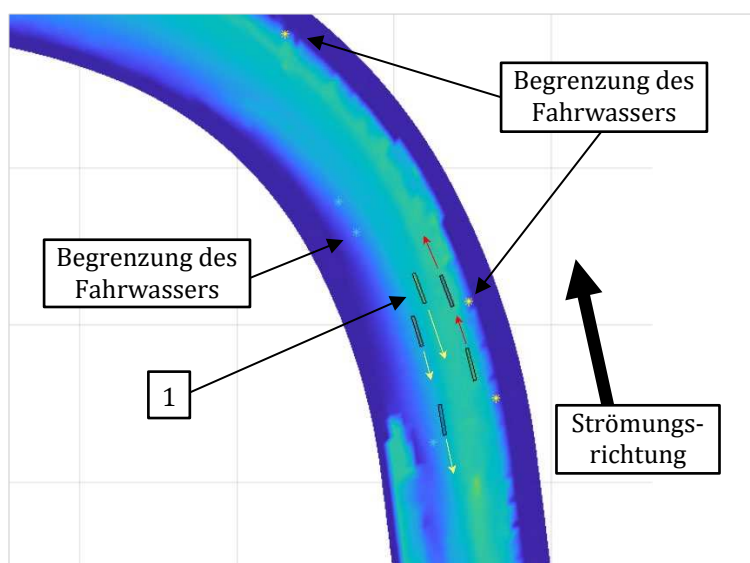


Bild 1: Überholmanöver eines Schiffes (1) bei gleichzeitigem Entgegenkommen von zwei Schiffen am Niederrhein mit Einfärbung der Wassertiefe mit Fahrwasserbegrenzungen.

### Literatur:

Lillicrap, T. P.; Hunt, J. J.; Pritzel, A.; Heess, N.; Erez, T.; Tassa, Y.; Silver, D.; Wierstra, D. (2015): Continuous Control with Deep Reinforcement Learning. preprint arXiv:1509.02971.



## 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. Einer der Treiber der Automatisierung 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. Auch eine Entlastung des Schiffsführers würde zur Erfüllung dieser Erwartung beitragen.

Das übergeordnete Ziel des hier bearbeiteten Projektes ist die Entwicklung einer echtzeitfähigen, fahrdynamischen Simulationssoftware als Teil eines Virtuellen Testfelds. Ein solches Testfeld bietet Möglichkeiten, sicher und in einer kontrollierten Umgebung ein Schiff durch einen Flussabschnitt zu steuern. Dabei können dann 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 Testfelds können die Randbedingungen aus Sicht einer automatisierten Binnenschifffahrt für verschiedene Themen identifiziert bzw. definiert werden. So kann z. B. auch eine Beratung der WSV bezüglich der Infrastruktur wie zusätzliche oder angepasste Sendeanlagen für

#### Auftragsnummer:

B3953.04.04.70016

#### Auftragsleitung:



Dr. Alexander Bernath  
 alexander.bernath@baw.de

#### Laufzeit:

2019 bis 2022

AIS (Automatic 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 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, an welchem Ort sich das Schiff nach einer gewissen Zeit befindet, in Echtzeit errechnet. Die verschiedenen Fahrweisen unterschiedlicher Schiffsklassen bei variierenden Tiefgängen können eine große Streuung der Kurslinien verursachen. 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. 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 werden und z. B. eine mit AIS-Daten aufgezeichnete Situation störungsfrei bewältigt werden.

### 4 Ergebnisse

Die bisherigen Arbeiten konzentrierten sich auf die Bereitstellung von Daten für die Erstellung einer virtuellen Testumgebung. Hierzu wurden Daten aus IENC-Karten mit Daten der Wasserstraße, u. a. Strömungs- und Tiefendaten, verschnitten. Zusätzlich können Verkehrsdaten geladen und visualisiert werden. Bild 1 demonstriert dies für einen Abschnitt des Rheins bei Kilometer 605. Enthalten sind die Lage der Fahrrinne, Verkehrsschilder, Hektometer und die Flussachse. Außerdem wurde die Karte mit einer räumlichen Verteilung der Wassertiefe aus einer 2D-HN-Simulation hinterlegt. Weitere Ebenen mit z. B. Strömungsgeschwindigkeiten lassen sich ebenfalls zuschalten. Dargestellt ist zudem eine aus historischen AIS-Daten extrahierte Verkehrssituation. Die Zusammenführung der gezeigten Daten ist ein wichtiger Schritt für die Erstellung einer virtuellen Trainingsumgebung für maschinelles Lernen. Auf Basis der Daten können z. B. gerasterte Eingangsdaten für neuronale Netze generiert werden, die Informationen über die Wasserstraße und das Umfeld des Schiffs beinhalten. Um während des Trainings auch die Fahrdynamik der Binnenschiffe adäquat abzubilden, wird die Software FaRAO aktuell um eine Fahrdynamik erweitert, die der des Binnenschiffssimulators der BAW entspricht. Dies stellt die Übertragbarkeit der Ergebnisse für weitere Versuche am Simulator sicher.

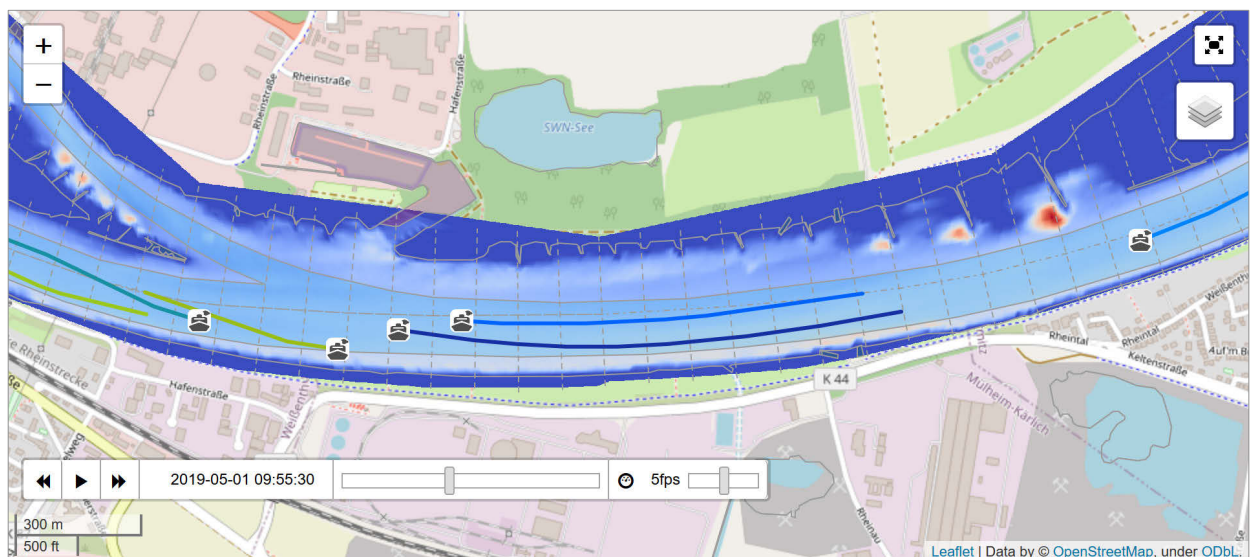


Bild 1: Kartendarstellung für einen Abschnitt des Rheins bei Kilometer 605 mit Überlagerung von Wasserstraßen-Infrastrukturdaten, räumlicher Wassertiefenverteilung und Verkehrsdaten





## Binnenschiffsemissionen (BinEm)

### Entwicklung eines Verfahrens zur Berechnung von Binnenschiffsemissionen

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die vom Verkehr emittierten Treibhausgase und Luftschadstoffe wie CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> und Rußpartikel tragen wesentlich zur anthropogenen Gesamtemission bei. Im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsvorhabens von BAW und Universität Duisburg-Essen (Institut Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme, ISMT) wird ein Verfahren zur Berechnung der Schadstoffemissionen von Binnenschiffen entwickelt, um Beiträge aus der Binnenschifffahrt mit denen anderer Verkehrsträger vergleichen sowie Emissionsminderungsmaßnahmen ableiten und bewerten zu können. Das zu entwickelnde Verfahren wurde in Noß und Lantermann (2020) sowie ein zugehöriges Modul zur Widerstandsberechnung in Noß und Kossmann (2021) erläutert. Neben dem hydraulischen Widerstand hängen die leistungsbezogenen Emissionen eines Schiffs bei der Fahrt maßgeblich von der Propulsionsgüte ab. Für die Propulsionsgüte wird auf Basis eines numerischen Verfahrens ein Propulsionsmodell erarbeitet. Zur Validierung der numerischen Verfahren für Widerstand und Propulsion sowie zur Verknüpfung mit Real-Driving-Messungen werden in den Versuchsanlagen des Entwicklungszentrums für Schiffstechnik und Transportsysteme (DST) in Duisburg Modellversuche durchgeführt.

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

Mit der im Rahmen einer Forschungskoooperation mit dem ISMT entwickelten Software können 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 Luftschadstoffemissionen abzubilden und den Erfolg von Emissionsminderungsmaßnahmen zu bewerten. Auf Basis dieser Ergebnisse können Entscheidungsträger im BMDV und in der GDWS erfolgversprechende Maßnahmen zur Minderung von Binnenschiffsemissionen gezielt ableiten, geltende Vorschriften anpassen oder neue erlassen.

#### Auftragsnummer:

B3953.04.04.70017

#### Auftragsleitung:

Dr. Christian Noß  
 christian.noss@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Benjamin Kossmann  
 benjamin.kossmann@uni-due.de

#### Laufzeit:

2019 bis 2022



### 3 Untersuchungsmethoden

Analog zu den empirischen und numerischen Widerstandsberechnungen erfolgt im darauf aufbauendem Programmteil die Berechnung der benötigten Propulsionsleistung. Hierfür wird das im Widerstandsmodell erarbeitete numerische Gitter um Propulsoren und weitere Anhänge wie Abstromplatten, Ruder und Düsen erweitert. Dieses Setup ermöglicht die Simulation eines Schiffs unter realen Fahrbedingungen und die Abbildung von Sog und Nachstrombedingungen. Wie in den Widerstandssimulationen liegt auch hier ein besonderes Augenmerk auf der Flachwasserproblematik und dessen Einfluss auf die Propulsionsleistung. Zur Verbesserung und Validierung der numerischen Modelle werden aktuell Modellversuche im DST und Real-Driving-Messungen an Bord von Schiffen von der BAW durchgeführt. Die detaillierten Modellversuche und gestaffelten numerischen Simulationen sind notwendig, um die komplizierten Zusammenhänge zwischen Widerstand und benötigter Propulsionsleistung bei verschiedenen Ladezuständen, Abladetiefgängen und Fahrprofilen korrekt berechnen und in der Emissionsmodellierung berücksichtigen zu können.

### 4 Ergebnisse

Der im ersten Programmteil berechnete Schiffswiderstand ist Voraussetzung für den Propulsionsteil. Die Ermittlung von Schub, Drehmoment und Wirkungsgrad des frei angeströmten Propellers erfolgt für häufig verwendete Propeller-Düsen-Konfigurationen an Binnenschiffen. Charakteristische Propellerfreifahrtprogramme werden hierfür einer Datenbank entnommen. Werte für Sog und Nachstrom, die den Einfluss des Schiffs auf den Propeller beschreiben, werden in Abhängigkeit der Propelleranzahl mithilfe der numerischen Propulsionsimulation bestimmt. Die für die Geschwindigkeit durch das Wasser benötigte Drehleistung PD und die für die Emissionsberechnung bestimmende Leistung am Antriebsflansch PB wird mit der Formel

$$P_B = R_T \cdot \frac{v_s}{\eta_M \cdot \eta_0 \cdot \eta_H \cdot \eta_R}$$

berechnet (Kornev 2009).  $R_T$  beschreibt den Gesamtschiffswiderstand und  $v_s$  die Geschwindigkeit durch das Wasser.  $\eta_M$  ist der mechanische Wirkungsgrad.  $\eta_0$ ,  $\eta_H$ ,  $\eta_R$  kennzeichnen den Freifahrtwirkungsgrad, den Schiffseinflussgrad und den Gütegrad der Anordnung. Die so berechneten Leistungsdaten können über charakteristische Motorenlinien verschiedener Motorenhersteller sowie über die bereits ermittelten Propellerlinien auf den Treibstoffbedarf und die Emissionen der jeweiligen Schiffstypenklasse übertragen werden.

Mittlerweile liegen numerische Widerstandssimulationen (Bild 1a) von allen an der Universität untersuchten Schiffsgeometrien vor. Entsprechende numerische Propulsionsimulationen werden aktuell durchgeführt. Das oben beschriebene Propulsionsberechnungsmodell wurde programmiert und wird derzeit validiert. Aktuelle Modellversuchsmessungen mit dem Fokus auf Flachwasserbedingungen eines Gütermotorschiffs werden zur Validierung der numerischen Simulationen und empirischen Verfahren herangezogen (Bild 1b).

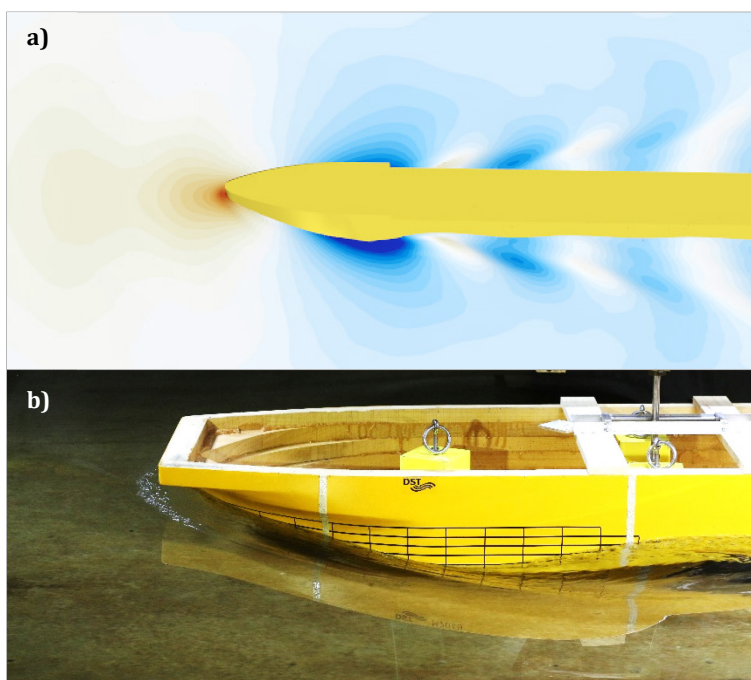


Bild 1: Auslenkung der freien Oberfläche am Beispiel eines (a) numerischen Modellversuchs (Farben kennzeichnen die Auslenkung der Wasseroberfläche und den Schiffsrumpf) und eines (b) gegenständlichen Modellversuchs.

#### Literatur:

Kornev, N. (2009): Propellertheorie, Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik.

Noß, C.; Kossmann, B. (2021): Binnenschiffsemissionen (BinEm) – Entwicklung eines Verfahrens zur Berechnung von Binnenschiffsemissionen, BAW (Hg.): Forschungskompodium 2020.

Noß, C.; Lantermann, U. (2020): Binnenschiffsemissionen (BinEm) – Entwicklung eines Verfahrens zur Berechnung von Binnenschiffsemissionen, BAW (Hg.): Forschung Xpress 16/2020.



## Verkehrswirtschaftliche Analysen in der Binnenschifffahrt

Im Rahmen des BMDV-Expertennetzwerks „Wissen – Können – Handeln“

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Der steigende Bedarf an verkehrsträgerübergreifenden Analysen zu den Folgen verkehrlicher Einschränkungen ist eine Erkenntnis der ersten Phase des Expertennetzwerks des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV). Verkehrliche Einschränkungen können dabei vielfältige Ursachen haben, die von Havarien bis zu den Auswirkungen des Klimawandels reichen (Cox et al. 2020). Zur Bündelung dieser Fragestellungen wurde in der zweiten Phase des Expertennetzwerks von 2020 bis 2022 das Themenfeld 6 „Verkehrswirtschaftliche Analysen“ (TF6) konzipiert, in dem das vorliegende Forschungsvorhaben „Verkehrswirtschaftliche Analysen in der Binnenschifffahrt“ eingegliedert ist.

Im TF6 werden die Verkehrsdaten unterschiedlicher Verkehrsträger gebündelt, um zeitnah Veränderungen der Verkehrsströme und verkehrsträgerübergreifende Verflechtungen zu analysieren. Dementsprechend werden verschiedene Datenquellen zusammengeführt, wie Lkw-Mautdaten und AIS-Daten (Automatic Identification System) von Küstengewässern und Binnenwasserstraßen. Neben den verkehrswirtschaftlichen Fragestellungen werden im TF6 auch Beiträge innerhalb des Expertennetzwerks zu Fragen des Klimawandels und der Verkehrsträgeremissionen geliefert.

Für den Verkehrsträger Binnenschifffahrt sollen die AIS-Daten der Binnenwasserstraßen und weitere Verkehrsdaten aufbereitet werden, um ein möglichst umfassendes Bild der Verkehrsbewegungen und Warenströme auf den Wasserstraßen zu erhalten. Für verkehrswirtschaftliche Analysen ist die Abschätzung der Transportkosten in der Schifffahrt eine wesentliche Größe, die entscheidend vom Treibstoffverbrauch bestimmt wird und mithilfe unterschiedlicher Methoden modelliert werden kann.

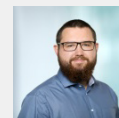
### 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)

Die entwickelten Analysen und Methoden können zur Einschätzung der Wirtschaftlichkeit eines Wasserstraßenabschnitts genutzt werden. Unter anderem können damit die Auswirkungen von Streckensperrungen auf die Verkehrsmengen und die Transportkosten der Binnenschifffahrt analysiert werden.

#### Auftragsnummer:

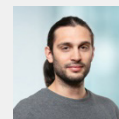
B3953.04.04.70018

#### Auftragsleitung:



Hauke Stachel  
 hauke.stachel@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Julian Bühler  
 julian.buehler@baw.de

#### Laufzeit:

2020 bis 2022

Die AIS-Daten und die entwickelten Analysewerkzeuge einschließlich eines Mikrosimulationsmodells können zudem für Fragestellungen im Zusammenhang mit Verkehrsverflechtungsprognosen und Nutzen-Kosten-Analysen eingesetzt werden. Schließlich wird mithilfe der Ergebnisse aus der Verkehrsdaten-Analyse eine Ergänzung der amtlichen Verkehrsstatistiken angestrebt.

### 3 Untersuchungsmethoden

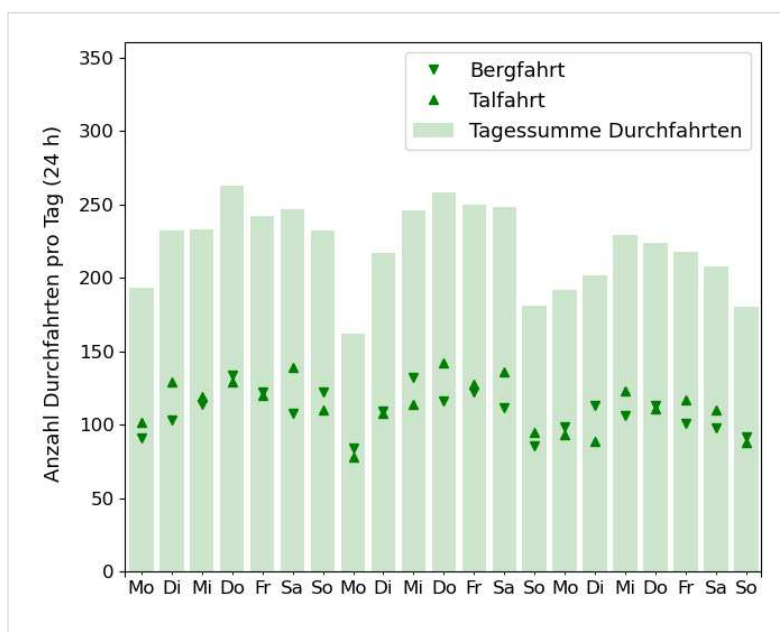
Verkehrsträgerübergreifende Datensätze bilden das Fundament der Untersuchungen. Auf dieser Basis können Schnittstellen und Werkzeuge entwickelt werden, mit deren Hilfe volkswirtschaftliche Untersuchungen für die Verkehrsinfrastruktur durchgeführt werden können. Für die Wasserstraße können mit automatisierten Skripten Durchfahrten durch einen frei wählbaren Querschnitt an einer Wasserstraße mithilfe anonymisierter AIS-Daten ausgewertet werden. Für einen beliebigen Zeitraum können damit u. a. die Anzahl der passierenden Schiffe nach Richtung unterschieden erfasst werden. Weitere querschnitts- und streckenbezogene Verkehrszahlen sollen auf der Grundlage von AIS-Datenanalysen entwickelt werden.

Ziel ist die Abschätzung verkehrswirtschaftlicher Größen wie Transportmengen oder -kosten, um beispielsweise eine Berechnung der Stückgutkosten vornehmen zu können. Verkehrszahlen können zudem auf kurz- oder langfristige Entwicklungen hin untersucht werden, aus denen saisonale Schwankungen oder konjunkturelle Entwicklungen abgeleitet werden können. Wenn ein lückenloser Datensatz im beobachteten Zeitraum gegeben ist, können wirtschaftliche Entwicklungen mithilfe statistischer Untersuchungen zeitnah beschrieben werden.

Neben Auswertungen von in der Vergangenheit produzierten Verkehrsdaten bieten Verkehrssimulationsmodelle die Möglichkeit, hypothetische Ereignisse oder Verkehrseinschränkungen sowie deren Auswirkungen auf Verkehrsströme zu simulieren. Entsprechende Modelle für verschiedene Anwendungsfälle liegen bereits vor bzw. werden derzeit entwickelt.

### 4 Ergebnisse

Als Ergebnisbeispiel ist in Bild 1 eine deskriptive Zeitreihe resultierend aus einer querschnittsbezogenen Auswertung von AIS-Daten dargestellt. Für einen Zählquerschnitt am Niederrhein bei Duisburg (Rhein-km 795,0) werden mithilfe eines AIS-Testdatensatzes die täglichen Durchfahrten innerhalb des gewählten Zeitraumes gezählt und nach Fahrtrichtung unterschieden dargestellt. In der Zeitreihe lässt sich ein zeitliches Muster erkennen. Im Verlauf einer Kalenderwoche ist das Verkehrsaufkommen zu Beginn der Woche am niedrigsten und nimmt zur Wochenmitte den Höchstwert an. Zum Ende der Woche sinkt das Verkehrsaufkommen wieder. Um diesen Trend genauer zu untersuchen, ist allerdings eine größere, statistisch aussagekräftige Datenmenge nötig.



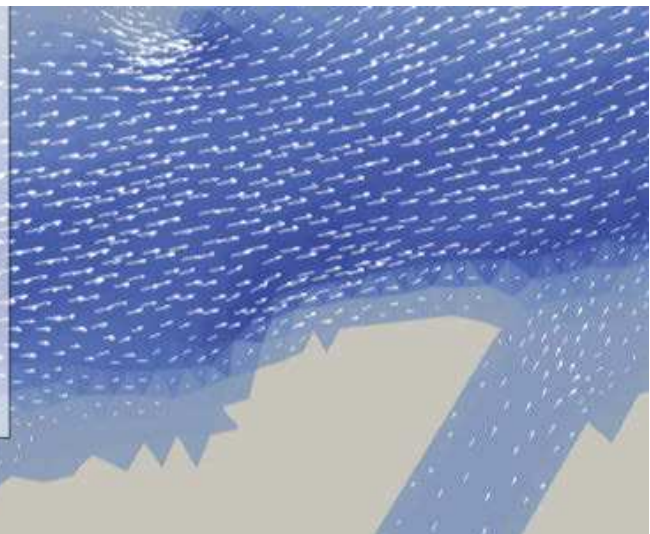
#### Literatur:

Cox, M.; Hänsel, S.; Heibeck, N.; Hindersmann, I.; Nilson, E.; Stachel, H.; Streek, P.; Voß, N.; Walter, A.; Zabrocki, M. (2020): BMVI-Expertennetzwerk „Wissen – Können – Handeln“, Themenfeld 6 Verkehrswirtschaftliche Analysen – Pilotprojekt: Einflüsse von Einschränkungen der Verkehrswege auf den Güterverkehr. Köln (unveröffentlicht).

Bild 1: Beispielhafte deskriptive Zeitreihe der täglichen Durchfahrten durch einen Zählquerschnitt am Niederrhein.



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). 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 Binnenschifffahrtsstraßen.

### 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.

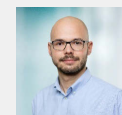
### 3 Untersuchungsmethoden

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 numerische 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 Binnenschifffahrtsstraßen zugeschnitten ist. Durch

#### Auftragsnummer:

B3953.05.04.70006

#### Auftragsleitung:



Martin Utz  
 martin.utz@baw.de

#### Laufzeit:

2018 bis 2025



den fachlichen Austausch mit der Entwicklergemeinschaft von DUNE und einer Zusammenarbeit im Rahmen des Open-Source-Softwareprojekts DuMu<sup>x</sup> (dumux.org) 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.

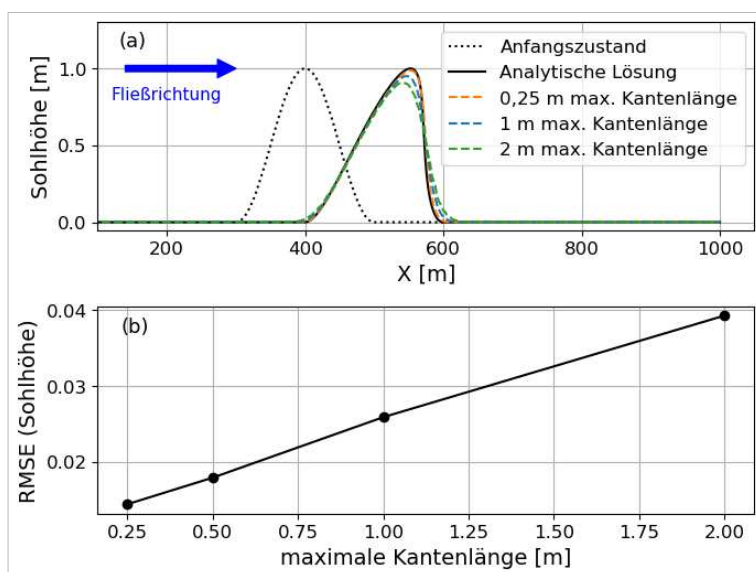
In einem ersten Schritt wird untersucht, inwieweit DUNE-SWF den Praxisanforderungen der BAW gerecht wird. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse bilden eine wichtige Grundlage für die Weiterentwicklung des Verfahrens, die im Rahmen von DuMu<sup>x</sup> stattfindet. Bei der Implementierung des Sedimenttransports 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

Nach der erfolgreichen Implementierung einer ersten Version des Sedimenttransportmodells wurde dieses im vergangenen Jahr erweitert und optimiert. Die aktuelle Version ermöglicht die Simulation von Einkorn-Transport mit den Transportformeln von Meyer-Peter und Müller (1949) sowie Grass (1970). Zudem stellt sie verschiedene Möglichkeiten zur Kopplung des Sedimenttransports mit der Strömungsberechnung bereit. Die Auswirkung der Sekundärströmung kann mithilfe des Ansatzes von Engelund (1974) approximiert werden. Außerdem wurde der Code so erweitert, dass der Gleichungslöser auf einfache Weise ausgetauscht werden kann, was die Optimierung der Performance im Zuge der weiteren Entwicklung deutlich erleichtert.

Neben diesen Weiterentwicklungen wurden wichtige Eigenschaften überprüft, wie beispielsweise die Gitterkonvergenz und die Massenkonservativität. Als Gitterkonvergenz wird das Verhalten bezeichnet, dass die Fehler, die beim Einsatz von numerischen Methoden entstehen, bei einer Verfeinerung des Rechengitters so reduziert werden, dass die numerische Lösung gegen die analytische strebt. Bild 1 (a) zeigt anhand eines eindimensionalen Sedimenttransportproblems (Hudson 2001), dass dies für das implementierte Sedimenttransportmodell zutrifft. Bei einer vergleichsweise groben Auflösung (strukturiertes Dreiecksgitter, maximale Kantenlänge 2 m) sind noch deutliche Abweichungen von der Referenzlösung zu erkennen, die sich mit zunehmender Verfeinerung des Netzes reduzieren. Die systematische Auswertung der Gitterkonvergenz (Bild 1 (b)) zeigt, dass das implementierte Verfahren eine Gitterkonvergenz erster Ordnung hat, d. h., dass sich die Fehler linear mit der Gitterverfeinerung reduzieren. Die Massenkonservativität wurde durch Bilanzierung der Sedimentflüsse über die Modellränder und durch Vergleich mit der Gesamtmasse im System nachgewiesen. Eine weitere wichtige Eigenschaft, insbesondere im Hinblick auf die Langfristsimulation, ist die parallele Performance. Auch hier sind die Ergebnisse der betrachteten akademischen Testfälle vielversprechend, auch wenn diese im Weiteren noch für Anwendungen auf Flussgebietskala bestätigt werden müssen.

Den nächsten Schritt bildet eine vertiefte Untersuchung der Kopplung zwischen Flachwasserströmung und Sedimenttransport inklusive einer genauen Betrachtung des zu lösenden Gleichungssystems. Ziel dieser Untersuchung ist eine Optimierung des Lösungsverhaltens, beispielsweise durch eine geschickte Wahl der Vorkonditionierer.



#### Literatur:

- Grass, A. J. (1970): Initial Instability of Fine Bed Sand. *Journal of the Hydraulics Division*, 96, S. 619–632.
- Engelund, F. (1974): Flow and bed topography in channel bends. *Journal of the Hydraulics, Division ASCE*, 100(11), S. 1631–1648.
- Hudson, J. (2001): Numerical techniques for morphodynamic modelling. University of Reading.
- Meyer-Peter, E.; Müller, R. (1949): Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebs. *Schweizerische Bauzeitung*, 67 (3), S. 29–32.

Bild 1: Gitterkonvergenz für 1D-Sedimenttransport (Hudson 2001); (a) Vergleich analytische und numerische Lösung (b) Root Mean Square Error (RMSE) in Abhängigkeit von der maximalen Kantenlänge in der numerischen Simulation.



## RiverCloud

### UAV/USV-Tandemsystem für Management und Unterhaltung von Wasserstraßen

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Mit Fortschreiten der Digitalisierung liegen hochaufgelöste Geometrie- und Sachdaten unterschiedlichster Art in immer besserer Qualität vor. Die Entwicklungen in der Fernerkundung, wie beispielsweise bei Drohnen oder Laserscannern, sind ein Grund für den starken Fortschritt in diesem Bereich. An Wasserstraßen stoßen allerdings moderne Fernerkundungsverfahren an ihre Grenzen. Hier sind ein trüber Wasserkörper und Bewuchs am Gewässerrand natürliche Hindernisse für geometrische Aufnahmen der Gewässer- und Vorlandtopographie aus der Luft (Weiß 2015).

Ziel von RiverCloud ist die Entwicklung eines kombinierten Systems aus Unmanned-Aerial-Vehicle (UAV) und Unmanned-Surface-Vehicle (USV). Es sollen Geometrie- und Sachdaten erfasst werden, die bisher nicht in ausreichender Genauigkeit aufgenommen werden konnten. Die modulare Bestückung beider Trägerplattformen gestattet eine bedarfsgerechte Ermittlung von gewässerspezifischen Daten wie beispielsweise der (Unterwasser-)Topographie, Vegetationsparameter, Fließgeschwindigkeitsprofile oder Wasserqualitätsparameter. Durch das Tandem ergibt sich eine hochgenaue Ableitung der USV-Position unter Nutzung der Positionsdaten des UAV.

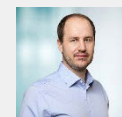
#### 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)

Eine hochgenaue Datengrundlage zum Ist-Zustand der Bundeswasserstraßen und der dazugehörigen baulichen Anlagen sind von wesentlicher Bedeutung, um bedarfsgerecht Maßnahmen zum Ausbau und zur Unterhaltung planen und durchführen zu können. Geometrische Daten der Flachwasserbereiche, des Gewässerrandstreifens, der Buhnengruppen oder der Wasserbauwerke lassen sich für eine ganzheitliche Betrachtung der Bundeswasserstraße meist nicht ausreichend genau oder zeitlich konsistent erfassen. RiverCloud, als kombiniertes System aus UAV und USV, soll die Datenquantität und -qualität dieser Bereiche steigern, um ein intelligentes Monitoring und Management der Wasserstraßen unter Berücksichtigung ökonomischer und ökologischer Aspekte verbessern zu können.

#### Auftragsnummer:

B3953.05.04.70007

#### Auftragsleitung:



Thomas Gattung  
 thomas.gattung@baw.de

#### Laufzeit:

2020 bis 2023

Die erhobenen Daten sollen durch ein verdichtetes digitales Höhenmodell auch für eine Qualitätssteigerung bei den hydrodynamisch-numerischen Modellen der BAW genutzt werden. Die Erstellung hochgenauer As-Built-Modelle für die BIM-basierte Bauwerksunterhaltung und -instandsetzung ist ein weiterer Anwendungsfall. Zusätzlich sollen die Daten in der mCloud als Open Data bereitgestellt werden, um so weitere wissenschaftliche und wirtschaftliche Verwertungen zu ermöglichen.

### 3 Untersuchungsmethoden

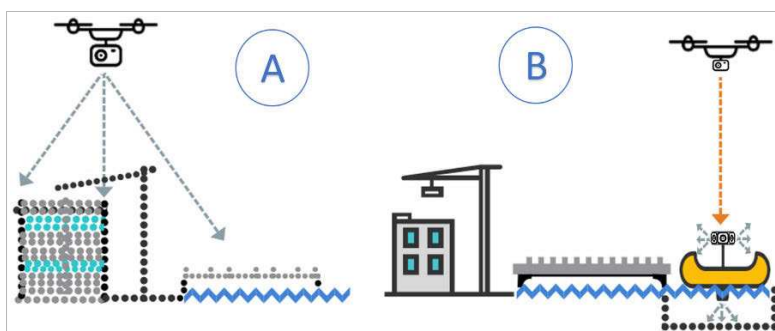
Die Ableitung der Pose des USV, das heißt sowohl die Position als auch die Orientierung im Raum, ist ein Schwerpunktthema im Projekt RiverCloud. Zu diesem Zweck wird die Pose über mehrere Systeme bestimmt. Zum einen erfolgt die Positions- und Lagebestimmung durch ein auf dem USV montiertes GNSS (Global Navigation Satellite System) in Kombination mit einer Inertial Measurement Unit (IMU). Hier kann es durch Signalabschattung, vor allem an Brücken, zu Ungenauigkeiten kommen. Die zweite Methode zur Bestimmung der Pose ist die visuelle Odometrie. Hierzu werden die Kameradaten der 360°-Kamera (Flir Ladybug 5) auf dem USV genutzt und es werden stetig eine Vielzahl von natürlichen Passpunkten im Kamerabild verfolgt. Aus deren Bewegung im Bild kann dann die Bewegung und Position des USV bestimmt werden. Die dritte Methode ist das Tracking des Bootes durch das UAV. Hierzu wird eine hochgenaue Kamera am UAV genutzt, die am USV angebrachte Marker erkennt und durch diese die Pose des Bootes ableitet. Über eine Fusion der gewonnenen Daten und den Einsatz von statistischen Filtern kann damit die Lage und Orientierung des USV hochgenau bestimmt werden. Die exakte Bestimmung der Pose ist Voraussetzung für die Ableitung von genauen geometrischen Daten an der Wasserstraße und am Bauwerk.

Für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche wurden entsprechende Konzepte zur Datenerfassung entwickelt. Durch anforderungsoptimierte Ausrüstung des USV und des UAV mit unterschiedlichen Sensoren sollen Rüstzeiten minimiert und Einsatzzeiten optimiert werden. Bild 1 zeigt das Konzept der Bauwerkserfassung. In einer ersten Messung (A) überfliegt das UAV mit einer RGB-Kamera (PhaseOne iXM) das Bauwerk und erfasst die Bereiche oberhalb des Wassers photogrammetrisch. In einer zweiten Mission (B) ist das Tandem aktiv. Hier sind das Fächerecholot und die 360°-Kamera auf dem USV installiert. Die Tracking-Kamera auf dem UAV (Ximea) folgt dem USV, welches das Bauwerk unter dem Wasserspiegel mit dem Echolot vermisst.

### 4 Ergebnisse

Das Tandemsystem soll im Einsatz an der Wasserstraße einen möglichst breiten Anwendungsbereich abdecken. Trotz begrenzter Testzeit im Projekt ist deshalb sicherzustellen, dass möglichst vielfältige Testgebiete ausgewählt und erfasst werden. Für den Einsatz am Bauwerk ist die zweite Schleusenkammer Trier Testgebiet. Hier liegen hochwertige Daten aus Laserscanaufnahmen und ein As-Built 3D-Modell der kompletten Schleusenkammer aus der Bauphase vor. An der Wasserstraße werden im Projekt zwei Testgebiete untersucht. Zum einen die Südspitze Niederwerth bei Koblenz am Rhein (Rhein-km 594,0), zum anderen die Tomateninsel bei Au am Rhein (Rhein-km 348,8). Das Testgebiet Südspitze Niederwerth stellt hohe Anforderungen an die Manövrierbarkeit und Stabilität des USVs. Die Rheininsel liegt unweit der Fahrrinne, so dass mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten und Wellenschlag zu rechnen ist. Der Fokus der Tests liegt dort auf der dreidimensionalen Aufnahme der Vegetation am Gewässerrand durch Kameras auf UAV und USV. Daten aus abgeschlossenen Forschungsprojekten (z. B. mDrones4rivers) bieten Referenzdaten und ermöglichen den Vergleich und die Einordnung der Aufnahmequalität für RiverCloud.

Durch die Umgestaltung des Bereichs der Tomateninsel bei Au am Rhein im Jahr 2015 – mit Schlitzung der Buhnen und dauerhafter Umströmung des Kohlkopfes – ist in diesem Testgebiet vor allem die (Unterwasser-)Topographie von besonderem Interesse. Mithilfe von drei Sensoren (Laserscanner, Multibeamecholot und hochaufgelöste RGB-Kamera) auf Drohne und Boot soll ein vollständiges digitales Höhenmodell erstellt werden. Zusätzlich sind Fließgeschwindigkeiten und Wasserqualität von besonderem Interesse, vor allem am neu gebauten Entnahmebauwerk und im Bereich der Mündung des Illinger Altrheins. Ziel ist es, die Datenerfassung in den Testgebieten im Sommerhalbjahr 2022 durchzuführen.



#### Literatur:

Weiß, Robert (2015): Erprobung der Laserbathymetrie an Bundeswasserstraßen im Binnenbereich. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Messen und Überwachen im Wasserbau und am Gewässer. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen (53). S. 435–444.

Bild 1: Messkonzept Bauwerksaufnahme.





## IMMERSE

### Implementing MeasurRes 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 has 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 Roskilde Fjord.

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

New solutions and improved designs of coastal and river engineering measures are developed in the project. 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. For tidal amplification and tidal pumping, pressures that affect the sediment transport and thus the maintenance works for navigation in the Elbe estuary, different measure types are investigated, pilots carried on and feasibility assessments conducted by different organisations. Within the project, the BAW has evaluated the hydraulic effects of re-connecting a cut-off anabranch to the tidal river Elbe to reduce tidal pumping and the tidal range, an assessment required for decision-making at the dialog process Forum Tideelbe (WSV steering committee partner).

The next task of the BAW in the project relates to the improvement of the numerical model to compute the spread of particle-bound contaminants, which is relevant in planning strategies for the sediment management at the

#### 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 bis 2023



maritime fairway Elbe. Consultancy for the WSV on sediment relocation and issues related to sediment mobilisation and pollutants fate will advance, ensuring the use of numerical methods at state-of-the-art standards.

### 3 Research Methods

Three-dimensional numerical simulations are employed using the hydrodynamic modelling system UnTRIM (Casulli and Lang 2004) in combination with the morphological model SediMorph.

For the assessment of the anabranch reconnection, the measure layout included a tidal flow control at the sluice gate *Tatenberger Siel* to constrain the amount of water flowing in and out the anabranch and so limit the variation of the water level within the anabranch Dove Elbe (BAW 2021). The aim here was to compute the maximal expected effects on the estuary dynamics considering the tidal flow control, and so to provide an estimation of the measure benefits for a comparison with two other potential locations: Haseldorfer Marsch and alte Süderelbe (see Forum Tideelbe 2020).

Since the flow constriction at the weir was only partially considered in this feasibility assessment, the model approach for weir control has been improved during the project. Within the modular architecture of UnTRIM, an add-on feature has been programmed and coupled in the model suite within the software environment PROHROME (see Lang 2017) at the department for hydraulic engineering in coastal areas of the BAW.

The next activities of the BAW in the project will address the development of a transport model to compute the spread of particle-bound contaminants in the tidal Elbe. At the next, a comprehensive review addressing research gaps and parametrization needs for the SPM transport behavior related to organic and inorganic pollutants will be carried on.

### 4 Results

The model results of creating estuary flood space by reconnecting a cut-off anabranch demonstrated the positive effects of this measure type reducing tidal amplification (tidal range) and tidal pumping. In the measure layout assessed to reconnect the Dove Elbe, a restrained tidal flow exchange was considered to reduce potential impacts for the local stakeholders. These constraints diminished the overall measure effects regarding tidal pumping (BAW 2021). This assessment provided a basic impact forecast that supported the steering committee of the Forum Tideelbe to further advice decision-makers in the Elbe estuary.

For modelling sluice gates operation, an add-on was developed and incorporated in the model suite UnTRIM-Sedimorph. The developed feature 'Op\_weir' improves the model capability of reproducing the operation of hydraulic structures like sluice gates at runtime, simulating the opening and closure of the gates depending on the model results. At runtime, it steers the weir height according to user-defined thresholds for the flow conditions, enabling a more efficient simulation (for more details see [https://wiki.baw.de/en/index.php/OP\\_WEIR.DAT](https://wiki.baw.de/en/index.php/OP_WEIR.DAT)).

During the Transnational Exchange Estuary Lab organized in November 2020, the results of the Dove Elbe measure assessment were presented and discussed with participants from different countries of the North Sea region. Three IMMERSE-solutions addressing measures for a sustainable sediment management were here discussed (see [here](#) the workshop report). From the discussion, it was concluded that future investigations regarding estuary management require a combination of different measure types and for that, knowledge exchange should be promoted. It was pointed out that pilots might be necessary in measure planning to obtain validation data for quality proof of complex numerical models at state-of-the-art, which are required to estimate the measure effects in the estuary system. To make model estimations more understandable and for further measure acceptance, it was advised to involve stakeholders very early in the development of measures, and to communicate the scientific background in a plain language accessible for a broad audience.

The project has been extended until March 2023 to explore solutions related to estuary pollution. The BAW will carry out two studies to advance the model techniques in estimating the spread of particle-bound pollutants. Beyond the project lifetime, these studies will contribute to develop solutions in estuary management concerning the riverine import of particle-bound pollutants into the tidal Elbe.

#### Literature:

BAW (2021): Auswirkung der Schaffung von Flutraum im Bereich der Tideelbe - Wiederanschluss Dove Elbe - Ergebnisse der Wasserbauliche Systemstudie zur Maßnahme Dove Elbe. Available online (in german) at [https://northsearegion.eu/media/16076/20210121\\_44\\_hydrologischeauswirkung\\_doveelbe\\_baw.pdf](https://northsearegion.eu/media/16076/20210121_44_hydrologischeauswirkung_doveelbe_baw.pdf).

Casulli, V.; Lang, G. (2004): Mathematical Model UnTRIM - Validation Document. Technical Report. Bundesanstalt für Wasserbau: Trento, Hamburg.

Forum Tideelbe (2020): Die Zukunft der Tideelbe gemeinsam gestalten. Ergebnisbericht des Forum Tideelbe. Hamburg. Available online (in german) at <https://www.forum-tideelbe.de/files/download/200928-fte-ergebnisbericht-s-61-korrigiert.pdf>

Lang, G. (2017): PROHROME - Software for Coastal Engineering Applications. In: Kompetenz für die Wasserstraßen - Heute und in Zukunft. Karlsruhe (BAWMitteilungen, 100), pp. 127-146 (in german).



## 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:

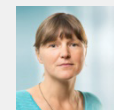
B3955.01.04.70174

#### 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

#### Laufzeit:

2015 bis 2022

### 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 Manövrierverfahren 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, Tauchung) 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. Bei der Präsentation der Messkampagne auf nationalen und einer internationalen Fachkonferenz (Jansch und Böttner 2019) wurde die geplante Veröffentlichung der Messwerte und Daten in Form eines internationalen Test-Cases (Benchmark) 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 Maßstabeffekt durch unterschiedliche Turbulenzgrade auf Nachstrom und Schwimmelage vergleichend bei zwei Containerschiffen untersucht werden (Shevchuk et al. 2019).

In der derzeitigen, abschließenden Projektphase werden der internationale Benchmark Test-Case und weitere Veröffentlichungen vorbereitet und erstellt.

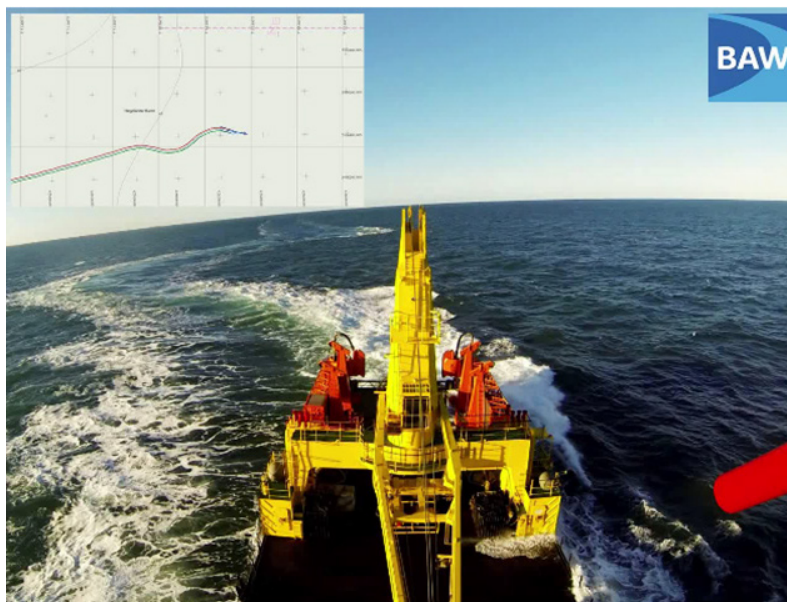


Bild 1: Manöver zur Ermittlung der Fahrdynamik im Tiefwasser.

#### Literatur:

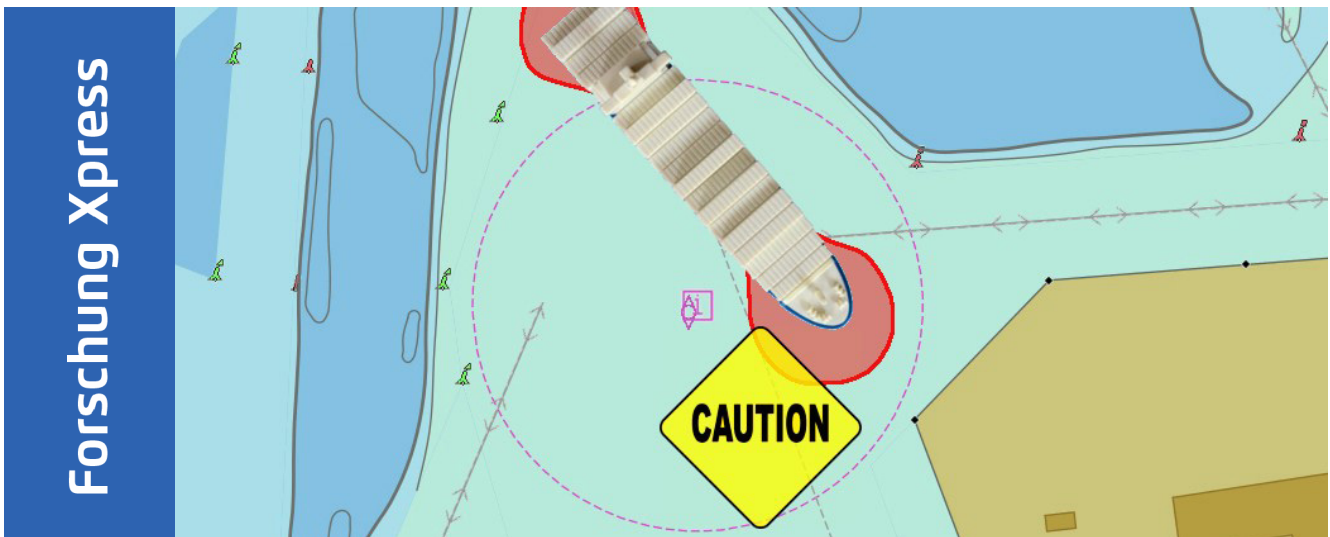
Böttner, C.-U.; Shevchuk, I. (2019): Dis-equilibrium Wall Function in RANSE Computation applied to Flow Conditions around Ship's Hull. In: Proceedings of MARINE 2019, 491–501.

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.

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.





## 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:

Martin Wezel  
 martin.wezel@baw.de  
 Thorsten Dettmann

#### Laufzeit:

2016 bis 2022

### 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 Radarbildschirm – 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.

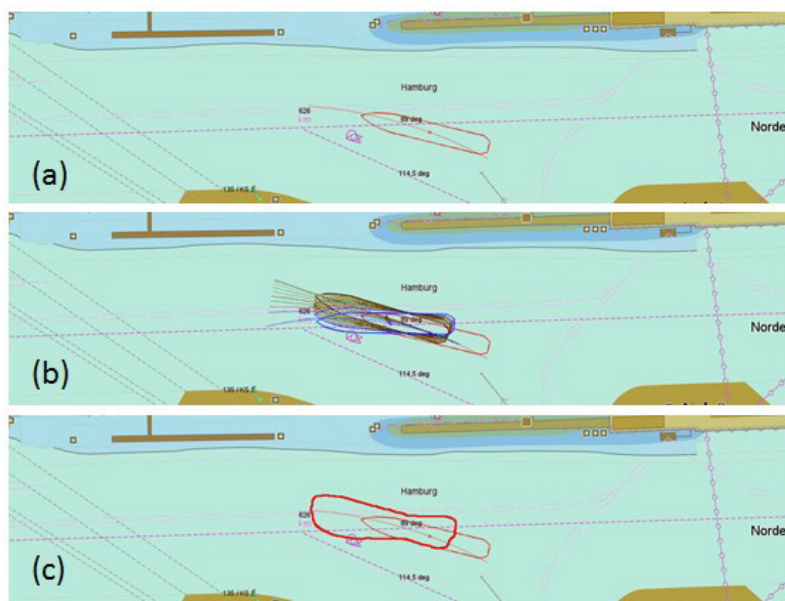


Bild 1: Ermittlung der SafeZone (c) aus einer nautischen Situation (a) und Manöversimulationen kleiner Abweichungen (b).

#### 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



## Probabilistische Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen (ProbBem)

Entwicklung eines Verfahrens zur Bemessung von Buhnendeckschichten anhand von Messungen in der Natur

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Schiffswellen stellen in weiten Teilen der Ästuarie die maßgebende Belastung auf natürliche und bauwerksgesicherte Uferbereiche dar. Schadensfälle an Leitwerken und Buhnen sowie an Deckwerken an den Seeschiffahrtsstraßen (SeeSchStr) aufgrund schiffserzeugter Belastungen wurden in den letzten 15 bis 20 Jahren verstärkt in den SeeSchStr Außenweser und Unterelbe festgestellt. Untersuchungen haben ergeben, dass insbesondere langperiodische Schiffsprimärwellen hohe hydraulische Belastungen auf Buhnen und Leitdämme hervorrufen können. Für Strombauwerke aus Wasserbausteinen, wie an SeeSchStr üblich, sind die Deckschichten hinsichtlich einer Schüttsteinerosion zu bemessen. Dabei ist die Ermittlung der erforderlichen Steingrößen bzw. -gewichte für die Belastung durch langperiodische Schiffsprimärwellen mittels vorhandener deterministischer Ansätze aus der Literatur, welche fachlich nicht exakt zutreffen bzw. nur bedingt gültige Ansätze verwenden, derzeit noch nicht nachweislich möglich (Gier und Schüttrumpf 2012, BAW 2018). Die stochastische Natur der in die Bemessungsverfahren eingehenden Belastungen sowie die Unsicherheiten der Modelle zur Beschreibung der Versagensformen und der dazugehörigen Eingangsparameter legen eine Erweiterung zu einer probabilistischen Betrachtungsweise dieser Bauwerke nahe.

Im Rahmen des vorangehenden FuE-Vorhabens „Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen“ wurden an Buhnenbauwerken in der Tideelbe bei Juelssand wertvolle Prototypdatensätze gesammelt, auf deren Grundlage u. a. ein probabilistischer Bemessungsansatz für Steingröße und -gewicht der Deckschicht zu erarbeiten ist.

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

Bei der derzeitigen Entwicklung der Flottenstruktur (zunehmende Größentwicklung in der Containerschifffahrt mit derzeit bis zu knapp 24.000 TEU)

#### Auftragsnummer:

B3955.01.04.70234

#### Auftragsleitung:

Dr. Gregor Melling  
 gregor.melling@baw.de

#### Kooperationspartner:

Department of Civil  
 Engineering and Geosciences,  
 Delft University of Technology

#### Laufzeit:

2020 bis 2022



erhält die nachhaltige Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an den SeeSchStr der Tideästure im Hinblick auf die Relevanz der schiffserzeugten Belastungen eine wachsende Bedeutung. Die Nutzung probabilistischer Bemessungsansätze könnte zu einer wirtschaftlicheren Bauweise führen, wird jedoch von der WSV wegen fehlender Grundlagen nicht umgesetzt. Für SeeSchStr sind in Abhängigkeit ihrer Lage zur offenen See verschiedene Bemessungssituationen maßgebend. Für die WSV relevante Lastfälle sind extrem langperiodische schiffserzeugte Wellen an Leitdämmen und Bühnen, für die fachwissenschaftlich abgesicherte Ansätze zu erarbeiten sind. Durch die Kooperation mit universitären Einrichtungen werden wichtige Impulse für – über dieses Projekt hinausgehende – weitere Entwicklungen auf dem Gebiet der probabilistischen Bemessung und insbesondere deren praktische Anwendung im Bereich Wasserbau/Küsteningenieurwesen erwartet.

### 3 Untersuchungsmethoden

Bei diesem FuE-Vorhaben werden hauptsächlich Methoden der statistischen Datenanalyse sowie wahrscheinlichkeitbasierte Methoden/Modelle eingesetzt. Als Grundlage dient ein Datensatz eines Feldversuchs mit zwei instrumentierten Bühnen in der unteren Tideelbe bei Juellssand. Dabei wurde ein Monitoring von zwei Bühnenprototypen vorgenommen, welches sowohl die einwirkenden lang-periodischen Schiffswellenbelastungen als auch die Schadensentwicklung der Bühnen über einen mehrjährigen Zeitraum aufgezeichnet hat. Der Feldversuch und erste grundlegende Ergebnisse sind in Melling et al. (2020) dokumentiert.

### 4 Ergebnisse

In einem ersten Schritt sind die Belastungsdaten an einer Messposition am Kopf der Bühne analysiert worden. Zunächst werden die Parameter Primärwellenhöhe  $H_p$ , Absenk  $z_A$  und Schiffsgeschwindigkeit  $V_i$  hinsichtlich ihrer statistischen Verteilung untersucht. Dabei zeigt sich, dass die Exponentialverteilung die Eintrittshäufigkeit der  $H_p$  und  $z_A$  am treffendsten beschreibt und für die Schiffsgeschwindigkeit die t-Verteilung. Für jede der drei Variablen sind monatliche Maximalwerte ermittelt worden, um eine univariate Extremwertanalyse durchzuführen. Hiernach wird die Verteilung der Extrema für  $H_p$  und  $z_A$  von der Gumbel-, für  $V_i$  von der Weibullverteilung am treffendsten beschrieben. Basierend hierauf können schon erste Angaben hinsichtlich der Extremwerte für jede unabhängige Variable und verschiedene Jährlichkeiten abgeleitet werden. Da die vereinfachende Annahme der Unabhängigkeit in der Realität nicht zutreffend ist, muss die bivariate Verteilung und deren gemeinsame Eintrittswahrscheinlichkeit („joint probabilities“) berechnet werden (Memar et al. 2021). Dabei werden die stochastischen Abhängigkeiten der bivariaten Verteilungen der Extremwerte mittels Copulas modelliert. Copulas ermöglichen es, multivariate Verteilungsfunktionen in univariate Randverteilungen und die Copulafunktion, welche die Abhängigkeitsstruktur der Variablen beschreibt, zu zerlegen. Die „best-fit“-Copula aus Gaussian, Gumbel, Clayton, Frank und student's t wurde für die vorliegenden Variablenpaare mittels Cramér-von-Mises-Test ermittelt. Die Abhängigkeit zwischen  $H_p$  und  $z_A$  sowie  $H_p$  und  $V_i$  wird durch die Gumbel-Copula am treffendsten beschrieben. Auf dieser Basis können bivariate Wiederkehrintervalle und Überschreitungswahrscheinlichkeiten berechnet werden. Um die statistische Verteilung der Primärwellenhöhen unter dem Einfluss der Verteilungen mehrerer Variablen zu modellieren, wurde beispielhaft ein Bayessches Netzwerk aufgebaut und validiert. Im Weiteren werden Belastungsdaten an anderen Positionen der Bühne nach dem geschilderten Schema ausgewertet. Dabei sollen auch Abhängigkeiten zwischen den Wellenhöhen an verschiedenen Messpositionen untersucht werden. Basierend auf gewonnenen Erkenntnissen wird das Bayessche Netzwerk weiter angepasst.

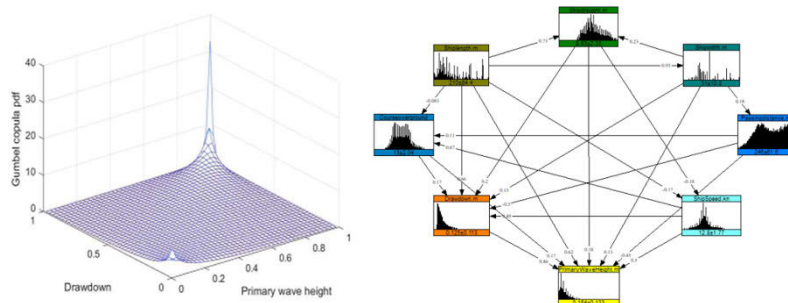


Bild 1: Gumbel-Copula für Primärwellenhöhe und Absenk (links), Bayessches Netz für die statistische Modellierung der Primärwellenhöhe (rechts).

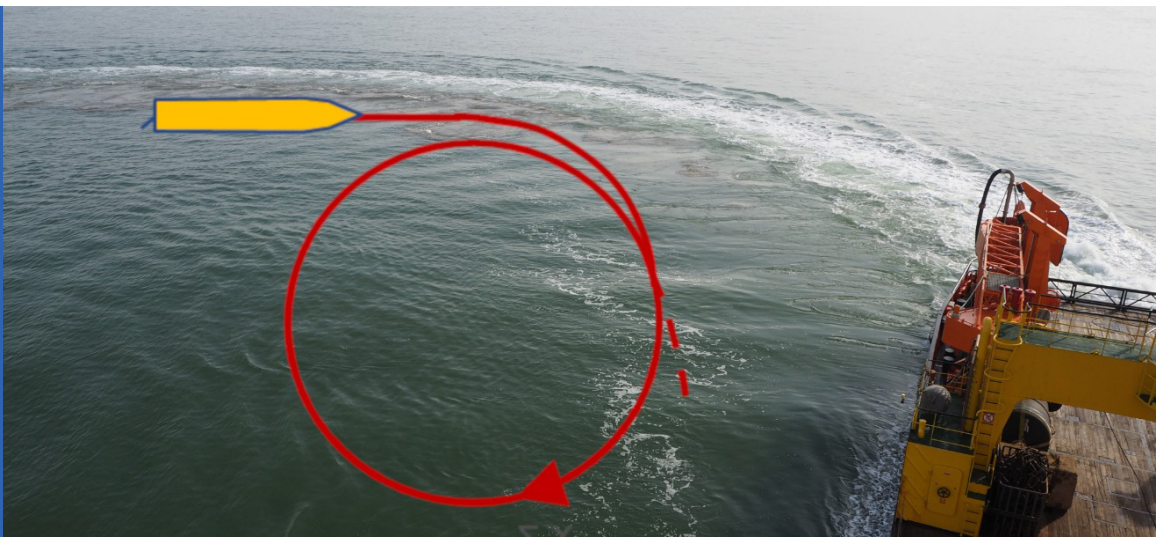
#### Literatur:

BAW (2018): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen. FuE-Abschlussbericht, B3955.02.04.70141, Januar 2018.

Gier F.; Schüttrumpf H. (2012): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen – Arbeitspaket 2: Analyse der Wellen-Strombauwerk-Interaktion auf Grundlage des Schrifftums. RWTH Aachen, Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, März 2012.

Melling, G.; Jansch, H.; Kondziella, B.; Uliczka, K.; Gätje, B. (2020): Evaluation of optimised groyne designs in response to long-period ship wave loads at Juellssand in the Lower Elbe Estuary. Die Küste, 89.

Memar, S.; Morales-Napoles, O.; Hofland, B.; Melling, G. (2021): Characterization of long-period ship wave loading and vessel speed for risk assessment for rock groyne designs via extreme value analysis. In: 31st European Safety and Reliability Conference, 19–23 September 2021, Angers, France.



## Direkte Identifikation der Manövriereigenschaften eines Schiffes aus Fahrtaufzeichnungen im Betrieb

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Wird die Schiffsführungssimulation für Zwecke der Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse oder zur Festlegung wasserpolizeilicher Restriktionen und Vorgaben eingesetzt, hat die Auswahl des Bemessungsschiffs und die Festlegung dessen Fahreigenschaften einen großen Einfluss auf das Ergebnis. Die Einigung auf ein geeignetes Bemessungsschiff folgt in den meisten Fällen direkt den Erfordernissen und der Zielstellung der Maßnahme und ist gewöhnlich leicht einvernehmlich herzustellen. Im Gegensatz dazu wird die Festlegung der Fahrdynamik dem Betreiber des jeweils mit der Durchführung beauftragten Schiffsführungssimulators und dem einzelnen Nautiker, der die Abnahme für den Auftraggeber durchführt, überlassen. Unter Beachtung der hohen Bedeutung im Hinblick auf das spätere Ergebnis der Simulation ist es erstrebenswert, zukünftig ein Mittel zur Verfügung zu haben, welches eine belastbare und nachvollziehbare Festlegung der Fahrdynamik ermöglicht. Eine Möglichkeit wäre, aus der Erfassung einzelner Fahrten geeigneter Schiffe einen Satz fahrdynamischer Koeffizienten zu gewinnen. Es könnte ein Datenerfassungsgerät der Besatzung oder dem Lotsen mitgegeben werden, um damit die benötigten Daten für die fahrdynamische Modellierung des Bemessungsschiffs zu gewinnen. In diesem Projekt wird exemplarisch die Ermittlung fahrdynamischer Koeffizienten für den Schiffsführungssimulator ANS6000 auf Basis aufgezeichneter Schiffsfahrten durchgeführt und validiert. Im Hinblick auf den operativen Einsatz der Methode werden die Mindestanforderungen an die Daten aus den Schiffsfahrten ermittelt. Dies bezieht sich auf die zu erfassenden Größen und die Menge der Fahrten für eine ausreichende statistische Absicherung.

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

An vielen wasserbaulichen Entscheidungen in der WSV sind Ergebnisse aus Schiffsführungssimulationen beteiligt. Nachvollziehbarkeit und Objektivität der eingesetzten Werkzeuge erhöhen die Investitionssicherheit und das Vertrauen in die planerischen Entscheidungen. Die Überprüfung wasserpolizeilicher Anordnungen wird durch die höhere Aussagesicherheit belastbar.

#### Auftragsnummer:

B3955.01.04.70235

#### Auftragsleitung:



Dr. Carl-Uwe Böttner  
 carl-uwe.boettner@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Marcus Döscher  
 marcus.doescher@baw.de

#### Laufzeit:

2020 bis 2023

### 3 Untersuchungsmethoden

Die angestrebten Projektziele lassen sich im physikalischen Modell untersuchen und erreichen, da die Übertragung auf die Natur in diesem Fall mit keinem Übertragungsfehler behaftet und keine Modellgesetzmäßigkeit zu berücksichtigen ist. Es sollen für verschiedene charakteristische Schiffstypen, darunter mindestens ein gängiges Containerschiff und ein Tanker oder Stückgutfrachter, freifahrende Manöver im Tief- und im Flachwasser durchgeführt werden. Hierfür wird ein vollständiger Satz an Messdaten erfasst und ausgewertet. Für die zu entwickelnde Methode der indirekten Systemidentifikation aus den Fahrten werden die Daten im nächsten Schritt entsprechend der Möglichkeiten an Bord realer Fahrzeuge reduziert und die Kalibrierung eines fahrdynamischen Modells vorgenommen. Die Validierung und Bewertung erfolgt anhand der erreichten Übereinstimmung der Fahrdynamik im Schiffsführungssimulator mit den Aufzeichnungsdaten. Eine Variation der dem Verfahren zur Verfügung stehenden Datenmenge (Anzahl der Messgrößen, Fahrten und Manöver) ermöglicht die Ermittlung der Mindestanforderungen an die im operativen Einsatz an Bord zu erfassenden Daten.

### 4 Ergebnisse

Die Bearbeitung des Auftrages begann im Sommer 2020. Im ersten Schritt konnten freifahrende Manöver eines hierfür ausgestatteten schiffbaulichen Modells (Bild 1) des Containerschiffs „Duisburg Test Case“ (DTC; el Moctar et. al. 2015) durchgeführt und aufgezeichnet werden. Im Sommer 2021 wurden die Manöverversuche fortgesetzt und die Serie erfolgreich abgeschlossen. Diese Fahrten erfolgten im Ernst-August-Kanal, da die Manöver bei Tiefwasserbedingungen erfolgen sollten.

Das Modell wurde so ausgerüstet, dass fahrdynamisch relevante Daten vollständig gemessen und aufgezeichnet werden. Der Antrieb wurde so gestaltet, dass, neben der Drehzahl, das Drehmoment in der Welle und unabhängig der Schub auf die Welle gemessen werden können. Die Aufhängung des Ruders erfolgte vollständig entkoppelt an einer 6-Komponenten-Kraftwaage und ermöglicht die Messung und Aufzeichnung der Auftriebs- und Widerstandskräfte des Ruderblatts für jeden Moment eines Manövers. Die dynamischen Bewegungen des Rumpfes werden durch einen optischen Kreisel (Octans) erfasst, die Lage im Raum wird mit einem Laser-Tracking-System (Total Station) verfolgt.

Derzeit werden die Freifahrtmanöver ausgewertet und numerische Strömungssimulationen (RANSE) freifahrender Manöver durchgeführt, die mit den experimentellen Ergebnissen validiert werden und diese ergänzen.

Es ist in der weiteren Bearbeitung vorgesehen, die Manöver mit dem Modellschiff unter Flachwasserbedingungen in der wasserbaulichen Versuchshalle der BAW in Hamburg zu wiederholen.



Bild 1: Schiffbauliches Modell (Containerschiff, 14000 TEU (DTC)) im Maßstab 1:60 das freifahrend manövriert.

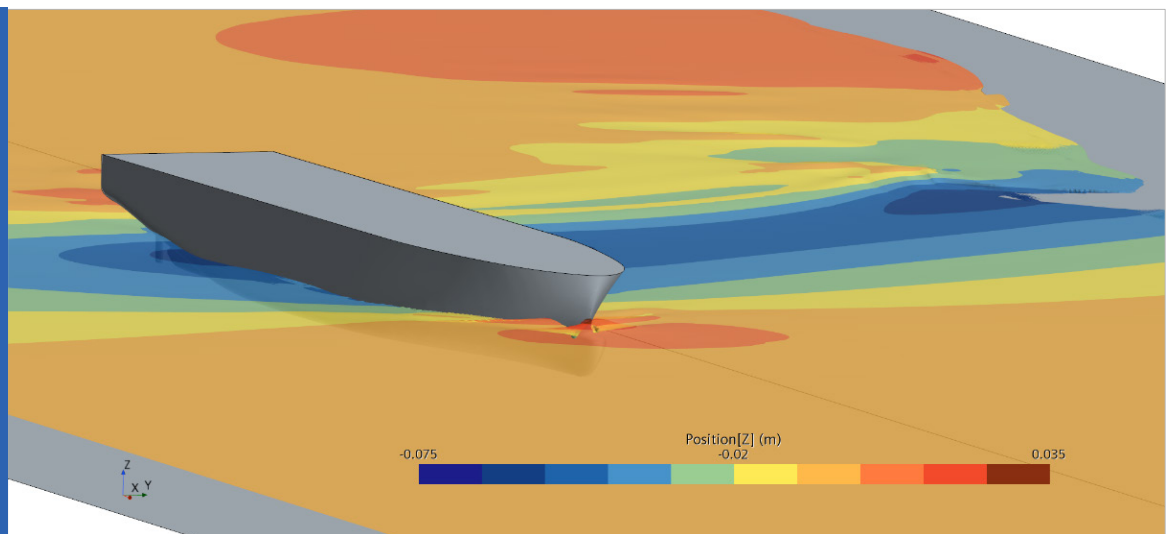
#### Literatur:

el Moctar, O. et al. (2015): Duisburg Test Case. Post-Panamax Container Ship for Benchmarking. In: Ship Technology Research, 59, 3, S. 50–64.

Oltmann, Peter (1978): Bestimmung der Manövriereigenschaften aus den Bahnkurven freimanövrierender Schiffsmodelle. Technischen Universität Hamburg-Harburg (Schriftenreihe Schiffbau, 364).

Zhang, Xin-guang; Zhou, Zao-jian (2011): Identification of Abkowitz Model for Ship Manoeuvring Motion Using  $\epsilon$ -Support Vector Regression. In: J. Hydrodyn 23 (3), S. 353–360.





## Schiffserzeugte Belastung von Seeschiffen (Integra3D)

Berechnung in seitlich begrenztem Flachwasser und Integration der dreidimensionalen Wasserstraße in die CFD

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Ziel dieses Projekts ist die Berechnung der schiffserzeugten Belastungen von Seeschiffen unter Flachwasserbedingungen mit seitlicher Begrenzung. Dazu wird die Methode der numerischen Strömungssimulation verwendet.

Ein bedeutender Aspekt ist die Validierung der Simulationsergebnisse. Dazu werden experimentell erhobene Daten des physikalischen Modells herangezogen, mit dem Ziel, die Belastbarkeit der CFD-Ergebnisse zu ermitteln.

Ein weiterer Schwerpunkt des Projekts ist die Implementierung der dreidimensionalen Wasserstraße anhand bathymetrischer Daten in das numerische Modell. Bisher wird die Bewegung von Schiffen durch einen schematischen Kanal simuliert. In Zukunft sollen die schiffserzeugten Belastungen und die Schiffsdynamik in Wasserstraßen mit realer Bathymetrie berechnet werden können.

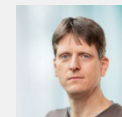
### 2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)

Um Fragestellungen in der Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff/Seeschiff-fahrtsstraße effizient bearbeiten zu können wurde die Methode der numerischen Strömungssimulation (CFD) eingeführt. Die Verfügbarkeit eines numerischen Strömungsmodells zur Vorhersage fahrdynamischer Größen und Strömungsbedingungen im Flachwasser ist bei vielen Aufgaben der WSV erforderlich. Zusätzlich zu diesem Fokus auf die Schiffsdynamik ist eine Aussage zu der schiffserzeugten Belastung notwendig. Die ersten Aussagen zu vorhabenbedingten schiffserzeugten Veränderungen wurden im Projekt „Ausbau des Seekanals Rostock auf NHN – 16,xx m“ (BAW 2019) unter Zuhilfenahme der CFD-Methode getroffen. Um die Beratungsleistung weiter auszubauen ist es zukünftig notwendig auch dreidimensionale Strukturen wie Hafenbecken und/oder Seitenarme in die bestehenden Modelle zu integrieren sowie die Validierung der Methode auf eine breite Basis zu stellen.

#### Auftragsnummer:

B3955.01.04.70379

#### Auftragsleitung:



Marko Kastens  
marko.kastens@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Christian Kochanowski  
christian.kochanowski@baw.de

#### Laufzeit:

2020 bis 2023

### 3 Untersuchungsmethoden

Das kommerziell verfügbare und bereits seit vielen Jahren in der BAW eingesetzte Softwarepaket *STAR-CCM+®* wird genutzt, um die oben erwähnten Ziele technisch umzusetzen. Experimentelle Werte aus dem physikalischen Modellversuch und/oder Naturmessungen werden - soweit vorhanden - zur Plausibilisierung und Validierung herangezogen.

Zur Simulation der Schiffsbewegung in Fahrtrichtung wird das Moving-Region-Modell verwendet, welches sich im Vergleich zu alternativen Modellen als das Effizienteste für die durchzuführenden Versuche herausgestellt hat. In diesem Modell folgt das numerische Gitter der Vorwärtsbewegung des Schiffs. Die Stampf- und Tauchbewegung des Schiffs wird mit der Methode der Gitterverformung (Morphing-Methode) abgebildet.

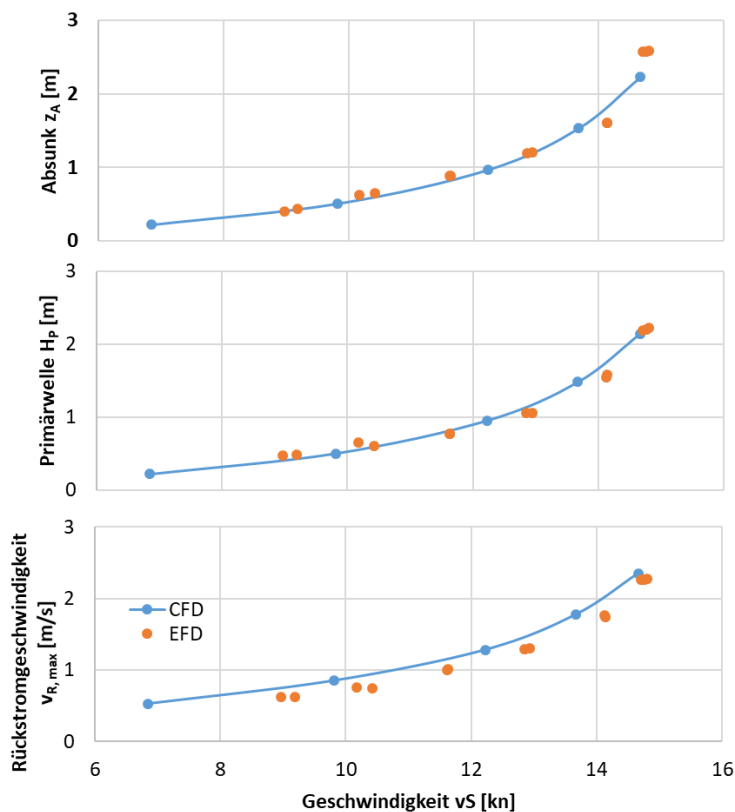
### 4 Ergebnisse

Zu Beginn des Projektes wurde das bestehende numerische Modell zur Simulation der Schiffsdynamik (BAW 2020) zur Simulation des schiffserzeugten Wellensystems optimiert. Hier war das Ziel, das Primärwellensystem, welches bei großen Schiffen die größten Uferbelastungen hervorruft, mit der CFD-Methode möglichst genau berechnen zu können. Die Optimierung umfasste eine Reduzierung von Wellenartefakten. Weiterhin wurde die Simulation durch ein Propellermodell ergänzt, so dass das Schiff nun selbstangetrieben und damit realitätsnäher bewegt werden kann. Durch den Einsatz des Propellermodells wird ebenfalls das Primärwellensystem präziser berechnet.

Im Anschluss fand eine Validierung des numerischen Modells durch einen Vergleich mit experimentell erhobenen Daten statt. Dazu wurden die Modellversuche, welche die BAW im eigenen Schiffswellenbecken (BAW 2018) durchführte, mit der CFD-Methode nachgerechnet und die Ergebnisse verglichen. Es wurden zwei Post-Panamax-Containerschiffe unterschiedlicher Größe in jeweils 5 Konfigurationen aus Wassertiefe und Tiefgang untersucht.

Eine besondere Herausforderung der Validierungsarbeiten war die eingeschränkte Vergleichbarkeit zwischen experimentellen und numerischen Daten. Solche Einschränkungen können durch unveränderbare Randbedingungen im Experiment entstehen. Beispielsweise überlagern sich in der begrenzten Länge des Versuchsbekens Wellen, während im CFD-Modell durch längere Berechnung und damit längere Fahrt des Schiffs diese Überlagerung reduziert wird.

Zur Bewertung der CFD-Ergebnisse wurden Fahrkurven (Kennwerte in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit) der Wellenkennwerte Absink  $z_A$  und Primärwellenhöhe  $H_P$ , sowie der maximalen Rückstromgeschwindigkeit  $v_{R,max}$  verglichen (Bild 1). Der Vergleich mit den experimentellen Daten hat ergeben, dass die Wellenkennwerte mit einer relativen Abweichung von etwa 12 % und die Rückstromgeschwindigkeit mit einer Abweichung von etwa 18 % berechnet werden konnten.



#### Literatur:

Bundesanstalt für Wasserbau (2019): Anpassung der seewärtigen Zufahrt zum Seekanal Rostock – Gutachten zu vorhabenbedingten Änderungen schiffserzeugter Belastungen (BAW-Gutachten, B3955.03.06.10001)

Bundesanstalt für Wasserbau (2020): Robuste Berechnung der Schiffshydrodynamik von Seeschiffen in seitlich begrenztem Flachwasser (RB-SHD-F) (BAW-FuE-Abschlussbericht B3955.01.04.70225)

Bundesanstalt für Wasserbau (2018): Fahrinnenanpassung der Außenweser – Gutachten zu vorhabenbedingten Änderungen schiffserzeugter Belastungen (BAW-Gutachten, B3955.02.10.10048.5-1)

Bild 1: Simulierte und experimentell erfasste Fahrkurven der Wellenkennwerte eines 59 m breiten Containerschiffs in der Außenweser.



## Numerische Simulation der Schiffswelle-Struktur-Interaktion (NumSiSSI)

Entwicklung eines Modellverfahrens zur Modellierung von langperiodischen schiffsbedingten Belastungsgrößen im Ufer- und Bauwerksbereich

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Schiffswellen stellen in weiten Teilen der Ästuarie die maßgebende Belastung auf natürliche und bauwerksgesicherte Uferbereich dar. Schadensfälle an Leitwerken und Bühnen sowie Deckwerken an den Seeschiffahrtsstraßen (SeeSchStr) aufgrund schiffserzeugter Belastungen wurden in den letzten 15 bis 20 Jahren verstärkt in den SeeSchStr Außenweser und Unterelbe festgestellt. Vorangegangene Untersuchungen haben ergeben, dass insbesondere langperiodische Schiffsprimärwellen hohe hydraulische Belastungen auf Bühnen und Leitdämme hervorrufen können (BAW 2018). Zahlreiche weitere Effekte schiffsgenerierter langperiodischer Wellen, z. B. auf Sedimenttransport/Morphodynamik oder Ökologie, werden in Dempwolf et al. (2021) dokumentiert. Für den Anwendungsbereich der langperiodischen Primärwellen müssen numerische Modellverfahren zunächst ertüchtigt werden, um die komplexe Interaktion zwischen der wellenerzeugenden Schiffsbewegung (Generierung) bis hin zur Interaktion mit Uferbereichen (Transformation, Strukturinteraktion) abbilden zu können. Ziel dieses FuE-Auftrags ist die Weiterentwicklung eines geeigneten numerischen Modellverfahrens, um eine realitätsnahe Repräsentation schiffsgenerierter Wellensysteme und der Wellen-Struktur-Interaktion mitsamt der im Ufer- und Bauwerksbereich wirksamen Wellentransformationseffekte zu ermöglichen.

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

Bei der derzeitigen Entwicklung der Flottenstruktur erhält die nachhaltige Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an den SeeSchStr der Tideästuarie im Hinblick auf die Relevanz der schiffserzeugten Belastungen eine wachsende Bedeutung. Durch ein entsprechend ertüchtigtes Modellverfahren lassen sich bemessungsrelevante Eingangsgrößen zur Planung und Bemessung konventioneller sowie technisch-biologischer Uferbauwerke ermitteln. Zusätzlich werden methodische Grundlagen für zusätzliche ingenieurspraktische Beratungsleistungen im Zusammenhang mit Schiffswellen-

**Auftragsnummer:**

B3955.01.04.70380

**Auftragsleitung:**Dr. Gregor Melling  
gregor.melling@baw.de**Kooperationspartner:**Leichtweiß-Institut,  
TU Braunschweig**Laufzeit:**

2020 bis 2023



einwirkungen auf Bauwerke erschlossen. Es wird erwartet, dass ein wesentlicher wissenschaftlicher Beitrag zur methodischen Weiterentwicklung numerischer Modellverfahren hinsichtlich der Generierung von Schiffswellen sowie der Abbildung der Schiffswelleninteraktion im Ufer- und Bauwerksbereich geleistet werden kann.

### 3 Untersuchungsmethoden

Bei diesem FuE-Projekt finden hauptsächlich numerische Methoden Anwendung. Dabei stehen die Anwendung, Weiterentwicklung und Validierung des numerischen Modellverfahrens „Reef3D“ im Vordergrund (REEF3D 2021). Das Modellverfahren wird im Rahmen dieses Vorhabens um einen Ansatz zur Schiffswellengenerierung ergänzt und für die Interaktion schiffsgenerierter Wellen mit Uferbauwerken validiert. Durch den engen fachlichen Austausch mit der Entwicklergemeinschaft soll eine robuste und zukunftssichere Implementierung sichergestellt werden. Für die Validierung stehen ausgewählte Datensätze aus gegenständlichen Modellen der BAW sowie auch Messdaten aus der Natur zur Verfügung.

### 4 Ergebnisse

Aus der Aufarbeitung des Stands des Wissens wurde eine erste Publikation angefertigt, welche die vielfältigen Auswirkungen lang-periodischer Schiffswellen im Ästuarbereich beschreibt und sich mit den diversen Möglichkeiten der Generierung langperiodischer Schiffswellen im numerischen Modellverfahren auseinandersetzt (Dempwolff et al. 2021). Dabei wird eine Modellierungsstrategie erörtert, in der die Wellengenerierung und -transformation im Fernfeld auf Basis der Flachwassergleichungen tiefengemittelt berechnet wird. Im Ufer-/Bauwerksnahbereich wird dieses Modell mit einem hochaufgelösten 3D-Navier-Stokes-Löser gekoppelt um die komplexen, teils hoch-turbulenten, Strömungsprozesse an Bauwerken zu berechnen. Diesem Ansatz folgend wurde zunächst in REEF3D::SFLOW ein Ersatzsystem für die Schiffswellengenerierung implementiert, welches dem Prinzip der „moving pressure source“ folgend, durch die Inklusion eines Druckterms in der Impulsgleichung für die Wasserspiegelauslenkung sorgt. Derzeit sind Druckterme in Form einer Halbkugel und eines „thin ship“ möglich. Im weiteren Verlauf des Projekts wird die Implementierung weiterentwickelt und verbessert, dabei werden zur Validierung Daten aus Versuchen im Schiffswellenbecken der BAW Verwendung finden. Parallel laufen Anstrengungen zur Validierung des vorgenannten Löser sowie des 3D-NS-Löser REEF3D::CFD hinsichtlich der Interaktion der Primärwelle mit ufernahem Bauwerk. Im ersten Schritt wird die Leistungsfähigkeit der Solver am Problem der turbulenten Bühnenüberströmung – ein Bestandteil der Bauwerksinteraktion mit langperiodischer Schiffswelle (BAW 2018) – erprobt und bewertet. Dazu werden Versuchsdaten für stationäre Überströmung von Bühnenquerschnitten (IWW 2013) zum Vergleich herangezogen. Erste Ergebnisse zeigen, dass beide Löser die Überströmungshöhen mit zufriedenstellender Genauigkeit berechnen. Eine realitätsnähere und genauere Berechnung des Strömungsgeschehens ist mit dem 3D-NS-Löser möglich, wird jedoch durch einen stark gestiegenen Ressourcenaufwand erkauft. In weiteren Untersuchungen sollen Parameterstudien zur Optimierung der Bühnengeometrie durchgeführt werden, mit dem Ziel, erste Hinweise für die Praxis zu erarbeiten. Da es sich bei dieser Studie um eine neue Anwendung mit charakteristischem Parameterraum handelt, sollen die erzielten Ergebnisse in einer weiteren Publikation veröffentlicht werden.

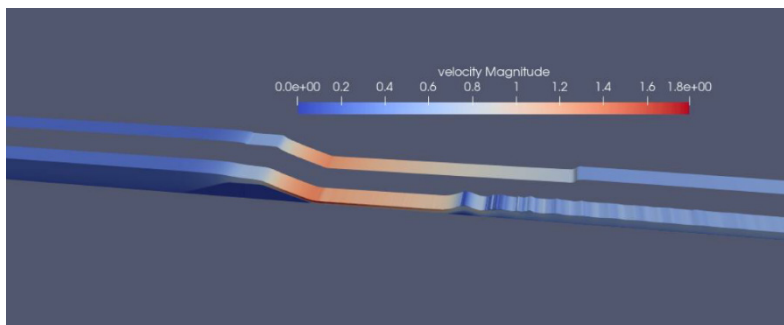


Bild 1: Vergleich der berechneten Bühnenüberströmung mittels SFLOW (oben) und CFD (unten).

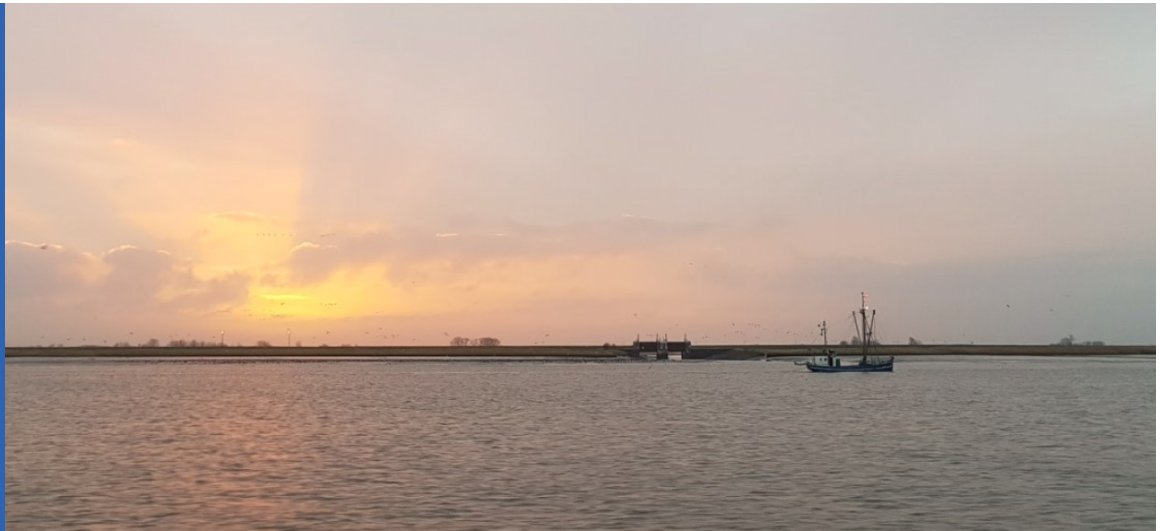
#### Literatur:

BAW (2018): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken und Seeschiffahrtsstraßen, FuE-Abschlussbericht, B3955.02.04.70141.

Dempwolff, C.; Melling, G.; Martin, T. et al. (2021): Loads and effects of ship-generated, drawdown waves in confined waterways – A review of current knowledge and methods. Journal of Coastal and Hydraulic Structures, submitted.

IWW (2013): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken und Seeschiffahrtsstraßen, AP 4: Kleinmaßstäbliche Untersuchungen zur Erfassung der maßgebenden Prozesse und zur hydraulischen Stabilität.

REEF3D (2021): REEF3D: Open-Source Hydrodynamics. Online verfügbar unter <https://reef3d.wordpress.com>, zuletzt geprüft am 28.09.2021.



## 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 Verbesserungen in den derzeit zur Verfügung stehenden Simulationswerkzeugen sind notwendig.

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 Vervollständigung 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 Um- 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 weiterverfolgt werden.

#### Auftragsnummer:

B3955.02.04.70230

#### Auftragsleitung:



Dr. Frank Kösters  
[frank.koesters@baw.de](mailto:frank.koesters@baw.de)

#### Auftragsbearbeitung:



Dr. Anna Zorndt  
[anna.zorndt@baw.de](mailto:anna.zorndt@baw.de)

#### Kooperationen:

Christian-Albrechts-Universität  
 zu Kiel (Prof. C. Winter)  
 Technische Universität  
 Hamburg (Prof. P. Fröhle)

#### Laufzeit:

2018 bis 2022

### 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. Diese Prozesse werden mittels hydrodynamisch-numerischen Simulationen mit dem Modell Untrim2009 sowie anhand von Messungen aus der Natur aus zwei Messkampagnen im Juni 2019 und im März 2020 untersucht.

Durch die Akkumulation von Feinsedimenten in der Trübungszone kommt es in der sog. „Schlickstrecke“ der Weser zu zeitweiser starker Deposition. Die hierzu beitragenden Bodenaustauschprozesse sind bislang noch nicht vollständig verstanden und werden im Rahmen des Projektes in Laboranalysen mithilfe von Absetzsäulen und einem Gust-Mikrokosmos näher untersucht.

### 4 Ergebnisse

Ein Untersuchungsschwerpunkt des Projekts FAUST ist die Wechselwirkung von Bodenformen und Strömung. Zur Betrachtung dieses Aspektes wurden im Rahmen des Projekts Laborversuche an skalierten Modelldünen durchgeführt. Die eingesetzten Modelldünen wurden an die in der Weser vorkommenden, natürlichen Dünen angelehnt. Anhand von systematischen und umfangreichen Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten wurden das Strömungsfeld sowie die Turbulenzintensität im Bereich der Modelldüne ermittelt (vgl. Bild 1). Die in der Natur beobachtete Rezirkulation im Leebereich von Dünen mit ausgeprägten Böschungsneigungen konnte hier erfolgreich nachgebildet werden. Die Ergebnisse der Laborversuche tragen zum verbesserten Prozessverständnis bei und dienen als Grundlage für weitere, zukünftige Untersuchungen (vgl. FuE Abschlussbericht des Teilprojektes, Carstensen 2021).

Im Rahmen des Projektes wurden die monatlichen Verkehrssicherungspeilungen systematisch ausgewertet und erlauben jetzt eine systematische Beschreibung der im Weserästuar vorkommenden Dünen (Lefebvre et al. 2021). Die Eigenschaften der Dünen variieren räumlich und zeitlich entlang des Ästuars. Im stark ausgeprägten Dünenfeld (Weser-km 12 bis 55) sind die Dünen im seewärtigen Teil zumeist flutstromorientiert, um dann über eine symmetrische Form hin zu einer Ebbstromorientierung im landseitigen Teil zu wechseln. Bei hohen Oberwasserzuflüssen sind die Dünen vorwiegend mit dem Ebbstrom ausgerichtet. Die Dünen in der Weser haben überwiegend geringe Neigungswinkel, mit den steilsten Böschungen im Bereich des Dünenkamms. Ein Anteil von bis zu 30 % der Dünen zeigt jedoch eine ausgeprägte Ebb- oder Flutstromorientierung mit Böschungswinkeln  $>15^\circ$ , die beim Überströmen während einer Tidephase Ablösung und Rezirkulation erzeugen.

Asymmetrische Dünen wirken sich damit auf die Strömung aus, da die durch die Rezirkulation hervorgerufene Energiedissipation von der Anströmrichtung abhängt. Damit haben Form und Ausrichtung der Bodenformen nicht nur Auswirkungen auf den Tidehub, sondern auch auf die Tideasymmetrie und den Netto-Sedimenteintrag ins Ästuar (Herrling et al. 2021).

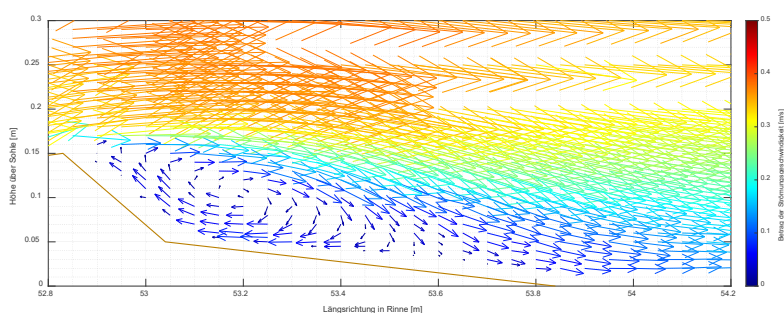


Bild 1: Gemessene Strömungsverteilung im Leebereich einer ebbausgerichteten Düne (mit ebb slip face) mit deutlich zu erkennender Wirbelstruktur im Leebereich (Carstensen 2021).

#### Literatur:

Carstensen, C. (2021): FuE-Abschlussbericht FAUST Teilprojekt E: Laboruntersuchungen BAW Bericht B3955.02.04.70230-17.

Herrling, G.; Becker, M.; Lefebvre, A.; Zorndt, A.; Krämer, K.; Winter, C. (2021): The effect of asymmetric dune roughness on tidal asymmetry in the Weser estuary. In: Earth Surface Processes and Landforms. DOI: 10.1002/esp.5170.

Lefebvre, A.; Herrling, G.; Becker, M.; Zorndt, A.; Krämer, K.; Winter, C. (2021): Morphology of estuarine bedforms, Weser Estuary, Germany. In: Earth Surf Process Landforms. DOI: 10.1002/esp.5243.





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 sowie 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 Ästuar-mündungen.

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

In enger Abstimmung mit den assoziierten Partnern 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/der 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 2022

### 3 Untersuchungsmethoden

Basierend auf den bathymetrischen und oberflächensedimentologischen Modellkomponenten wurden zunächst die verfügbaren stratigraphischen Naturdaten zusammengetragen, qualitätsgesichert und homogenisiert (Basisdaten). Hierzu wurden die in der BAW und den WSÄ vorhandenen Bohrungen (etwa 3.000 Bohrungen) gesichtet und aus der analogen Form (Papierform) in ein digital zu verarbeitendes Format überführt. Dabei mussten 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) beachtet werden.

#### Bohrsäulen

Zugleich wurden die Daten dokumentiert (Metadaten), harmonisiert und mit lithologisch vergleichbaren Daten der näheren Umgebung qualitätsgesichert. Hierzu wurden 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. Im Arbeitsgebiet (mit einer Fläche von ca. 10.000 km<sup>2</sup>) sind über 19.000 Bohrungen enthalten. Die Phase der Zusammenstellung und Homogenisierung der Datengrundlage ist gegenwärtig in der finalen Arbeitsphase.

#### 3D-Bodenmodell

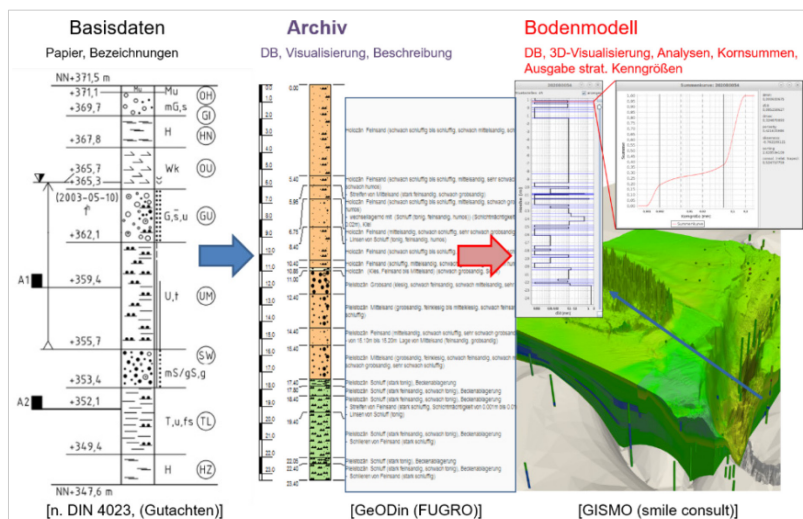
Weiterhin wurde eine Konversionsmethodik entwickelt, die zwischen den linguistischen sedimentologischen Beschreibungen (z. B. aus Abbildungen in Altunterlagen) digitale einzelne Sedimentsummenkurven (als Funktion) pro sedimentologischer Schicht generiert (Bild 1). Hiermit lässt sich ein dreidimensionales Bodenaufbau mit unterschiedlichen sedimentologischen Eigenschaften (aus den Kornsummenkurven s. o.) flächendeckend für die Deutsche Bucht erzeugen.

#### Morphodynamische Modellierung

Die BAW führt Systemstudien zur grundlegenden Wirkungsweise der stratigraphischen Sedimentkomponenten mit unterschiedlichen Modellsystemen durch. Der Mehrwert bei der Berücksichtigung der stratigraphischen Informationen bei der numerischen Simulation wurden anhand eines Testbeispiels durch die Modellsysteme UnTRIM-SediMorph und DELFT3D-MOR deutlich belegt. Zur Übertragung auf reale Systeme führt die BAW bis zum Projektende morphodynamische Berechnungen unter Wirkung von Tidedynamik sowie Salz- und Sedimenttransport für Fokusgebiete mit den Modellierungssystemen UnTRIM-SediMorph sowie zur Qualitätssicherung mit DELFT3D-MOR durch. Die smile consult GmbH wird Vergleichsuntersuchungen mit MARINA betreiben.

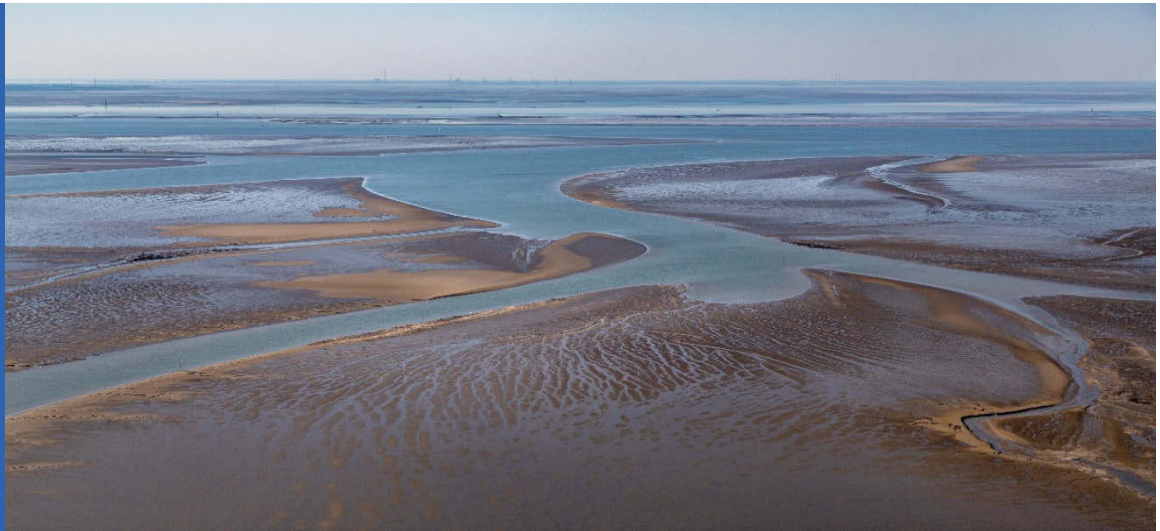
### 4 Ergebnisse

Die Qualitätssicherung und Speicherung der Sedimentdaten aus Bohrsäulen wurden im Dezember 2021 abgeschlossen. Diese Daten werden in einer Bohrpfahl-Datenbank gespeichert und in das stratigraphische Bodenmodell eingepflegt. Die Visualisierung der Bohrsäulen erfolgt durch GeODin (z. B. als frei verfügbare „shuttle-Version“). Weiterhin werden in GISMO zusätzliche Funktionalitäten bezüglich der Darstellung und Extraktion von Kornsummenkurven für unterschiedliche Tiefenhorizonte und gewünschter Korngrößeneinteilung ((PHI nach Udden und Wentworth (Wentworth 1922), nach DIN 4022) bereitgestellt. Darüber hinaus wurden Interpolationsverfahren und Exportfunktionalitäten für stratigraphische Daten zur Nutzung in unterschiedlichen Modellierungssystemen (z. B. UnTRIM-SediMorph, DELFT-3D bzw. DELFT-FM, TELEMAR, MARINA) entwickelt. Damit lassen sich die stratigraphischen Daten aus der Datenbank, je nach Nutzeranforderung und Modellsystem, in die Simulationssoftware überführen.



**Literatur:**  
 Wentworth, C. K. (1922): A scale of grade and class terms for clastic sediments. The journal of geology, 30(5), 377-392.

Bild 1: Herkömmliche Bohrpfahlbeschreibung vs. GeODin und 3D-Bodenmodell (SMMS).



## Datenbasierte Analyse der Sedimentdynamik im Wattenmeer

Das Projekt HERKULIS

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Umlagerungsflächen der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) im Außenbereich der Ästuar- und Küstenvorfeld, zum Beispiel der Außenweser, sind teilweise erschöpft. Somit wird die Ausweisung neuer Umlagerungsflächen notwendig. Dabei steht die Identifikation größerer Gebiete, insbesondere im Küstenvorfeld, als flexible Umlagerungsflächen zur Diskussion. Um ein nachhaltiges Sedimentmanagement zu erreichen, ist die Charakterisierung und Eignung der potenziellen Umlagerungsflächen im Hinblick auf die hydro- und morphodynamischen Gegebenheiten nötig. Dazu ist es erforderlich, die treibenden Kräfte hinsichtlich des Sedimenttransports in der Deutschen Bucht zu identifizieren und zu quantifizieren.

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

Die Bundesanstalt für Wasserbau kann mit diesem Projekt wissenschaftliche Ergebnisse von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben auf die vielfältigen Planungsvorhaben im Ästuar- und Küstenbereich übertragen und somit die Beratungsqualität für die WSV erhöhen. Dies erfolgt an dem konkreten Beispiel der für die WSV relevanten flexiblen Umlagerungsstrategie, die somit eine erweiterte daten- und modellbasierte Grundlage zur Absicherung eines nachhaltigen Sedimentmanagements erhält. Durch die modell- und datenbasierten Arbeiten innerhalb des Projektes wird eine wissenschaftlich abgesicherte Entscheidungsgrundlage hinsichtlich der Umlagerungsstrategie erarbeitet. Ergebnisse sollen zukünftig über geeignete Webportale für die WSV bereitgestellt werden und die enge Zusammenarbeit zwischen WSV und BAW erleichtern. Die BAW baut damit ihre Erfahrungen und Kenntnisse aus, die eigene Geodateninfrastruktur effizient zu gestalten, um die Nutzung und Verwendung ihrer Simulations- und Analyseergebnisse für Fragestellungen anderer Fachdisziplinen zu erweitern. Die Weiterentwicklung der Datenstruktur der BAW unterstützt dabei auch das Wissen zur Anwendung von Standards für die nationalen und internationalen Dokumentationspflichten (OpenData, INSPIRE).

#### Auftragsnummer:

B3955.02.04.70234

#### Auftragsleitung:



Dr. Frank Kösters  
frank.koesters@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Robert Hagen  
robert.hagen@baw.de



Romina Ihde  
romina.ihde@baw.de

#### Laufzeit:

2020 bis 2022



### 3 Untersuchungsmethoden

In einem ersten Schritt wurden datenbasierte Analysen und Auswertungen auf Basis der bathymetrischen und sedimentologischen Datengrundlage des vorangegangenen mFUND-Projektes EasyGSH-DB vorgenommen. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde damit begonnen, eine prozessbasierte, hydrodynamisch-numerische Modellierung der kurz- und langfristigen Morphodynamik (inklusive Seegangmodellierung) mit einem numerischen Verfahren (Delft3D-Flexible Mesh) umzusetzen. Zusätzlich wird das numerische Nordseemodell aus EasyGSH-DB (UnTRIM2, gekoppelt an SediMorph und UnK) zur Abbildung des Sedimenttransports erweitert, um Ergebnisse mit einem zweiten numerischen Verfahren abzusichern.

Mit numerischer Modellierung wird das Untersuchungsgebiet hinsichtlich hydrologischer, meteorologischer, tidedynamischer oder seegangsbasierter Kennwerte charakterisiert und fachwissenschaftlich eingeordnet. Diese gezielten Sensitivitätsstudien geben Aufschluss zur quantitativen Herkunft und Verteilung der treibenden Kräfte für den großräumigen Sedimenttransport in der südlichen Nordsee. Im Anschluss werden die numerischen Modellergebnisse mit geeigneten Datenanalysemethoden bezüglich der Fragestellung ausgewertet und diese Ergebnisse in Datenprodukten für die Datenportale der BAW bereitgestellt.

### 4 Ergebnisse

Geomorphologische und hydrodynamische Datenbestände aus dem mFUND-Projekt EasyGSH-DB wurden gesichtet und im Hinblick auf mehrjährige Trends ausgewertet. Im Fokus stand hierbei insbesondere die Entwicklung der Geomorphologie und der Sedimentologie, um die in der Öffentlichkeit diskutierte Zunahme von Schlickakkumulation im Küstenvorfeld zu bestimmen. Hierfür wurde die Wattfläche mit den jährlichen Bathymetriem und jährlichen hydrodynamischen Tidekennwerten berechnet und auf dieser Fläche mithilfe der Schiefe und des Medians der Kornsummenkurve die vorwiegende Wattart geschätzt. Die Untergliederung wurde dabei vereinfacht in Schlick-, Misch- und Sandwatt eingeteilt (siehe Bild 1). Die resultierende Verteilung wurde mit Ergebnissen aus der Satellitenfernerkundung (Meyer und Ragutzki 1997) validiert und ergibt eine zufriedenstellende Übereinstimmung. Aus dieser Klassifizierung erfolgende vorläufige Ergebnisse geben Hinweise auf eine geringfügige Abnahme der Sandwattflächen im deutschen Küstenvorfeld von 1996 bis 2016 um rund 2 %, während sich die Schlickwattfläche gleichermaßen um 2 % erhöht.

Um die Nachhaltigkeit und Wiederverwendbarkeit der Daten zu gewährleisten, wurden die harmonisierten Ergebnisse aus dem mFUND-Projekt EasyGSH-DB in Themengebiete unterteilt und mit Daten-DOIs ausgestattet. Zur Nachvollziehbarkeit wurden die Veröffentlichungen aus EasyGSH-DB um ein erklärendes Analyse-kennblatt bezüglich der flächenhaften Analysen der numerischen Simulation erweitert (Freund et al. 2020).

In nachfolgenden Arbeiten sollen Systemstudien aus numerischen Modellen aufzeigen, welche Entwicklungen obige Veränderung herbeigeführt haben und eine küstennahe Sedimentakkumulation begünstigen. Ziel ist es, neben der Entwicklung der Wattgebiete Veränderungen in den Unterhaltungsbaggermengen in den deutschen Seehafenzufahrten zu quantifizieren und mögliche zugrundeliegende Ursachen zu identifizieren. Dazu sollen die kurzfristigen (z. B. Seegang), mittelfristigen (z. B. Tide) und langfristigen (z. B. Nodaltide) treibenden Kräfte des Sedimenttransports im Modell untersucht und deren Einfluss auf den Sedimenttransport quantifiziert werden.

Alle entstehenden Ergebnisse werden als webbasierte Produkte der Fachöffentlichkeit performant und visuell ansprechend zur Verfügung gestellt. Das projektbezogene Datenmanagement wird ausgebaut.

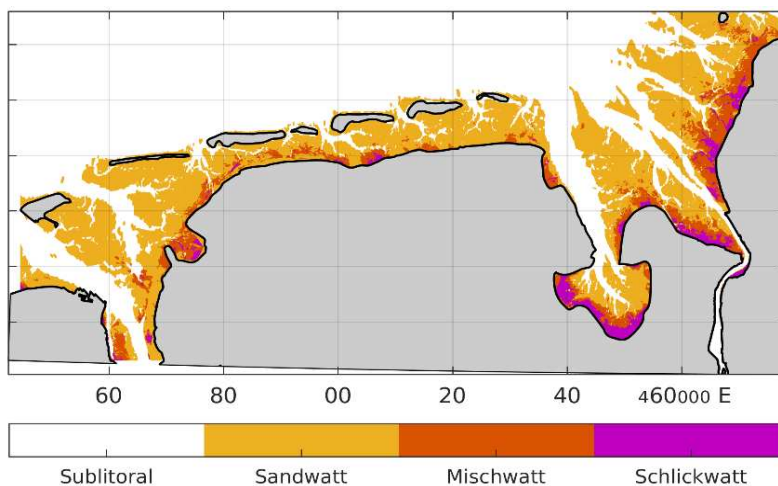
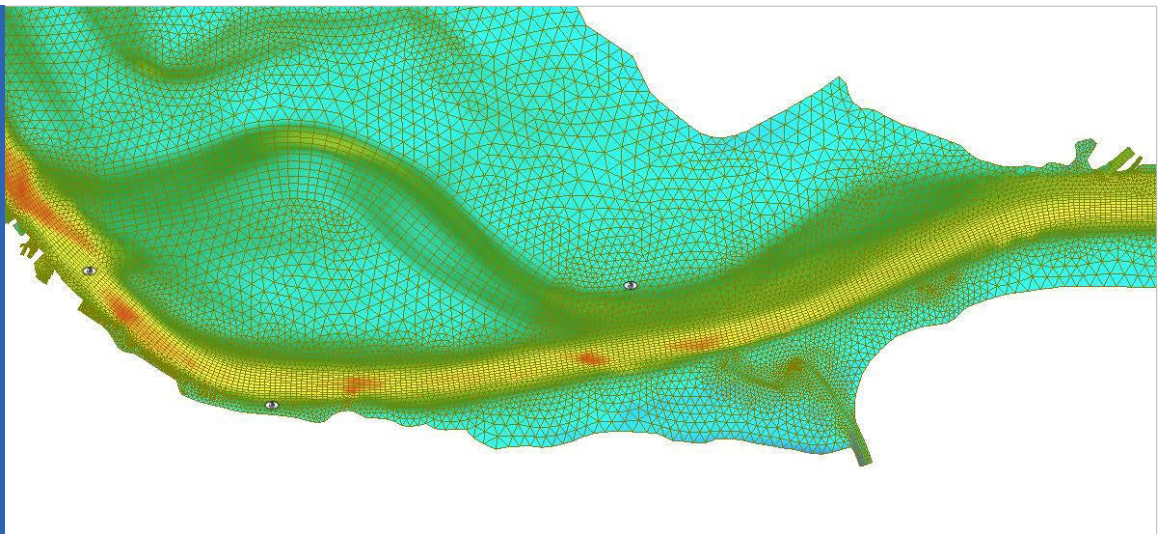


Bild 1: Darstellung einer datenbasiert berechneten Wattklassifizierung für den Bereich Ostfriesland für das Jahr 1996 auf einem 100-m-Raster.

#### Literatur:

Ragutzki, G.; Meyer, C. (1997): 1. Zwischenbericht Sedimentverteilung als Indikator für morphodynamische Prozesse.

Freund, J. et al. (2020): Flächenhafte Analysen numerischer Simulation aus EasyGSH-DB. Hamburg: Bundesanstalt für Wasserbau. Online verfügbar unter [https://doi.org/10.18451/k2\\_easygsh\\_fans\\_2](https://doi.org/10.18451/k2_easygsh_fans_2)



## 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 erstellten

#### Auftragsnummer:

B3955.03.04.70221

#### Auftragsleitung:

Dr. Aissa M. Sehili  
 Aissa.sehili@baw.de

#### Laufzeit:

2014 bis 2022

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 NCPlot, NCANALYSE, NCDELTA und NCAGGREGATE verwendet (<https://wiki.baw.de/de/index.php/Hauptseite>).

### 4 Ergebnisse

Eine D-Flow FM Benchmark auf dem BAW-Compute-Server Kronos wurde durchgeführt. Ziel ist es, Vergleichswerte zu den Ergebnissen aus den Benchmarks, die im Rahmen der laufenden Ausschreibungen für die Ersatzbeschaffung eines neuen Compute-Servers stattfinden, zur Verfügung zu stellen. Dafür wurde eine neue Linux-Version auf dem Cluster installiert. Die Läufe konnten mit bis zu 512 Rechenkernen/MPI-Prozessen erfolgreich ausgeführt werden (siehe Bild 1). Die Skalierbarkeit hängt vom Testlauf ab. Flache Gebiete, die trockenfallen wie z. B. an der Elbmündung, führen zu einem Last-Ungleichgewicht der MPI-Prozesse und mindern dadurch die Beschleunigung. Mit steigender Anzahl der MPI-Prozesse steigt der Kommunikations-Overhead und übertrifft ggf. den eigentlichen Rechenaufwand der einzelnen Prozesse. Dieses Verhalten ist ausgeprägter, je kleiner das Modell ist (Anzahl der Gitter-Elemente, 2D-3D).

Die Unterstützung des Vorhabens „Herkulis“ zur Charakterisierung des Sedimenttransports im deutschen Nordsee-Küstenvorfeld anhand eines D-Flow-FM-Modells wird weitergetrieben.

Mit dem 2D-D-Flow-FM-Modell der Deutschen Bucht wird an der Anpassung und der Vereinheitlichung der D-Flow-FM-UGRID-NetCDF-Ausgaben in Zusammenarbeit mit Deltares gearbeitet. Die Arbeiten sollten bis zum Ende des Jahres fertig gestellt werden. Teil der original erzielten D-Flow-FM-Ergebnisse können schon ohne Anpassung mit dem BAW-Analyse-Programm NCANALYSE prozessiert und mit dem Programm NCPlot visualisiert werden. Neue implementierte MATLAB-Routinen stehen auch für die Analyse der Ergebnisse zur Verfügung.

Parallel zu DCSMv6 FM läuft nun auch das feinaufgelöste 2D-DCSM-FM-100m-Modell (400 m an der deutschen Küste) operationell und liefert Randwerte für das BAW-GBOM (German Bight Operational Model).

Da D-Flow FM kontinuierlich weiterentwickelt wird, werden auch laufend neue Versionen freigegeben. Dies bedeutet, dass eine fortwährende Installierung des Systems (Linux und Windows DeltaShell) und Überprüfung der erzielten Ergebnisse durchgeführt werden müssen.

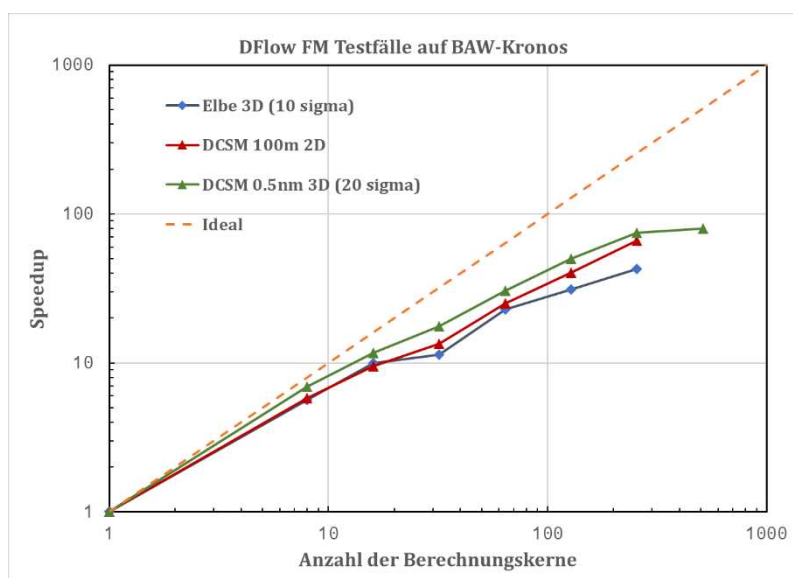


Bild 1: Skalierung verschiedener D-Flow-FM-Modelle auf dem BAW-Cluster Kronos. 3D-Modelle sind in Sigma-Schichten vertikal aufgelöst. Erzielte Speedup bis zu 512 Rechenkern.

#### Literatur:

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. DCSMv6 FM als Randwerte-Generator. BAW-interne Veranstaltung „TV12“, Dezember 2018, Hamburg.

Sehili, A.; Lang, G.; Benndorf, J. (2020): Towards a unified UGRID-NetCDF file format for flow simulations on unstructured grids. DANUBIUS-RI Modelling Node Webinar, Delft Software Days, 1 December 2020.





## Prozessintegration und Performanzsteigerung des biogeochemischen Modells der Tideelbe

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Eingriffe an Gewässern unterliegen heute hohen Umweltauflagen und dem kritischen Blick der Gesellschaft. Um Maßnahmen erfolgreich zu planen und umzusetzen, 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 Sedimentumlagerungen, die durch eine Erhöhung der Trübung den Sauerstoffgehalt zusätzlich verschlechtern können, 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. den Sauerstoffgehalt oder den 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 damit 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)

Sedimentumlagerungen 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 Trübungsfahnen 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

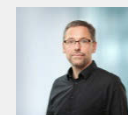
#### Auftragsnummer:

B3955.03.04.70239

#### Auftragsleitung:

Dr. Jessica Kelln  
 jessica.kelln@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:



Dr. Arne Hammrich  
 arne.hammrich@baw.de

#### Laufzeit:

2019 bis 2022

können in 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

Strombauliche Maßnahmen wirken sich häufig auch auf Strömungen und damit auch auf die Verweilzeiten des Wasserkörpers aus. In Gewässern wie der Tideelbe, in denen der Sauerstoffgehalt vor allem durch Zehrung geprägt ist, kann eine längere Verweilzeit zu einer Verschlechterung der Sauerstoffsituation führen. Insbesondere in den Hafenbecken des Hamburger Hafens führen lange Verweilzeiten oft zu einer schlechteren Wasserqualität. Um ein einfaches und pragmatisches Werkzeug zur ersten Einschätzung einer Maßnahme zu haben, soll das Wasseralter als neuer Parameter in Untrim implementiert werden. Dies ermöglicht auf eine relativ ressourcenschonende Weise abzuschätzen, wie sich eine Maßnahme auf den Sauerstoffhaushalt auswirkt.

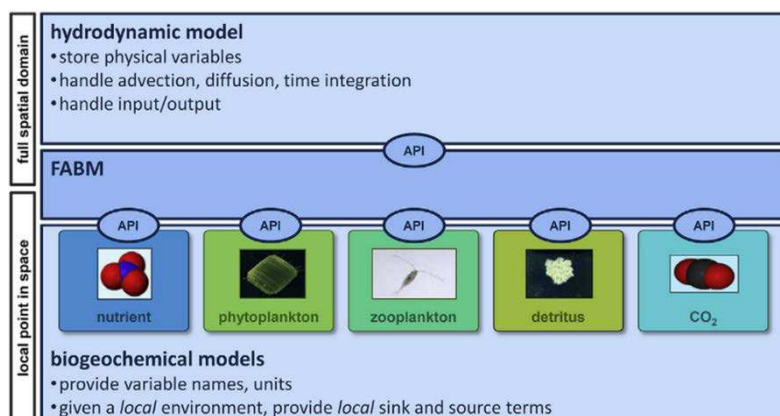
Das Wasseralter ist jedoch nur ein Indikator und ersetzt keine umfassende Betrachtung der Prozesse, die den Sauerstoffgehalt beeinflussen. Daher sollen die im aktuell vorliegenden Modell (Holzwarth 2018) verwendeten Prozesse kritisch untersucht und gegebenenfalls ergänzt werden. Insbesondere sauerstoffzehrende Prozesse bei Sedimentumlagerungen sind hier aus umwelttechnischer Sicht von Interesse. Im Rahmen dieses Projektes wird eine Doktorarbeit am Helmholtz-Zentrum Geesthacht finanziert und begleitet, in der das komplexe Zusammenspiel von Biologie, Chemie und Physik untersucht wird und ein biologisch moduliertes Flokkulationsmodell für die Tideelbe entwickelt werden soll. Der Feststofftransport in Ästuaren ist stark durch Flokkulation geprägt, da die Aggregation von organischen und anorganischen Partikeln das Sink- und Transportverhalten in der Wassersäule beeinflusst. Bisherige Modelle vernachlässigen in der Regel den Einfluss von biologisch-chemischen Prozessen; diese Lücke soll nun geschlossen werden.

Abschließend soll die Performanz des Modells deutlich gesteigert werden. In der derzeitigen Konfiguration ist das Modell deutlich zu langsam, um im Rahmen der Beratungstätigkeit der BAW eingesetzt zu werden.

### 4 Ergebnisse

Die bisherige prototypische Kopplung von Delwaq an Untrim (Holzwarth 2018) konnte zwar auf dem Hochleistungsrechner der BAW implementiert werden, die mangelnde Parallelisierung von Delwaq verhinderte jedoch eine zufriedenstellende Steigerung der Performanz. Für „produktive“ Läufe im Rahmen der Projektarbeit ist das Verfahren daher nicht geeignet. Eine Recherche nach möglichen Alternativen zeigte, dass das open-source-Produkt FABM (Bruggeman und Bolding 2014, Bild 1) die für die BAW vielversprechendste Alternative zu sein scheint. Der wissenschaftliche Hintergrund sichert langfristig eine Weiterentwicklung von FABM und fördert die Akzeptanz bzw. die Glaubwürdigkeit in das Produkt. Darüber hinaus erlaubt FABM als open-source-Produkt eigene Weiterentwicklungen und Anpassungen an Fragestellungen der BAW. Hier sind zukünftig vor allem Auswirkungen im Zusammenhang mit Sedimentbaggerungen bzw. -umlagerungen von Interesse. Der wichtigste Punkt ist jedoch, dass FABM speziell für den Einsatz auf Hochleistungsrechnern konzipiert wurde und daher voll parallelisiert ist. Die Kopplung von FABM an Untrim soll in den folgenden Monaten umgesetzt werden.

Darüber hinaus wurde ein idealisiertes 1D-Flokkulationsmodell erstellt, mit dem die Schwebstoffkonzentration und die mittlere Partikelgröße der Schwebstoffe berechnet werden können. Erste Tests zeigen eine gute Übereinstimmung der Schwebstoffkonzentration mit den Messdaten. Das Modell soll nun an ein biogeochemisches Modell gekoppelt werden, um die Flokkulation um ein biologisch moduliertes Signal zu ergänzen. Mit diesem Modell soll die Flokkulation und letztlich auch die Sinkgeschwindigkeit der Schwebstoffe in der Tideelbe besser beschrieben werden.



**Literatur:**

Bruggeman, J.; Bolding, K. (2014): A general framework for aquatic biogeochemical models. In: Environmental Modelling & Software, 61, S. 249–265.

Holzwarth, I. (2018): Implications of direct anthropogenic pressures on dissolved oxygen dynamics in a well-mixed estuary. PhD Thesis. Online verfügbar unter <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105564>, zuletzt geprüft am 28.10.2021.

Bild 1: Kopplung von FABM an hydrodynamische Modelle (aus Bruggeman und Bolding 2014).



## FuE: 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 in etwa der Hälfte der Wassersäule beobachtet (Becker et al. 2018). Dies ist mit ökologischen Folgen (kaum/kein Sauerstoff) sowie ökonomischen Konsequenzen (hoher Unterhaltungsaufwand) verbunden.

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. Eine Anwendung mit einer Verifizierung sowie fundierter Kalibrierung und Validierung in einem hochaufgelösten Ästuarmodell der Ems fehlt bislang. Hierfür ist auch zwingend ein erweitertes Prozessverständnis mithilfe von Naturmessungen erforderlich, wofür das internationale Messprogramm Ems-Dollart-Measurements (EDoM) im Zeitraum 2018/2019 stattfand und eine neue Messkampagne „MudMeas“ im Zeitraum 2021/2022 (Blick auf das Messgebiet, Titelbild) initiiert wurde. Die Analyse dieser 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 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.

#### Auftragsnummer:

B3955.03.04.70241

#### Auftragsleitung:

Marie Naulin  
 marie.naulin@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Anna Wünsche  
 anna.wuensche@baw.de

#### Laufzeit:

2018 bis 2022



### 3 Untersuchungsmethoden

Als Untersuchungsmethoden sollen die Analyse von Messdaten und numerische Modelle Anwendung finden. In MudEms werden die beiden Arbeitsschwerpunkte Weiterentwicklung des Simulationsverfahrens und die praktische Anwendung in einem hochaufgelöstem 3D-Modell der Ems fortgesetzt und verbessert. 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 einzelnen Arbeitspakete umfassen:

- AP 1: Analyse von Messdaten
- AP 2: Weiterentwicklung Simulationsmodell
- AP 3: Anwendung Emsmodell

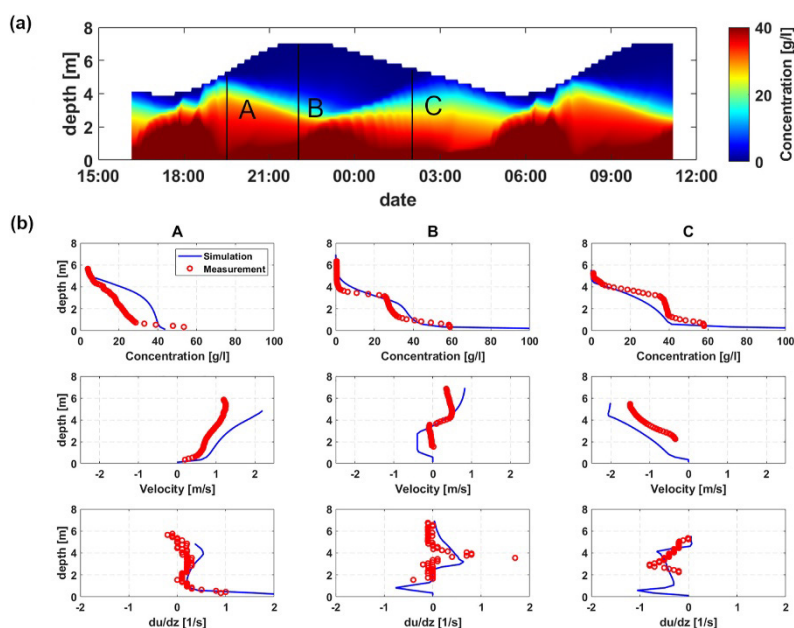
Weiterhin ist ein Bestandteil des Forschungsvorhabens der Austausch von Forschungsaktivitäten im Bereich „Schlick in Ästuaren“ mit weiteren Partnern aus Forschung und Praxis. Hierfür finden Kooperationen, u. a. mit der Universität der Bundeswehr in München, dem Institut für Ostseeforschung Warnemünde und der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, statt.

### 4 Ergebnisse

In diesem Kurzbericht wird auf die wesentlichen Ergebnisse des AP 2 eingegangen. Für die Weiterentwicklung der Simulationsmodelle wurde in Kooperation mit der Universität der Bundeswehr in München ein 1DV-Modell weiterentwickelt, welches in der Lage ist, die gesamte Wassersäule von der Oberfläche über Fluid Mud bis zum unbeweglichen Boden zu modellieren. Mit diesem sogenannten „holistischen Modellansatz“ konnte die komplexe Tidedynamik im Emsästuar unter Berücksichtigung von Flüssigschlick erfolgreich simuliert werden. Bild 1 zeigt die (a) Simulationsergebnisse des Schwebstoffgehalts über etwas mehr als eine Tide sowie (b) einen Vergleich von Simulation und Messung für die Parameter Konzentration, Geschwindigkeit und Scherrate für drei unterschiedliche Zeitpunkte im Verlauf der Tide. Die Simulationsergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messungen von Becker et al. (2018). Der Modellcode des numerischen Modells wurde in Malcherek und Schmidt (2021) und die Beschreibung und Anwendung in Schmidt und Malcherek (2021) veröffentlicht. Zu den aktuellen Arbeiten zählt die Implementierung der Ansätze des 1DV-Modells in ein 3D-Modell.

Für die Verifizierung und Validierung der Modellansätze hat sich jedoch gezeigt, dass die Verfügbarkeit von Messdaten ungenügend ist. Insbesondere fehlen bisher jegliche Informationen über die Interaktion von Flüssigschlick und Turbulenz im Emsästuar. Aus diesem Grund wurde die Messkampagne „MudMeas“ in Kooperation mit der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel initiiert. Hier fand die erste Messkampagne im September 2021 statt und eine weitere ist für den Sommer 2022 geplant. Auf dem Forschungsschiff F. K. "LITTORINA" (siehe Titelbild rechts) fanden stationäre Messungen unter Erprobung neuer Messtechnik in der hoch-komplexen Tide- und Schlickdynamik der Ems statt. Zusätzlich wurden Längsprofilfahrten um das Schiff gemacht (siehe Titelbild links), um auch die Mächtigkeit, Dynamik und Fläche des Flüssigschlicks im Messgebiet besser bestimmen zu können.

Im finalen Projektjahr liegt der Fokus verstärkt auf der Analyse dieser Messdaten und die gewonnenen Informationen sollen Anwendung zur Weiterentwicklung des Simulationsmodells finden.



#### Literatur:

Becker, M.; Maushake, C.; Winter, C. (2018): Observations of mud-induced periodic stratification in a hyperturbid estuary. *Geophysical Research Letters*, 45.

Malcherek, A.; Schmidt, J. (2021). 1DV-Holistic-Ems-Model: A holistic model to simulate mud-induced periodic stratification in hyper-turbid estuaries. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.5533535>

Schmidt, J.; Malcherek, A. (2021). Using a holistic modeling approach to simulate mud-induced periodic stratification in hyper-turbid estuaries. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL092798. <https://doi.org/10.1029/2021GL092798>

Bild 1: (a) Simulationsergebnisse 1DV-Modell (b) Vergleich Simulation und Messung; Bild: Schmidt und Malcherek (2021).



## BMDV-Expertennetzwerk: Küste (Phase 2)

Wissen – Können – Handeln

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Im BMDV-Expertennetzwerk haben sich sieben Ressortforschungseinrichtungen und Fachbehörden des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) zusammengeschlossen (DWD, BSH, BfG, BAW, DZSF/EBA, BAST und BAG). Im Themenfeld 1 des BMDV-Expertennetzwerks werden durch Klima-Veränderungen und extreme Wetterereignisse bedingte Auswirkungen für Verkehr und Infrastruktur bestimmt und beispielhaft Anpassungsoptionen entwickelt. Die Phase 2 (Laufzeit 2020 bis 2025) baut auf der Phase 1 (2016 bis 2019) des Expertennetzwerks auf, indem weitere Klimawirkungen in die Betrachtung integriert, Modellansätze weiterentwickelt und Wissenslücken geschlossen werden. Der Schwerpunkt der BAW am Standort Hamburg liegt auf der Untersuchung der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems Seeschiff-fahrtsstraße mit dem Küstenbereich und den Seehafenzufahrten. Aktuelle Erkenntnisse zum Meeresspiegelanstieg und zu möglichen Wetterlagenänderungen fließen in die Untersuchungen ein.

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

Grundlegende Voraussetzung für die rechtzeitige Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen und für die langfristige Gewährleistung der Funktionalität der Verkehrsinfrastruktur ist ein vertieftes Verständnis der ablaufenden Prozesse in den Ästuaren unter Klimawandelbedingungen. Für die Seeschiff-fahrtsstraßen spielt, neben möglichen Veränderungen der Abflüsse und der Windverhältnisse, der Meeresspiegelanstieg eine zentrale Rolle. Durch den Meeresspiegelanstieg verändern sich nicht nur die Wasserstände, auch die Tidedynamik, die Lage der Brackwasser-/Trübungszone und der Sedimenttransport werden beeinflusst. Eine wichtige Frage in diesem Zusammenhang ist, wie sich die Wattgebiete in den Mündungsgebieten der Ästuar bei einem klimawandelbedingten Meeresspiegelanstieg entwickeln. Die Wattgebiete bieten nicht nur einen einzigartigen Lebensraum für viele Tiere, sondern haben auch eine dissipierende Wirkung auf die Tide- und Seegangsenergie. Wenn die Wattflächen nicht dem Meeresspiegelanstieg entsprechend aufwachsen, wird sich ihre dissipierende Wirkung verringern.

#### Auftragsnummer:

B3955.03.04.70242

#### Auftragsleitung:

Dr. Rita Seiffert  
rita.seiffert@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Tara Mahavadi  
tara.mahavadi@baw.de  
Dr. Ingo Hache  
ingo.hache@baw.de

#### Laufzeit:

2020 bis 2025

### 3 Untersuchungsmethoden

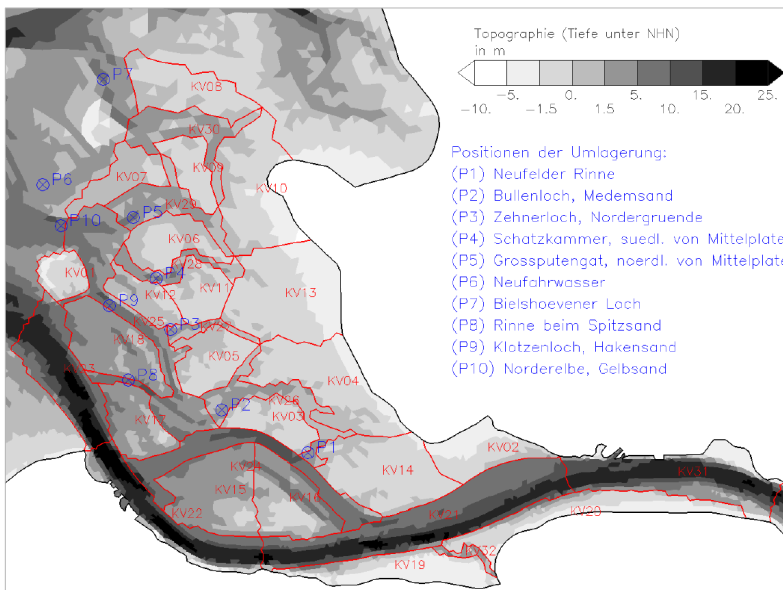
Im Hinblick auf die Unterhaltung der Seehafenzufahrten kann es wichtig sein, das Aufwachsen der Wattgebiete im Mündungsbereich der Ästuar bei einem beschleunigten Meeresspiegelanstieg zu fördern, um einer Vergrößerung des Strömungsquerschnitts und einer damit verbundenen Zunahme des Eintrags von Tideenergie ins Ästuar entgegenzuwirken.

Eine Möglichkeit zur Förderung des Wattwachstums könnte die gezielte Umlagerung von Baggergut in den Mündungsgebieten der Ästuar darstellen. Diese könnte das bestehende Sedimentmanagement ergänzen. In einer Sensitivitätsstudie werden mithilfe hydrodynamischer Modellierung verschiedene Varianten einer möglichen Umlagerung von Sediment im Elbmündungsgebiet untersucht (Wachler 2021). Die Untersuchungen erfolgen mithilfe des Deutsche-Bucht-Modells der BAW und des numerischen Modellverfahrens UnTRIM<sup>2</sup> (Casulli 2008). Dabei werden die Position, die Tidephase sowie die Korngrößenverteilung der Umlagerung variiert. Die betrachteten Umlagerungsmengen haben die Größenordnung der Ladekapazität von Baggerschiffen. Die für eine Förderung des Wattwachstums insgesamt erforderliche Sedimentmenge ist jedoch um einige Größenordnungen größer. In der Studie werden die prinzipiellen Wirkungen verschiedener Aspekte einer Umlagerung auf das Verdriftungsmuster dargestellt.

Die Studie dient dabei in erster Linie dem Systemverständnis. Die im Modell untersuchten Verbringstellen haben Wassertiefen, in denen die üblicherweise in der Tideelbe eingesetzten Baggerschiffe nicht navigieren können. Für die Praxis würde das bedeuten, dass die Sedimente an die betreffenden Stellen nur mithilfe von Spülleitungen (Pipelines) verbracht werden können, die ihren Eingang beispielsweise nahe der Fahrrinne haben. Mögliche Positionen bzw. Routen solcher Spülleitungen werden in dieser Untersuchung nicht erörtert.

### 4 Ergebnisse

Die Modellsimulationen deuten darauf hin, dass eine Umlagerung des Sediments möglichst in der Nähe der Wattgebiete erfolgen sollte, um die Deposition auf den Wattgebieten am besten zu fördern. Für die Förderung des Wattwachstums im gesamten Elbmündungsgebiet ist eine Umlagerung an mehreren Positionen innerhalb des Elbmündungsgebietes notwendig. Weiterhin ist die Wahl des Zeitpunkts der Umlagerung und die Korngrößenverteilung des Sediments entscheidend. Die frühe Flutstromphase (zwischen Kenterung bei Tide-niedrigwasser und maximaler Flutstromgeschwindigkeit) scheint als Zeitpunkt am günstigsten für eine Förderung des Wattwachstums. Bei allen Umlagerungspositionen ergibt sich die geringste Deposition auf den Watten im Fall einer Umlagerung während der Kenterung bei Tidehochwasser. Mit einer vor allem aus feineren (Schluff-)Fraktionen dominierten Korngrößenverteilung wird eine maximale Deposition auf den Watten erreicht. Die Korngrößenverteilung spielt im Vergleich zur Position und zum Zeitpunkt der Umlagerung eine besonders große Rolle, da die verschiedenen Fraktionen ein sehr unterschiedliches Verdriftungsmuster aufweisen.



#### Literatur:

Casulli, V.: A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 60, 391–408, 2008.  
<https://doi.org/10.1002/flid.1896>

Wachler, B.: Förderung des Wattwachstums: Eine mögliche Maßnahme zum Erhalt wichtiger Funktionen des Wattenmeeres bei Meeresspiegelanstieg. Meilensteinbericht M102.3.3 des Schwerpunktthemas SPT-102 Verkehrsinfrastruktur und Anpassung im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks, 2021.  
<https://hdl.handle.net/20.500.11970/107483>

Bild 1: Positionen der simulierten Umlagerungen (blaue Kreuze) und Lage der definierten Kontrollvolumen zur Aggregation der Simulationsdaten (rote Polygone), aus Wachler (2021).





## Einsatz von alternativen Antriebstechnologien

### Grundlagenermittlung für Entwürfe von Behördenschiffen

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Im Zuge weiterer Verschärfungen der Grenzwertsetzung von Abgasemissionen in der See- und Binnenschifffahrt sind aus Sicht des Bundesministeriums für Digitales und digitale Verkehr (BMDV) 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. Liquefied Natural Gas (LNG) oder Gas-To-Liquids (GTL) auch um die Untersuchung/Etablierung des Einsatzes emissionsarmer oder -loser Antriebstechniken, in diesem Falle um die Möglichkeit von elektrischen Antriebsanlagen unter anderem mit Batteriespeichern.

Da alternative Antriebstechnologien bei zukünftigen Schiffsneubauprojekten eine immer größere Rolle spielen, ist das Ziel der Forschungsarbeit, die praktische Umsetzung vorhandener und zukünftiger Technologien auf die konkrete Anwendung im Bereich der Wasserfahrzeuge des BMDV und seines nachgeordneten Bereiches voranzubringen. Zudem sollen Einsatzerfahrungen zur Optimierung und Übertragung wesentlicher Erkenntnisse auf weitergehende Anwendungen im Geschäftsbereich untersucht werden.

Dazu sind der technologische Fortschritt einzubeziehen und geeignete Entwürfe zu erstellen, die sukzessive an die unterschiedlichen Schiffsanforderungen angepasst und weiterentwickelt werden, um diese realisieren zu können. Die Erarbeitung von Monitoringkonzepten soll dabei die erforderliche Datengrundlage liefern.

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

Die WSV verfügt über eine große Anzahl an Arbeits- und Aufsichtsfahrzeugen im See- und Binnenbereich, die für verschiedene Aufgaben wie u. a. Wartung und Unterhaltung der Wasserstraßen, Vermessung oder die maritime Notfallvorsorge eingesetzt werden. Auf Grund der Altersstruktur dieser verschiedenen Fahrzeugarten entsteht in absehbarer Zeit die Notwendigkeit von Grundinstandsetzungen bzw. des Neubaus. Dabei spielt vor allem der Einsatz alternativer Antriebstechnologien eine wichtige Rolle. Es besteht im Hinblick

#### Auftragsnummer:

B3955.04.04.70001

#### Auftragsleitung:

Benno Lenkeit  
 benno.lenkeit@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Jan Moritz Schäfer  
 moritz.schaefer@baw.de

#### Laufzeit:

2018 bis 2022

auf die absehbar anstehenden Investitionsentscheidungen und Anforderungen an Umweltschutzaspekte ein grundlegendes Interesse an einer geeigneten alternativen Energie- und Antriebskonzeption, die z. B. rein elektrisch erfolgen könnte. Sich daraus ergebende Möglichkeiten können ein wesentlicher Beitrag seitens der 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 alternativer Antriebstechnologien, Marktrecherche zu aktuellen und in der Entwicklung befindlichen Systemen und Systemkomponenten.
- Durchführung technischer Vergleichsbetrachtungen und Bewertungen hinsichtlich der Anwendbarkeit für verschiedene Einsatzfälle.
- Entwurfsarbeit zur Integration von alternativen Antriebstechnologien in verschiedenen Fahrzeugtypen der WSV (u. a. Elektro- Spatz (E-Spatz) oder kleines Mehrzweckschiff zum Tonnenlegen und zu Zwecken der maritimen Notfallvorsorge).
- Entwicklung geeigneter Monitoringkonzepte für die Datenerfassung und Begleitung von Prototypen im Betrieb zur Entwicklung von Optimierungsansätzen und zur gezielten Auslegung der Systeme.

### 4 Ergebnisse

In Phase 1 der Untersuchung konnte eine Wissensbasis zu alternativen Antriebstechnologien aufgebaut werden, die fortlaufend an den technologischen Fortschritt angepasst und durch neue Erfahrungen ergänzt wird. Die Ergebnisse der Untersuchung einer Elektrifizierung der neuen Vermessungsboote des Vermessungs-, Wracksuch- und Forschungsschiffes ATAIR, die aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nicht realisiert werden konnte, dienen als Basis für weitere Projekte innerhalb des Forschungsvorhabens. Der dabei entwickelte leistungsoptimierte Bootsentwurf konnte schon im Pilotprojekt „E-Spatz“ der WSV eingesetzt werden.

Im Rahmen der Mitwirkung/Unterstützung im Pilotprojekt „E-Spatz“ der WSV konnten zugewiesene Arbeiten an der notwendigen Voruntersuchung und der Entwurf-Ausführungsunterlage (E-AU) gemäß den Verwaltungsvorschriften der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung VV-WSV 2107 durchgeführt werden. Nach erfolgreicher Genehmigung im Sommer 2020 wurde das Pilotprojekt in die Ausschreibung gebracht und konnte im Frühjahr 2021 erfolgreich vergeben werden. Im nächsten Schritt beginnt in Zusammenarbeit mit der Werft die Konstruktionsphase, die bis zum Baustart begleitet wird.

Auf erfolgte Anfrage seitens des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) wurde auf Basis der Arbeiten im Projekt „E-Spatz“ außerdem ein erstes Entwurfskonzept für eine elektrische Fähre ausgearbeitet, mit dem die Idee für eine elektrifizierte und umweltfreundliche Fährverbindung zur Insel Vilm weiterverfolgt und vorangetrieben werden soll. Hierfür steht auf Vermittlung der BAW nunmehr das Beschaffungsamt des BMI für die eigentliche Projektrealisierung zur Verfügung.

Im Projekt „Ersatz Eversand“ – ein kleines Mehrzweckschiff zum Tonnenlegen und zu Zwecken der maritimen Notfallvorsorge – sind unterschiedliche Energieversorgungskonzepte untersucht worden, die in die Entwurfsplanung eingeflossen sind. Dabei spielt vor allem der vollelektrische Betrieb unter bestimmten Fahrtbedingungen, hier der besondere Einsatz in gefährlicher Atmosphäre, bei der Auslegung des Batterie-Energiespeicherkonzeptes eine wichtige Rolle. Neue technische Herausforderungen und Anforderungen wurden mit verschiedenen Stellen erörtert, um die Ausschreibung optimal vorbereiten zu können.

Die notwendigen Arbeitspakete können wie folgt definiert werden:

2018 – Marktrecherche, technisches Konzept Vermessungsboote und Arbeitsschiffe der WSV

2019/2020 – Neustart des Projekts nach einjähriger Unterbrechung, Entwurfsarbeit für Arbeitsschiffe der WSV, fortlaufende Marktrecherche

2021/2022 – Fortsetzung der Entwurfsarbeit für Arbeitsschiffe der WSV/Schiffe der maritimen Notfallvorsorge, Aufnahme des Betriebs, Monitoring im Betrieb, erste Erkenntnisse/Erfahrungen aus dem Betrieb, Schwachstellenanalyse und Ansätze zu technischen Anpassungen

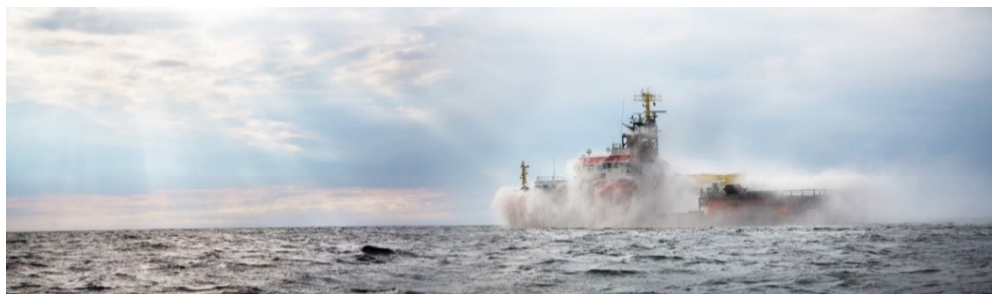


Bild 1: Mehrzweckschiff „Arkona“ (Quelle: BAW).

### III. Neue FuE-Vorhaben in 2021







## Wartung massiver Wasserbauwerke

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Wartung von technischen Systemen ist ein wesentlicher Baustein zur Erhaltung dieser Systeme sowie zur Erzielung einer langen Nutzungsdauer und wird in zahlreichen Bereichen praktiziert. Gemäß DIN 31051 [2019-06] bezeichnet Wartung „alle Maßnahmen zur Verzögerung des Abbaus des vorhandenen Abnutzungsvorrates“ und bildet zusammen mit der Inspektion, der Instandsetzung und ggf. der Verbesserung den Bereich der Bauwerkserhaltung. Im Massivbau ist Wartung derzeit lediglich für Parkhausbauten in Betonbauweise definiert und mit Maßnahmen hinterlegt, vgl. DBV-Merkblatt „Parkhäuser und Tiefgaragen“ (2018). Ansonsten werden im Betonbau kleinere Pflege- und Instandsetzungsmaßnahmen zumeist nur unsystematisch vorgenommen. Dies gilt auch für Bauwerke des Verkehrswasserbaus.

Forschungsthema und Ziel sind daher in einem ersten Schritt die Ausarbeitung potentieller Wartungsmaßnahmen für massive Wasserbauwerke (Beton und Mauerwerk). Die Aufstellung bauwerksspezifischer Wartungshandbücher unter individueller Berücksichtigung von Bauarten und Hauptbaustoffen bzw. die Erarbeitung entsprechender allgemeingültiger Vorlagen in Anlehnung an die Vorgehensweise bei Hoch- und Infrastrukturbauten sollen Ergebnis des Projekts sein.

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

Bezogen auf Wasserbauwerke kann der Begriff Wartung als Summe derjenigen Maßnahmen interpretiert werden, die ohne signifikante Einschränkung des laufenden Betriebs dazu dienen, eine Zustandsverschlechterung möglichst lange hinauszuzögern bzw. bereits bestehende Gebrauchseinschränkungen kurzfristig zu beseitigen und damit die Nutzbarkeit des Bauwerks sicherzustellen. Auf der Grundlage der im Projekt erarbeiteten Handlungsanweisungen bzw. Wartungshandbücher soll die WSV in die Lage versetzt werden, Wartung an massiven Wasserbauwerken systematisiert vorzunehmen, um so ihren Bauwerksbestand so lange wie wirtschaftlich sinnvoll betreiben zu können.

#### Auftragsnummer:

B3951.03.04.70020

#### Auftragsleitung:



Nancy Freitag  
 nancy.freitag@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Matthias Mohs  
 matthias.mohs@baw.de

#### Laufzeit:

2021 bis 2022

### 3 Untersuchungsmethoden

Im Inspektionstool WSVPruf werden Schäden erfasst, die im Rahmen der Bauwerksinspektionen festgestellt werden. Dieser Schadenskatalog wird im ersten Schritt ausgewertet, um einen Überblick zu gewinnen, welche Schäden in welcher Baustoff- bzw. Bauwerksgruppe häufig vorkommen und welches Schadensausmaß sie haben. Zudem werden durch theoretische Überlegungen Beeinflussungsmöglichkeiten der Zustandsprognose, die anhand der gelisteten Schäden durch stochastische Berechnungen den Eingreifzeitpunkt für Instandsetzungen der Bauwerke ermittelt, durch Wartungsmaßnahmen untersucht. Durch eine Literatursichtung werden mögliche Maßnahmen zur präventiven und korrektiven Wartung beleuchtet und ihre Eignung für kleinteilige Durchführungen an Verkehrswasserbauwerken ohne signifikante Beeinträchtigungen der Schifffahrt diskutiert.

Im zweiten Schritt werden Beschäftigte der WSV, in erster Linie Außenbezirksleitende, zu ihrem Umgang mit planmäßigen Wartungsmaßnahmen und dem aktuellen Stand der Wartung von Massivbauteilen befragt und die Ergebnisse ausgewertet. Ergänzend werden Gespräche mit anderen Infrastrukturbetreibern zu deren Umgang mit Wartung am Massivbau geführt. Ferner werden ausgewählte Wasserbauwerke während ihrer Trockenlegung zur Inspektion begangen, um einen Überblick über die dabei durchgeführten Arbeiten zu gewinnen.

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse werden mögliche Potentiale von Wartung am Massivbau zusammengetragen, systematisiert und daraus Wartungskonzepte entwickelt.

### 4 Ergebnisse

Das Projekt startete erst im Spätjahr 2020, sodass im Folgenden nur über die ersten Erkenntnisse berichtet werden kann.

Die in WSVPruf gelisteten Schäden für die Region Süd-West in der Kategorie Konstruktion, der Schäden am Massivbau zugeordnet werden, ist in mehrere Materialgruppen unterteilt. Die Materialgruppe Beton macht mit ca. 80 % der Schäden den größten Anteil aus. Mauerwerk und Steine nehmen zusammen 8 % ein, ebenso wie die Materialgruppe Metalle. Dabei ist zu beachten, dass der Stahlwasserbau eine eigene Kategorie darstellt und nicht in der Materialgruppe Metalle abgebildet ist.

Neben der Einteilung in Materialgruppen lassen sich die erfassten Schäden nach Schadensgruppen sortieren. Die Sauberkeit der Bauteile ist hier als eine Schadensgruppe definiert, umfasst aber auch Problemstellen durch Bewuchs oder Ablagerungen. Diese Schadensgruppe nimmt in der Kategorie Konstruktion bereits ca. 3 % der Schäden ein. Diese sind per Definition durch Wartung zu beheben. In der Materialgruppe Beton sind die am häufigsten vorkommenden Schadensgruppen Risse (39 %) und Beton (49 %). Nur 4 % der Schäden entfallen auf die Schadensgruppe Bewehrung, 2 % der Schäden sind auf die Thematik Sauberkeit zurückzuführen (vgl. Abbildung 1).

Für eine sinnvolle Beurteilung ob Schäden wartungsg geeignet sind, reicht diese Betrachtung allerdings nicht aus. Neben der Schwere der Schäden, die sich aus der Schadensklasse (SK 1-4) ergibt, sind die Größe der Schäden, ihre Zugänglichkeit und der Umfang der zur Reparatur nötigen Arbeiten relevant. Demnach ist eine pauschalisierte Aussage über korrektive Wartungsmöglichkeiten nur schwer möglich, lässt sich aber anhand der aufgeführten Einflüsse eingrenzen.

Die Gespräche mit den WSV-Beschäftigten machten deutlich, dass es derzeit kein einheitliches Vorgehen bei der Wartung von Massivbauteilen innerhalb der WSV gibt. Schon bei der Reinigung der Bauwerke vor der Bauwerksinspektion gibt es hinsichtlich Art und Umfang sehr unterschiedliche Vorgehensweisen. Während der Inspektions- und Trockenlegungsrythmus auf sechs Jahre festgelegt ist, gibt es große Unterschiede hinsichtlich der während der Trockenlegung am Massivbau durchgeführten Wartungsarbeiten. Zwischen den Trockenlegungen sind die Wartungsmöglichkeiten durch anstehendes Wasser und die Verkehrsbelastung der Bauwerke in der Regel begrenzt auf diejenigen Bauwerksbereiche, welche hiervon nicht unmittelbar tangiert werden.

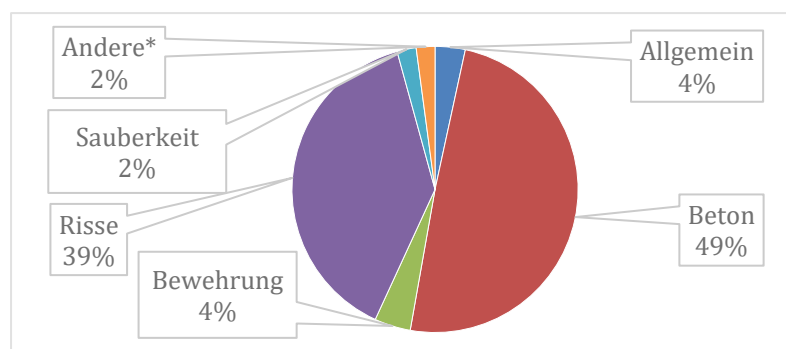


Bild 1: Anteil der Betonschäden je Schadensgruppe.

#### Literatur:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2010): BAWMerklblatt Bauwerksinspektion (MBI). Karlsruhe: BAW.

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2018): BAWMerklblatt Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV). Karlsruhe: BAW.

DIN 31051:2019-06: Grundlagen der Instandhaltung.





## Charakterisierung relevanter Mauerwerkseigenschaften zur Nachrechnung bestehender Wasserbauwerke aus Mauerwerk im Rahmen des TbW

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Im Geschäftsbereich der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) existiert ein nicht unerheblicher Anteil an Bauwerken, die ganz oder teilweise aus Mauerwerk errichtet wurden und deren Bestandsunterlagen oft unvollständig sind. Bei Erfordernis einer Nachrechnung werden Mauerwerksbauwerke gemäß BAWMerkblatt Bewertung der Tragfähigkeit bestehender, massiver Wasserbauwerke (TbW) wie unbewehrte Betonbauwerke behandelt. Bezüglich der Erfassung der erforderlichen Materialangaben wird auf die entsprechenden Mauerwerksnormen verwiesen. Die relevanten Mauerwerksnormen beziehen sich jedoch in erster Linie auf modernes Mauerwerk, das vorzugsweise im Hochbau Verwendung findet. Eine explizite, an die Besonderheiten von Mauerwerk angepasste Vorgehensweise bei der Nachrechnung bestehender Wasserbauwerke und Hinweise zu Probenahmen für Bestandsuntersuchungen an Wasserbauwerken aus Mauerwerk existieren derzeit nicht.

Das vorliegende Forschungsvorhaben soll die im Hochbau üblichen Prüfverfahren zur Bestimmung relevanter Materialkenngrößen wie Druck- und Zugfestigkeit im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit im Verkehrswasserbau untersuchen und geeignete Prüfverfahren ableiten. Es sollen Hinweise für die Probenahme an historischen Mauerwerksbauten im Wasserbau erarbeitet werden.

Des Weiteren sollen Versuche zur Ermittlung von Scherparametern in Mauerwerksfugen der Erweiterung von bereits in früheren Forschungsvorhaben erworbenen Kenntnissen zum Scherverhalten von Mauerwerk dienen.

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

Sind für bestehende Wasserbauwerke aus Mauerwerk Nachrechnungen erforderlich, müssen fehlende Bestandsunterlagen neu erarbeitet werden. Die

#### Auftragsnummer:

B3951.03.04.70021

#### Auftragsleitung:



Nancy Freitag  
 nancy.freitag@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Anka Frentzel-Schirmacher  
 anka.frentzel-schirmacher@baw.de  
 Dr. Viktória Malárics-Pfaff  
 viktoriamalarics-pfaff@baw.de

#### Laufzeit:

2021 bis 2022

in diesem Zusammenhang notwendigen Materialparameter erfordern ab Untersuchungsstufe B nach TbW-Beprobungen der jeweiligen Mauerwerksbauwerke. Die Vorgehensweise bei diesen Beprobungen soll mithilfe des vorliegenden Vorhabens konkretisiert und vereinheitlicht werden. Weiterhin sollen Hinweise erarbeitet werden, die ein einheitliches Vorgehen bei der Ermittlung der relevanten Materialparameter ermöglichen. Dabei sollen sowohl Vorgaben zur Bohrkernentnahme als auch für die Durchführung der Prüfungen zur Bestimmung der charakteristischen Mauerwerksdruckfestigkeit sowie der Kennwerte zum Scherwiderstand von historischen Mauerwerksfugen abgeleitet werden.

### 3 Untersuchungsmethoden

In einem ersten Arbeitsschritt werden im Rahmen einer Literatursichtung die im Mauerwerksbau üblichen und für die Bewertung von Bestandsbauten genutzten Prüfverfahren zusammengestellt und im Hinblick auf die Übertragbarkeit auf Wasserbauwerke betrachtet.

Im Rahmen des Forschungsprojektes stehen Untersuchungen an historischen Mauerwerksschleusen im Mittelpunkt. Dabei werden zunächst die in (Weydert 2020) gewonnenen Erkenntnisse an Bestandsmauerwerk verifiziert, um Hinweise zu vorzugsweise zu wählenden Prüfmethoden zur Ermittlung der Mauerwerkeigenschaften ableiten zu können. Die Wahl der Prüfmethode steht dabei in direktem Zusammenhang mit der Wahl des geeigneten Probennahmeverfahrens.

Auf Basis der experimentellen Ergebnisse sollen Vorgaben für die Probennahme und Untersuchung von Bestandsmauerwerk erarbeitet und weitere Erkenntnisse zum Schertragverhalten von Mauerwerksfugen gewonnen werden.

### 4 Ergebnisse

Eine erste Probennahme an historischem Ziegelmauerwerk hat stattgefunden, weiteres Probenmaterial wurde durch die WSV zur Verfügung gestellt. Das Probenmaterial wurde aufbauend auf den Erkenntnissen der Masterarbeit von Weydert (Weydert 2020) im Rahmen einer weiteren Masterarbeit (Fischbach 2021) untersucht. Dabei wurden erste Erkenntnisse zur Übertragbarkeit der Verfahren zur Bestimmung der Mauerwerkfestigkeit von modernem auf historisches Mauerwerk sowie zur im historischen Mauerwerk zu erwartenden Einflussfaktoren auf die Prüfstreuung gewonnen. Als wesentlicher Einflussfaktor wurde die Prüfrichtung erkannt, woraus sich grundsätzliche Fragen zur Prüfungsdurchführung ableiten.

Die Auswertung einer ersten Serie bereits durchgeführter Scherversuche an historischem Mauerwerk steht noch aus.

Aufbauend auf die Ergebnisse der durchgeführten Versuche werden die weiteren experimentellen Schritte geplant und durchgeführt.



Bild 1: Druckfestigkeitsprüfung eines Vertikalbohrkerns.

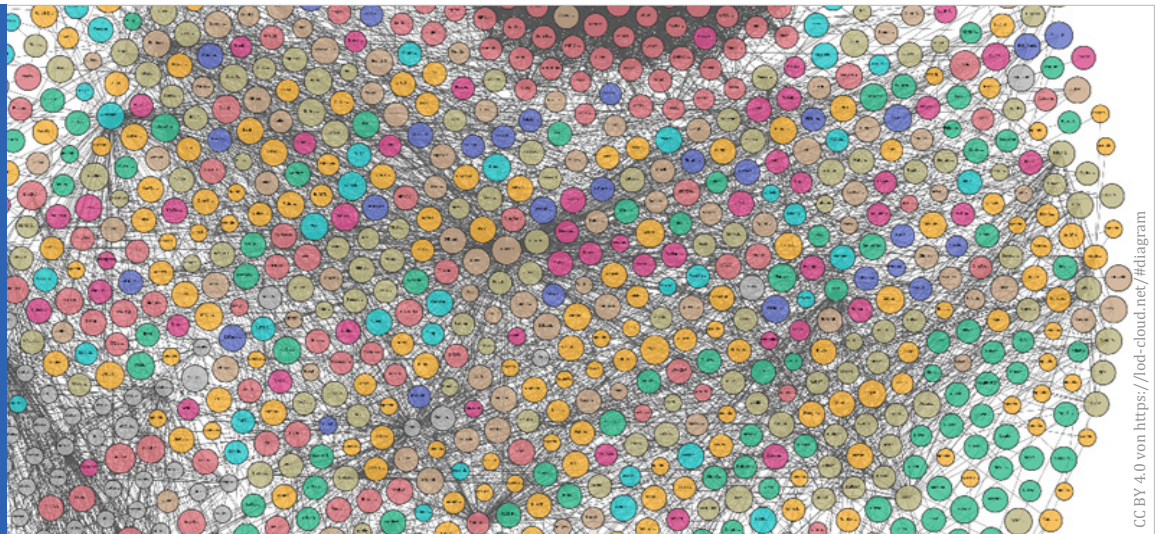
#### Literatur:

BAWMerkblatt TbW (2016): Bewertung der Tragfähigkeit bestehender, massiver Wasserbauwerke (TbW), BAW, Karlsruhe.

Fischbach, Jan (2021): Experimentelle Charakterisierung bestehender Mauerwerksbauten im Wasserbau. Masterarbeit. KIT, Karlsruhe.

Weydert, Charlotte (2020): Nachrechnung von bestehenden Mauerwerksbauwerken im massiven Verkehrswasserbau. Masterarbeit. KIT, Karlsruhe.





## Erprobung der Methode Semantic Web zur Überführung von relevanten Informationen in ein Datenmodell

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die IT-Anwendungslandschaft in der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) ist aufgrund ihrer langen Entwicklungshistorie technologisch heterogen. Aktuell stehen in der WSV viele Informationen in Daten unterschiedlicher Art und Qualität, in unterschiedlichen IT-Systemen zur Verfügung. Dadurch wird eine Kombination und Weiterverarbeitung der enthaltenen Informationen erschwert. Die Überführung von relevanten Informationen in ein Datenmodell ist hierbei ein zentraler Punkt. Ein Informationsmodell, das eine effizient vernetzte IT-Landschaft zur optimalen Bedienung der Informationsanforderungen der Nutzer bündelt und integriert, existiert nicht. Die Methode des Semantic Web wird als Stand der Technik unter Verwendung von offenen und einheitlichen Standards zur Integration der heterogenen Daten benutzt. Ein bekanntes Beispiel dafür ist der Ansatz Linked Open Data, welcher das Web zu einem globalen, verteilten und semantikbasierten Informationssystem bringen soll (Auer et al. 2014). Im Bereich des Verkehrswasserbaus existiert bisher jedoch keine Erfahrung zum Aufbau eines Datenmodells mit Wissensbasis durch Semantic Web.

Die avisierte Arbeit soll die Methode des Semantic Web für den Verkehrswasserbau erproben, um einen perspektivischen Bauplan für das Datenmodell mit Wissensbasis zu skizzieren und den Kompetenzaufbau in der BAW in der Erarbeitung von Datenmodellen mit Wissensbasis für die Entwicklung eines Informationsmodells zu unterstützen.

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

Eine Vernetzung der bestehenden IT-Systeme der WSV ohne neue, redundante und insulare Datenhaltungen kann geschaffen werden. Dadurch können Informationsbedürfnisse der Prozessbeteiligten optimal (aktuell, redundanzfrei, widerspruchsfrei) befriedigt werden. Die Informationskonsumenten verlieren weniger Zeit bei der Suche nach entscheidungsrelevanten Informationen. Somit kann eine effizientere Projektbearbeitung erzielt werden. Die Informationsbereitstellung kann dadurch verbessert werden. Ferner kann diese Arbeit zur Erprobung des Semantic Web einen Beitrag zum Wissensmanagement der WSV in der methodischen Frage leisten.

#### Auftragsnummer:

B3951.04.04.70012

#### Auftragsleitung:



Jiuru Huang  
 jiuru.huang@baw.de

#### Laufzeit:

2021 bis 2023



### 3 Untersuchungsmethoden

Das Vorhaben untersucht die konkrete Einsatzbarkeit der Methode Semantic Web im Bereich des Verkehrswasserbaus, welche durch die formalen Sprachen zur Repräsentation von Wissen in der Form einer Wissensbasis das Auffinden relevanter Informationen sowie die Integration von Informationen aus verschiedenen Quellen erleichtern soll (Hitzler et al. 2008). Nachfolgend werden die Untersuchungsschritte erläutert.

- 1) Es ist ein Domänenbereich, in dem die Wissensbasis aufgebaut werden soll, festzulegen.
- 2) Es sind Abfragen, die das Datenmodell bedienen soll, als Anwendungsszenarien zu definieren.
- 3) Auf diesen Abfragen aufbauend kann ein Assoziationsnetz als Entwurf für die Wissensbasis konzipiert werden, welches die im Datenmodell befindlichen Klassen bildet. Diese Aufgabe ist temporär und wird durch den Schritt 4 vollständig ersetzt.
- 4) Die Bestandteile der Wissensbasis (z. B. Klassen und Beziehungen) werden in formalen Sprachen der Methode Semantic Web definiert. Die Definitionen werden durch eine umfangreiche Recherche der Verwaltungsvorschriften und der Regelwerke widerspruchsfrei mit Quellenangaben belegt.
- 5) Zusätzlich zu den Erkenntnissen aus einer internen Datenlandkarte werden die Quellspeicherorte der Wissensbasis und deren Datenstrukturen in den Datenbeständen der verteilten IT-Systeme analysiert, um die Durchsuchungsmöglichkeit der vorhandenen IT-Systeme über die Wissensbasis zu skizzieren. Es werden nur die Datenstrukturen, die eine Bedeutung haben, in die Wissensbasis integriert. Dabei ist es irrelevant, welche Datenrelationen in den IT-Systemen gespeichert sind, da eine Wissensbasis diese integrieren kann, damit sie von Maschinen interpretiert werden können.

Diese Schritte (außer Schritt 1) werden iterativ wiederholt, womit eine kontinuierliche Verbesserung des Datenmodells erreicht werden kann. Das Datenmodell wird fortlaufend auf Konsistenz und Kohärenz geprüft.

### 4 Ergebnisse

Es wurden exemplarische Anwendungsbeispiele aus dem Kontext des Informationssystems „Multi-Projektmanagement der WSV“ (MPM) ausgewählt und als Domänenbereich festgelegt. Die Gründe dafür sind zum einen, dass das Informationssystem MPM umfangreiche Daten unterschiedlicher Art und Qualität aus vorhandenen IT-Systemen der WSV nutzt. Zum anderen wurden die im MPM genutzten Informationen in einem Standardisierungsprozess festgelegt, wodurch ein einheitliches Verständnis der Begrifflichkeiten und somit eindeutige Definitionen erzielt wurden. Darüber hinaus sind die Nutzerbedürfnisse relativ klar formuliert.

Die Abfragen, die das Datenmodell mit Wissensbasis bedienen soll, wurden unter Berücksichtigung des Nutzerbedarfs im Informationssystem MPM als mögliche Anwendungsszenarien grob formuliert. Sie werden im Laufe der Datenmodellierung weiter konkretisiert und verbessert (s. Bild 1, oberer Bereich). Es wurde ein Assoziationsnetz (s. Bild 1, unterer Bereich) passend zu den Abfragen aufgestellt. Hierzu wurde das Fachkonzept „MPM“ gesichtet. Daraus wurden Definitionen für „Projekt“-Informationen abgeleitet. Die mit dem „Projekt“ zusammenhängenden Daten wurden analysiert. Die Daten für den Aufbau des Datenmodells mit Wissensbasis über „Projekt“ wurden selektiert, in den Protégé-Ontology-Editor importiert und in Ontologien mit Web Ontology Language (OWL) gebracht. Ein Bestandteil der Wissensbasis ist es, dass ein „Projekt“ aus zwei wesentlichen Klassen – „Maßnahme“ und „Objekt“ – besteht, von denen unterschiedliche „Projekt“-Klassen abgeleitet werden. Dies ermöglicht die Abfrage wie z. B. „alle Projekte der Instandsetzung und/oder des Wehrverschlusses“, bei der „Instandsetzung“ eine „Maßnahme“ ist und „Wehrverschluss“ ein „Objekt“ ist.

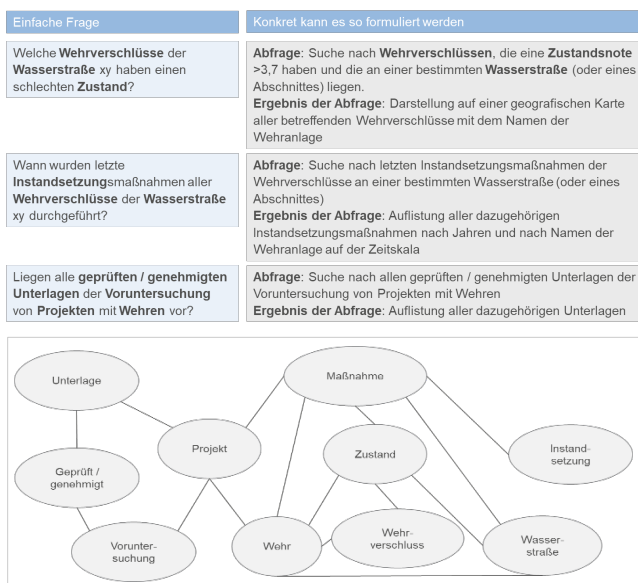
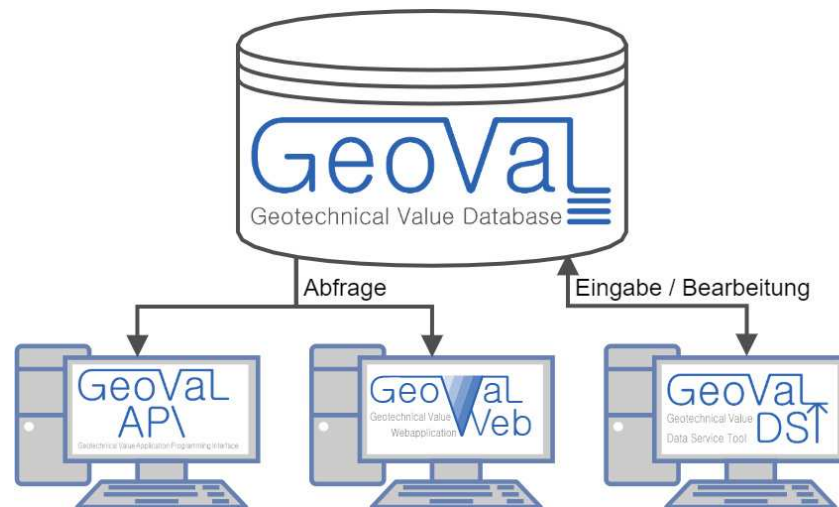


Bild 1: Beispiele der möglichen Abfragen und Ergebnisse der Abfragen (oben) sowie die dazugehörenden Klassen in einem beispielhaften semantischen Assoziationsnetz (unten).

**Literatur:**

Auer, Sören; Bryl, Volha; Tramp, Sebastian (Hg.) (2014): Linked Open Data – Creating Knowledge Out of Interlinked Data. Cham: Springer International Publishing (8661). Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1007/978-3-319-09846-3>

Hitzler, Pascal; Krötzsch, Markus; Rudolph, Sebastian; Sure, York (2008): Semantic Web. Grundlagen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag (eXamen.press). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-33994-6>.



## GeoValDB – Geotechnical Value Database

### Aufbau und Betrieb einer geotechnischen Kennwertdatenbank

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Projekt- und aufgabenbezogene Untersuchungen der Eigenschaften von Boden- und Felsproben sind mit erheblichem zeitlichem und finanziellem Aufwand verbunden. Die Nutzung der gewonnenen Erkenntnisse für andere Aufgabenstellungen ist ein volks- und betriebswirtschaftliches Gebot. Mit der freien Bereitstellung einer Datenbank für die systematische Sammlung von Versuchsergebnissen wird eine wichtige Voraussetzung für die Nutzung des angesammelten Wissens geschaffen. Der Vergleich oder die Bewertung einzelner geotechnischer Kennwerte setzt voraus, dass Informationen über dessen Gewinnung, die angewandte Methode, die verwendete Versuchstechnik sowie die Herkunft der Rohdaten bzw. die Rohdaten selbst im System hinterlegt werden können. Eine große Anzahl von Behörden und Universitäten unterhalten Datenbanksysteme oder Datensammlungen zu geotechnischen Versuchen. Dieser „Datenschatz“ liegt praktisch dispers vor. Ziel ist die Aggregation dieser Daten in einem gemeinsamen Datenformat. Dies ist gleichbedeutend mit der Entwicklung eines interoperablen Austauschformats für bodenmechanische und felsmechanische Kennwerte. Die Daten sollen öffentlich bereitgestellt werden. Mittels Webanwendungen können Daten hinzugefügt, editiert oder abgerufen werden. Es wird eine Verknüpfung mit Diensten und Portalen mit fachlich nahem Bezug, wie z. B. BoreholeML oder der Bohrpunktkarte Deutschland, angestrebt.

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

Durch den Aufbau der GeoValDB wird der Bereich Open Data und Open Access entscheidend unterstützt. 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 genutzt werden, wenn sie auf einer Plattform gebündelt aufgefunden werden. Durch eine kontinuierliche Befüllung der Datenbank aus Projekten

#### Auftragsnummer:

B3952.00.04.70002

#### Auftragsleitung:

Andreas Sorgatz-Wenzel  
 andreas.sorgatz-wenzel@baw.de

#### Laufzeit:

2021 bis 2025

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 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 Untersuchungsmethoden

GeoValML wurde generisch aufgebaut und berücksichtigt die modernen Ansätze konzeptueller Datenmodelle und Datenbanken. Die fachliche Herkunft spielt aus Sicht der Daten eigentlich keine Rolle. Daten (Messwerte, Kennwerte) bleiben Daten, ob sie im Feld gemessen, mittels einer Probennahme klassifiziert, oder durch eine weitere Prozessierung oder Laboranalyse gewonnen wurden. Notwendig ist eine Differenzierung aber für die Semantik, d. h. die eindeutige Zuordnung der Daten zu bestimmten Disziplinen sowie für eine Abbildung der Beziehung der Daten untereinander (Ontologien). Dafür unerlässlich ist sowohl die Erstellung von Vokabularen als auch die Verknüpfung von Daten und Vokabularen über Ontologien. Für diese Aufgabe ist Domänen- bzw. Expertenwissen zwingend notwendig. Der Aufbau von abgestimmten Vokabularen ist von essentieller Bedeutung. Als Grundlage für den Aufbau von abgestimmten Vokabularen werden die in nationalen und internationalen Normen verwendeten Begrifflichkeiten genutzt.

GeoValML greift im Kern auf das Schema von „Observations & Measurements“ zurück. Dadurch wird die Erweiterungsfähigkeit des Modells erreicht. Zusätzlich zu dem Datenmodell von GeoValML ist ein Datenmodell für die Vokabularen notwendig.

Zur manuellen Dateneingabe und -bearbeitung wird das Data Service Tool (GeoValDST) entwickelt. Dieses generiert die Webansicht direkt aus dem aktuellen Datenbankschema. Dies senkt den Wartungsaufwand, da neue Attribute somit automatisch in der Webanwendung erscheinen. Eine Datenrecherche soll mittels der Webapplikation (GeoValWeb) möglich sein.


### 4 Ergebnisse

Zur Veröffentlichung der Daten wird ein OGC konformer Web Feature Service der neuesten Generation eingesetzt. Mit der Einführung der OGC APIs wird ein Paradigmenwechsel eingeleitet. Der erste neue Standard dieser Familie, der vom OGC im November 2019 verabschiedet wurde, ist OGC API – Features.

Die Vorteile der neuen Schnittstelle sind:

- Vereinfachung des Zugriffs auf verteilte Geodaten,
- einfachere Integrierbarkeit in beliebige Webanwendungen und Prozesse,
- Indizierung über Suchdienste und
- einfaches Sichten der zur Verfügung gestellten Daten über eine Webseite.

Der Dienst ist bei der Bundesanstalt für Wasserbau unter <https://baugrund-daten.baw.de> verfügbar. Die dort zugänglichen Seiten dienen der Veröffentlichung der Daten und Metadaten der GeoVal-Datenbank. Über den genannten Link erreicht man die sogenannte Landing Page der Schnittstelle. Mit dieser Schnittstelle und dem Aufbau der Datenbank können die FAIR-Prinzipien (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) erfüllt werden.



Bohrloch 'BK 001'	
<b>Objekt-Id</b>	677
<b>Art</b>	Bohrloch
<b>Aufschlusspunkt-Id</b>	BK 001
<b>Kurzbezeichnung</b>	BK 001
<b>Bezeichnung</b>	BK 001
<b>Projekte</b>	STH Iffezheim, Rhein, Dammnachsorge

Bild 1: Screenshot der GeoVal-API.

#### Literatur:

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

GeolDG. (2020): Geologiedatengesetz. Bundesrepublik Deutschland.

Wilkinson MD, D. M. (2019): The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. Scientific data.





## Geohydraulische und geotechnische Optimierung von Fischaufstiegsanlagen in Schlitzpassbauweise

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die ökologische Durchgängigkeit ist bei den staugeregelten Flüssen der Bundeswasserstraßen durch ca. 250 Staustufen mit Stauhöhen bis ca. 10 m unterbrochen. Diese stellen für wandernde Fische und das Makrozoobenthos unüberwindbare Hindernisse dar. Um die Passierbarkeit flussaufwärts zu gewährleisten, ist an vielen Staustufen der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) die Errichtung von Fischaufstiegsanlagen (FAA) vorgesehen.

Fischaufstiegsanlagen können entweder als Raugerinne oder in Form von aufeinanderfolgenden Becken konstruiert werden. Seitens der BAW empfohlene Bautypen sind fischpassierbare Raugerinne sowie Schlitzpässe, die zu den beckenartigen FAA zählen. Bei Schlitzpässen wird der insgesamt zu überwindende Höhenunterschied durch einen vertikal durchgehenden Schlitz in den Trennwänden der einzelnen Becken in kleine Wasserspiegeldifferenzen eingeteilt, die der Fisch überwinden kann (DWA-M 509 2014). Die Becken von Schlitzpässen werden i. d. R. in Massivbauweise als Trog mit geschlossener Betonsohle sowie Betonwänden erstellt. Schlitzpässe können, im Gegensatz zu fischpassierbaren Raugerinnen, bei Bedarf zumindest abschnittsweise als platzsparendes Kompaktbauwerk mit Wendelungen hergestellt werden (DWA-M 509 2014). Deshalb werden, insbesondere bei einem nachträglichen Einbau an bestehenden Querbauwerken, bei beengten Platzverhältnissen und bei großen Höhenunterschieden häufig Schlitzpässe geplant.

Erforderliche Maßnahmen zur Erbringung von Tragfähigkeits-, Gebrauchstauglichkeits- und Dauerhaftigkeitsnachweisen der FAA als Schlitzpass in Massivbauweise nach DIN 19702:2013-02, eine gegebenenfalls notwendige Auftriebssicherung der Baugruben- und Beckensohlen sowie die daraus resultierende Menge an zu verbauendem Stahlbeton führen zu einem hohen Aufwand und hohen Kosten für die Errichtung der Anlagen. Deshalb sollen Material- und Ausführungsalternativen bei den Beckenwänden und Trennwänden sowie der Gestaltung der Beckensohlen untersucht werden, durch die eine Aufwands- und Kosteneinsparung ermöglicht werden kann. Der Schwerpunkt soll auf der Verwendung einer offenen Sohle in der FAA anstelle einer Trogbauweise mit Betonsohle liegen.

#### Auftragsnummer:

B3952.03.04.70010

#### Auftragsleitung:



Sonja Letzelter  
 sonja.letzelter@baw.de

#### Laufzeit:

2021 bis 2023

Das Ziel der Untersuchung ist die Erstellung von Leitlinien zur Auswahl geeigneter Bauverfahren und Materialien für Schlitzpässe aus geotechnischer und geohydraulischer Sicht. Dabei soll herausgearbeitet werden, unter welchen hydraulischen, geohydraulischen, geotechnischen und bautechnischen Randbedingungen sich welche Bauweisen und Materialien als am geeignetsten erweisen und was dabei jeweils zu beachten ist.

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

Die Erhaltung und Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit an Fließgewässern zählt zu den bedeutenden Umweltzielen der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL). Zur Umsetzung der Vorgaben der EU-WRRL ist zur Herstellung der flussaufwärts gerichteten Durchgängigkeit die Erstellung von Fischaufstiegsanlagen an den Staustufen der staugeregelten Flüsse der Bundeswasserstraßen vorgesehen. Das Vorhaben ist darauf ausgelegt, Möglichkeiten zur Reduzierung des Bau- und ggf. Unterhaltungsaufwandes der als Schlitzpässe erstellten FAA zu untersuchen und wenn möglich die wirtschaftliche Bauweise und Ökologie der FAA zu steigern.

## 3 Untersuchungsmethoden

Am Anfang sowie ggf. auch im weiteren Verlauf des Projektes steht eine Literaturrecherche, um die aktuellen Vorgaben und den Stand des Wissens hinsichtlich bautechnischer Dimensionierung, Gestaltung und Herstellung von FAA sowie wasserbauliche und bautechnische Vorgaben zu eruieren. Dies soll mit Unterstützung der Abteilungen Wasserbau und Bautechnik der BAW erfolgen.

In einem zweiten Schritt sollen geplante sowie bereits fertiggestellte FAA an Bundeswasserstraßen (z. B. an den Wehren Geesthacht/Elbe, Koblenz/Mosel, Malliß/MEW) hinsichtlich ihrer Bauweise und den jeweils vorliegenden hydraulischen, geohydraulischen, geotechnischen und bautechnischen Randbedingungen genauer analysiert werden. Dazu ist eine Besichtigung der fertiggestellten FAA sowie ein Erfahrungsaustausch mit den für die Erstellung und den Betrieb der Anlagen Verantwortlichen zu den Planungsgrundlagen, zur baulichen Umsetzung und den dabei aufgetretenen Problemen sowie zur Funktionalität und zum Unterhalt der FAA geplant. Anhand der vorliegenden Randbedingungen bei den fertiggestellten FAA soll überprüft werden, ob eine Umsetzung der vorgeschlagenen alternativen Wand- und Sohlgestaltung und der Materialien an diesen Standorten möglich gewesen wäre und welche Probleme, Nachteile oder Vorteile zu erwarten gewesen wären.

In einem dritten Schritt sollen die Möglichkeiten zur Anwendung der vorgeschlagenen alternativen Bauformen und Materialien im Rahmen von Planungen für den Neubau von FAA (z. B. an den Lahnwehren Hollerich und Lahnstein) untersucht werden. Insbesondere bei der FAA am Wehr Hollerich ist eine intensive Begleitung der Planung für den Neubau der FAA vorgesehen. Aus den Ergebnissen der Untersuchungen sollen maßgebende Randbedingungen für die Anwendung der vorgestellten alternativen Bauweisen und Materialien herausgefiltert und Vor- und Nachteile bei diesen Randbedingungen ermittelt werden.

## 4 Ergebnisse

Im Zuge des Projektverlaufs gab es einen engeren Austausch mit den Abteilungen Wasserbau und Bautechnik der BAW zur Klärung der Grundlagen und wichtigen Fragestellungen. Daten zu verschiedenen geplanten und bestehenden FAA wurden eingeholt und erste Berechnungen sowie numerische Modellierungen von möglichen Wasserverlusten durchgeführt. Zudem ist eine Befragung von Verantwortlichen für den Betrieb von Fischaufstiegsanlagen in Kooperation mit der GDWS und der Abteilung Bautechnik der BAW in Planung.

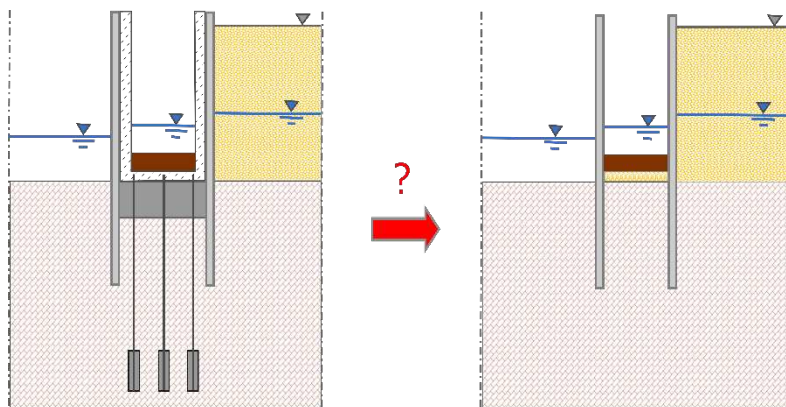


Bild 1: Schnitt durch ein Becken einer FAA in Schlitzpassbauweise. Vergleich zwischen der aktuellen Massivbauweise mit Betontrög und ggf. Rückverankerung zu einer im Projekt untersuchten Bauweise mit offener Sohle ohne Betontrög.

### Literatur:

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

DWA-M 509 (2014): Merkblatt: Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef.





## Verockerung geotextiler Filter in Deckwerken

### Grundwasseranalytik und physikalische Modellversuche

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Mit Modellversuchen soll das Phänomen der Verockerung von geotextilen Filtern und Kornfiltern an Bundeswasserstraßen untersucht werden, um Abhängigkeiten der Verockerungsgefahr vom Grundwasserchemismus herauszuarbeiten und evtl. Konstruktionshinweise für verockerungsresistente Geotextilien bzw. Deckwerke zu finden. Parallel dazu erfolgt an Wasserstraßen mit bekannter Verockerungsgefahr eine chemische und biologische Analyse des Grundwassers.

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

Filter gewährleisten in ungedichteten Wasserstraßen einen Druckaustausch zwischen Grundwasser und Gewässer bei gleichzeitiger Verhinderung eines Bodenaustrages in die Deckschicht bzw. in das Gewässer bei hydraulischen Belastungen durch Strömungen und Wellen infolge Schiffsvorbeifahrt. Vor allem in tidebeeinflussten Wasserstraßen (Ems, Weser) gab es Probleme infolge Verockerung der geotextilen Filter (Bild 1), die zu einer deutlichen Verringerung der Durchlässigkeit der Filtervliese und dadurch zu Blasenbildung (s. Titelbild) und Behinderungen der Schifffahrt (Verwickeln in Schiffsschrauben) führten. U. a. deshalb erfolgte ein teilweiser Ersatzneubau der Deckwerke an der Tideems unter Einsatz von Kornfiltern.

Die alternative Bauweise mit Kornfiltern ist deutlich unwirtschaftlicher als die Verlegung von geotextilen Filtern. Die Verbesserung des Verständnisses der Verockerung von Filtern liefert damit einen wichtigen Beitrag für die Weiterentwicklung dauerhafter Deckwerksbauweisen.

#### 3 Untersuchungsmethoden

Die Bearbeitung des Themas erfolgt im Rahmen eines Forschungsverbundes der BAW mit der FH Münster und der RWTH Aachen. Dafür sind folgende Arbeitsschritte geplant:

#### Auftragsnummer:

B3952.04.04.70015

#### Auftragsleitung:

Norbert Kunz  
 norbert.kunz@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

FH Münster, RWTH Aachen

#### Laufzeit:

2021 bis 2025



- Literaturrecherche, Methodenentwicklung und Untersuchung von in situ Prozessen
- Bestimmung und Qualifizierung der maßgeblichen Verockerungsparameter und Einflüsse
- Planung der physikalischen Modellversuche
- Versuche zur Entstehung und Wirkung von Verockerungsprodukten an geotextilen Filtern
- Versuche zur Entstehung und Wirkung von Verockerungsprodukten an mineralischen Filtern
- Untersuchung von Maßnahmen zur Reduktion der Verockerung
- Erarbeitung einer Handlungsempfehlung zur Planung und Bemessung von mineralischen und geotextilen Filteranlagen im Wasserbau

An der FH Münster erfolgt die Untersuchung der Einflussparameter der Verockerung auf Grundlage einer Daten- und Literaturanalyse und deren Verifizierung durch die chemische und mikrobiologische Untersuchung von Grundwasserproben über einen Jahresgang von Orten, an denen Filterkonstruktionen durch Verockerung beeinträchtigt wurden. Weiterhin sollen in situ die chemischen bzw. biologischen Verockerungsprodukte in den Filterstrukturen bestimmt werden.

Die physikalischen Modellversuche an der RWTH Aachen sollen die Wechseldurchströmung von Deckwerken in Folge Tide bzw. Schiffsvorbeifahrt in Gebieten mit Verockerung begünstigenden Grundwasserverhältnissen nachbilden. Der Versuchsaufbau soll grundsätzlich in einen Strömungskreislauf und einen Mess- und Regelungskreislauf getrennt werden. Im Strömungskreislauf erfolgt die jeweils entgegengesetzt gerichtete Durchströmung zweier Proben, während im Mess- und Regelungskreislauf die Messung und Regelung der chemischen Eigenschaften des Prozesswassers erfolgt.

#### 4 Ergebnisse

Nach erfolgter Literaturrecherche läuft derzeit die Planung der Grundwasseruntersuchungen in situ sowie der Aufbau des Modellversuchsstandes an der RWTH Aachen.



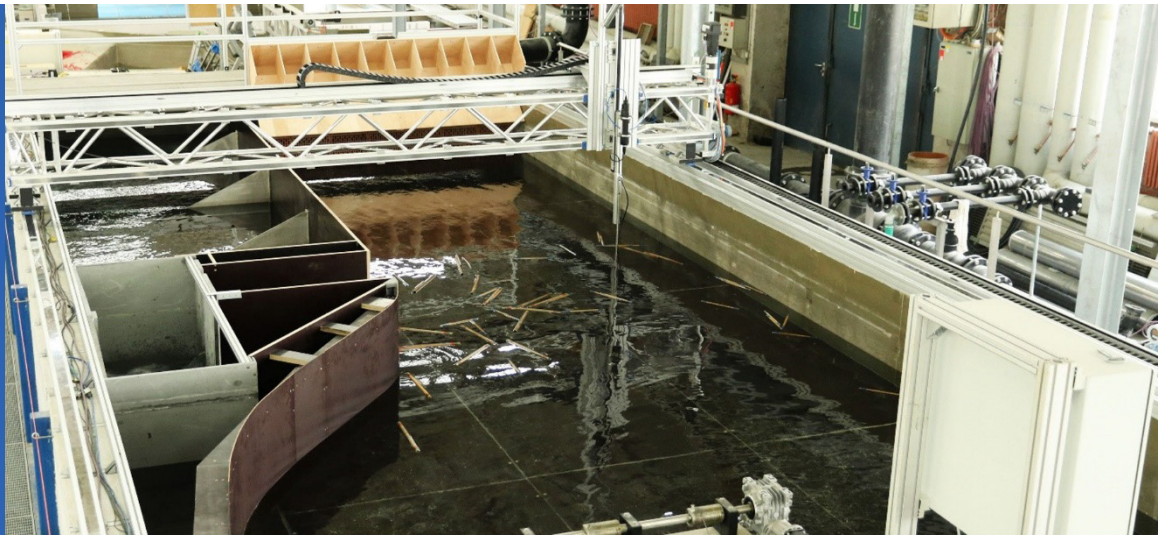
Bild 1: Verockerter geotextiler Filter (Tideems), Schnitt.

#### Literatur:

Abromeit, H.-U. (2000): Deckwerkschäden durch Verockerung des geotextilen Filters und Sanierungsmethode. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (Nr. 82): 73–80.

Correia, L.G.C.S., Ehrlich, M. und Mendonca, M.B. (2017): The effect of submersion in the ochre formation in geotextile filters. In: Geotextiles and Geomembranes 45 (1): 1–7

Gebken, N. und Glasker, C. (2013): Ufersicherung an der Tideems. Vortrag am Wasser- und Schifffahrtsamt Meppen, 29.8.2013



## Versuche zu Treibgutverhalten sowie Treibgutabwehr an Fischaufstiegsanlagen

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Funktionsfähigkeit von Fischaufstiegsanlagen (FAA) hängt im Wesentlichen von der Auffindbarkeit und der Passierbarkeit ab. Letztere bedeutet, dass Fische die gesamte Anlage durchschwimmen können. Die Passierbarkeit kann temporär durch die Verklauung des Wanderkorridors mit Treibgut verhindert werden. Zusätzlich zu der physischen Barrierewirkung von Treibgut beeinflusst es auch die Hydraulik der FAA. Dies betrifft besonders den durch die WSV am häufigsten geplanten Schlitzpass. An verlegten Durchlässen kommt es zu einem Aufstau und in der Folge zu unzulässig hohen Geschwindigkeiten in und unterhalb der Schlitze. Diese stellen somit eine hydraulische Barriere für alle oder einzelne Fischarten dar. Für die Funktionsfähigkeit der FAA ist daher eine regelmäßige Kontrolle und Wartung erforderlich. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen, aufgrund der Personalausstattung der WSV sowie der zum Teil entlegenen Standorte von FAA ist der Unterhaltungsaufwand mit Hilfe einer bestmöglichen Treibgutabwehr für FAA gering zu halten. Für die Art, Bemessung und Positionierung des Verklauungsschutzes gibt es derzeit noch keine fundierte Grundlage. Im Rahmen des FuE-Vorhabens „Versuche zu Treibgutverhalten sowie -abwehr an Fischaufstiegsanlagen“ werden Grundlagen erarbeitet, die es den planenden Ingenieuren ermöglichen, funktionsfähige Treibgutabweiser abhängig von standortbezogenen Bedingungen zu dimensionieren.

### 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. Ein Treibgut-

#### Auftragsnummer:

B3953.01.04.70011

#### Auftragsleitung:



Sabine Wickersheim  
 sabine.wickersheim@baw.de

#### Laufzeit:

2021 bis 2024

abweiser trägt als Teilkomponente einer FAA maßgeblich zur Funktionsfähigkeit bei, da Treibgut in einer solchen Anlage zügig zu einer erschweren, wenn nicht gar zu einer verhinderten Passierbarkeit für Fische führen kann (White et al. 2005). Aus Versuchen innerhalb dieses Forschungsprojektes sollen Bemessungsempfehlungen zur Dimensionierung von Treibgutabweisern abgeleitet werden. Sämtliche Verbesserungen in bestehenden FAA-Strukturen, die aus diesem Projekt hergeleitet werden können, tragen zur Erhöhung der Effektivität der FAA und Reduzierung von Unterhaltungskosten sowie -aufwand seitens der WSV bei.

### 3 Untersuchungsmethoden

Zur Entwicklung von Empfehlungen für die Treibgutabweisung müssen Daten bezüglich des Zusammenhangs von Hydraulik und Treibgutverhalten im Einlaufbereich von Fischaufstiegsanlagen gewonnen werden. Dazu werden anhand eines gegenständlichen Modells in der 4,5-m-Rinne, welche sich in den Laborhallen der BAW befindet, maßstäbliche Versuche zu Treibgutverhalten und -abweisern durchgeführt. Der Einlauf in die FAA ist im Maßstab 1:5 modelliert. Der Effekt einer Anströmung zur Wasserkraftanlage (WKA) und die Stauhaltung wird in einem Teilmodell ebenfalls abgebildet. Es sind zwei Durchflusskontrollen vorhanden: Mithilfe einer Schiebetafel wird der Durchfluss der FAA reguliert, während der Durchfluss der WKA über eine Wehrklappe abgegeben wird.

Um die Effektivität der jeweiligen Abweiserkonstruktion zu bestimmen, wird die Anzahl des zurückgehaltenen Modellholzes ins Verhältnis zum insgesamt hinzugegebenen Modellholz gesetzt. Verschiedene Randbedingungen, wie z. B. Treibgutmenge und -zusammensetzung und die Abweiserkonstruktion, werden systematisch geändert, wodurch ein breites Spektrum möglicher Situationen untersucht wird. Variiert wird zudem die Ausrichtung des FAA-Einlaufbereichs, sodass vielfach vorkommende mögliche Positionen von Fischaufstiegsanlagen an Bundeswasserstraßen abgedeckt werden.

Die Hydraulik wird im Maßstabsmodell mithilfe von Geschwindigkeits- sowie Wasserspiegellagenmessungen vor und hinter dem Treibgutabweiser aufgenommen. Des Weiteren ist geplant, mit dem in den Hallen vorhandenen 2D-PTV-System (particle tracking velocimetry) das Verhalten des Treibguts aufzuzeichnen.

### 4 Ergebnisse

Der Modellaufbau ist abgeschlossen und das Modell befindet sich in der Kalibrierung.

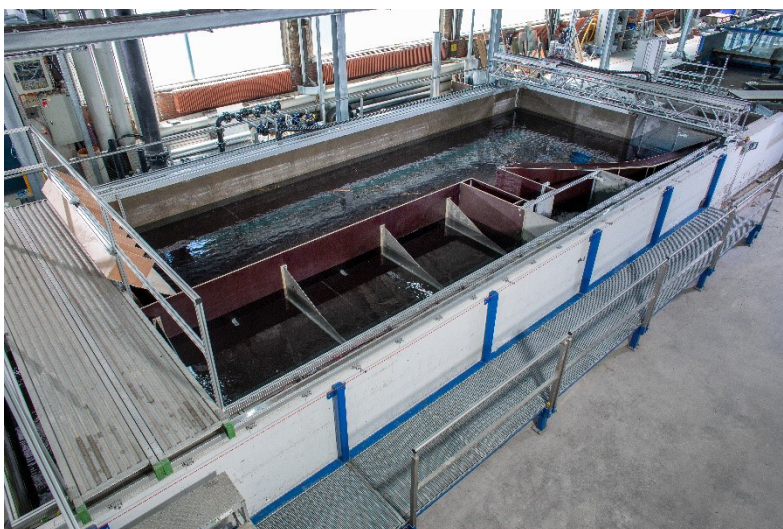
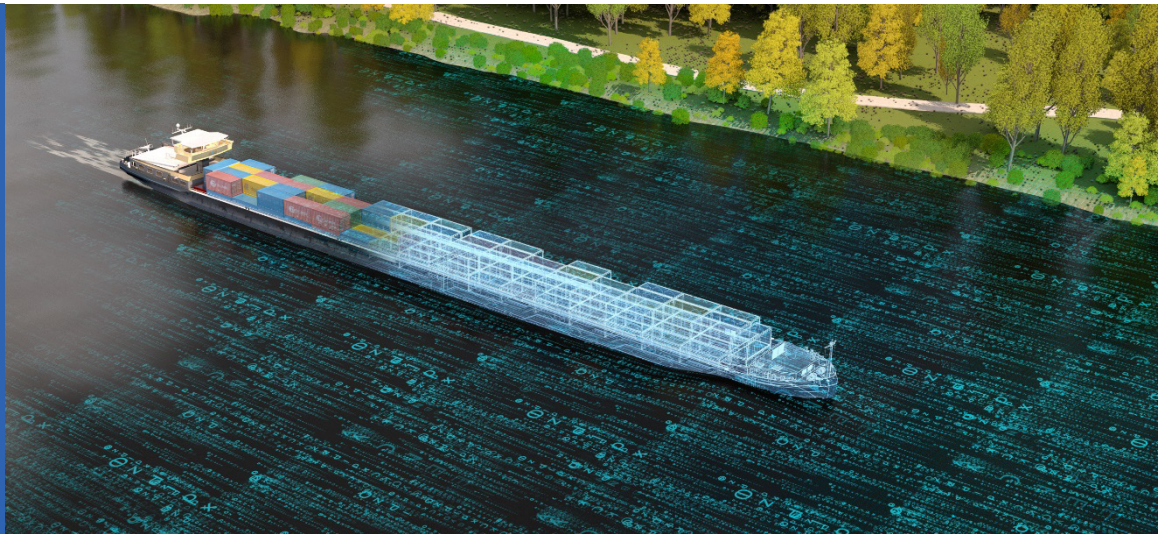


Bild 1: Aufbau des Treibgutmodells zur Untersuchung von Treibgutverhalten und Rückhalte- bzw. Weiterleitungsmöglichkeiten.

#### Literatur:

White, Rodney; Bowker, Pam; McGahey, Caroline (2005): Flow measurement structure design to aid fish migration without compromising flow data accuracy. Bristol: Environment Agency (Science Report SC020053/SR2).





## Projekt FernBin

### Ferngesteuertes, koordiniertes Fahren in der Binnenschifffahrt

#### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Das ferngesteuerte Fahren ist ein Zwischenschritt auf dem Weg zum vollautomatisierten Fahren in der Binnenschifffahrt. Viele Techniken und Komponenten, die in diesem Kontext entwickelt werden, können später auf einem automatisierten Binnenschiff Anwendung finden.

Das Verbundprojekt FernBin wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Rahmen des „Maritimen Forschungsprogramms“ gefördert und von einem Konsortium aus verschiedenen Forschungseinrichtungen und mittelständischen Unternehmen im Verbund bearbeitet. Übergeordnetes Ziel ist die zuverlässige und sichere Fernsteuerung von Binnenschiffen. Dies soll durch eine umfangreiche Datenbasis und mit einem darauf aufbauenden adaptiven Navigationssystem erreicht werden. Letzteres wird den fernsteuernden Schiffsführer zum einen bei der regulären Fahrt unter Berücksichtigung der aktuellen Verkehrssituation unterstützen und zum anderen durch Vorhersage der Trajektorien von umgebenden Schiffen vor zukünftigen kritischen Verkehrssituationen warnen.

Neben einer breiten Datenbasis sind wohldefinierte Abläufe und Schnittstellen zwischen Schiff, Leitstelle und Fernsteuerstand für den sicheren Betrieb eines ferngesteuerten Binnenschiffs essentiell. Diese sollen mittels Workflow-Analysen untersucht und festgelegt werden. Aus technischer Sicht ist außerdem eine zuverlässige Datenverbindung von hoher Wichtigkeit, damit der fernsteuernde Schiffsführer jederzeit genaustens über die aktuelle Lage informiert ist.

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

Durch das zu entwickelnde adaptive Navigationssystem, das dynamisch auf den umgebenden Verkehr reagiert, Verkehrsinformationen in Echtzeit verarbeitet und den fernsteuernden Schiffsführer unterstützt, leistet das Vorhaben einen substanziellen Beitrag zur Sicherung der Sicherheit und Leichtigkeit der Binnenschifffahrt. Die angestrebte Fernsteuerung von Binnenschiffen führt zudem zu einer Erhöhung der Attraktivität von Berufen der Binnenschifffahrt und kann damit zu einer Entschärfung des Fachkräftemangels

#### Auftragsnummer:

B3953.04.04.70019

#### Auftragsleitung:

Dr. Alexander Bernath  
 alexander.bernath@baw.de

#### Auftragsbearbeitung:

Karim Böttger  
 karim.boettger@baw.de  
 Najibullah Sadid  
 najibullah.sadid@baw.de  
 Johannes Schwarz-Beutel  
 johannes.schwarz-beutel@baw.de

#### Laufzeit:

2021 bis 2023

#### Projektseite:

[www.fernbin.de](http://www.fernbin.de)

beitragen. Darüber hinaus ermöglicht die Technologie eine Fernsteuerung mehrerer Schiffe durch einen einzelnen Schiffsführer. Dies eröffnet neue Möglichkeiten, da z. B. auch kleinere Schiffseinheiten wirtschaftlich betrieben werden können. Hierdurch wird die zukünftige Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der Binnenschifffahrt in der multimodalen Transportkette gesichert. Die Projektentwicklungen adressieren explizit die Entwicklung und Umsetzung innovativer Verfahren und Technologien für einen sicheren, wirtschaftlichen und effizienten Binnenschiffsverkehr. Sie dienen zudem als wichtige Vorstufe für die Entwicklung von vollautomatisierten Binnenschiffen. Durch die Mitwirkung der BAW in derartigen Automatisierungsprojekten können grundlegende Erfahrungen und Kenntnisse in diesem Bereich erlangt werden und damit die WSV hinsichtlich der künftigen Entwicklung qualifiziert beraten und unterstützt werden.

### 3 Untersuchungsmethoden

Die Arbeiten der BAW konzentrieren sich auf die Bereitstellung von Daten, die messtechnische Ausrüstung von Binnenschiffen und die Analyse und Prognose von Trajektorien des Eigenschiffs sowie von Fremdschiffen.

Die Bereitstellung von Daten umfasst Verkehrs- und Infrastrukturdaten sowie Daten von Messschiffen. Hierfür wird die BAW einen Datenserver einrichten. Für den Abruf der Daten durch Leit- und Fernsteuerstand sowie die Navigationseinrichtungen des Testschiffs werden zudem passende Schnittstellen implementiert. Darüber hinaus dient der Datenserver dem Empfang von Messdaten von entsprechend ausgerüsteten Schiffen. In Kooperation mit Projektpartnern wird die BAW hierfür Binnenschiffe mit geeigneter Sensorik ausstatten. Diese im normalen Fahrbetrieb der Schiffe erfassten Daten sind für fahrdynamische Analysen von großem Wert und werden daher im Rahmen des Projekts zur Vorhersage von Trajektorien verwendet. Für die Bewertung und Prognose von potentiell kritischen Verkehrssituationen wird zusätzlich eine Vorhersage der Trajektorien von Fremdschiffen benötigt, die auf einer Analyse von Verkehrsdaten basieren wird. Zusätzlich werden wasserstraßenbezogene Daten, z. B. Strömungsgeschwindigkeiten aus hydrodynamisch-numerischen Modellen, herangezogen, um lokale Gegebenheiten hierbei berücksichtigen zu können.

### 4 Ergebnisse

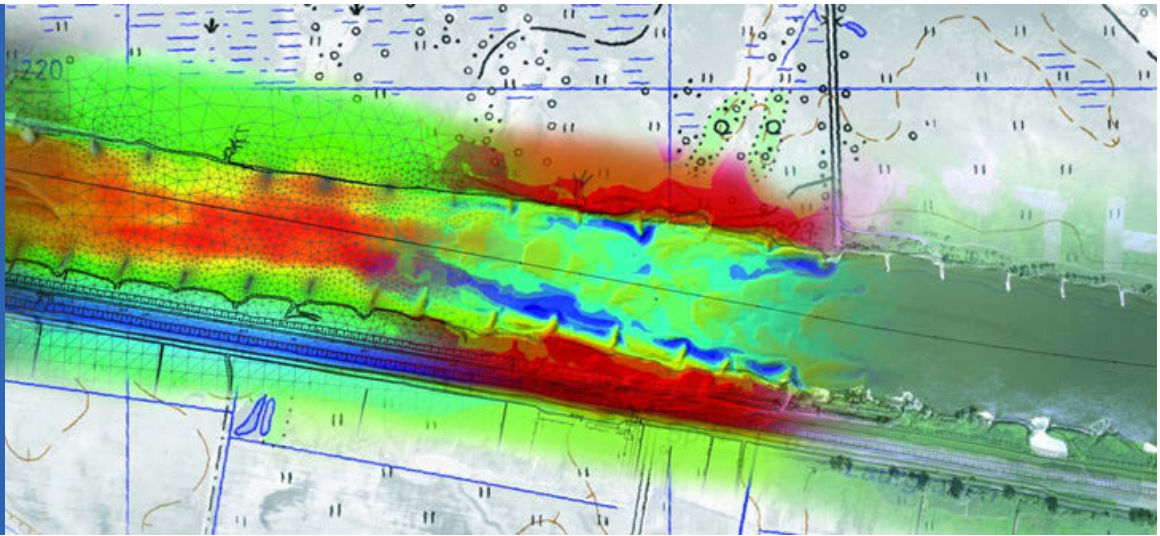
Das Projekt wurde in der zweiten Jahreshälfte 2020 begonnen. Seitdem wurden am Aufbau des Datenservers und der dazugehörigen Software gearbeitet. Für die Weitergabe und Verarbeitung von historischen Verkehrsdaten wurden Softwaremodule für die automatisierte Zusammenstellung und Anonymisierung von AIS-Daten (Automatic Identification System) erstellt. Für die Bereitstellung von Infrastruktur- und Schiffsdaten wurde ein Server aufgesetzt. Einzelne Softwaremodule für die Aufbereitung, Speicherung und Auswertung dieser Daten liegen vor. Passende Schnittstellen für den Datenaustausch befinden sich in der Entwicklung.

Die Ausrüstung des Testschiffs mit Sensorik während eines Werftaufenthalts zeigt Bild 1. Zur Erfassung der Strömungsgeschwindigkeiten in einem Bereich von 50 m vor dem Schiff hat die BAW zwei Horizontal-ADCPs (Acoustic Doppler Current Profiler) im Bug des Schiffs installiert. Hierfür wurden spezielle Hülsen für die Aufnahme der Messtechnik angefertigt und in den Rumpf eingeschweißt. Des Weiteren wurden durch Projektpartner ein präzises GNSS-System (Global Navigation Satellite System), Beschleunigungssensoren, Ladungssensoren, Kameras, Laserscanner sowie eine zentrale Navigationsplattform installiert. Neben dem Zugriff auf Sensorik und Aktorik des Schiffs dient die Navigationsplattform der Aufzeichnung von Messdaten und dem gebündelten Transfer auf den Datenserver der BAW. Aktuell werden letzte Arbeiten an der Hardwareinstallation vorgenommen. Im Anschluss daran erfolgt die Inbetriebnahme und Erprobung der Systeme im regulären Fahrbetrieb des Schiffs.



Bild 1: Ausrüstung des Testschiffs mit Messtechnik während eines Werftaufenthalts in Speyer





## Automatisierung zweidimensionaler hydrodynamisch-numerischer Modelle im Rahmen flussbaulicher Anwendungen

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Zur Beantwortung unterschiedlicher flussbaulicher Fragestellungen werden in der Abteilung W zahlreiche zweidimensionale hydrodynamisch-numerische Modelle vorgehalten, die bereits umfassende Streckenabschnitte der frei fließenden Binnenwasserstraßen in hoher räumlicher Auflösung abdecken. Die Bearbeitungszyklen dieser Modelle von der Konzeption über den Modellaufbau, die Kalibrierung und die Validierung bis hin zur Anwendung sind durch lange Bearbeitungszeiten geprägt. Der spätere Rechenbetrieb eines kalibrierten und validierten Modells kann jedoch zu großen Teilen standardisiert und automatisiert erfolgen und dadurch vereinfacht und beschleunigt werden.

Der Rechenbetrieb beruht im Wesentlichen auf der Berechnung von verschiedenen Szenarien (stationäre Abflüsse, Abflussganglinien), die auf derselben Variante (Geometrie, Landnutzung etc.) basieren. Hierbei müssen die Randbedingungen und Anfangsbedingungen des Modells jeweils entsprechend dem Szenario angepasst werden. Die Erzeugung dieser Szenarien lässt sich gut automatisieren. Die nötigen Anpassungen der Randbedingungen können hierbei entweder vom Anwender oder aber voll automatisiert, beispielsweise auf Basis aktueller Pegelkennwerte, durchgeführt werden. Zusätzlich kann für die gerechneten Szenarien automatisiert eine standardisierte Auswertung erstellt und online für die interne und externe Nutzung bereitgestellt werden. Der Zugang zu den Ergebnissen der numerischen Modelle wird so deutlich erleichtert und ist auch ohne nennenswerte Erfahrung in der numerischen Modellierung möglich.

Ziel des FuE-Vorhabens ist es, ein Konzept und die notwendige Software für den automatisierten Betrieb flussbaulicher 2D-HN-Modelle zu entwickeln. Mit der zu entwickelnden Software sollen sich für bereits fertig kalibrierte Modelle automatisch Szenarien berechnen, auswerten und deren Ergebnisse online bereitstellen lassen.

**Auftragsnummer:**

B3953.05.04.70008

**Auftragsleitung:**Tilman Steinweg  
tilman.steinweg@baw.de**Laufzeit:**

2021 bis 2024



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

Verschiedene Bedarfsträger können in kurzen Aktualisierungszyklen standardisierte Ergebnisse aus den numerischen Modellen der BAW erhalten. Neben den flussbaulichen Projekten der WSV für Ausbau und Unterhaltung der Bundeswasserstraßen stehen hier u. a. Aufgaben wie großräumige Befahrbarkeitsanalysen, Verkehrssimulationen, der DAS-Basisdienst oder die Veröffentlichung schifffahrtsrelevanter Daten im Rahmen der Open-Data-Strategie im Fokus der Anwendung. Langfristig ist der Ausbau für einen operationellen Betrieb zur Bereitstellung aktueller hydraulischer Informationen für die Schifffahrt auf Grundlage hydrologischer Mess- oder Vorhersagedaten vorgesehen.

## 3 Untersuchungsmethoden

Für die Entwicklungen werden bereits vorliegende kalibrierte zweidimensionale numerische Modelle herangezogen, sodass eine zügige Umsetzung der Zielsetzungen erreicht werden kann. Für den automatisierten Betrieb müssen zunächst die Eingangsdaten für die automatisierte numerische Modellierung standardisiert werden. Der Workflow besteht aus drei Schritten: der Modellgenerierung basierend auf den standardisierten Eingangsdaten, der Durchführung der Rechnung auf den Hochleistungsrechnern der BAW und schließlich der Ergebnisaufbereitung und -analyse.

Alle drei Schritte werden über ein Softwareprodukt umgesetzt, das auf die in der Abteilung vorliegenden Python-Bibliotheken zurückgreift. So wird gewährleistet, dass Anpassungen an zukünftige Anforderungen BAW-intern einfach umgesetzt werden können.

Die Software für den automatisierten Rechenbetrieb soll unabhängig vom eingesetzten Verfahren sein. Hierfür müssen zunächst Schnittstellen definiert und später verfahrensspezifisch implementiert werden.

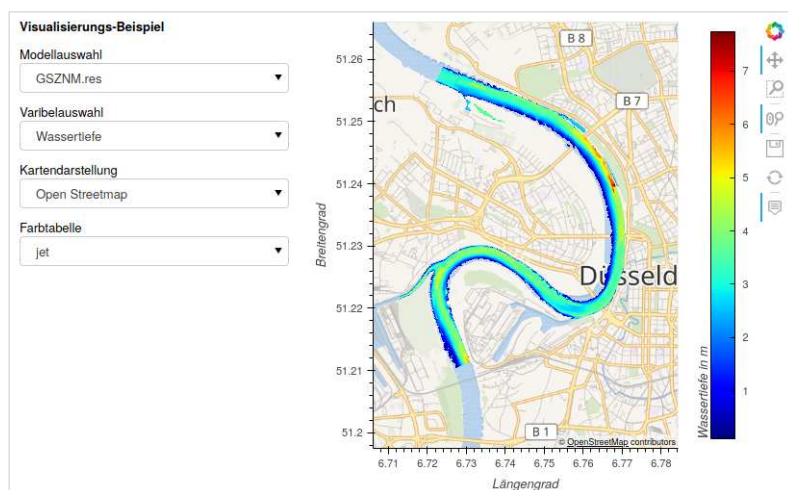
Eine entsprechende Umsetzung soll zunächst für das an der BAW neu entwickelte numerische Verfahren Dumux-Shallowwater, das auf DuMu<sup>x</sup> (Koch et al. 2020) basiert, durchgeführt werden. Anschließend ist auch eine Unterstützung des Standardverfahren Telemac (Hervouet 2007) geplant.

## 4 Ergebnisse

Für die automatische Modellgenerierung wurde ein Konzept zur Standardisierung der Eingangsdaten entwickelt. Darin ist eine strikte Trennung der Eingangsdaten in Varianten und Szenarien vorgesehen. Für die Automatisierung werden in einem ersten Schritt nur die Randbedingungen angepasst. Diese werden verfahrens-unabhängig mit Metadaten wie z. B. Pegelinformation in Szenario-Ordnern abgelegt.

Um Szenarien zu editieren, wurde bereits ein Programm-Modul zum Auslesen, Bearbeiten und Herausschreiben von Randbedingungen für die numerischen Verfahren Dumux-Shallowwater und Telemac erstellt. Dieses Modul wurde in die vorliegenden Python-Bibliotheken integriert. Für den Testbetrieb des Automatisierungstools wurde ein 2D-HN-Modell, welches den Niederrhein bei Düsseldorf abbildet, ausgedacht.

Es wurde ein Konzept für die Implementierung auf einer grafischen Oberfläche entworfen und ein Beispiel zur möglichen Realisierung der Oberfläche mit Python-Modulen für interaktive browserbasierte Visualisierungen erstellt. (Bild 1).



### Literatur:

Koch, Timo et al. (2021). DuMux 3 – an open-source simulator for solving flow and transport problems in porous media with a focus on model coupling: Computers & Mathematics with Applications. DOI: 10.1016/j.camwa.2020.02.012.

Hervouet, Jean-Michel (2007). Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling with the finite element method. DOI: 10.1002/9780470319628.

Bild 1: Beispiel für die interaktive grafische Oberfläche. Dargestellt ist ein Rheinabschnitt am Niederrhein auf der Höhe von Düsseldorf.  
© OpenStreetMap contributors.



## Numerische Modellierung des Suspensionstransports zur Berücksichtigung des lateralen Sediment austauschs

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Sedimenttransportprozesse werden bislang in den numerischen flussbaulichen Modellen der Abteilung Wasserbau im Binnenbereich nahezu ausschließlich als Geschiebetransport abgebildet. Die Limitierungen durch diese Vereinfachung sind gering, sofern das vorrangige Interesse der Untersuchungen dem Hauptstrom gilt. Allerdings werden u. a. durch die Anforderungen aus der EU-Wasserrahmenrichtlinie in den Projekten an Binnenwasserstraßen zunehmend Fragestellungen aufgeworfen, die das Vorland und die Interaktion zwischen Vorland und Hauptgerinne betreffen (z. B. Verlandungen von Vorlandgewässern).

Bei zunehmendem Strömungsangriff gerät das als Geschiebe transportierte Material in Suspension; es trägt somit nicht nur zur Sohlentwicklung im Hauptstrom bei, sondern gelangt in Abhängigkeit der Korngröße in die Buhnenfelder und auf das Vorland bzw. wird dort wieder remobilisiert und gegebenenfalls erneut in den Hauptstrom eingetragen.

Fragestellungen zu Verlandungstendenzen auf dem Vorland oder zur morphologischen Entwicklung von Vorlandgewässern können nur unter der Berücksichtigung von Suspensionstransport beantwortet werden. Die Anschlüsse zwischen Hauptgerinne und Vorlandgewässer sind oft nicht sohnah realisiert, um bewusst den Geschiebeeintrag zu verhindern. Ein Materialeintrag auf das Vorland erfolgt dabei vorwiegend in Suspension.

Der Suspensionstransport von nicht-kohäsivem Material sowie der seitliche Ein- bzw. Austrag können einen nicht unerheblichen Anteil an der Sedimentbilanz haben und werden bisher bei den langfristigen numerischen morphodynamischen Modellierungen der Abteilung W nicht berücksichtigt.

Ziel des Projektes ist der Nachweis der numerischen Modellierbarkeit des lateralen Sediment austauschs von nicht-kohäsivem Material zwischen Vorland und Hauptgerinne an Binnenwasserstraßen sowie eine Verbesserung der langfristigen morphodynamischen numerischen Modellierungen durch die Berücksichtigung des Suspensionstransports.

#### Auftragsnummer:

B3953.05.04.70009

#### Auftragsleitung:



Dr. Rebekka Kopmann  
 rebekka.kopmann@baw.de

#### Laufzeit:

2021 bis 2026

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

Mithilfe von prognosefähigen hydro-morphodynamischen Modellen für Geschiebetransport und Transport in Suspension können Projekte mit zunehmend ökologisch geprägten Fragestellungen effektiv und mit belastbaren Ergebnissen bearbeitet werden. Zudem ist eine Verbesserung der langfristigen morphodynamischen Modellierungen durch die Berücksichtigung der Suspensionsvorgänge zu erwarten.

## 3 Untersuchungsmethoden

Neben einer intensiven Auseinandersetzung mit der Literatur werden in dem Vorhaben vorwiegend zweidimensional tiefengemittelte bzw. dreidimensionale Simulationen auf Grundlage des Programmpakets TELEMAC-MASCARET zur Anwendung kommen. Zunächst soll anhand von Labormodellversuchen zu lateralem Sediment austausch das numerische Modell validiert werden. Dazu gehören auch Sensitivitätsuntersuchungen für eine geeignete kombinierte Suspensions-Geschiebetransportmodellierung an Bundeswasserstraßen im Binnenbereich. Anschließend können an Prinzipmodellen und an Flussabschnitten verschiedene Fragestellungen zum lateralen Sediment austausch bearbeitet werden. Dazu gehören Fragestellungen zu der Vermeidung von Sedimentablagerungen bei der Anbindung von Vorlandgewässern an das Hauptgerinne und der kausale Zusammenhang zwischen der Hydrodynamik und dem seitlichen Sedimenteintrag bzw. -austrag zwischen Hauptgerinne und Bühnenfeldern.

## 4 Ergebnisse

Im Rahmen einer Masterarbeit (Perez Obreque 2021) wurde ein Laborversuch von Juez et al. (2018) zur Schwebstoffablagerung in seitlichen Einbuchtungen (siehe Bild 1) als Validierungsbeispiel ausgewählt und numerisch simuliert. Bei der überschaubaren Auswahl an Laborversuchen mit Schwebstoffen und lateralem Sediment austausch überzeugte dieser Laborversuch durch einfache Geometrie, Messungen von Schwebstoffkonzentrationen und Sedimentablagerungen, Validierungsmöglichkeiten durch vier verschiedene Versuchskonfigurationen und drei verschiedene Abflüsse sowie eine gute Versuchsbeschreibung. Mit den Modulen TELEMAC-2D und GAIA aus dem Programmpaket TELEMAC-MASCARET wurde der Laborversuch im Labormaßstab simuliert und die Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen verglichen. Dabei erwiesen sich die nicht klar definierte Einlauftrandbedingung des Sediments, die Wasserstandsoszillationen als Folge des Seiche-Effektes (stehende Wellen, die durch Überlagerung von anlaufenden mit an Beckenrändern reflektierenden Wellen entstehen, z. B. Kimura und Hosora 1997) und vor allem das Anhaften von Sedimentpartikeln an den Steinen der seitlichen Begrenzungen als erhebliche Unsicherheiten im Laborversuch. Das numerische Modell konnte auf die Versuchskonfiguration 3.1 und den kleinsten im Labor durchgeführten Abfluss kalibriert werden. Sowohl für die Schwebstoffkonzentrationen als auch für die in den Einbuchtungen abgelagerten Sedimentmassen gab es eine gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und gemessenen Werten. Allerdings konnte die gefundene Parameterkombination nicht auf andere Konfigurationen oder Abflüsse übertragen werden. Insbesondere konnte der im Laborversuch beobachtete abnehmende Trend der Ablagerungen in den Einbuchtungen mit zunehmendem Abfluss numerisch nicht abgebildet werden. Anschließende Untersuchungen sollen klären, ob die vertikale Geschwindigkeits- bzw. Sedimentverteilung und/oder die bisher nicht im numerischen Modell abgebildeten Wasserspiegelooszillationen die lateralen Sediment austauschprozesse in dieser Versuchsanordnung wesentlich beeinflussen.

Erste Ergebnisse zeigen, dass die Wasserspiegelooszillationen mit einer hohen Gitterauflösung und einer „no-slip“-Randbedingung für die Einbuchtungen auch mit einem zweidimensional tiefengemittelten Modell wiedergegeben werden können.

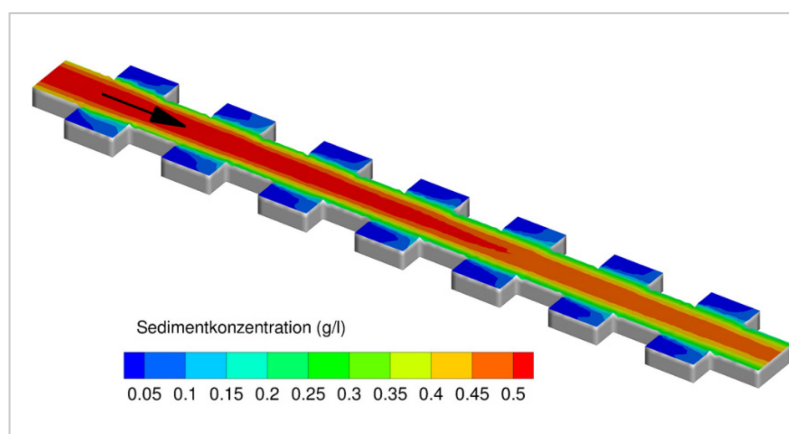


Bild 1: Initiale Sedimentkonzentration für Versuchskonfiguration 3.1 und kleinstem Abfluss.

### Literatur:

Juez, C.; Bühlmann, I.; Maechler, G.; Schleiss, A. J.; Franca, M. J. (2018): Transport of suspended sediments under the influence of bank macro-roughness. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43 (1), 271–284. <https://doi.org/10.1002/esp.4243>.

Kimura, I.; Hosoda, T. (1997): Fundamental properties of flows in open channels with dead zone. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123, 98–107.

Kopmann, R.; Perez Obreque, J. (2021): Simulation of embayment lab experiments with TELEMAC-2D/GAIA. In: *Proceedings of the TELEMAC-MASCARET User Conference, 13th to 15th October 2021, Antwerp*.

Perez Obreque, J. (2021): Modelling of lateral sediment exchange using TELEMAC-2D/GAIA. Master thesis at Karlsruhe Institute of Technology.





## Erzeugung von Schiffsprimärwellen im physikalischen Modellversuch (2DShipWaves)

Inbetriebnahme und Ertüchtigung der neuen Umlaufrinne 2 für die Generierung langperiodischer Schiffswellen

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

Schiffswellen stellen in weiten Teilen der Ästuarie die maßgebende Belastung auf natürliche und bauwerksgesicherte Uferbereiche dar. Schadensfälle an Leitwerken und Buhnen sowie an Deckwerken an den Seeschiffahrtsstraßen aufgrund schiffserzeugter Belastungen wurden in den letzten 15 bis 20 Jahren verstärkt in den Seeschiffahrtsstraßen Außenweser und Unterelbe festgestellt. Untersuchungen haben ergeben, dass insbesondere langperiodische Schiffsprimärwellen hohe hydraulische Belastungen auf Buhnen und Leitdämme hervorrufen können. Derzeit liegen jedoch keine geeigneten und validierten Ansätze zur Bemessung von Buhnen und Leitwerken für die Lastfälle langperiodischer schiffserzeugter Belastungen vor. Ebenso fehlt die Beschreibung eines funktionalen Zusammenhanges der Stabilität natürlicher Uferstrukturen unter dem Einfluss von Schiffsprimärwellen.

Der hydraulische Modellversuch bietet den Vorteil der guten messtechnischen Zugänglichkeit und der systematischen Durchführbarkeit der Experimente. Die Erzeugung der mit langperiodischen Schiffswellen einhergehenden Prozesse im physikalischen Modellversuch ist herausfordernd, entsprechende Versuche sind weltweit bisher nur vereinzelt durchgeführt worden. Für die Generierung von langperiodischen Schiffswellen existiert dementsprechend kein universell akzeptiertes Vorgehen. Um Versuche zur Stabilität von Ufern und Bauwerken unter der Belastung von Schiffsprimärwellen durchführen zu können, besteht daher die Herausforderung zunächst in der Abbildung der relevanten Komponenten der langperiodischen Schiffswelle im Versuchsstand. Hierzu soll eine neue pumpengesteuerte Umlaufrinne in Betrieb genommen und hinsichtlich der Generierung der beschriebenen Wellen ertüchtigt werden. Damit stünden am Ende des Vorhabens eine Methode und die entsprechende Versuchseinrichtung für die Untersuchung von Fragestellungen zu aus Schiffswellen resultierenden Belastungen zur Verfügung.

**Auftragsnummer:**

B3955.01.04.70381

**Auftragsleitung:**Dr. Gregor Melling  
gregor.melling@baw.de**Auftragsbearbeitung:**Christina Carstensen  
christina.carstensen@baw.de**Laufzeit:**

2021 bis 2024

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

Bei der derzeitigen Entwicklung der Flottenstruktur ist mit einer weiteren Zunahme von mit langperiodischen Schiffswellenbelastungen verknüpften Fragestellungen zu rechnen. Im Rahmen der Unterhaltung treten Fragen des Uferschutzes von befestigten und unbefestigten Ufern auf, wobei Untersuchungen zur Stabilität natürlicher Ufer oder die Einsatzmöglichkeiten technisch-biologischer Ufersicherungen zunehmend an Bedeutung gewinnen. Die BAW als zentraler Berater der WSV ist regelmäßig gefordert, zu den Fragen von Unterhaltung, Ausbau und Verkehrssteuerung Stellung zu beziehen und Maßnahmen an der Wasserstraßeninfrastruktur beratend zu begleiten. Um sich diesen erwartungsgemäß steigenden Anforderungen für die Zukunft besser stellen zu können, ist die Erweiterung der Untersuchungsmöglichkeiten um einen geeigneten Versuchsstand, verbunden mit der Erarbeitung von theoretischen und praktischen Kenntnissen zur Generierung langperiodischer Schiffswellen in einem großen Maßstab, notwendig. Der Beratungsbedarf hinsichtlich der Belastung durch Schiffswellen stellt WSV-spezifische Fragestellungen dar, die in der internationalen Forschung bisher kaum behandelt werden (siehe z. B. BAW 2012). Stand heute hält kein Forschungsinstitut den benötigten Versuchsstand und das damit verbundene Wissen so vor, dass Untersuchungen ohne längere Voruntersuchungen hinsichtlich der korrekten Generierung der maßgebenden Prozesse möglich wären. Der Aufbau dieser Kapazitäten an der BAW ergibt ein wertvolles Hilfsmittel bei der Beratung der WSV und ergänzt andere Untersuchungsmethoden, die beispielsweise auch auf dem Gebiet der numerischen Methoden durch die BAW weiterentwickelt werden.

## 3 Untersuchungsmethoden

Zunächst wird eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, um den Stand des Wissens hinsichtlich der Einrichtung des Versuchsstands für die Generierung langperiodischer (Schiffs-)wellen im gegenständlichen Modellversuch zu dokumentieren. In diesem Zuge werden auch relevante Benchmark-Tests für die spätere Validierung des Versuchsstands identifiziert. Im Rahmen der Inbetriebnahme und Ertüchtigung der Rinne 2 wird die Ausrüstung des Versuchsstands mit der benötigten Steuerungssoft- und hardware, Automations- und Messtechnik projektbegleitend vorgenommen. Es ist vorgesehen, (Benchmark-)Versuche mit sukzessiv steigender Komplexität durchzuführen und den Versuchsstand begleitend weiterzuentwickeln. Dabei ist vorgesehen, zunächst mit hydraulischen Modellversuchen der Strömung zu beginnen, gefolgt von der Generierung langperiodischer Wellen und zuletzt ausgewählten Zielgrößen langperiodischer Schiffswellen.

## 4 Ergebnisse

Eine Auswertung der Literatur zeigt, dass die Generierung langperiodischer Schiffswellen in hydraulischen Rinnen im Vergleich zu (Schiffs-)Wellenbecken bisher kaum unternommen worden ist. Derzeit ist nur eine Untersuchung bekannt, bei der auch nur stark vereinfacht die Heckwelleneinwirkung auf einen Bühnenquerschnitt untersucht worden ist (IWW 2016). Die Erzeugung langperiodischer Wasserspiegelauslenkungen (Schwallwelle, Bore) in hydraulischen Rinnen findet in der Tsunamiforschung häufig Anwendung. Dabei basieren die Generierungsmethoden auf Wasservolumenverdrängung bzw. Wasservolumeneinleitung, um die gewünschte Wasserspiegelauslenkung zu bewirken (vgl. Goseberg et al. 2013). Die langperiodischen Wellen werden dabei häufig approximiert, z. B. als Sinuswellen, Solitone, cnoidale Wellen oder N-Wellen, durch welche die Längen- und Zeitskalen der zu betrachtenden maßgebenden Prozesse allerdings nicht immer ausreichend genau abgebildet werden. Die Nachbildung realistischerer Wasserspiegelauslenkungen sowie längerer Wellenperioden ist hingegen mittels PID-Steuerung leistungsstarker Pumpen möglich (Goseberg et al. 2013, 2020) – ein Ansatz, dessen Umsetzung für die vorliegende Rinne geprüft werden soll.

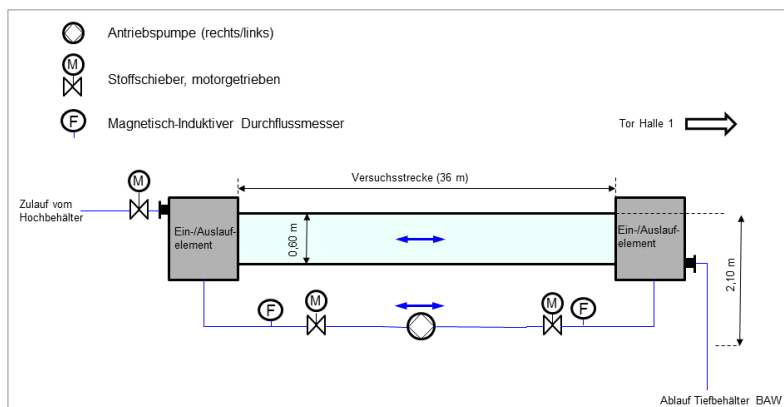


Bild 1: Systemskizze der Rinne 2.

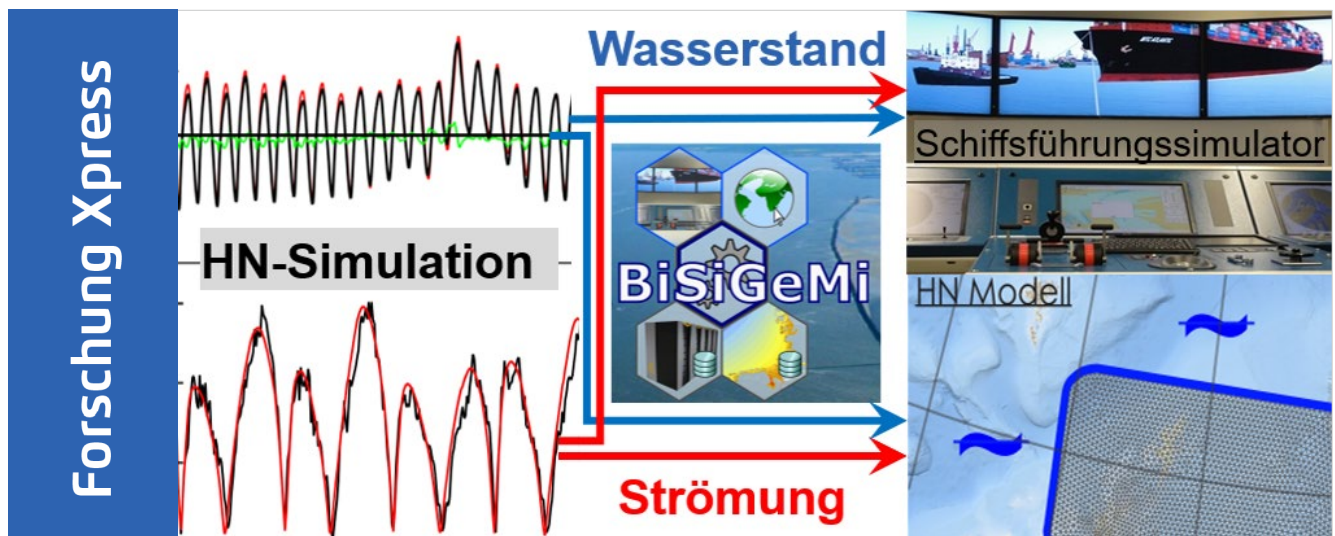
### Literatur:

BAW (2012): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen. AP1 – Schadensanalyse, A39550270141.

Goseberg, N.; Wurpts, A.; Schlurmann, T. (2013): Laboratory-scale generation of tsunami and long waves. Coastal Engineering 79 (1), 57–74.

Goseberg, N.; von Hafen, H.; Ballesteros, P.; Kerpen, N.; Schlurmann, T. (2020): Arbitrary generation of very long and tsunami-like waves using an optimized pump-driven method. Proc. of the Coastal Engineering Conference. p. 17.

IWW (2016): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen. AP4-3 – Modellphase 3, B2017002.



## Big-Simulation- and Geodata-Middleware BiSiGeMi

Entwurf, Implementation und prototypische Inbetriebnahme

### 1 Aufgabenstellung und Ziel

In der Bundesanstalt für Wasserbau liegen synoptische, mehrjährige Ergebnisdatsätze aus hydro-numerischen (HN)-Simulationsmodellen in der Regel auf unstrukturierten Gebietszerlegungen und in hoher zeitlicher Auflösung vor. Die Nutzbarkeit dieser Daten kann durch eine geeignete Softwareinfrastruktur noch verbessert werden.

Ziel des im Rahmen der Förderinitiative *mFUND* des BMDV geförderten Verbundvorhabens mit der smile consult GmbH ist die Schaffung und prototypische Inbetriebnahme einer Big-Simulation- and Geodata-Middleware für unstrukturierte zeitvariante HN-Simulationsergebnisse.

Darüber hinaus stellt die Schaffung von Schnittstellen und Diensten zur Einbindung der Middleware in die nationale und europäische Geodateninfrastruktur sowie die *mCLOUD* ein zentrales Element für den Erfolg und die Nachhaltigkeit des Gesamtprojektes dar. Durch die Integration von Anwenderszenarien in die Projektbearbeitung und deren Dokumentation, kann frühzeitig auf die Erfordernisse von potentiellen Nutzern eingegangen werden.

Das Ziel der BAW ist, die HN-Simulationsergebnisse so zu strukturieren und dokumentieren, dass ein automatisches Füllen der Big-Simulation-Database ermöglicht wird sowie die hard- und softwaretechnische Basis für den operationellen Betrieb zu schaffen. Weiterhin ist die Definition der Anwendungsszenarien zusammen mit den zukünftigen Nutzern zu erstellen und erproben sowie die Möglichkeiten und Grenzen zu dokumentieren.

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

Die fachbezogene weitergehende Nutzung der umfangreichen Simulationsergebnisse aus Projekten der BAW, insbesondere die synoptische Datenbasis aus EasyGSH-DB in ihrer originären zeitlichen und örtlichen Auflösung, ermöglicht neue Anwendungsszenarien in der WSV und erhöht die Daten-Transparenz weiter. Diese Vorgehensweise geht über den bisherigen Stand der Datenanwendung und des Datenaustauschs der BAW mit Dritten hinaus und erhöht den Anwendungsbezug und die Nutzbarkeit dieser Daten in der Praxis wesentlich.

#### Auftragsnummer:

B3955.02.04.70235

#### Auftragsleitung:

Dr. Andreas Plüß  
andreas.pluess@baw.de

#### Laufzeit:

2021 bis 2022



### 3 Untersuchungsmethoden

Im Rahmen ihrer gutachterlichen Tätigkeit und in Forschungsprojekten nutzt die BAW unterschiedliche Simulationsmodelle. Beispielsweise führte die BAW im Rahmen des FuE-Projektes „EasyGSH-DB“ dreidimensionale Simulationen von Hydrodynamik, Salz- und Sedimenttransport sowie Seegang mit dem Programmsystem UnTRIM/SediMorph/UnK über eine Zeitspanne von 20 Jahren (1996 bis 2015) durch. Hierauf aufbauend wird im Vorhaben ein Verwaltungs- und Analysekonzept erstellt und prototypisch umgesetzt, welches die Grundlage für die Integration bestehender und zukünftiger Simulationsdaten bildet.

Bereits zu Beginn des Projektes kann auf eine umfangreiche und synoptische Simulationsdatenbasis über einen Zeitraum von 20 Jahren und mit einem Datenvolumen von knapp 80 TB aus dem *mFUND*-Verbundprojekt „EasyGSH-DB“ zurückgegriffen werden. Durch eine Rasterung der 10-minütigen Simulationsergebnisse auf Basis der unstrukturierten Berechnungsnetze auf ein 1x1-km-Raster in 20-minütigem Intervall, wie dies zur Veröffentlichung der EasyGSH-DB-Produkte damals umgesetzt wurde, konnten kleinere Dateigrößen von rund 25 GB erzielt werden (siehe Bild 1). Diese reproduzieren aber die komplexen bathymetrischen und hydrodynamischen Verhältnisse im Küstennahbereich und in den Ästuarmündungen nur eingeschränkt.

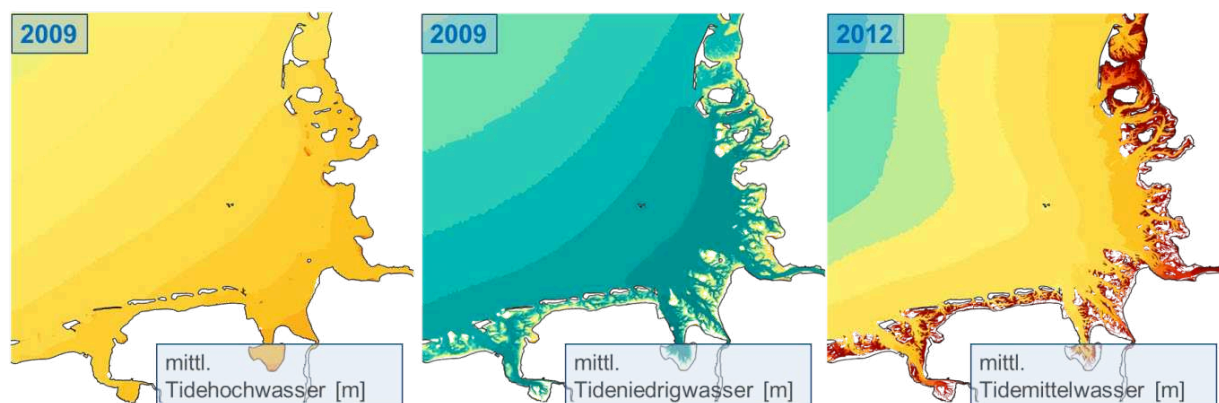


Bild 1: Analyse der Kennwerte des Wasserstandes als Produkt

Im Projekt wird ein generischer Ansatz auf der Basis einer Middleware verfolgt, der einen anwendungsorientierten, selektiven und transparenten Zugriff auf die originär unstrukturierten HN-Simulationsergebnisse ermöglichen soll. Dieser Zugang ist derzeit aufgrund der Menge und Struktur der Daten mit Standardlösungen kaum möglich. Hierdurch ergibt sich ein großer Zugewinn, wenn die Nutzer entsprechend ihrer Fragestellungen direkt lesend auf diese unstrukturierten Simulationsdaten zugreifen und u. U. schon erste einfache Analysen durchführen können.

### 4 Ergebnisse

Das Projekt schafft die konzeptionelle und softwaretechnologische Basis, um den großen Bestand an Simulationsergebnissen der BAW einer breiten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen. Durch die Einbindung von spezifischen Vorschauprodukten und Web-Services in die Datenportale MDI-DE: (<https://www.mdi-de.org>) und *mCLOUD*: (<https://www.mcloud.de/>) ist eine gute Auffindbarkeit auch zukünftig gewährleistet.

Die Erkenntnisse und Ergebnisse dieses Projektes werden durch den Projektpartner smile consult GMBH und die BAW in Form von wissenschaftlichen Vorträgen und Veröffentlichungen dokumentiert.

Weiterhin sollen die Ergebnisse den potentiellen Stakeholdern gezielt auf Kolloquien und Konferenzen bezüglich der Sichtbarkeit in den einzelnen Wissenschaftsgemeinschaften vermittelt werden.

#### Literatur:

Hagen, Robert; Plüß, Andreas; Ihde, Romina; Freund, Janina; Dreier, Norman; Nehlsen, Edgar; Schrage, Nico; Fröhle, Peter; Kösters, Frank (2021): An Integrated Marine Data Collection for the German Bight – Part II: Tides, Salinity and Waves (1996–2015). Earth System Science Data (45).

Plüß, Andreas; Hagen, Robert; Ihde, Romina; Freund, Janina; Kösters, Frank; Milbradt, Peter; Sievers, Julian; Nehlsen, Edgar; Schrage, Nico; Dreier, Norman; Fröhle, Peter; Ahlhorn, Frank; Meyerdirks, Jürgen (2020): Wissenschaftlicher Abschlussbericht zum *mFUND*-Projekt: EasyGSH-DB. Online verfügbar unter: <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIB-KAT:1744505187/Wissenschaftlicher-Abschlussbericht-zum-mFUND-Projekt?cHash=e6009c7b94d92b7d9b8293f133c21efe>





Bundesministerium  
für Verkehr und  
digitale Infrastruktur

#### **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)