BAW
Bundesanstalt für Wasserbau

2023

Geschäftsbericht der BAW

Kompetenz für die Wasserstraßen

Organigramm 2023

Präsident
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Christoph Heinzelmann
Vertreter: Claus Kunz

Gleichstellungsbeauftragte
Dr.-Ing. Andrea Wahrheit-Lensing

Datenschutzbeauftragter
Dr. Nurullah Akbulut

Abteilungen

Abteilung Bautechnik
Claus Kunz

- Massivbau
- Stahlbau/ Korrosionsschutz
- Baustoffe
- Infrastruktur-management

Abteilung Geotechnik
Dr.-Ing. Jan Kayser

- Baugrund-erkundung
- Grundbau
- Grundwasser
- Erdbau und Uferschutz

Abteilung Wasserbau im Binnenbereich
Prof. Dr. Ing. Andreas Schmidt

- Wasserstraße und Umwelt
- Flussbau
- Wasserbauwerke
- Schifffahrt
- Daten und Methoden
- Projektgruppe Mittelrhein

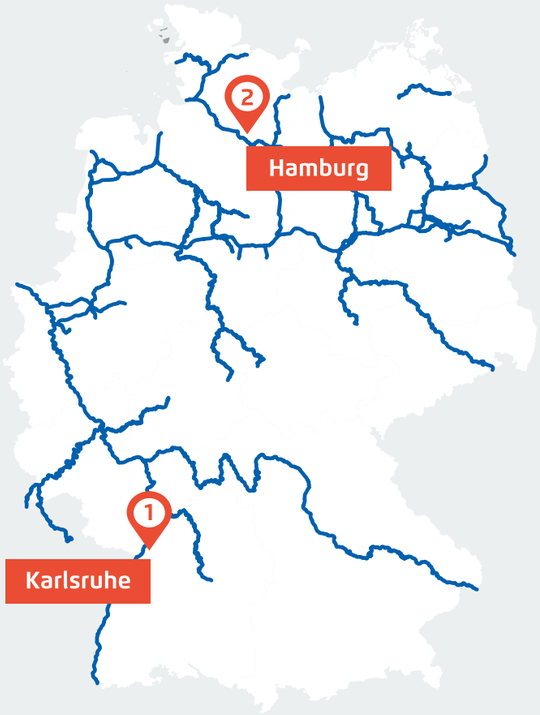
Abteilung Wasserbau im Küstenbereich
Holger Rahlf

- Küsteningenieurwesen
- Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen
- Ästuarsysteme I
- Ästuarsysteme II
- Schiffstechnik
- Geotechnik Nord
- Geotechnik Küste

Abteilung Zentraler Service
Peter Weinmann

- Verwaltung
- Technischer Support
- Datenmanagement und Systemtechnik

Standorte und Projekte



676

WSV / BMDV Aufträge aktiv
+ 81 Aufträge, die in 2023 abgeschlossen wurden = 757

107

FuE aktiv
+ 17 FuE, die in 2023 abgeschlossen wurden = 124

65

Drittaufträge aktiv
+ 14 Drittaufträge, die in 2023 abgeschlossen wurden = 79

1 Karlsruhe
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe
Tel.: +49 (0) 721 9726-0

2 Hamburg
Wedeler Landstraße 157
22559 Hamburg
Tel.: +49 (0) 40 81908-0

E-Mail
info@baw.de
Internet
www.baw.de

Künstliche Intelligenz bietet große Chancen

Liebe Leserin, lieber Leser,

die rasante Entwicklung bei der Nutzung Künstlicher Intelligenz (KI) ist das Thema der Stunde. Auch wir beschäftigen uns intensiv mit der Frage, was das gegenwärtige Entwicklungstempo von KI für die eigene Zukunft als Wissenschaftseinrichtung für den Verkehrswasserbau bedeutet. Die Antwort lautet: Die Herausforderungen sind groß. Aber die Chancen sind noch größer. Diese gilt es, gezielt zu ergreifen.

Wir sind überzeugt, dass die Nutzung von KI dazu beitragen wird, unsere Leistungsfähigkeit zu steigern und die Qualität unserer Ergebnisse zu verbessern. KI wird uns helfen, neue Innovationsansätze zu entwickeln, um die großen Herausforderungen für das System Schiff/Wasserstraße erfolgreich zu meistern.

Die strategischen Rahmenbedingungen, die wir für eine erfolgreiche KI-Nutzung in der BAW schaffen wollen, lassen sich stichpunktartig wie folgt beschreiben:

Wissen, was man will:
Wir priorisieren die Aufgabenbereiche, für die der KI-Einsatz unsere Arbeiten am wirkungsvollsten unterstützen kann. Derzeit sind das die Bereiche: Autonomes Fahren, Planungsprozesse, Fernerkundung und Datenanalyse.

Beschäftigte befähigen:
Unsere langjährigen Erfahrungen bei der Etablierung neuer wissenschaftlichen Methoden haben gezeigt, dass das eigene Erleben bei der Anwendung von neuen Instrumenten und Verfahren die wirksamste Form des Kompetenzaufbaus ist. Unsere Beschäftigten sollen sich KI-Kompetenzen aus eigener praktischer Nutzung selbst erarbeiten können.

In kleinen Schritten, dafür schnell:
Aus der Digitalentwicklung der letzten Jahre haben wir gelernt, dass Geschwindigkeit ein entscheidender Erfolgsfaktor ist. Wir gehen deshalb in Sachen KI in kleinen Entwicklungsschritten, die uns kontinuierlich voranbringen. Auf diese Weise können wir mit der rasanten Technologieentwicklung mithalten.

Daten, Daten, Daten:
Der sichere Zugang zu qualitativ hochwertigen, strukturierten Daten aus vertrauenswürdigen Quellen ist elementar. Das Thema Datenmanagement war in den letzten Jahren einer der Schwerpunkte unserer Digitalisierungsstrategie. Für den Verkehrswasserbau gibt es in Deutschland und Europa vermutlich keinen hochwertigeren Datenschatz als den der BAW.

Für einen vertieften Einblick in unsere aktuellen Digitalentwicklungen empfehle ich Ihnen den Beitrag: „Digitalisierung und Künstliche Intelligenz – Planen, Bauen und Betreiben von Verkehrsinfrastruktur 4.0“ auf den Seiten 26 bis 33 in diesem Heft.

Eine interessante Lektüre wünscht Ihnen

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Christoph Heinzelmann
Präsident der Bundesanstalt für Wasserbau

Karlsruhe, im Juni 2024

Inhalt

Instandsetzung unter Betrieb

Bauteilversuche zur Reprofilierung der Schleuse unter grundsätzlicher Weiterführung des Schleusenbetriebs

Klimaschutz in der Binnenschifffahrt

Messung und Modellierung von Maßnahmen zur Minderung der Treibhausgasemissionen

Digitalisierung und Künstliche Intelligenz

Planen, Bauen und Betreiben von Verkehrsinfrastruktur 4.0

8 **Die BAW - Wichtiger Partner der Deutschen Allianz Meeresforschung**
Dr. Joachim Harms, Vorstandsvorsitzender der Deutschen Allianz Meeresforschung

10 **Instandsetzung unter Betrieb**
Bauteilversuche zur Reprofilierung der Schleuse unter grundsätzlicher Weiterführung des Schleusenbetriebs

18 **Klimaschutz in der Binnenschifffahrt**
Messung und Modellierung von Maßnahmen zur Minderung der Treibhausgasemissionen

26 **Digitalisierung und Künstliche Intelligenz**
Planen, Bauen und Betreiben von Verkehrsinfrastruktur 4.0

34 **Ausgewählte Forschungs- und Entwicklungsprojekte**

34 Fertigteile im Verkehrswasserbau: Schnell, qualitätsgesichert und nachhaltig Bauen

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

38 Abbildung der Rauheitswirkung von Vorlandvegetation bei der hydro-numerischen Modellierung

40 Schiffserzeugte Belastung: Simulation in dreidimensionaler Bathymetrie

42 **Die Bundesanstalt für Wasserbau**

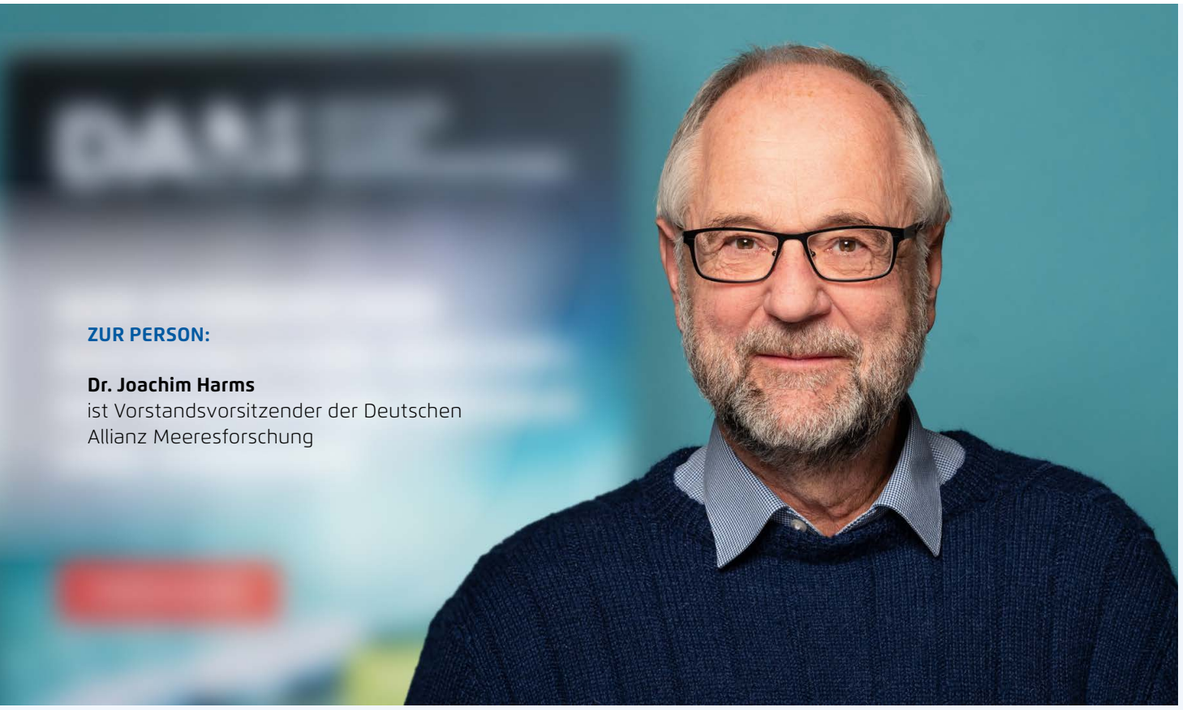
43 Das Jahr 2023

58 Gute wissenschaftliche Praxis in der BAW

60 Daten & Fakten

64 Anhang

69 Impressum



ZUR PERSON:

Dr. Joachim Harms
ist Vorstandsvorsitzender der Deutschen Allianz Meeresforschung

Die BAW - Wichtiger Partner der Deutschen Allianz Meeresforschung

Dr. Joachim Harms,
Vorstandsvorsitzender der Deutschen Allianz Meeresforschung

Die Deutsche Allianz Meeresforschung (DAM) repräsentiert aktuell 24 universitäre und außeruniversitäre marine Forschungseinrichtungen. Die DAM arbeitet ressortübergreifend und ist stolz darauf, dass Ressortforschungseinrichtungen des Bundes als assoziierte Mitglieder in der DAM aktiv mitarbeiten.

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) ist seit Mai 2021 assoziiertes Mitglied der DAM. Als Ressortforschungseinrichtung des Bundes im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) unterhält die BAW vielfältige Kooperationen mit Forschungseinrichtungen und Institutionen im Küstenbereich. Die BAW engagiert sich als Partner von Universitäten und Forschungseinrichtungen bei der Umsetzung des Forschungsprogramms MARE:N der Bundesregierung.

Die BAW trägt damit unmittelbar dazu bei, die Ziele der DAM, den nachhaltigen Umgang mit den Küsten, Meeren und Ozeanen durch Forschung, Transfer, Datenmanagement und Digitalisierung sowie Koordinierung der Infrastrukturen, umzusetzen. Diese enge Kooperation zwischen den universitären und außeruniversitären Forschungsinstituten sowie den Ressortforschungseinrichtungen ist erforderlich, um die heutigen großen Herausforderungen, vor denen unsere Küsten und Meere stehen, gemeinsam anzugehen. Nur gemeinsam können fundierte wissensbasierte Handlungsoptionen für die zukünftige Entwicklung im Meeresbereich erarbeitet und diese den Entscheidungsträgern aus Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft in verständlicher Weise präsentiert werden.

Die BAW hat bereits im Rahmen des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI), einem Zusammenschluss der in der Küstenforschung tätigen Verwaltungen des Bundes und der Länder, langjährige Erfahrungen in der Zusammenarbeit unter anderem mit Forschungseinrichtungen der DAM. Hier ergibt sich auch eine enge Verknüpfung mit dem Bereich Datenmanagement und Digitalisierung der DAM. Der Datenservice Küste der BAW wird in enger Kooperation mit der Marinen Dateninfrastruktur (MDI-DE) des KFKI und dem Datenmanagement-Ansatz der DAM realisiert. Die vom BMDV geförderte Open Data-Politik der BAW trägt hier mit dazu bei, dass die Forschungsvorhaben der DAM durch eine öffentlich verfügbare Datenbasis befördert werden.

Durch die Mitgliedschaft in der DAM kann sich die BAW in ihrer Funktion als Gutachterin bei großen Infrastrukturmaßnahmen in der ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ), im Küstenvorfeld und in den Ästuaren aktiv bei der Entwicklung zukünftiger dringender Forschungsthemen engagieren, um so neueste wissenschaftliche Erkenntnisse in die Entscheidungsprozesse einfließen zu lassen.

Insbesondere im Hinblick auf die Notwendigkeit, sich dem menschgemachten Klimawandel anzupassen und geeignete Maßnahmen transdisziplinär zu erarbeiten, ist die Zusammenarbeit zwischen den universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen der DAM und der Ressortforschung wichtig. Nur so lassen sich neueste wissenschaftliche Erkenntnisse in Handlungsempfehlungen mit Praxisrelevanz umsetzen.

Eine moderne marine Forschung ist nach wie vor auf leistungsfähige Forschungsschiffe angewiesen. Die BAW hat mit ihrem Referat Schiffstechnik ein Schiffbau-Kompetenzzentrum und damit ein einmaliges Know-how für die Entwicklung und den Bau von zivilen Wasserfahrzeugen und Spezialschiffen aufgebaut. Sie unterstützt dabei nicht nur das BMDV, sondern im Rahmen einer seit dem Jahr 2010 bestehenden Ressortvereinbarung auch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) bei der Erneuerung der deutschen Forschungsflotte. So betreut die BAW aktuell für das BMBF den Neubauprozess der METEOR IV. Außerdem hat die BAW die DAM bei der Erstellung von Unterlagen für die Evaluation des zukünftigen Bedarfs an regionalen, mittelgroßen Forschungsschiffen für die deutsche Meeresforschung unterstützt. Der Wissenschaftsrat ist in seinem im Herbst 2023 veröffentlichten Gutachten unter anderem dem gemeinsam mit der BAW erarbeiteten Vorschlag gefolgt, als Ersatz für die in die Jahre gekommenen Forschungsschiffe HEINCKE, ALKOR und MANN BORGESE Schwesterschiffe mit identischen Grundplattformen zu entwickeln, die möglichst technologieoffen und interoperabel gestaltet werden sollten. Dass die Energieerzeugung und der Antrieb der neuen Forschungsschiffe klimaneutral sein sollten, versteht sich fast von selbst. Auch diesbezüglich hat die BAW im Zuge laufender Neubauvorhaben bereits erste Erfahrungen sammeln können. Die BAW als assoziiertes Mitglied der DAM ist mit den aktuellen wissenschaftlichen Herausforderungen und Anforderungen, die die deutsche Meeresforschung an ihre seegehende Infrastruktur stellt, bestens vertraut. Es besteht eine enge Abstimmung zwischen BAW und den schiffsbetreibenden Einrichtungen und enge Kooperationsbeziehungen mit vielen Mitgliedseinrichtungen der DAM.

> **„Als lösungsorientiert denkender Partner ist die BAW ein wichtiges Mitglied innerhalb der DAM, um basierend auf fundierten wissenschaftlichen Erkenntnissen Handlungsoptionen für einen umweltschonenden und nachhaltigen Umgang mit unseren Meeren zu entwickeln.“**
>
> Dr. Joachim Harms

Die BAW betreibt eigene Forschung in den Themenfeldern Infrastruktur, Mobilität und Umwelt. Sie verfügt über eine hervorragende Forschungsinfrastruktur. Im Rahmen ihrer Forschungstätigkeit führt die BAW sowohl Versuche an Großversuchsständen als auch numerische Simulationen, Labor- und Felduntersuchungen durch und setzt in ihrer interdisziplinären, anwendungsorientierten Forschung ein großes Methodenspektrum ein. Ihre Erkenntnisse bereitet die BAW für die wissenschaftliche Fachgemeinschaft auf und diese fließen direkt in die Politik- und Projektberatung ein. Die hohe wissenschaftliche Qualität der Arbeit hat der Wissenschaftsrat im April 2023 bestätigt.

Für die DAM ist die BAW ein wichtiger Partner, um die gesellschaftlichen Herausforderungen im marinen Bereich gemeinsam anzupacken.

Instandsetzung unter Betrieb

Bauteilversuche zur Reprofilierung der Schleuse unter grundsätzlicher Weiterführung des Schleusenbetriebs

Aufgrund des zunehmenden Instandsetzungsbedarfs an den Schleusenanlagen der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) soll mit dem FuE-Vorhaben „Instandsetzung unter Betrieb“ (IuB) eine weitere Möglichkeit entwickelt werden, um Schleusen unter grundsätzlicher Aufrechterhaltung des Betriebs instand zu setzen.

Wie bei vielen Verkehrswasserbauwerken besteht auch an den Schleusenanlagen der WSV vor dem Hintergrund der Altersstruktur der Anlagen ein erheblicher Instandsetzungsbedarf, der absehbar weiter ansteigen wird. Möglichkeiten, um diesem Instandsetzungsbedarf zu begegnen, sind aktuell entweder ein Ersatzneubau oder eine umfassende Grundinstandsetzung der betreffenden Schleusenanlage. Ein Ersatzneubau in unmittelbarer Nachbarschaft zu den bestehenden Anlagen ist aus wirtschaftlichen oder genehmigungsrechtlichen Gründen, aber auch aufgrund lokaler Situationen wie bestehender Bebauung oftmals nicht realisierbar. Die Durchführung einer konventionellen Grundinstandsetzung bedingt bei Einkammerschleusen eine Außerbetriebnahme der zugehörigen Wasserstraße für mehrere Jahre, was aus Sicht der Nutzer vielfach nicht akzeptabel ist.

Vor diesem Hintergrund wird als eine weitere Möglichkeit eine Instandsetzung von Schleusenanlagen unter Betrieb bei grundsätzlicher Aufrechterhaltung der Schifffahrt während der Dauer der Instandsetzungsmaßnahme in den Fokus genommen. „Unter Betrieb“ bedeutet hierbei, dass die Schleusenanlage nur innerhalb fest definierter Zeitfenster für die Instandsetzungsarbeiten gesperrt wird und in den übrigen Zeiträumen dem Schifffahrtsbetrieb zur Verfügung steht. Die Qualität einer Instandsetzung unter Betrieb und damit die erreichbare Nutzungsdauerverlängerung soll mindestens der einer konventionellen Grundinstandsetzung auf Basis der geltenden Normen und Vorschriften entsprechen. Bauliche Maßnahmen, die für eine Instandsetzung unter Betrieb als zielführend erachtet werden, sollen in einer modular aufgebauten Informationssammlung für die WSV und die von ihr beauftragten Planenden im „Modulbaukasten“ verfügbar gemacht werden.

Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens „Instandsetzung unter Betrieb“ (IuB), das die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) gemeinsam mit dem Wasserstraßen-Neubauamt Heidelberg (WNA HD), dem Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) sowie der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) durchführt, werden zwei Handlungsstränge verfolgt:

- Maßnahmen zur Grundinstandsetzung massiver Schleusenkammern unter Betrieb
- Ersatzneubau von Häuptern bzw. Umbau von Kammerblöcken zu Häuptern unter Betrieb (im Folgenden als „Ausbau Schleusenkammer“ bezeichnet).

Modulbaukasten

Für beide Bereiche werden im vorgenannten Modulbaukasten Informationen bereitgestellt (https://izw.baw.de/wsv/planen-bauen/instandsetzung-unter-betrieb). Der Modulbaukasten ist derzeit in zehn Kapitel unterteilt (Bild 1), die sich schwerpunktmäßig mit Maßnahmen zur Grundinstandsetzung von Schleusen unter Betrieb befassen. Neben den klassischen Maßnahmen bei einer Instandsetzung im Massivbaubereich wie Abtrag und Reprofilierung finden sich auch IuB-spezifische Kapitel wie die partielle Trockenlegung. Abgerundet werden die Informationen durch das Kapitel Recht, in dem neben Aspekten wie der täglichen Baufeldübergabe auch alternative Vergabeverfahren und Berichte zur partnerschaftlichen Projektabwicklung zu finden sein werden.

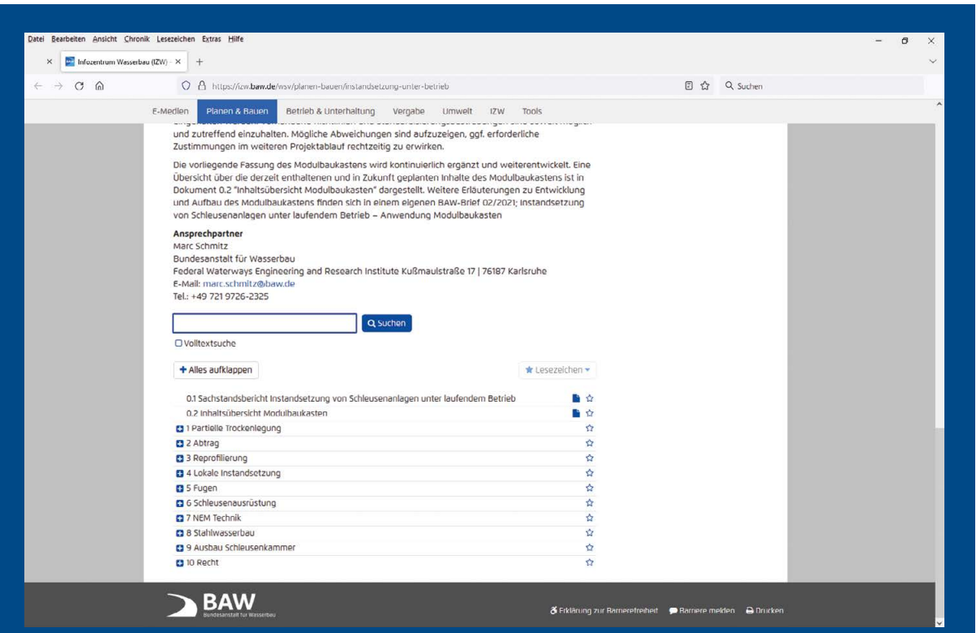


Bild 1: Übersicht über die Kapitel des Modulbaukastens „Instandsetzung unter Betrieb

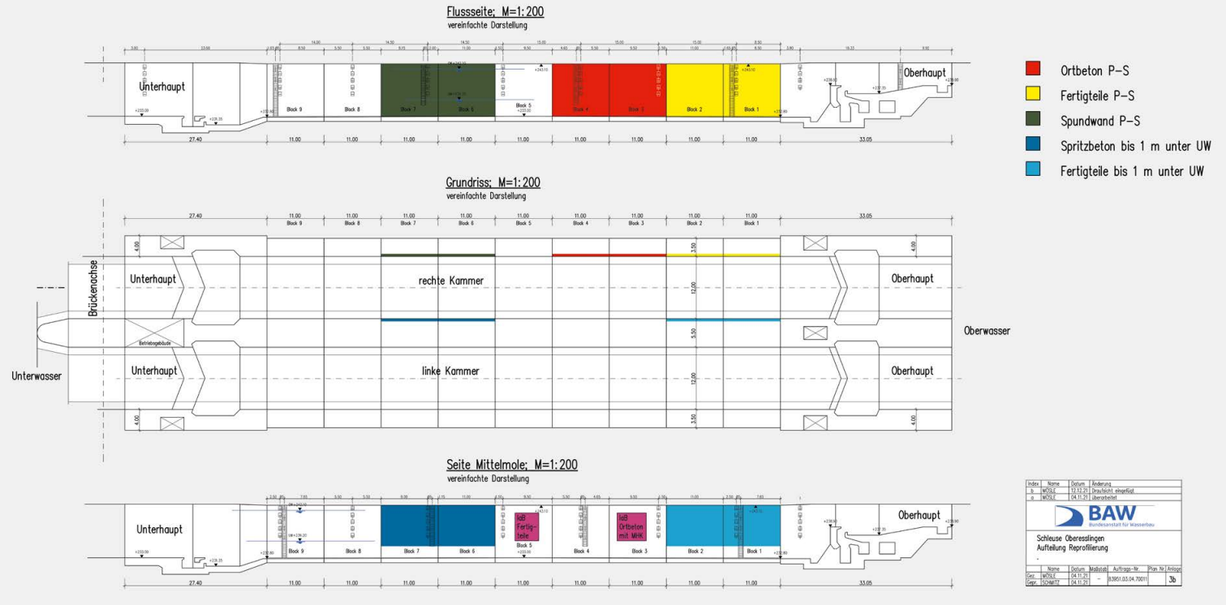


Bild 2: Verteilung der Bauteilversuche in der Schleuse Oberesslingen

Der Modulbaukasten ist in jedem Kapitel dreistufig aufgebaut. Auf der obersten Ebene finden sich die Verfahrenssteckbriefe, in denen stichwortartig die Inhalte einzelner Projektberichte aufgeführt und Leistungsdaten angegeben werden. In der zweiten Ebene befinden sich die Erläuterungsdokumente. Hier sind die Maßnahmen ausführlicher beschrieben und sollen dem/der interessierten Nutzer*in einen vertieften Einblick in die jeweiligen Verfahren bieten. Für Mitarbeitende der WSV befindet sich in der dritten Ebene ein Zugang zu den Originaldokumenten. Derzeit ist die Version 1.1 in Bearbeitung, in der unter anderem der Bereich „Ausbau Schleusenkammer“ intensiver betrachtet wird. Der Modulbaukasten wird mit dem Fortschreiten der Bauteilversuche sukzessive fortgeschrieben und erweitert. Aktuell befinden sich viele der im Modulbaukasten beschriebenen Maßnahmen auf dem Niveau Vorplanung oder Machbarkeitsstudie. Ziel muss sein, die tatsächliche, praktische Umsetzbarkeit durch ausgeführte Maßnahmen belegen zu können. Vor diesem Hintergrund wurden in 2023 für erfolgversprechende IuB-Ansätze zu temporärer Trockenlegung, zum Betonabtrag, zur Reprofilierung und zum Toraustausch an einer Kammer der Doppelschleuse Oberesslingen sogenannte Bauteilversuche gestartet (BTV OES). Hierbei werden in einem partnerschaftlichen Prozess zwischen Bauherrenschaft, planendem Ingenieurbüro und bauausführender Firma innovative Bauverfahren identifiziert und im Weiteren der Nachweis der baupraktischen Durchführung der einzelnen Verfahren aufgezeigt.

Interessendialog und Teilnahmewettbewerb

Mitte 2020 wurde zur Vorbereitung des Vergabeverfahrens für die BTV OES ein Interessendialog mit Teilnehmenden aus der Bauindustrie durchgeführt. In elf Gesprächen wurden mit insgesamt 23 Planungsbüros und Baufirmen neben dem geplanten Ablauf auch der Umfang der BTV (Bild 2), der geplante partnerschaftliche Ablauf und die ortsspezifischen bzw. IuB-typischen Randbedingungen besprochen. Eine wichtige Rückmeldung des Interessendialogs bestand in der Aussage der beteiligten Planungsbüros, dass für die Bearbeitungsdauer der indikativen Angebote mindestens sechs Monate je Planungsschritt vorzusehen seien.

Die anschließende Aufforderung zum Teilnahmewettbewerb wurde am 22.12.2021 im Amtsblatt der EU veröffentlicht. Die Auswahl im Teilnahmewettbewerb erfolgte aufgrund von Referenzen auf den Gebieten Planung und Ausführung von Schleusenneubau, Schleuseninstandsetzung und Stahlwasserbau. Die ausgewählten Bietergemeinschaften erhielten am 25.02.2022 die Aufforderung zur Abgabe der ersten indikativen Angebote. Dabei mussten in den Konzepten neben zwei Abtragsvarianten auch die geforderten Reprofilierungen unter IuB-Randbedingungen in ihren verschiedenen Varianten (Bild 2) und die partielle Trockenlegung technisch beschrieben werden. Zudem sollte ein Torersatz inkl. Tausch der Anschlagpunkte geplant werden (BTV Rahmenlösung). Weiter mussten zwei BTV zu Abtrag und Reprofilierung unter konventionellen Bedingungen entwickelt werden. Diese Instandsetzung mit Außerbetriebnahme der Schleuse (IaB) umfasst neben einer Reprofilierung aus Fertigteilen mit normal erhärtendem Hinterfüllbeton zusätzlich eine Reprofilierung mittels Ortbeton mit Mikrohohlkugeln (BTV MHK), welche als Ersatz für einen konventionellen Luftporenbildner dienen. Im Verlauf des Vergabeverfahrens kamen für die Erstellung des zweiten indikativen Angebots zusätzlich noch Seilsägen als weiteres Abtragsverfahren hinzu. Nach Zuschlag wurde der BTV MHK um einen weiteren Block erweitert. Hier soll untersucht werden, ob im Hinblick auf Beanspruchungen aus frühem Zwang statt der bisher vorgegebenen Bewehrung der Betonvorsatzschale in zwei Ebenen bei sonst identi-

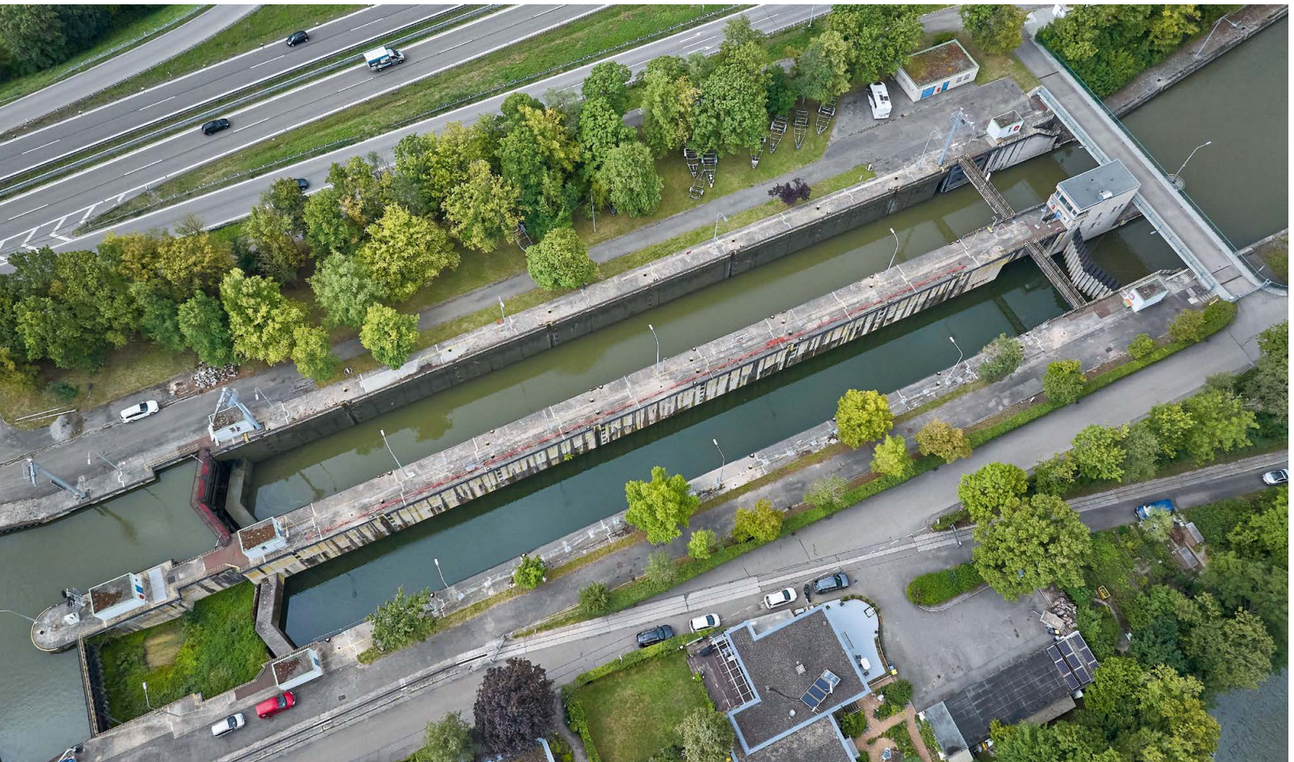
schen Randbedingungen (z. B. Klima, Dicke der Vorsatzschale und Abtragsverfahren) auch eine Bewehrung in nur einer Ebene zu einem akzeptablen Ergebnis führen kann.

Die Randbedingungen für die BTV OES sind in zwei Kategorien einzuteilen: Randbedingungen, die den allgemeinen Anforderungen einer Instandsetzung unter Betrieb genügen müssen und Randbedingungen, die den spezifischen Gegebenheiten vor Ort bei der Schleuse Oberesslingen geschuldet sind (Bild 3). Typische Randbedingen für eine Instandsetzung unter Betrieb beziehen sich auf die Sperrzeiten. Für die BTV OES sind vorab Sperrzeiten von 12 Std/Tag festgelegt worden. Das bedeutet, dass der Auftragnehmer (AN) seine Ausführung so zu planen hat, dass die Schleuse die restlichen 12 Stunden für den Schifffahrtsbetrieb zur Verfügung steht. Innerhalb der Sperrzeiten sind also nicht nur die Instandsetzungsarbeiten einzutakten, sondern auch die notwendigen Vorarbeiten wie die bereichsweise Trockenlegung, das Einfahren von Arbeitspontons sowie die Baufeldübergabe zu Beginn und Ende der Sperrzeiten. Nach derzeitigem Wissensstand verbleiben bei Sperrzeiten von 12 Stunden etwa 10 Stunden für die reinen Instandsetzungsarbeiten. Weiter müssen die Konzepte so ausgelegt sein, dass während des Schleusenbetriebs in der Schleusenkammer mindestens 11,80 m in der Breite zur Verfügung stehen und die Abladetiefe nicht eingeschränkt wird. Entsprechend dieser Vorgabe sind Baubehelfe wie Schalungen inkl. Schalanker oder Sicherungsmaßnahmen innerhalb der Schleuse zur Aufrechterhaltung des sicheren Schiffsverkehrs auszulegen. Auch sind die Bauverfahren so zu planen, dass auf der Planie keine Lasten über 10 kN/m² anzuordnen sind. Schwerere Hebegeräte kann der AN zum Beispiel auf einem Arbeitsponton einplanen, welcher in die Kammer eingefahren werden muss, was allerdings zu Lasten der zur Verfügung stehenden Arbeitszeit geht. Die ortsspezifischen Randbedingungen beziehen sich zum Großteil auf den Umstand, dass die nun zur Verfügung stehende Kammer 1968 als massive Schleusenkammer ausgebildet worden ist und danach als Sparbecken genutzt wurde, sodass weder Tore noch Antriebstechnik vorhanden sind. Im Ober- und Unterhaupt sind vielmehr seit Inbetriebnahme Spundwände installiert. Um die Bauteilversuche möglichst realitätsnah abbilden zu können, ist daher die Spundwand am Unterhaupt zu demontieren. Als Torersatz für die Dauer der BTV ist zwingend ein Revisionsverschluss vorzusehen, sodass die Kammer sowohl für die IaB-BTV dauerhaft trockengelegt als auch für die IuB-BTV bis Oberwasser eingestaut werden kann, um einen Schleusenbetrieb, beispielsweise für die Materialbelastung (Schockabkühlung des jungen Betons durch Schleusungsvorgang), zu simulieren. Weiterhin ist die Ausführung der BTV so abzustimmen, dass die Belastung der Anwohner durch Staub oder Lärm möglichst gering ist.

Vergabeverfahren

Das Vergabeverfahren für die BTV OES war als zweistufiges Verhandlungsverfahren angelegt. Zur ersten Verhandlungsrunde waren die Bietergemeinschaften aufgefordert, ihre Konzepte auf Grundlage der Vergabeunterlagen zu erstellen. Aufgrund der Gesprächsinhalte und der vorgelegten Konzepte wurden seitens des Auftraggebers (AG), BAW und WNA Heidelberg, nach der ersten Verhandlungsrunde

Bild 3: Luftaufnahme Schleuse Oberesslingen



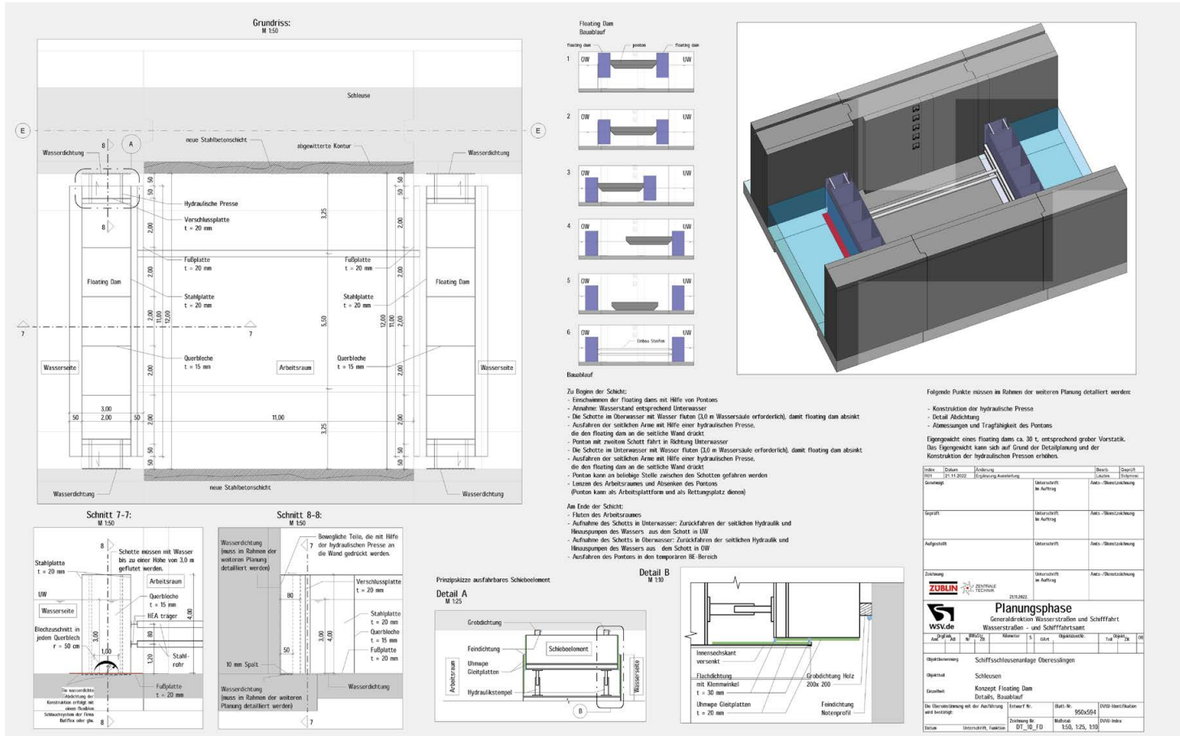


Bild 4: Einschwimmbare Wände

alle Vergabeunterlagen überarbeitet bzw. ergänzt. Dies war unter anderem notwendig geworden, um innovative Lösungsvorschläge weiter verfolgen zu können und den Schutz der Ideen der einzelnen Bietergemeinschaften sicherstellen zu können. So hat zum Beispiel ein Bieter im Rahmen seiner Konzepte ein drittes Abtragsverfahren aufgeführt, woraufhin von allen Bietern ein beliebiges drittes Abtragsverfahren eingefordert wurde. Weiter hatte der AG in seiner ursprünglichen Planung als mobilen Revisionsverschluss (mRV) einen Dammbalkenverschluss vorgesehen, der abschnittsweise in den einzelnen Blöcken / Arbeitsabschnitten über eigens zu fertigende Nischen eingesetzt werden sollte. Hier hatten drei Bieter ähnliche Konzepte eingereicht, bei denen komplette Wände eingeschwommen und abgesenkt werden sollen (Bild 4). Die Unterschiede in den Konzepten bestanden überwiegend in den statischen Sicherungssystemen. Daher mussten die Anforderungen in den Vergabeunterlagen diesbezüglich vollständig überarbeitet und neben dem mRV zwingend ein Dammbalkenverschluss (zDV) gefordert werden. Dieser muss auf einen Wasserstand bis Oberwasserstand in der Kammer bemessen werden, um die Betriebsprüfungen der BTV OES durchführen zu können.

Die Bietergemeinschaft, die letztlich den Zuschlag erhielt, hatte in ihrem Konzept zudem vorgesehen, den trocken zu legenden Bereich bei den Abtrags- und Reprofilierungsarbeiten über einen Süllkasten zugänglich zu machen (Bild 5).

In der weiteren Ausarbeitung wurde seitens der Bietergemeinschaft entschieden, dies zur Vorzugsvariante auszubauen und so die aufwändig einzuschwimmenden Wände des mRV nicht weiter zu berücksichtigen. Wie in Bild 5 zu sehen ist, hat dieser Süllkasten sowohl einen verfahrbaren Boden (blau), um ohne Übergänge in allen Bereichen bis Planie arbeiten zu können, als auch einen demontierbaren Boden (orange), um zum einen Arbeiten bis zur Sohle ausführen zu können und zum anderen bei Schleusen mit durchlässiger Sohle durch Montage des Bodens den Süllkasten auch in diesen Bereichen einsetzen zu können.

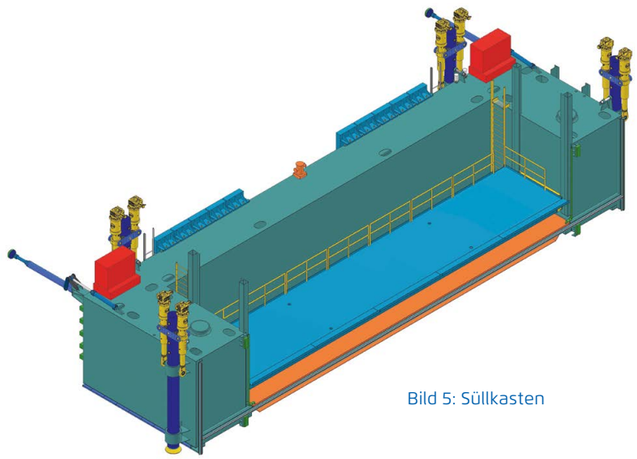


Bild 5: Süllkasten

Bild 6:
Aufteilung der Bauteilversuche in der Schleuse Oberesslingen

BTV	Abtragstiefe	Abtrag mittels	Block	Ausrüstung	Bearbeitungshöhe	Hinweise
Ortbeton (IuB)	30 cm	Fräsen	Block 3 rechts Block 4 rechts	Ohne Ausrüstung Mit Ausrüstung	Sohle – Planie Sohle – Planie	4 horizontale Arbeitsschritte
Fertigteil I (IuB)	40 cm	Seilsägen	Block 2 rechts Block 1 rechts	Ohne Ausrüstung Mit Ausrüstung	Sohle – Planie Sohle – Planie	4 horizontale Arbeitsschritte Hinterfüllbeton schnell erhärtend
Spundwand (IuB)	50 cm	Seilsägen	Block 6 rechts Block 7 rechts	Ohne Ausrüstung Mit Ausrüstung	Sohle – Planie Sohle – Planie	2 vorgefertigte Elemente je Block Hinterfüllbeton schnell erhärtend
Spritzbeton (IuB)	20 cm	HDW	Block 6 links Block 7 links	Ohne Ausrüstung Mit Ausrüstung	1 m unter UW – Planie 1 m unter UW – Planie	Ohne Stabstahlbewehrung Mit Faserspritzbeton
Fertigteil II (IuB)	40 cm	Fräsen	Block 2 links Block 1 links	Ohne Ausrüstung Mit Ausrüstung	1 m unter UW – Planie 1 m unter UW – Planie	3 horizontale Arbeitsschritte Hinterfüllbeton schnell erhärtend
MHK (IaB)	30 cm	Fräsen	Block 3 links Block 4 links	Ohne Ausrüstung Ohne Ausrüstung	1 m unter UW – Planie 1 m unter UW – Planie	Zweilagige Stabstahlbewehrung Einlagige Stabstahlbewehrung
Fertigteil III (IaB)	40 cm	Seilsägen	Block 5 links	Mit Ausrüstung	1 m unter UW – Planie	Hinterfüllbeton schnell erhärtend

Ein weiterer, sehr innovativer Vorschlag war, eine Reprofilierung mittels Spritzbeton ohne Stabstahlbewehrung durchzuführen. Hierzu soll die Tragwirkung der Vorsatzschale über den Stahlfaseranteil im Spritzbeton erreicht werden. Sollte dieses Reprofilierungsverfahren sowohl aus statischer wie aus baubetrieblicher Sicht erfolgversprechend verlaufen, besteht aus Sicht der Arbeitsgruppe IuB ein großes Potenzial für zukünftige IuB- wie auch IaB-Maßnahmen.

Herausforderungen und Potenziale

Im Einzelnen sollen nunmehr im Rahmen der BTV OES die in Bild 6 dargestellten Abtrags- und Reprofilierungsvarianten durchgeführt werden. Für die durchzuführenden Arbeiten liegen teilweise keine Erfahrungswerte vor. So ist zwar ein Abtrag mit Hochdruckwasserstrahlen oder Fräsen unter konventionellen Randbedingungen in der WSV ein gängiges Verfahren, für die Instandsetzung unter Betrieb fehlen aber entsprechende Informationen. Der Abtrag mittels Seilsägen ist für eine Schleuseninstandsetzung bisher zumindest nicht dokumentiert. Die Herausforderung für die Reprofilierung mit Ortbeton liegt u. a. in der Tatsache begründet, dass es kurz nach der Betonage eine Beaufschlagung mit kaltem Flusswasser geben wird. Daher muss der Beton der Belastung einer „Schockabkühlung“ standhalten. Bei der bautechnischen Planung muss entsprechend berücksichtigt werden, dass der Beton in der Schalung bereits eine ausreichende Frühfestigkeit entwickeln konnte, um schadensfrei zu bleiben. Derzeitige Planungen sehen mehrere einzelne, horizontal orientierte Arbeits- bzw. Betonierabschnitte vor, um innerhalb der zur Verfügung stehenden Arbeitszeit mit ausreichender Wahrscheinlichkeit ein qualitativ hochwertiges Ergebnis zu erhalten. Analoge Anforderungen gelten für die Reprofilierungen mit Fertigteilen (IuB). Bei der vorgesetzten Spundwand mit Hinterfüllbeton sind insbesondere die Verbundsituation zwischen den einzelnen Komponenten und das Tragverhalten des Gesamtsystems zu betrachten. Für den Bauteilversuch mit Mikrohohlkugeln ist neben dem Baustoff mit zugefügten künstlichen Luftporen anstatt konventioneller Luftporenbildner vor allem der Vergleich zwischen der Ausführung mit zweilagiger und einlagiger Bewehrung interessant. Sollten hier aufgrund von frühem Zwang keine signifikanten, nicht akzeptablen Unterschiede in der Rissbildung festgestellt werden, könnte dieser Ansatz zu einem einfacheren Bauverfahren für zukünftige Reprofilierungen führen. Vorteile wären die Zeit- und Aufwandsersparnis durch den geringeren Abtrag und geringere einzubauende Bewehrungs- und Betonmengen. Erste Simulationen legen nahe, dass nur minimale Unterschiede im Rissbild zu erwarten sind. Durch die BTV soll nun aber der praktische Nachweis erbracht werden. Bei allen Reprofilierungsvarianten ist die Frage zu beantworten, mit welcher Instandsetzung ein gravierender Wasserdurchtritt durch den Altbeton auf ein akzeptables Maß begrenzt werden kann, wo und wie im Instandsetzungssystem also eine entsprechende „Dichtungsebene“ realisiert wird.

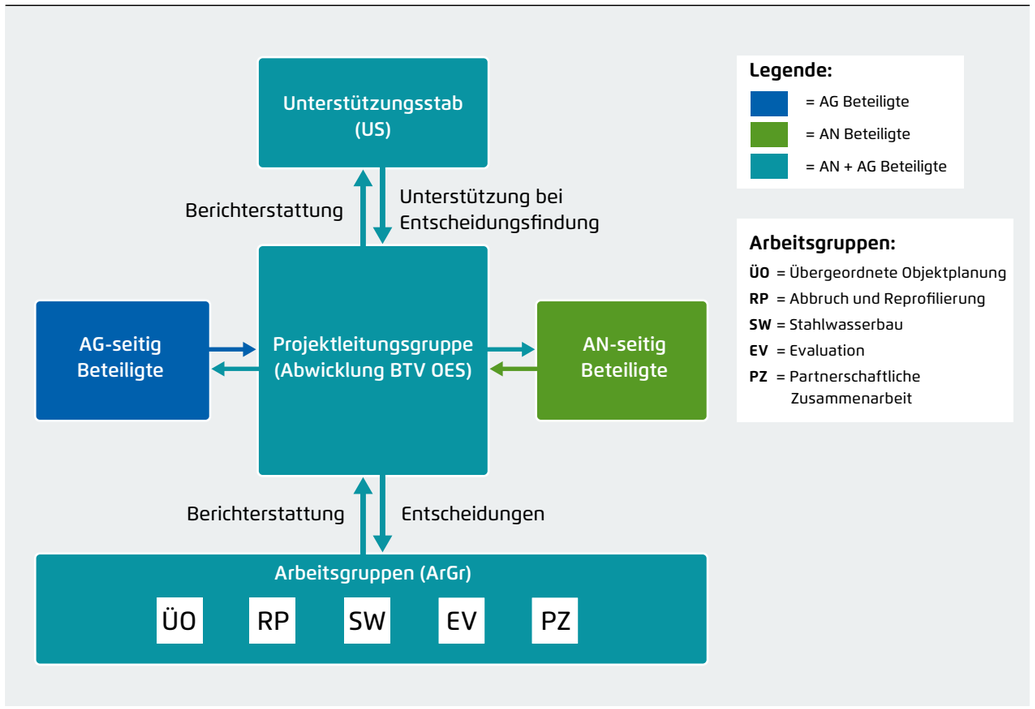
Nachdem der Zuschlag für die BTV OES Anfang August 2023 bekannt gegeben werden konnte, wurde die weitere partnerschaftliche Zusammenarbeit im Rahmen eines Kick-Off-Meetings im September 2023 besprochen. Hier vereinbarten alle am Projekt Beteiligten eine Projektstruktur (Bild 7), die neben fachlichen Arbeitsgruppen (ArGr) auch einen Unterstützungsstab vorsieht. Er soll im Fall von besonderen bzw. richtungsweisenden Entscheidungen, die nicht in der Projektleitungsgruppe behandelt werden können oder sollten, vermitteln und entscheiden. Zudem wurde gemeinsam eine individuelle Projektcharta als Leitfaden für die Arbeit am Projekt entwickelt und verabschiedet.

„Wie bei vielen Verkehrswasserbauwerken besteht auch an den Schleusenanlagen der WSV vor dem Hintergrund der Altersstruktur der Anlagen ein erheblicher Instandsetzungsbedarf, der absehbar weiter ansteigen wird.“

Die einzelnen ArGr arbeiten selbstständig und haben einen individuellen Sitzungsrhythmus vereinbart. Sie sind so zusammengesetzt, dass offene Diskussionspunkte direkt in die Projektleitungsgruppe getragen werden können (Bild 7). Temporäre Arbeitsschwerpunkte in den ArGr bestimmt der vom AN geplante Ablaufplan. So ist die ArGr Stahlwasserbau derzeit hauptsächlich mit den Planungen des Süllkastens beschäftigt, da dieser aufgrund einer langen Fertigungszeit die größte Vorlaufzeit benötigt, auch wenn er erst im späteren Verlauf der BTV OES zum Einsatz kommt.

Der AN hat Mitte Februar die erste Lesefassung des Pflichtenhefts zur Abstimmung dem AG vorgelegt, das dann partnerschaftlich abgestimmt wurde. Der weitere Projektablaufplan sieht vor, dass die ersten Bautätigkeiten im Quartal III/2024 mit den notwendigen Sicherungsmaßnahmen der Sohle (Entspannungsbohrungen) sowie dem Ausbau der Spundwand im Unterhaupt beginnen sollen. Die eigentlichen BTV beginnen im Frühjahr 2025 mit der Umsetzung der Rahmenlösung. Die IaB-BTV sollen bis August 2025 abgeschlossen sein, die IuB-BTV bis August 2027. Hierbei ist zu beachten, dass der AN bisher nur mit der Planung aller BTV beauftragt worden ist. Für die Beauftragung der Durchführung der einzelnen BTV werden separate Verträge geschlossen, wobei hier der AG die Möglichkeit hat, diese nicht ausführen zu lassen, wenn sich ein BTV aufgrund finanzieller oder bautechnischer Gründe als nicht durchführbar zeigt (Exit-Strategie). Aufgrund des aktuellen Planungsstandes wird jedoch von einer Durchführung aller Bauteilversuche ausgegangen.

Bild 7:
Organisation der Bauteilversuche in der Schleuse Oberesslingen



Klimaschutz in der Binnenschifffahrt

Messung und Modellierung von Maßnahmen zur Minderung der Treibhausgasemissionen

Die BAW begleitet die Binnenschifffahrt auf dem Weg in die Klimaneutralität. Mithilfe von Modellen und Messungen werden bereits angewendete und neu erarbeitete Minderungsmaßnahmen der Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen untersucht. Signifikante Einsparungen durch technische und betriebliche Optimierungen sind schon heute möglich. Das aktuell größte Potenzial für einen insgesamt umweltfreundlicheren Gütertransport stellt die Verlagerung vom LKW auf das Binnenschiff dar.

Herausforderung und Potenziale für die Binnenschifffahrt

Hitze, lang anhaltende Trockenphasen und katastrophale Überschwemmungen als Folgen des vom Menschen beeinflussten Klimawandels nehmen auch in Deutschland spürbar zu. Um die globale Erwärmung und ihre Folgen auf ein für uns erträgliches Maß zu begrenzen, empfiehlt der Weltklimarat eine deutliche Reduzierung der Treibhausgasemissionen. Für den Wirtschaftsstandort Deutschland mit seinen essenziellen Warenströmen erfordert das umfassende Transformationsprozesse, auch im Verkehrssektor. Die Güterverkehrsprognose des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr erwartet für den Zeitraum von 2019 bis 2051 eine Steigerung des Verkehrsaufkommens um insgesamt 30 %. Gleichzeitig fordert das Bundes-Klimaschutzgesetz bis 2030 eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen um mindestens 65 % (bezogen auf das Jahr 1990), bis 2045 eine Treibhausgasneutralität. Die zahlreichen Staus auf Autobahnen und Verspätungen der Bahn machen deutlich, dass sich die Infrastruktur des Schienen- und Straßenverkehrs bereits heute teilweise an der Kapazitätsgrenze befindet. Weder eine Steigerung der Verkehrsleistung noch eine erhebliche Verlagerung auf die klimafreundliche Bahn erscheinen daher realistisch. Die Verlagerung auf das transportleistungseffiziente Binnenschiff stellt dagegen eine probate Maßnahme zur kurz- bis langfristigen Realisierung eines möglichst klimaschonenden Gütertransports dar. Um jedoch von „Klimaschutz durch die Binnenschifffahrt“ sprechen zu können, sind erhebliche Anstrengungen zur Minderung bzw. zukünftigen Vermeidung von Treibhausgasemissionen erforderlich. Diese lassen sich grundlegend in technische und betriebliche Minderungsmaßnahmen kategorisieren.

Während bereits etablierte technische Maßnahmen in Form von Katalysatoren und Filtern auf die Reduzierung von Luftschadstoffemissionen abzielen, müssen künftige Entwicklungen auf alternative Energieträger und Antriebstechniken ausgerichtet sein. Denn selbst die zurückliegende Effizienzsteigerung bei Dieselmotoren genügt mit ca. 0,4 % jährlich (seit 1975, bezogen auf den leistungsspezifischen Treibstoffverbrauch) nicht den Zielen des Klimaschutzes. Aktuell erscheint grünes Methanol als geeigneter Schiffskraftstoff der Zukunft. Dieser weist eine ausreichende Energiedichte auf, ist im Falle von Havarien weniger umweltschädlich als Ammoniak oder Schweröl und kann mithilfe neuer Katalyse-Verfahren aus atmosphärischem CO_2 gewonnen werden. Alternativ zu Methanol werden bereits erste Pilot- und Forschungsschiffe elektrisch mit Akkumulatoren oder über Brennstoffzellen mit Wasserstoff betrieben. Neben den technischen Änderungen sollte der Fokus auch auf die Energieeinsparung gelegt werden. Diese lässt sich mit einem effizienteren Schiffsbetrieb z. B. durch Geschwindigkeitsreduzierung (Slow Steaming) in Verbindung mit optimierten Prozessen auf den Wasserstraßen umsetzen, wie etwa durch die Steuerung des Schleusenzulaufs in Schleusenketten. Die BAW begleitet und unterstützt diese

Bild 1: On-Board-Emissionsmessung auf einem Binnenschiff

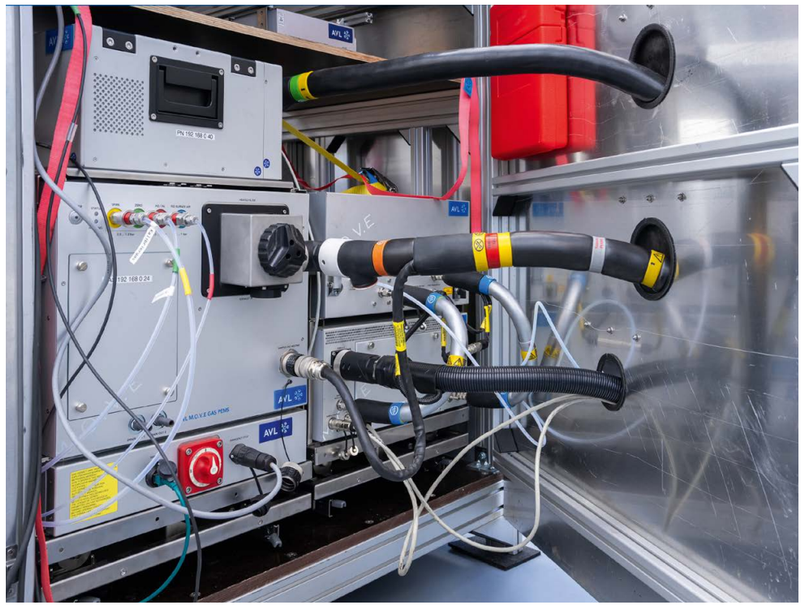


Bild 2: Emissions-Messequipment der BAW (Partikelzähler, Gasanalysator und Energieversorgung links und Partikelmassenkonzentration rechts sowie Zuleitung über beheizte Entnahmeschläuche)

Maßnahmen mit Messungen und Modellen, die es ermöglichen, den Erfolg zur Reduzierung der Emissionen zu erfassen bzw. abzuschätzen.

On-Board-Monitoring der Emission

Binnenschiffsemissionsraten unterliegen einer großen Spannweite, da neben neuen Schiffen und Motoren auch solche in Betrieb sind, deren Alter mehr als 50 Jahre betragen kann. Zudem hängt der Verbrauch und damit die Emissionsrate von der Ladungsmenge und der Wasserströmung ab. Diese Variabilität lässt sich nur unzureichend mittels Motorprüfstandmessungen unter standardisierten Bedingungen abbilden. Für die Bewertung der aktuellen Beiträge betriebsbedingter Treibhausgasemissionen und für darauf aufbauende Empfehlungen zur Emissionsminderung sind präzise Datengrundlagen jedoch essenziell und begründen die seit 2018 praktizierten On-Board-Emissionsmessungen der BAW (Bild 1). Seit August 2023 wird hierfür das BAW-eigene Mess-Equipment eingesetzt, bestehend aus Gas- und Partikelanalysatoren (Bild 2) sowie Volumenstromsensoren. Das kompakte System, welches neben den Sensoren noch Brenn- und Kalibriergase sowie eine Notstromversorgung umfasst, wird für die Messung mit einem Arbeitskran auf das hintere Deck platziert. Die Sonden im Abgasrohr werden über beheizte Entnahmeleitungen an die Sensoren angeschlossen. Eine hohe Messrate von 1 Hz erlaubt es, auch kurzzeitige Änderungen von Betriebszuständen in den Zeitreihen der Emission zu registrieren. Die Messdauer beträgt je nach Fahrtrevier zwischen 3 und 8 Stunden. Neben dem Treibhausgas CO_2 werden die Luftschadstoffe NO, NO_X, CO und HC spektral und die Partikelanzahl sowie Partikelmassenkonzentration fotoakustisch bzw. gravimetrisch bestimmt. Von der BAW durchgeführte Messungen mit dem eigenen Equipment gewährleisten eine konsistente Datenerhebung und ermöglichen die Gewinnung eines umfangreichen Datensatzes über lange Zeiträume. Die Messungen auf unterschiedlichen Schiffen erfolgen entweder als Real-Driving-Emissionsmessungen (RDE), bei der kein Einfluss auf die Betriebsweise genommen wird, oder für gezielt gefahrene Drehzahl- bzw. Lastbereiche. Während Erstere Kenntnisse zu transportleistungsbezogenen Emissionen liefern, dienen Letztere vorrangig der Ermittlung leistungsspezifischer Emissionsfaktoren. Diese Faktoren sind von zentraler Bedeutung für die zukünftige Emissionsmodellierung. Mit längerfristig angelegten On-Board-Emissionsmessungen lässt sich die Entwicklung zu einer immer klima- und umweltfreundlicheren Binnenschifffahrt verfolgen bzw. nachweisen.

Numerische Bottom-up-Modellierung – vom Einzelschiff- bis zur Gesamtemission

Um Minderungsmaßnahmen für einzelne Schiffe, für Flotten und – wegen der anzustrebenden Gütertransportverlagerung – für die Wasserstraße insgesamt bewerten zu können, müssen sowohl der Status quo des Treibstoffverbrauchs und der Treibhausgasemissionen als auch die Wirkungsweise der Maßnahmen möglichst präzise abgeschätzt werden. Obwohl bereits einige Modelle zu Binnenschiffsemissionen existieren, sind aufgrund der vielfältigen Anwendungsfälle, Randbedingungen und neueren Erkenntnisse weiterhin Modellentwicklungen erforderlich. So lassen sich im Vergleich zu früheren Modellen, die häufig auf verkehrsstatistischen Daten beruhen, mittler-

„Die Verlagerung von Gütern auf das leistungseffiziente Binnenschiff stellt eine probate Maßnahme zur kurz- bis langfristigen Realisierung eines möglichst klimaschonenden Transports dar.“

weile Emissionen aus direkt beobachteten Schiffsverkehren und mithilfe verbesserter fahrdynamischer Ansätze bestimmen (Bild 3). Der BAW stehen hierfür Daten des automatischen Identifikationssystems (AIS) zur Verfügung, die über AIS-Landstationen der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt an einem Großteil der Bundeswasserstraßen erfasst und seit 2019 aufgezeichnet werden. Diese beinhalten neben den genauen Positionen und Geschwindigkeiten auch Angaben zur Identifikation und den Abmessungen der Binnenschiffe. Zusätzliche Informationen wie Motoralter oder maximale Anzahl der Passagiere bei Fahrgast- und Hotelschiffen werden über die IVR-Datenbank ergänzt. Eine weitere Grundlage des Modells bilden Informationen zu den Wasserstraßen, die sich aus Datenbankeinträgen zu Breiten, Tiefen und Profilformen in Kanälen sowie aus HN-Modellen der BAW zu Bathymetrie und Strömungsbedingungen in Flüssen gewinnen lassen. In Verbindung mit Pegelaufzeichnungen der Bundesanstalt für Gewässerkunde kann so zu jeder beobachteten Schiffsposition die Wassertiefe und die relative Geschwindigkeit durch Wasser quasistationär bestimmt werden. Mit fahrdynamischen Ansätzen aus dem Fast-Time-Simulator FaRAO (Fahrdynamische Routen-Analyse und -Optimierung) wird der Widerstand mit den im Binnenbereich anzutreffenden Flachwasserbedingungen und Kurvenfahrten berücksichtigt. Über Propulsions- und Verlustbeiwerte kann man den Widerstand auf die Motorleistung sowie mithilfe leistungsspezifischer Faktoren auf den Treibstoffverbrauch und die Emissionsraten übertragen. Aus der Integration der Emissionsraten entlang eines Wasserstraßenabschnitts lassen sich über den Zeit- und Längenbezug der Beobachtungen längenspezifische Emissionsraten ableiten und kartieren. Die Gesamtemission beliebiger Zeiträume und Regionen resultiert schließlich aus der Multiplikation und Akkumulation der Raten mit der Zeit und über die entsprechenden Wasserstraßenabschnitte. Neben der Analyse beobachteter Emissionsraten lassen sich auf diese Weise auch Emissionsraten für Szenarien ermitteln.

Aktuell greift das Modell für die leistungsspezifischen Emissionsfaktoren auf Literaturwerte zurück. Perspektivisch werden diese jedoch durch die gemessenen Faktoren ersetzt. Darüber hinaus wird eine Modellerweiterung angestrebt, sodass sich die Emissionen auch für instationäre Prozesse präzise bestimmen lassen. Instationäre Bedingungen, die z. B. während des Manövrierens in Schleusen und Häfen sowie beim Kaltstart des Motors vorliegen, lassen sich mithilfe der aktuell verwendeten konstanten Emissionsfaktoren und Propulsionsbeiwerte nur unzureichend abbilden. Neben einem verbesserten Ansatz zur Berücksichtigung der Propulsion liegt der Fokus auf der Erweiterung des Emissionsmodells um ein numerisches Motorenmodell. Hierfür genügt ein sogenanntes Mean-Value-Modell, welches zwar die Emissionsentstehung mechanistisch und zeitlich höher aufgelöst ermittelt, jedoch nicht jeden Motortakt abbildet. Mit einem Mean-Value-Modell kann man perspektivisch auch neue Motortechniken abbilden. Auf diesem

Bild 3:
Konzept der Emissionsmodellierung

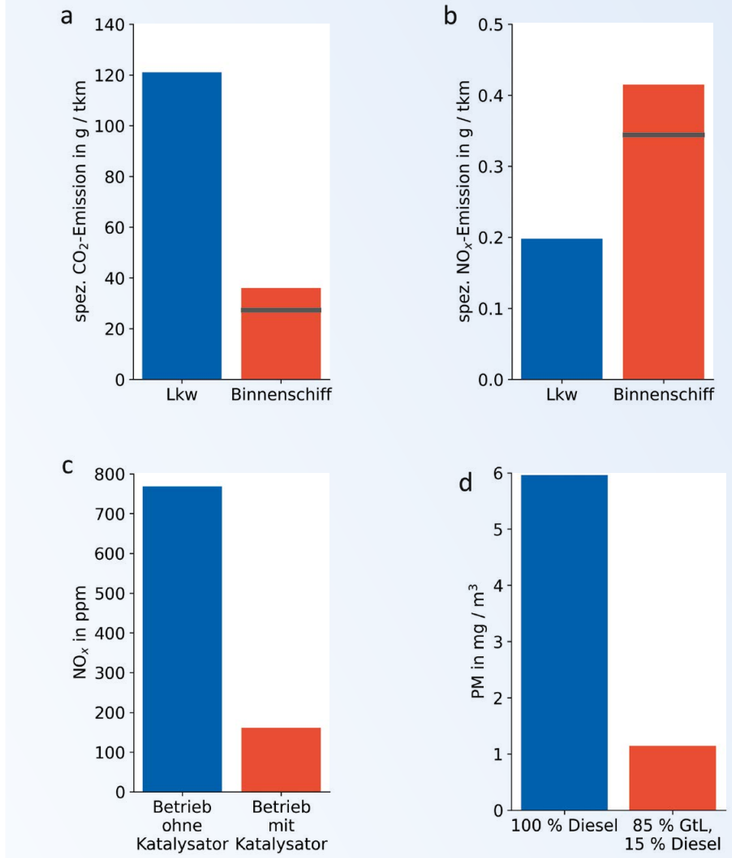


Bild 4:
Transportleistungsspezifische Emissionen von CO_2 (a) und NO_x (b) von LKW und Binnenschiff (Säulen kennzeichnen Werte aus TREMOD V6.51, Linien eigene RDE-Messwerte) sowie gemessene Konzentrationen von NO_x (c) und Partikelmasse PM (d) bei gleichen Betriebsbedingungen mit und ohne technische Minderungsmaßnahmen

Weg lässt sich der Anwendungsbereich der Bottom-up-Modellierung deutlich erweitern – ohne signifikanten Verlust bei der Performanz.

Emissionsminderung durch technische Maßnahmen

Das Binnenschiff ist aufgrund des geringen Leistungsbedarfs für Transporte großer Massen besonders effizient. Das spiegelt sich auch in der transportleistungsbezogenen CO_2-Emission wider, die dem TREMOD-Modell des Umweltbundesamtes zufolge für das Binnenschiff bei durchschnittlich 36 g/tkm liegt, während ein LKW einen ungefähr 3,4-mal höheren Durchschnittswert aufweist (Bild 4a). Das TREMOD-Modell basiert auf verkehrsstatistischen Daten und Prüfstandmesswerten. Die eigene RDE-Messung auf einem nur zu 25 % beladenen Schiff des Baujahrs 2016 ergaben bereits eine geringere spezifische Emission (27 g/tkm), die bei einer größeren Auslastung nochmals deutlich niedriger wäre. Ein häufig aufgeführter Kritikpunkt für Binnenschiffstransporte ist der im Vergleich zum LKW höhere NO_X-Ausstoß (Bild 4b), der bei einer potenziellen klimaschutzrelevanten Verkehrsverlagerung auf die Wasserstraße mitberücksichtigt werden sollte. Auch hier konnte durch Messungen auf demselben Schiff eine im Vergleich zum TREMOD-Modell geringere Emission festgestellt werden (0,34 g/tkm), die dennoch über dem Durchschnittswert eines LKWs liegt. Vermutlich liegt dies an dem deutlich kürzeren Erneuerungsintervall der LKW-Flotte (8,5 Jahre) und dem dadurch größeren Anteil neuer Motoren und Katalysatoren. Das Durchschnittsalter eines Binnenschiffes liegt bei ca. 65 Jahren und Binnenschiffsmotoren werden in der Regel nur alle 20 bis 30 Jahre ersetzt. Der mit der längeren Nutzungszeit einhergehende geringere Ressourcenverbrauch im Vergleich zu den anderen Verkehrsträgern ist nicht Teil aktueller BAW-Untersuchungen, sollte in einer Gesamt-Klimaschutzbetrachtung aber nicht vernachlässigt werden.

RDE-Messungen auf einem im Jahr 2019 mit SCR-Katalysator nachgerüsteten Binnenschiff weisen im Vergleich zu Messungen ohne Katalysator bei gleichen Betriebsbedingungen erheblich geringere NO_X-Emissionen auf (Bild 4c). Eine vergleichbare Reduzierung der Schadstoffbelastung durch Partikelemissionen (Bild 4d) ermöglicht unter an-

derem der Betrieb mit dem Kraftstoff GtL (Gas to Liquid). Die RDE-Messung auf einem Schiff mit Partikelfilter zeigte, dass sich diese Schadstoffbelastung sogar gänzlich vermeiden lässt. Alle bisherigen RDE-Messungen weisen relativ konstante Emissionsraten auf. Änderungen während einer Fahrt lassen sich ausschließlich auf Last- bzw. Drehzahländerungen zurückführen, z. B. am Übergang zwischen dem strömenden Bereich des Rheins und der strömungsberuhigten Waal. Diese Feststellung validiert u. a. die Anwendbarkeit des Modells für einen Großteil der Streckenfahrten und Emissionen wie CO_2, dessen leistungsspezifische Faktoren drehzahlunabhängig sind. Bei anderen Emissionen wie NO_X konnte dagegen eine deutliche Abhängigkeit der Faktoren von der Drehzahl, stellvertretend für die Verbrennungstemperatur, festgestellt werden. In Häfen, bei An- und Ablegemanövern sowie insbesondere beim Kaltstart weisen die Emissions-Zeitreihen deutliche Spitzen auf und begründen die Erfordernis der zuvor genannten Modellerweiterung.

Auf Basis bisheriger Analysen kann bereits bestätigt werden: Mit einer Verlagerung des Gütertransportes von der Straße auf die Wasserstraße ließe sich der Anteil verkehrsbedingter Treibhausgasemissionen schon jetzt erheblich reduzieren. Eine Erneuerung der Motoren, das Nachrüsten mit Katalysatoren und Filtern sowie die Verwendung alternativer Kraftstoffe würde die Luftschadstoffbelastung zusätzlich verringern.

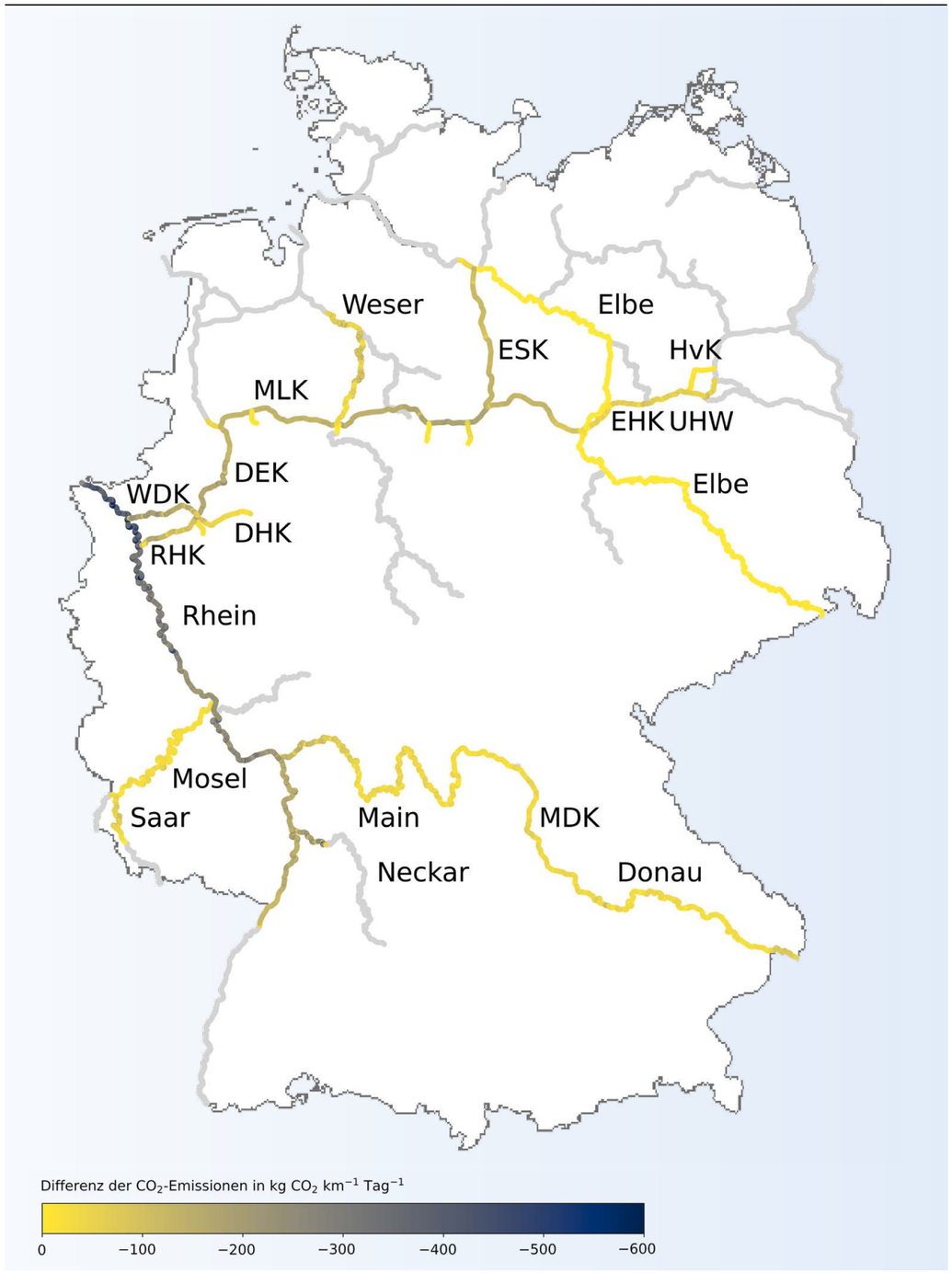
Emissionsminderung durch betriebliche Maßnahmen

Das Referat Schifffahrt der BAW unterstützt die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) und die Binnenschifffahrt bei Prozessoptimierungen durch Digitalisierung und Automatisierung. Im Rahmen des Projektes intelligente Schleusenzulaufsteuerung werden über Methoden des maschinellen Lernens die erwarteten Ankunftszeiten der Schiffe an Schleusen ermittelt und daraufhin die Schleusungen so optimiert, dass sich die Gesamtwartezeit bei angepasster Fahrweise deutlich reduziert. Die entwickelten Methoden werden in ein bestehendes Schleusenmanagementsystem der WSV implementiert und unterstützen das Schleusenpersonal bei der Schleusenbelegung sowie die Schifffahrt durch ein frühzeitiges Mitteilen der Schleusungszeiten. Auf diese Weise lassen sich Ressourcen auf dem Weg zur Schleuse bzw. im Schleusenvorhafen, dem Wartebereich der Schleusen, einsparen. In dem mFUND-geförderten Projekt RUBIN (Reiseunterstützung für die Binnenschifffahrt) sollen Schiffsführer auf Basis von Strömungs- und Verkehrsprognosen ihre Transporte deutlich effizienter gestalten können. Dies gelingt analog zur intelligenten Schleusenzulaufsteuerung mithilfe möglichst präziser reiseunterstützender Informationen. Hierzu zählen Angaben zu den erwarteten Ankunftszeiten an Zwischen- und finalen Zielen, zum Verkehrsaufkommen und zu freien Liegestellen, aber auch detaillierte Angaben zu den prognostizierten Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten entlang der geplanten Route. Neben der zeitlichen Optimierung kann so auch die Ladung hinsichtlich der größtmöglichen Abladetiefe über Grund bzw. Durchfahrtshöhe unter Brücken maximiert werden. Aufgrund der hohen Tragfähigkeit von Binnenschiffen wird die Steigerung der Transportleistungseffizienz mit der Ladungsmenge meist durch die zur Verfügung stehende Wassertiefe begrenzt.

Unter der Annahme, dass diese unterstützenden Systeme ein „Slow Steaming“, also eine Reduzierung der Geschwindigkeit ohne größeren Zeitverlust für die gesamte Fahrt ermöglichen, stellt sich die Frage, wie viel Treibstoff sich einsparen ließe bzw. wie viel Treibhausgasemissionen entfallen könnten. Zur Beantwortung dieser Frage werden die Emissionen des Ist-Zustandes auf Basis der AIS-Daten mit denen von Szenarien verglichen. Für den Fall, dass ein Slow Steaming zu einer durchschnittlichen Reduzierung der Geschwindigkeit auf Kanälen um 2 km/h und auf Flüssen um 0,5 km/h führt, ergibt sich eine Reduzierung der Binnenschiffs-Gesamtemission an CO_2 um 11 % bzw. 107 Tt in einem Jahr. Betrachtet man die Verteilung über das Wasserstraßennetz, erkennt man, dass die absolute Einsparung auf dem Rhein mit durchschnittlich 228 kg/km täglich größer ist als auf Kanälen mit 66 kg/km täglich (Bild 5), die relative Einsparung jedoch mit 33 % auf Kanälen größer ist als auf dem Rhein (7,5 %). Für das Beispiel eines 2,50 m abgeladenen Europaschiffes auf dem Wesel-Datteln-Kanal bedeutet dies: Zur Vermeidung einer insgesamt 1,5 Stunden dauernden Wartezeit vor den Schleusen fährt das Schiff mit 8 km/h anstatt 10 km/h Reisegeschwindigkeit, wodurch sich 61 kg Treibstoff einsparen lassen und 195 kg CO_2-Emission vermieden werden. Dies entspricht einer Reduzierung um jeweils 36 %. Zusätzliche Einsparungen durch den Verbrauch während des Liegens bzw. Wartens vor der Schleuse oder für Stop-and-Go-Manöver bleiben hierbei unberücksichtigt. Bei den Slow-Steaming-Szenarios ist zu beachten, dass eine Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit nur bis zu einem für das Manövrieren erforderlichen Mindestwert möglich ist. Bei Binnenschiffen beträgt die Mindestgeschwindigkeit zum Manövrieren ca. 6 km/h, sodass genügend Propellerschub generiert wird, um die Ruder ausreichend anzuströmen und die Ruderwirkung aufrecht zu erhalten.

Das Slow-Steaming-Szenario verdeutlicht beispielhaft, dass sich mit betrieblichen Minderungsmaßnahmen der Ressourcenverbrauch und die Treibhausgasemission deutlich reduzieren lassen. Durch einen optimierten, aufeinander abgestimmten Betrieb der Schiffe und Wasserstraßen erfolgt dies sogar ohne Zeitverlust für den Transport.

Bild 5:
Einsparpotenzial für CO2-Emissionen auf Bundeswasserstraßen durch Slow Steaming



Digitalisierung und Künstliche Intelligenz

Planen, Bauen und Betreiben von Verkehrsinfrastruktur 4.0

Die Umwandlung von analogen Informationen und Prozessen in digitale Formate und Technologien hat durch die gestiegene Leistungsfähigkeit von Hard- und Software sowie deren Vernetzung enormes Potenzial gewonnen. Zusätzlich scheinen KI-Ansätze bisher ungeahnte Möglichkeiten zu eröffnen. Die BAW verfolgt die Entwicklungen sehr intensiv und bewertet sie im Hinblick auf den möglichen Nutzen für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Vielversprechende Ansätze werden validiert, adaptiert und für die Arbeit der BAW verwendet oder der WSV zur Unterstützung ihrer Aufgaben empfohlen.

Potenzial der Digitalisierung

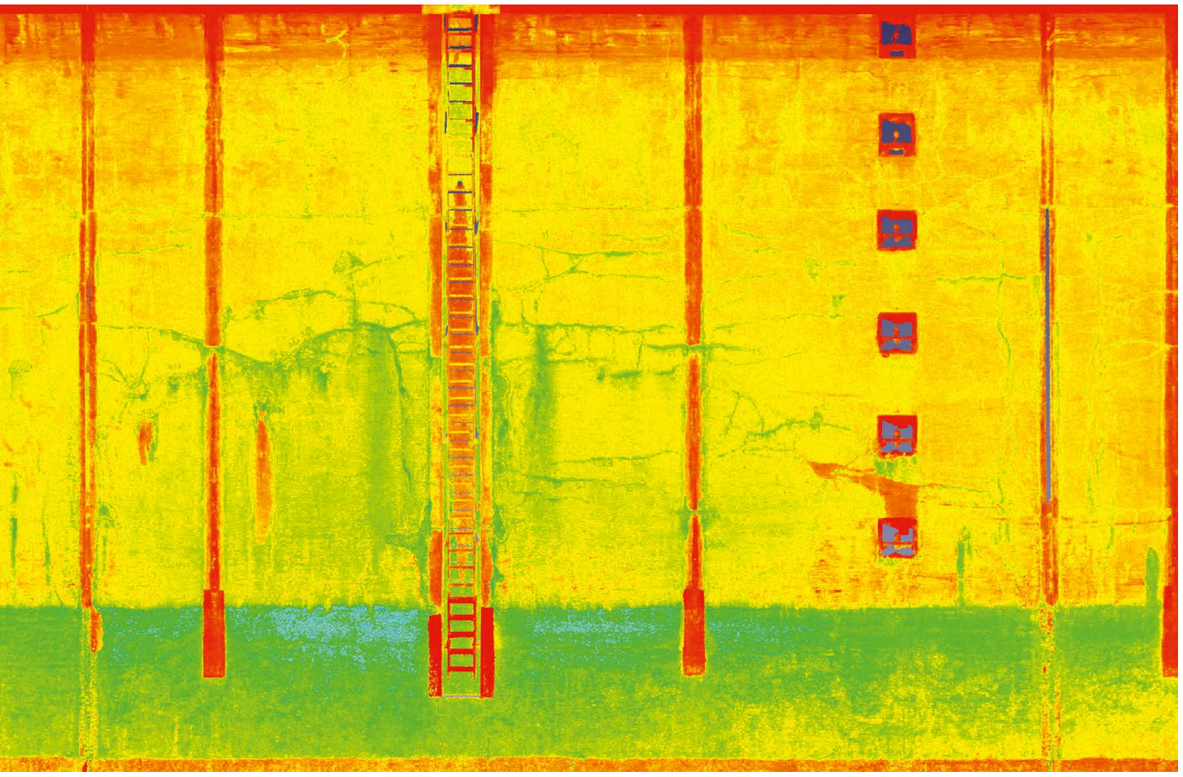
Ein großes Ziel der Digitalisierung im Kontext von Planen, Bauen und Betreiben der Wasserstraßeninfrastruktur ist die Bereitstellung von Informationen in hoher Qualität. Informationen, die aus den digital vorliegenden Daten gewonnen werden, sollten eine Relevanz für die spezifischen Aufgabenstellungen aufweisen, um die erforderlichen Aufwände für Vorhalten und Pflegen zu rechtfertigen. Um eine hohe Qualität zu gewährleisten, müssen die zugrunde liegenden Daten unter anderem korrekt, aktuell und vollständig sein. Die gestiegene Leistungsfähigkeit der Hardware, Software und Vernetzung über das Internet erlaubt es heute, Daten zentral vorzuhalten und zu pflegen (Korrektheit – single source of truth), wesentlich schneller allen Nutzenden zur Verfügung zu stellen (Aktualität) und alle relevanten Informationen zu erfassen (Vollständigkeit). Ein weiterer entscheidender Aspekt besteht darin, dass die Daten maschinenlesbar sein sollen. Dies gewährleistet ein reibungsloses Zusammenspiel der Daten und ermöglicht Maschinen/Computern, die Daten effektiv zu interpretieren und für automatisierte Prozesse zu nutzen.

Ein anderes Ziel der Digitalisierung ist die beschleunigte und qualitativ hochwertige, wiederholte Erledigung standardisierter, manuell aufwendiger Prozesse. Die Hürde liegt dabei häufig in der Standardisierung, da sie individuelle Aufgabenerledigungen einschränkt, dafür aber deutlich mehr Effizienz und definierte Qualität bietet.

Die BAW hat ihre Erkenntnisse im Jahr 2019 in Empfehlungen zur Erstellung eines Masterplans Digitalisierung für das Planen, Bauen und Betreiben der Wasserstraßeninfrastruktur formuliert. Diese Empfehlungen leiten sich von einer übergeordneten Vision ab, die im Wesentlichen durch effizientere Arbeitsabläufe und damit eine Beschleunigung und Verbesserung bei Planung, Bau und Betrieb beschrieben ist. Im Weiteren werden klare Ziele gesetzt, die sich in umsetzbaren Maßnahmen mit einem Zeithorizont von wenigen Jahren konkretisieren. Die WSV hat diese Empfehlungen in einen Masterplan Digitalisierung übernommen. Erste Maßnahmen sind bereits verwirklicht, andere befinden sich in der Umsetzungsphase. Bild 1 zeigt beispielhaft die mittels Laserscan ermittelte Punktwolke einer Schleusenkammerwand zwecks ihrer Vermessung und der Detektion von Schäden.

Der hohe Stellenwert, der Daten zukommt, hat die BAW dazu motiviert, im eigenen Hause das Projekt Datenmanagement zu initiieren. Im Fokus stehen dabei alle Daten,

Bild 1: Laserscan einer Kammerwand der 2. Schleuse Zeltingen



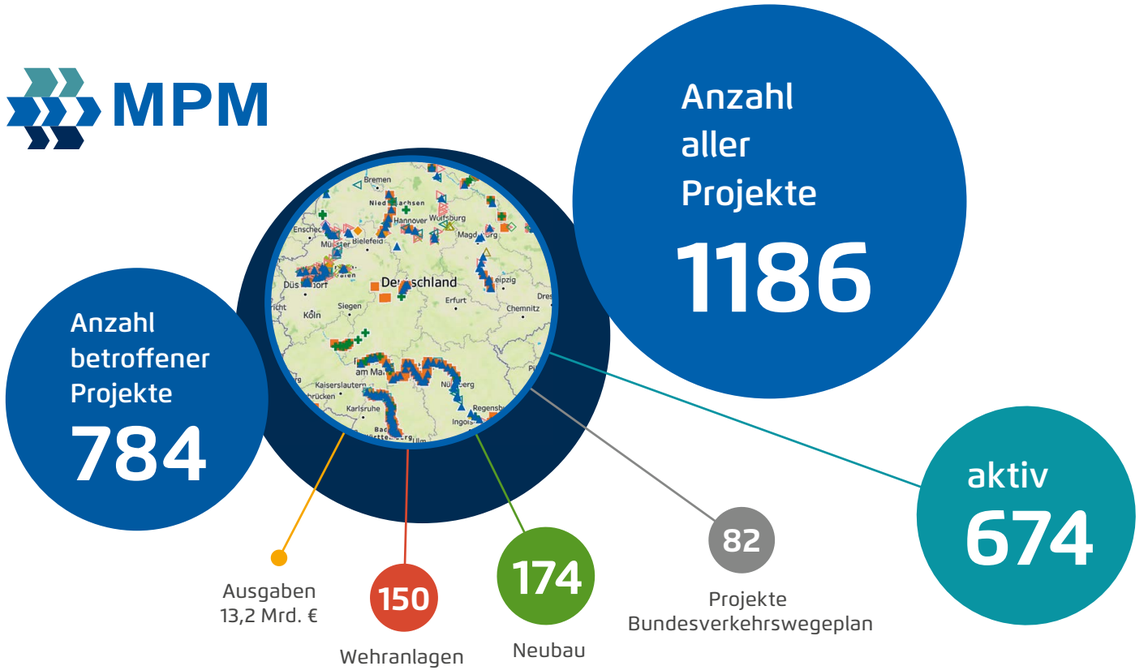


Bild 2: Schematische Darstellung des Dashboards MPM-WSV

die im Rahmen der Beratung der WSV und bei FuE-Projekten anfallen. So soll eine strukturierte Datenablage mit datenbeschreibenden, standardisierten Metadaten geschaffen werden, die eine langfristige Datenspeicherung und eine Wiederauffindbarkeit gewährleistet. Die Daten werden über ein Datenrepository zur Verfügung gestellt.

Im Folgenden werden Beispiele der Digitalisierung aus den verschiedenen Fachabteilungen der BAW vorgestellt.

Informationsbereitstellung für die WSV

Die WSV führt aktuell über 1.000 Bauprojekte durch, die eine übergeordnete Steuerung verlangen. Im Auftrag der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) hat die BAW gemeinsam mit der WSV ein Informationssystem Multiprojektmanagement (MPM) entwickelt, um steuerungsrelevante Informationen aktuell und vollständig darzustellen. Das Informationssystem ist seit dem 01.04.2023 im Einsatz. Fachliche Basis ist ein standardisiertes Multiprojektmanagement, das in den vergangenen Jahren in der WSV etabliert wurde. Dabei müssen MPM-relevante Projekte eindeutig identifiziert und mit entsprechenden Stammdaten versehen werden. Bei der Entwicklung wurde besonders viel Wert darauf gelegt, in anderen IT-Systemen vorhandene Daten zu nutzen und die Datenaktualisierung bei der verantwortlichen Projektleitung auf ein Minimum zu reduzieren. So werden z. B. Objektinformationen aus dem Objektkataster der WSV (WInD) und Zustandsinformationen aus der Software zur Dokumentation der Bauwerksinspektion (WSVPruf) automatisiert verwendet. Final ist eine IT-Anwendung mit zwei Komponenten entstanden: eine an die Belange der WSV angepasste Software-Anwendung zur Datenbündelung und -haltung inklusive einer Datenaktualisierung über quartalsmäßige Abfragen bei den Projekt- und Personalverantwortlichen sowie eine Plattform zur Präsentation der Informationen auf nutzerspezifischen Dashboards. Neben dem großen Nutzen der Informationsbereitstellung für die Steuerungsebene sehen die Projektverantwortlichen auf ihrer Seite einen signifikant reduzierten Aufwand zur Berichtspflicht, da neben der quartalsmäßigen Abfrage keine weiteren Abfragen erfolgen. Alle Informationen liegen im MPM-System bereits gebündelt vor und können zeit- sowie ortsunabhängig abgerufen werden (Bild 2).

Digitalisierung erfordert fachliche Standardisierung

Die BAW setzt sich in einschlägigen Arbeitskreisen auf Bundesebene – zum Teil auch unter der Leitung von BAW-Beschäftigten, wie im Arbeitskreis Digitalisierung in der Geotechnik – für das Zusammenwirken von ingenieurfachlicher Qualität und digitaler Transformation ein. Die Grundlage eines jeden Datenaustausches zwischen Datenbanken sowie der Nutzbarmachung von Daten (z. B. für statistische Auswertungen oder Daten-Verknüpfungen wie Mengen mit Zeiten oder Kosten) sind standardisierte Informationen. Standardisierte Informationen in Form einer gemeinsamen Sprache und verbindlicher Prozesse sind seit jeher die Grundlage für das Ingenieurwesen, niedergeschrieben in Vorschriften wie Normen und Richtlinien.

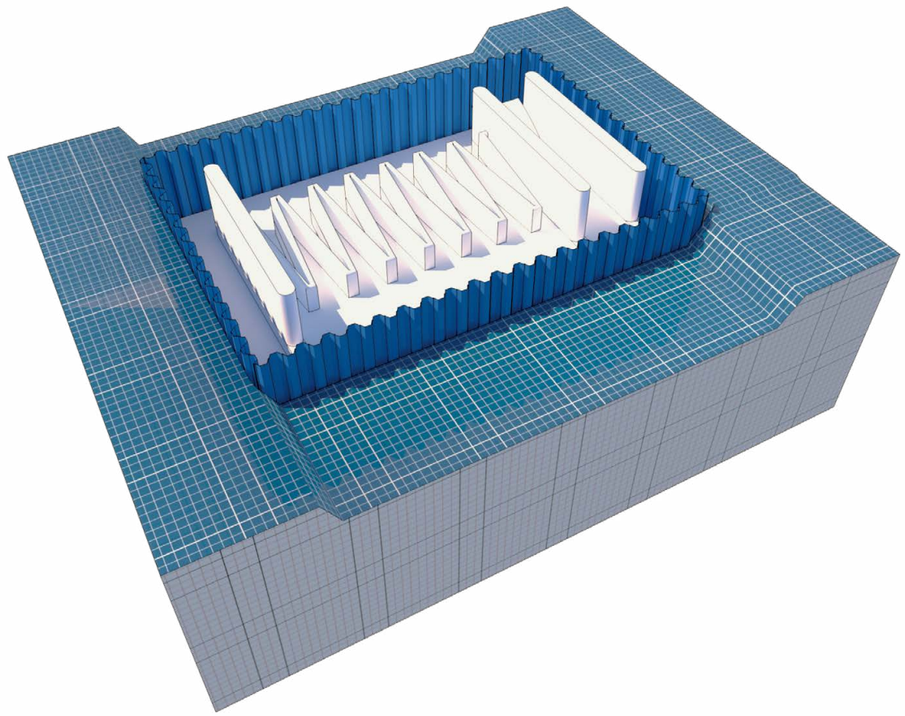


Bild 3: Parametrisch erzeugtes 3D-Modell des Labyrinth-Wehrs

Diese Vorschriften weisen eine oft hohe Komplexität auf und stellen den Stand der Technik dar, ausgearbeitet von ausgewiesenen und allgemein anerkannten Fachexperten, u. a. in Normenausschüssen. Die Transformation von analogen zu digitalen Prozessen muss diesen ingenieurwissenschaftlichen Stand der Technik zwingend in der vorhandenen Komplexität berücksichtigen. Mit der fundierten Wissensbasis, der Vernetzung und den Erfahrungen der BAW in ingenieurwissenschaftlichen, bautechnischen und datenbanktechnischen Methoden kann dabei in den Arbeitsausschüssen eine wichtige Querschnittsfunktion zur Standardisierung und Normung beim Planen, Bauen und Betreiben der Wasserstraßeninfrastruktur erfüllt werden.

Baugrunddatenbank GeoVal

Die BAW entwickelt die Software GeoVal (Geotechnical Values). GeoVal ist eine Open-Source-Plattform für geotechnische Daten, u. a. zur öffentlichen Datenbereitstellung mit Visualisierungs- und Eingabeinterface sowie offener Schnittstelle. Ziel der Entwicklung ist die Bereitstellung von geotechnischen und geologischen Daten für die Fachöffentlichkeit, für die Staatlichen Geologischen Dienste der Länder (Geologiedatengesetz) sowie zur Erfüllung des E-Government-Gesetzes und der Anforderungen des Digitale Planens und Bauens des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV).

GeoVal basiert auf GeoValML (Geotechnical Value Markup Language), einem Projekt, das durch die mFUND-Förderlinie und das BMDV-Expertennetzwerk unterstützt wird. GeoVal beinhaltet die georeferenzierte Datenhaltung für geotechnische Erkundungen und Versuche sowie Kennwerte und Messdaten aller Art und deren Veröffentlichung über eine standardisierte Schnittstelle. Zusätzliche Kernfunktionen von GeoVal sind die Erweiterbarkeit, die flexible Datenhaltung und Vokabulare für die Standardisierung und Interoperabilität. GeoVal visualisiert die Daten, bietet umfangreiche Download- und Recherchefunktionen und ermöglicht eine flexible Datenerfassung und -pflege.

GeoVal geht über die datenbankbasierte Speicherung und Weiterverarbeitung von Kennwerten hinaus, da durch standardisierte Schnittstellen und geotechnische Kenngrößen der Datenaustausch mit Softwareprodukten Dritter vereinfacht wird. Mit GeoVal steht also ein wesentlicher Baustein für die Digitalisierung der Geotechnik (z. B. als frei zugängliche Komponente für den Austausch 3D-georeferenzierter geotechnischer Daten im Rahmen von BIM-Projekten) und für das digitale Planen, Bauen und Betreiben zur Verfügung. Im Juni 2023 wurde mit der Umsetzung von GeoVal zu einem marktreifen Produkt begonnen, die Fertigstellung ist für Ende 2025 geplant.

Standardisierung – FuE-Projekt ENGINEER

Die BAW führt zusammen mit den Projektpartnern CADCOM und Arcadis in Kooperation mit dem WNA Magdeburg seit Dezember 2021 bis November 2024 ein FuE-Projekt zur Digitalisierung des Planungsprozesses von Labyrinth-Wehranlagen durch. An dem Projekt sind die Abteilungen Wasserbau im Binnenbereich, Geotechnik und Bautechnik beteiligt, es wird durch die Innovationsinitiative mFUND des BMDV gefördert.

„Ein großes Ziel der Digitalisierung im Kontext von Planen, Bauen und Betreiben der Wasserstraßeninfrastruktur ist die Bereitstellung von Informationen in hoher Qualität."

Der Planungsprozess beginnt mit der Eingabe der hydrologischen Randbedingungen und führt über eine automatisierte hydraulische Berechnung vorgeschlagener Labyrinth-Wehr-Gestaltungen zur Konstruktion eines parametrisierten Modells in der CAD-Software (Bild 3). Aus diesem standardisierten Modell werden Informationen für eine Kostenberechnung, für die Ausschreibung sowie für Pläne, die im Rahmen der Entwurfs-Haushaltsunterlage (E-HU) und Entwurfs-Ausführungsunterlage (E-AU) erforderlich sind, exportiert. Bereits jetzt zeigt sich bei diesem Projekt, dass bei einer Standardisierung des Prozessablaufs von Input über Konstruktion bis hin zu den erforderlichen Plänen ein sehr hoher Grad an Digitalisierung und damit Automatisierung des Planungsprozesses erreicht werden kann. Im Hinblick auf eine Beschleunigung des Planungsprozesses birgt dieser Ansatz auch für andere Bauwerke ein großes Potenzial.

Informationsbereitstellung und Standardisierung beim Bau von Fischauf- und Fischabstiegsanlagen

Im Rahmen des Projektes „Digitalisierung von Planungsprozessen für Wasserbauwerke" wurde 2023 die Bereitstellung von Informationen und die Standardisierung von Berichten vorangetrieben. In einem ersten Schritt wird für die Planung von Fischauf- und Fischabstiegsanlagen ein webbasierter Planungsnavigator aufgesetzt. Der Planungsnavigator „Ökologische Durchgängigkeit an Bundeswasserstraßen" (PlaN ÖD) stellt Informationen zur Planungstiefe, mit der Genehmigungsbehörde abgestimmte Textbausteine und Beispieltexte für Erläuterungsberichte zur Verfügung.

Ein wichtiges Element der Standardisierung ist zudem die Entwicklung von Bemessungsstandards für den Bau von Fischauf- und Fischabstiegsanlagen. Neben den anerkannten Empfehlungen der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. gilt es, fachliche Standards zu entwickeln, wie sie insbesondere für die Verhältnisse an Bundeswasserstraßen fehlen. Dies geschieht im Rahmen von FuE-Projekten in Kooperation mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde für verschiedene Fragestellungen. Entwickelte Standards, wie beispielsweise für die Bemessung der Leitströmung oder zur Dimensionierung eines Dotationsmischers, werden im Infozentrum Wasserbau veröffentlicht und den Planenden gemeinsam mit weiteren Begleitdokumenten direkt über den PlaN ÖD zur Verfügung gestellt. Perspektivisch kann die Anbindung an weitere Datenmanagementsysteme der WSV die planende Person beim Auffinden und Verwenden von bereits vorliegenden Daten unterstützen.

Künstliche Intelligenz – ein Game-Changer?

Die Integration künstlicher Intelligenz (KI) in die Planung, den Bau und den Betrieb von Wasserstraßeninfrastruktur birgt enormes Potenzial. KI ermöglicht effizientere Planung, präziseren Bau und optimierten Betrieb. Von der Vorhersage von Umweltauswirkungen bis zur autonom gesteuerten Navigation trägt KI dazu bei, Wasserstraßen nachhaltiger, sicherer und effektiver zu gestalten.
Die Herausforderung besteht darin, diese Technologie verantwortungsbewusst einzusetzen, um die Vorteile maximal zu nutzen und ethische Aspekte zu berücksichtigen (https://chat.openai.com).

Dieser einleitende Text wurde mit ChatGPT formuliert, das Synonym für die teils disruptiven Entwicklungsschritte, die KI in den letzten Jahren vollzogen hat und auch weiterhin vollziehen wird. Die BAW sieht auch hier ihre Aufgabe darin, diese Entwicklungen zu beobachten, ihr Potenzial zu bewerten und bei Eignung an die spezifischen Belange von WSV und BAW anzupassen.

Das Feld der KI ist sehr groß, der Begriff nicht scharf definiert. Die ersten Entwicklungen führen auf die 1960er Jahre zurück und umfassen logikbasierte Systeme. Im Rahmen der symbolischen KI wird bis heute versucht, menschliches, semantisches Wissen durch Symbole und Regeln zu modellieren und damit für Computer-Algorithmen nutzbar zu machen (Beispiel Optimierung des Baubestandswerks). Subsymbolische KI verwendet stattdessen Verfahren des maschinellen Lernens wie neuronale Netzwerke, um Muster und Zusammenhänge in Daten zu erkennen. Künstliche neuronale Netze helfen, aus vorgegebenen Daten durch statistische Analysen unter Zuhilfenahme von Maschinenlernalgorithmen Erkenntnisse abzuleiten (Beispiel Einsatz von Maschinenlernalgorithmen).
Im Gegensatz zur symbolischen KI fehlen hier jedoch die physikalisch begründeten Zusammenhänge. Daher spielen Transparenz und Nachvollziehbarkeit eine große Rolle, woraus sich der Zweig der erklärbaren künstlichen Intelligenz (Explainable Artificial Intelligence (XAI)) entwickelt hat.

Optimierung des Baubestandswerks mittels KI

Im Rahmen von Neubaumaßnahmen entstehen umfangreiche Bestandsunterlagen, die mehrere tausend technische Unterlagen umfassen können. Zur Wiederauffindbarkeit der technischen Unterlagen müssen diese mit Metadaten versehen (Bild 4) und in das Baubestandswerk der WSV (DVtU) überführt werden. Die Software Plusmeta ist in der Lage, auf Basis symbolischer KI Metadaten automatisiert zu vergeben. Die Vergabe erfolgt dabei regelbasiert unter Verwendung von Indikatoren, auf Basis logischer Abhängigkeiten sowie über Extraktoren, die relevante Zeichenketten wiedererkennen. Im Rahmen eines Proof of Concept und einer anschließenden Pilotstudie wurden in Zusammenarbeit mit dem WSA Mosel-Saar-Lahn in 2023 deutlich über 1.000 technische Unterlagen zum Neubau der zweiten Schleuse Zeltingen automatisiert mit Metadaten versehen und in die DVtU importiert. Der Prozess wird mit dieser Vorgehensweise erheblich beschleunigt. Die Qualität der Metadaten hat sich durch die Stringenz der Metadaten-Vergabe signifikant verbessert.

Einsatz von Maschinenlernalgorithmen für die Approximation hydrologischer Messungen im Küstenbereich

Die von der Gewässerkunde der WSV erhobenen hydrologischen Messungen sind eine wichtige Grundlage für die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt sowie die Beschreibung der Natursysteme. Insbesondere im hochdynamischen und weitläufigen Küstenbereich ist eine Sicherstellung der Datenqualität und Kontinuität eine Herausforderung. Hier kann der Einsatz von KI unterstützen. Im KI-Teilgebiet des Maschinellen Lernens existiert eine Vielzahl von Vorgehensweisen, Anwendungen, Methoden und Algorithmen. Je nach Art des gewählten ML-Ansatzes können verwendete Rechenmodelle beispielsweise Muster erkennen, Daten klassifizieren oder (zukünftige) Ereignisse approximieren. Clusterverfahren zur Mustererkennung können helfen, die Datenqualität zu erhöhen, indem zum Beispiel Ausreißer in Messdaten gefunden und automatisiert als fehlerhaft markiert werden. Darüber hinaus können datenorientierte ML-Verfahren helfen, Lücken in Messzeitreihen zu schließen oder den weiteren Verlauf zu approximieren. Dazu werden in der BAW bereits künstliche neuronale Netze (KNN) genutzt, die in der Lage sind, Beobachtungsdaten mit hoher Genauigkeit wiederzugeben.

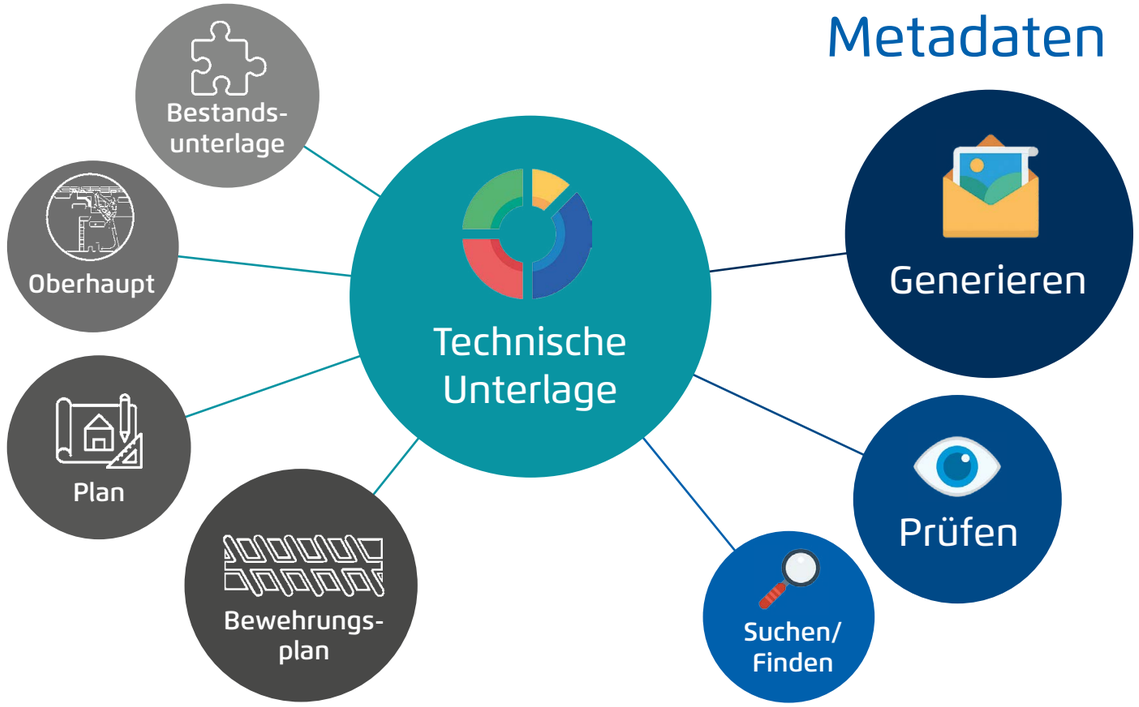
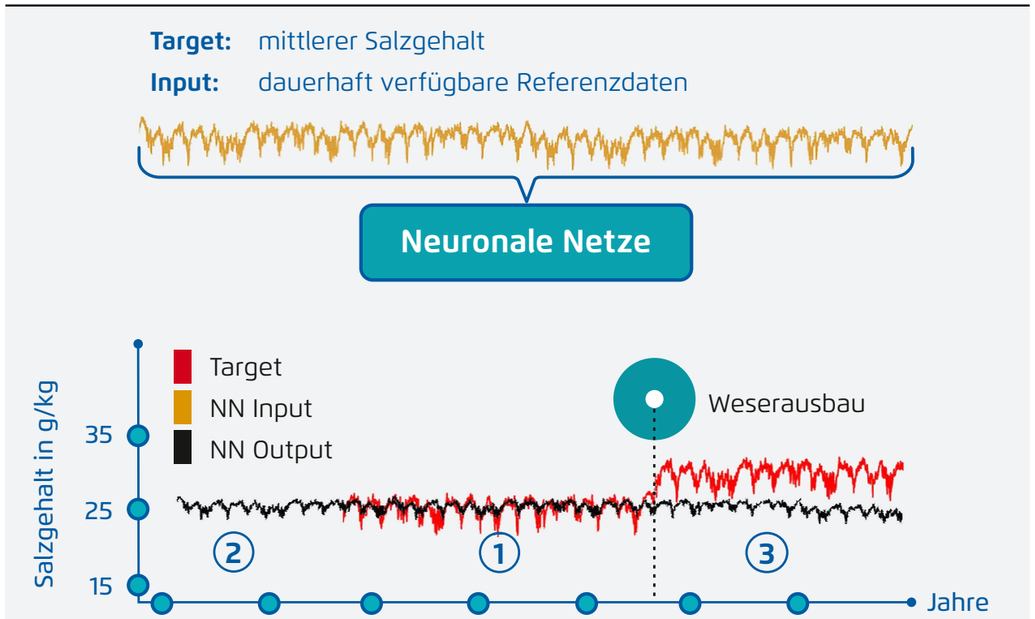
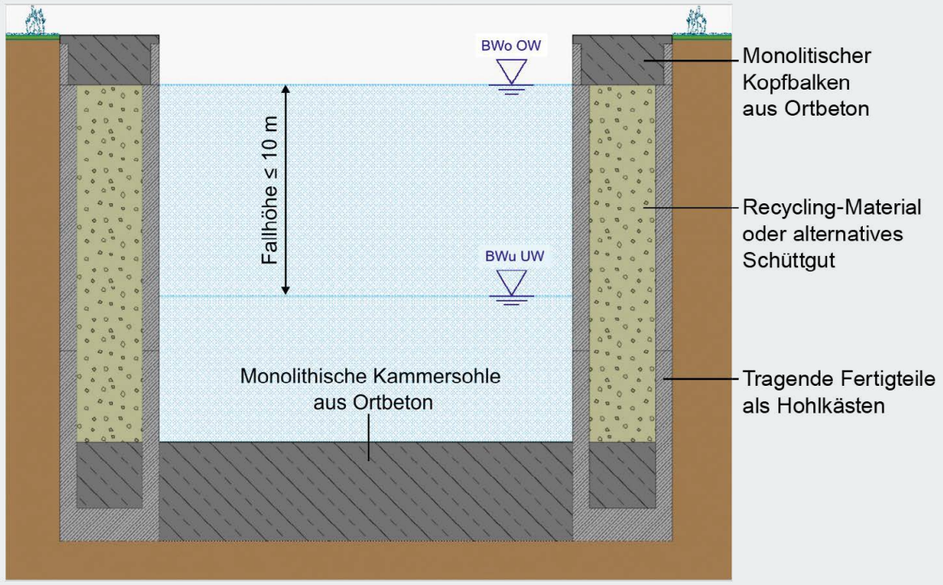


Bild 4: Schematische Darstellung der Metadatenvergabe für technische Unterlagen

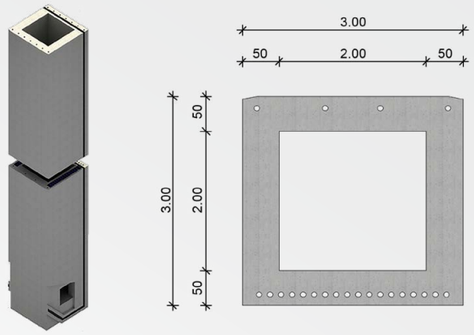
Bild 5:
Anwendungsfälle für künstliche neuronale Netze (KNN) am Beispiel einer Messzeitreihe: (1) Datenqualität sichern und Geräteausfälle überbrücken, (2) historische Zustände rekonstruieren oder (3) zukünftige Zustände approximieren



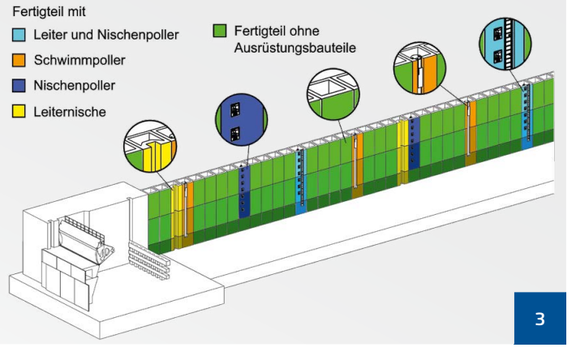
Wenn zum Beispiel Daten aus einer zeitlich begrenzten Messkampagne im Training von KNNs eingesetzt werden, so lässt sich die Messkampagne virtuell verlängern – solange sich die äußeren Verhältnisse nicht maßgeblich ändern. Gleiches gilt für den Betrieb von Messstationen. Hier können KNN-Verfahren unterstützen, Datenlücken bei Messgeräteausfall zu schließen oder bei nachträglich installierten Messsonden vorangegangene Werte abzuschätzen. Bild 5 zeigt das Ergebnis eines entsprechenden Anwendungsfalls. Eine solche KNN-Anwendung wurde genutzt, um fehlende Salzgehaltsmessungen aus der Vergangenheit zu rekonstruieren. Das KNN-Verfahren zeigt inzwischen sogar so verlässliche Ergebnisse, dass es in formalen Verfahren zur Beweissicherung eingesetzt wird. Dazu werden KNN-Regressionsverfahren mit vor einer Fahrrinnenanpassung erfassten Daten trainiert und daran anschließend mit ungesehenen Daten vor und nach der Fahrrinnenanpassung getestet. Die Abweichung beider Tests erlaubt, die vorhabenbedingten Änderungen zu bestimmen. Da die Beweissicherung ein juristisch angeordnetes Verfahren ist, sind Transparenz und Nachvollziehbarkeit bei dem eingesetzten KNN-Verfahren elementar. Dass Maschinenlernverfahren und insbesondere neuronale Netze teilweise als „Black Box“ bezeichnet werden, erschwert diese Voraussetzung. Hier spielt der BAW die XAI-Bewegung in die Hände, die bestrebt ist, künstliche Intelligenz erklärbar zu machen. So gibt es eine große Bandbreite an wissenschaftlicher Literatur und XAI-Maschinenlernalgorithmen. Beispielsweise hilft eine vorangestellte Informationsanalyse („feature importance analysis“ bzw. „feature selection“), KNN-Eingangsdaten besser auszuwählen und Zusammenhänge herauszuarbeiten. Zudem erhält man mit dem Ausnutzen des KNN-Optimierungspotenzials entscheidende Einblicke in die Struktur und Reaktion der Algorithmen.



1



2



3

Fertigteile im Verkehrswasserbau: Schnell, qualitätsgesichert und nachhaltig Bauen

Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) steht aufgrund gealterter sowie geschädigter Bauwerke vor der Herausforderung, zukünftig Ersatzbaumaßnahmen durchführen zu müssen. Die Fertigteilbauweise eröffnet unter anderem Chancen zur zeitlichen Optimierung der Bauwerksherstellung gegenüber der bisher weitgehend monolithischen Ortbetonbauweise. Im Jahr 2020 wurde im Rahmen des Expertennetzwerks des Bundesministeriums für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI), seit 2021 Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV), ein Forschungs- und Entwicklungsprojekt (FuE) mit dem Thema „Einsatz von Fertigteilen im massiven Verkehrswasserbau“ in der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) initiiert, um diese Chancen zu erschließen. Ziel der Forschung ist es, eine gegenüber der Ortbetonbauweise schnellere, qualitätsgesichertere, gleichzeitig ressourcenschonendere und damit nachhaltigere Bauweise für die angestrebte Nutzungsdauer von 100 Jahren aufzuzeigen. Zur Optimierung der bewährten Bauweise einer Schleuse als Stahlbetonhalbrahmen wird eine Tragstruktur unter Einsatz von Fertigteilen entwickelt und detailliert ausgearbeitet.

Der Leitgedanke des Projekts ist, mit industriell hergestellten Elementen und weniger Fachpersonal größer, zukunftsfähiger und schneller zu bauen. Durch den Einsatz der Fertigteilbauweise, wie sie zum Beispiel im Hoch- und Brückenbau etabliert ist, kann das Planen und Bauen insgesamt optimiert werden. Für die Erstellung von Schleusenbauwerken könnten hieraus im Vergleich zu konventionellen Bauweisen ein Produktivitätszuwachs, ein Qualitätszuwachs sowie Möglichkeiten für eine nachhaltigere Bauweise resultieren. Im BMDV-Expertennetzwerk ist das Forschungsprojekt im Themenfeld „Zuverlässige Verkehrsinfrastruktur“ angesiedelt und wird in Kooperation mit dem Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU) sowie der Professur für Konstruktionswerkstoffe und Bauwerkserhaltung der Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg (HSU/UniBw H) durchgeführt. Im Forschungsprojekt ist vorgesehen, die Fertigteilbauweise zunächst am Beispiel einer Schleuse zu etablieren und hieraus einen Leitfaden zum Einsatz von Fertigteilen im massiven Verkehrswasserbau zu entwickeln und herauszugeben. Dieser soll sich an Auftraggeber, Planende, Bauausführende, Betreibende sowie Fertigteilwerke (FT-Werke) richten und konkrete Empfehlungen für das Planen und Bauen geben. Dies sind insbesondere die Möglichkeiten zur Beschleunigung der Planung und Umsetzung der Baumaßnahmen sowie die Qualitätssteigerung. Neben der Erarbeitung des Leitfadens sollen die Ergebnisse aus Theorie und Praxis in einer Pilotanwendung erprobt, validiert und mit der Ortbetonbauweise in Relation gesetzt werden.

Die entwickelte Tragkonstruktion der Schleuse bildet einen Stahlbetonhalbrahmen. Wie Bild 1 zu entnehmen ist, besteht dieser Rahmen aus einer Sohle und Kammerwänden, gefertigt aus vorgefertigten rechteckigen Hohlkastenelementen, sowie einem Kopfbalken. Im unteren Bereich binden die Fertigteile biegesteif in die monolithische Ortbetonsohle der Kammer ein. Im oberen Bereich der Kammerwand sind sie an den monolithischen Kopfbalken aus Ortbeton biegesteif angeschlossen. Untereinander sind die Hohlkästen vertikal mittels übergreifender Bewehrung kraftschlüssig verbunden. Die horizontale Fuge wird schubkraftübertragend ausgeführt. Für eine standardisierte Bemessung der Hohlkästen wird seitens der RPTU ein Bemessungswerkzeug entwickelt, das alle erforderlichen statischen Nachweise nach Eurocode 2 und DIN 19702 durchführt. Offene Fragestellungen bezüglich der Bemessung und Konstruktion werden mithilfe von Laborversuchen beantwortet. Die Wahl der in Bild 2 dargestellten Fertigteilgeometrie ermöglicht einen differenzierten und somit effizienteren Materialeinsatz durch die gezielte Verwendung leistungsfähiger Betonzusammensetzungen in dauerhaftigkeitsexponierten Bereichen. Das Hohlraumvolumen des Elements ist hingegen weitestgehend unbeansprucht, wodurch für einen bedeutenden Anteil des Fertigteilvolumens der Einsatz von Baustoffen mit reduzierten technischen Anforderungen möglich ist und der Einsatz von Recyclingmaterialien angestrebt wird. Diese Art der zonierten Bauweise fördert ressourcenschonendes Bauen, besonders im Fall der Nutzung von Sekundärbaustoffen als Füllmaterial.

Die spätere Verlagerung einer Vielzahl von Fertigungsschritten von der Baustelle in ein FT-Werk ermöglicht die Reduktion bauzeitlicher Prozesse vor Ort sowie die Reduktion baulicher Emissionen in ökologisch sensible Bereiche im Umfeld der Baumaßnahme. Hierfür ist es zielführend, tragende Fertigteile mit bereits werkseitig integrierter Tragbewehrung und bereits montierten Ausrüstungsbauteilen zu verwenden. Wesentliche Bewehrungs- und Betonagearbeiten können somit auf der Baustelle entfallen. Unter Berücksichtigung der gemäß DIN 19703 erforderlichen Ausrüstung für Schleusen ergeben sich damit, wie in Bild 3 dargestellt, fünf verschiedene Fertigteiltypen. Gleichzeitig begünstigt ein FT-Werk durch kontrollierte Produktionsbedingungen und eingesetzte Baustoffe eine zielgenaue und damit qualitätssteigernde Herstellung der Fertigteile. Inwiefern die Fertigteilbauweise im Vergleich zur konventionellen Ortbetonbauweise ein Potenzial zur Verminderung grauer Emissionen aufweist und damit zum klimaschonenderen Bauen beiträgt, wird in einem weiteren Schritt über ökobilanzielle Betrachtungen ermittelt. Es erwachsen aus der gewählten Konstruktionsmethode und der Größe der Fertigteile jedoch neue Herausforderungen: Zum einen ergibt sich aus der Bauweise mit Fertigteilen das Erfordernis einer abdichtenden Fugenausbildung zwischen den Elementen, die erarbeitet und anhand verschiedener Kriterien bewertet wird. Zum anderen bedingt das Gewicht von bis zu 100 Tonnen je Fertigteil ein Konzept für die Baustellenlogistik und Montage. Um einen großen Anwendungsbereich im Bereich der WSV sicherzustellen, war für die Entwicklung dieser Schleusenkammerwände als maßgebliche Randbedingung die von der WSV entwickelte Standardschleuse mit einer maximalen Fallhöhe von 10 m abzudecken. Damit wären über 90 % der Schleusen der WSV an den Bundeswasserstraßen mit der Fertigteilbauweise abgedeckt (Lühr et al. 2023).

Neben konstruktiven und herstellungstechnischen Fragestellungen wird im Weiteren ein zukunftsorientiertes Konzept zur automatisierten Bauprozessüberwachung und zur Optimierung des Lebenszyklusmanagements (LZM) massiver Verkehrswasserbauwerke in Fertigteilbauweise unter Anwendung des Building Information Modeling (BIM) am Beispiel der Schleusenkammerwand ausgearbeitet. Dies kann zu einem optimierten LZM beitragen, indem alle gesammelten Daten im Sinne des BIM zentral für ein Bauwerk abgelegt werden. Die Erfassung und Speicherung von Informationen über das Bauwerk erleichtert nach der Nutzungsdauer die effiziente Ressourcenplanung für die Weiterverwendung von Bauteilen und -stoffen, ohne zusätzliche aufwändige Untersuchungen.

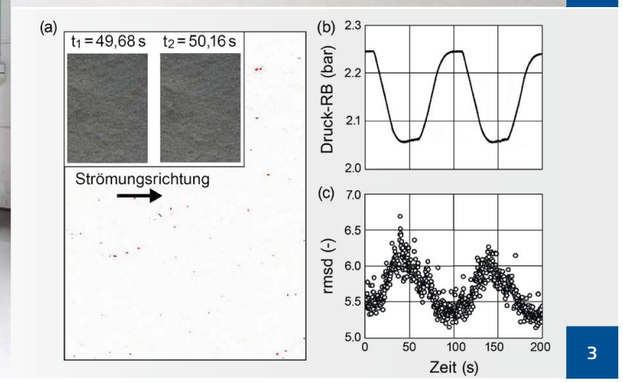
1: Querschnitt einer Schleusenkammer als Stahlbetonhalbrahmen mit Einsatz von tragenden Fertigteilen in Form von Hohlkästen
2: Links: Isometrie des unteren und oberen Fertigteilelements; rechts: Draufsicht bemaßter Tragquerschnitt
3: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Fertigteiltypen einer Schleuse mit Ausrüstungsbauteilen nach DIN 19703 (Kopfbalken ausgeblendet)

Literatur:

Lühr, S.; Stephan, C.; Kunz, C. (2023): Einführung in das Thema „Fertigteile im Verkehrswasserbau“. In: BAW-Kolloquium „Instandsetzung und Neubau von Verkehrswasserbauwerken“ 22./23.11.2023, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

1

2



3

1: Gewässerbettsimulator der BAW (GeSi)
2: Wechseldurchströmungsanlage mit Steuerungseinheit
3: Experimentelle Ergebnisse:
(a) Bilddifferenzen (rot markiert) zweier Einzelbilder,
(b) Druckrandbedingung im Versuch und
(c) Sedimentmobilität (rmsd-Wert)

Wellen-induzierte Porenströmungen im Gewässerbett und ihre Auswirkungen auf Erosionsprozesse

Dieses Forschungsvorhaben befasst sich mit der Frage der Stabilität eines sandigen Gewässerbetts an Binnenwasserstraßen. Ihm kommt eine zentrale Bedeutung für die Zuverlässigkeit der Wasserstraßen zu. Am Gewässerbett treten hydraulische Belastungen wie natürliche Strömungen und schiffsinduzierte Wellen auf, durch die es zum Abrutschen der Uferböschungen oder zu Erosion kommen kann; das Gewässerbett erfährt Form- und Lageänderungen. Für die sichere und leichte Navigation auf den Wasserstraßen ist eine ausreichend tiefe, breite und stabile Fahrrinne erforderlich. Das Gewässerbett wird daher in der Regel durch unterschiedliche technische Maßnahmen stabilisiert. Meist werden die Uferböschungen mit Deckwerken aus Wasserbausteinen gegen Abrutschen und Erosion gesichert. Die Ausführung der Deckwerke basiert auf den von der Bundesanstalt für Wasserbau entwickelten Bemessungsgrundlagen (GBB 2010). Das Bewusstsein, dass schiffbare Flüsse und Kanäle außer ihrer Funktion als Verkehrsträger auch eine wichtige ökologische Funktion innehaben, weitet sich aus. Daraus resultieren wachsende und interdisziplinär ausgerichtete Anforderungen an den Betrieb der Wasserstraßen aus ökologischer, wasserwirtschaftlicher und verkehrlicher Sicht. Im Rahmen dieser Entwicklung eröffnen sich neue Fragestellungen und ein vertieftes Verständnis der Bodenprozesse ist Bedingung für eine den Anforderungen angemessene Entwicklung von neuen oder optimierten Lösungen für die Sicherung des Gewässerbetts von schiffbaren Flüssen und Kanälen bei gleichzeitiger Erhaltung oder Verbesserung der ökologischen Funktion. Das Forschungsprojekt zielt daher auf eine umfassende Beschreibung und Quantifizierung der auftretenden physikalischen Prozesse des gesicherten und freiliegenden Gewässerbetts ab, um so eine Wissens- und Datenbasis für weitere Entwicklungen zu schaffen.

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.

Die Bearbeitung des FuE-Projekts beinhaltete zu großen Teilen die Entwicklung des Gewässerbett-Simulators (Bild 1), einer geotechnisch-hydraulischen Versuchseinrichtung, die 2018 fertiggestellt wurde. Das Ziel bestand darin, eine Versuchseinrichtung zu entwickeln, die es erlaubt, sowohl die Bodenprozesse, die durch Wellen im Naturmaßstab im Gewässerbett induziert werden, an einer ausreichend großen und tiefen Probe abzubilden, als auch ein den Randbedingungen angepasstes Strömungsfeld in der Anströmung auf die Bodenprobe zu haben.

Der Gewässerbett-Simulator ist ein geschlossener und druckdichter Strömungskreislauf, der über Pumpen betrieben wird. Der Untersuchungsbereich der Versuchsanlage bildet mit der Bodenprobe einen Teil einer Gewässersohle ab. Die Probenoberfläche schließt bündig mit dem Boden der Anströmungsstrecke ab und stellt die Erosionsfläche im rechteckigen Strömungsquerschnitt dar. Der gesamte Strömungskreislauf und damit die Probenoberfläche kann durch Anschluss der Wechseldurchströmungsanlage (Bild 2) mit Wasserdrücken beaufschlagt werden, die dynamisch, z. B. in Form von Druckschwankungen zur Simulation von Wellenbelastungen im Naturmaßstab, geregelt werden. Die Wechseldurchströmungsanlage ist ein geschlossenes Drucksystem, bei dem über zwei Ausdehnungsgefäße absolute Wasserdrücke z. B. auf die im Bild dargestellte Bodensäule aufgebracht werden.

Messtechnisch ist der Gewässerbett-Simulator mit Absolut- und Differenzdrucksensoren ausgestattet. So werden die Porenwasserdrücke und -überdrücke in der Bodenprobe in unterschiedlichen Tiefen sehr genau erfasst. Damit können hydraulische Gradienten, Strömungskräfte und Bodenverflüssigungsprozesse abgeleitet werden. Durchflussmessungen der Hauptströmung im Kreislauf und der Bodenströmungen ergänzen die Druckmessungen. Zur Untersuchung der Bodenverschiebungen im oberflächennahen Bereich der Probe und der Bewegungsintensität der Sedimentoberfläche kommen photogrammetrische Verfahren zur Anwendung.

Bei gleichzeitiger Überströmung und Wellenbelastung der Bodenprobe zeigen erste Versuchsergebnisse (Bild 3), dass bei konstanter mittlerer Strömungsgeschwindigkeit während einer durch die Wellenbelastung ausgelösten aufwärts gerichteten Porenströmung im oberflächennahen Bodenbereich eine Verstärkung der Sedimentbewegung beim Durchlaufen des Wellentals auftritt.
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 3a zeigt die Bildänderungen in rot markiert. Eine Erhöhung des rmsd-Wertes stellt eine qualitative Erhöhung der Erosionsrate oder der Sedimentmobilität dar (Bild 3c). Zusätzlich lassen sich durch die Druckmessungen im Strömungskanal und in der Bodenprobe die Abhängigkeit der Bodenreaktionen von Überströmung und von den Wasserdruckänderungen erfassen. Eine detaillierte Darstellung bisheriger Ergebnisse ist in Ewers (2020) und Ewers et al. (2023) zu finden.

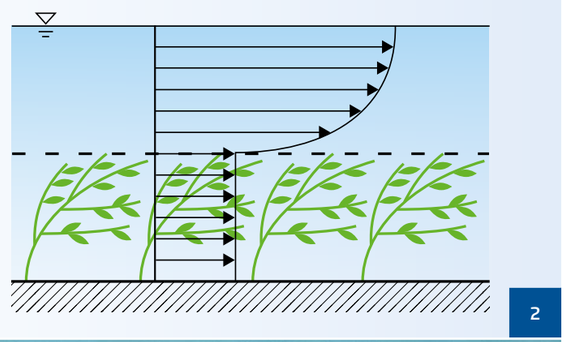
Literatur:

GBB (2010): BAW-Merkblatt Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen, Ausgabe 2010.

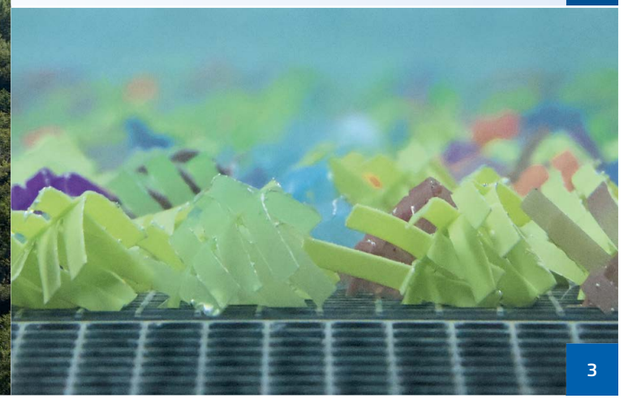
Ewers, Jeanne (2020): Incipient motion of sand under combined flow and full-scale waves. In: Wim Uijttewaal, Mário J. Franca, Daniel Valero, Victor Chavarrias, Clàudia Ylla Arbós, Ralph Schielen und Alessandra Crosato (Hg.): River Flow 2020. Proceedings of the 10th Conference on Fluvial Hydraulics (Delft, Netherlands, 7-10 July 2020), Bd. 10: CRC Press.

Ewers, Jeanne; Grabe, Jürgen; Stelzer, Oliver (2023): Experimental study on wave-induced soil mechanical processes influencing bed load transport of fine sand. 11th Conference on Scour & Erosion (Copenhagen, Denmark, 17–21 September 2023). Accessible in the ISSMGE online library: www.issmge.org/publications.

1



2



3

1: Durchströmte und überströmte Vegetation auf dem Vorland des Oberrheins bei Leimersheim während des Rheinhochwassers 2021
2: Vereinfachtes vertikales Geschwindigkeitsprofil im Fall überströmter flexibler Vegetation
3: Laborversuch zur Untersuchung des hydraulischen Verhaltens von Vorlandvegetation mit speziell entwickelten flexiblen Vegetationselementen aus Silikon

Abbildung der Rauheitswirkung von Vorlandvegetation bei der hydro-numerischen Modellierung

Naturnahe Ufer und Vorländer zeichnen sich durch eine artenreiche Vegetation aus und bieten zahlreichen Pflanzen- und Tierarten wertvolle Lebensräume. Ihre Erhaltung und Entwicklung ist für das Ökosystem von zentraler Bedeutung, auch im Hinblick auf die Erreichung der Ziele der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie an den Bundeswasserstraßen. Die Vegetation beeinflusst jedoch auch das Strömungsfeld, teilweise sogar erheblich, und kann bei Hochwasser zu erhöhten Wasserständen führen (Bild 1). Um naturnahe Lösungen effektiv planen und umsetzen zu können, bedarf es zuverlässiger Werkzeuge, mit denen der Einfluss der Ufer- und Vorlandvegetation auf die Hydraulik abgeschätzt werden kann.

Die Bewertung vegetationsinduzierter Auswirkungen auf das Strömungsfeld stellt eine große Herausforderung dar, zumal derzeit noch eine deutliche Diskrepanz zwischen wissenschaftlichen Erkenntnissen und praktischer Anwendung besteht. Die Modellierung von Vegetation erfolgt meist mittels traditioneller Rauheitsparameter wie den Strickler- oder Manning-Werten. Dabei handelt es sich um rein empirische Parameter, die grundlegende physikalische Mechanismen des hydraulischen Widerstandsverhaltens von Vegetation nicht direkt abbilden können. Demgegenüber stehen speziell entwickelte Vegetationsmodelle, die Effekte wie die Durch- und Überströmung sowie die pflanzenmorphologischen Eigenschaften der Vegetation berücksichtigen. Allerdings sind weiterhin viele Fragen ungeklärt. Für die Anwendung mangelt es insbesondere an Methoden, die das gesamte Spektrum von der Erfassung der Vegetationsparameter bis zu einer validen und praxistauglichen Abbildung natürlicher Vegetation in der numerischen Modellierung abdecken. In vielen Berechnungsverfahren stehen Vegetationsmodelle nicht oder nur eingeschränkt zur Verfügung. Leitlinien zur Auswahl geeigneter Modelle und Strategien für den Umgang mit heterogenen Vegetationsbeständen sind noch in der Entwicklung. Auch die Sensitivitäten und Unsicherheiten von Eingangsparametern müssen weiter untersucht werden.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die aus der Wissenschaft gewonnenen Erkenntnisse im Bereich der Vegetationsmodellierung gezielt in die praxisrelevante ingenieurtechnische Anwendung zu integrieren. Dabei wird nicht nur angestrebt, die vorhandenen Modelle zu optimieren und zu verfeinern, sondern auch bestehende Forschungslücken zu identifizieren und zu schließen. Um eine gesamtheitliche Betrachtung zu gewährleisten und ein umfassendes Verständnis für die komplexen Zusammenhänge zu erlangen, wurden unterschiedliche Untersuchungsmethoden angewandt, die sich über verschiedene Skalen erstrecken.

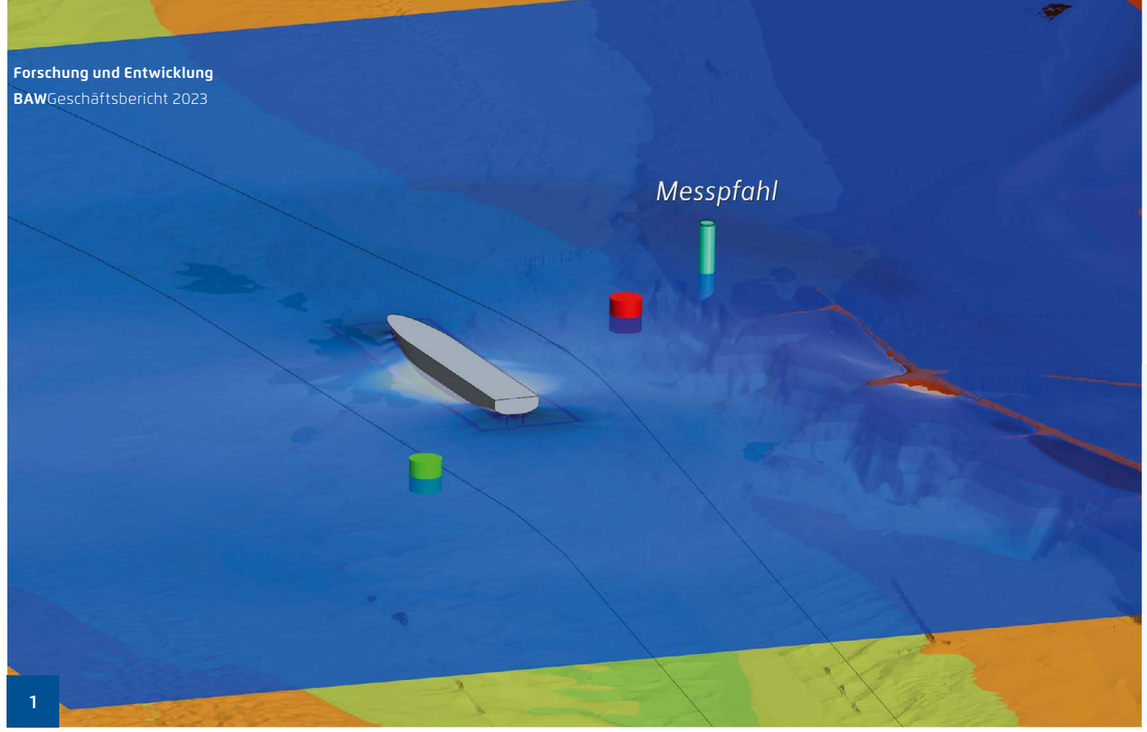
Anhand speziell konzipierter Laborversuche in Zusammenarbeit mit dem Leichtweiß-Institut (LWI) der TU Braunschweig konnte ein praxisorientiertes Vegetationsmodell für durch- und überströmte flexible Vegetation erfolgreich entwickelt werden (Bild 2). Durch die Implementierung dieses Modells und bereits existierender Ansätze in die Open-Source Simulationssoftware Telemac-2D wird der Zugang und die Anwendung dieser Verfahren für eine Vielzahl von Nutzern erweitert. Zusätzlich wurden spezifische Methoden zur Berücksichtigung von Mischbewuchs, wie er in vielen Bereichen der Ufer und Vorländer vorherrscht, in zweidimensionalen hydro-numerischen (2D-HN) Modellen konzipiert.

Die Frage, inwieweit sich die Wahl des Vegetationsmodells im Vergleich zu Unsicherheiten aufgrund der natürlichen Schwankungsbreiten der Parameter typischer Vorlandvegetation bei durch- und überströmten Szenarien auswirkt, konnte im Rahmen einer Unsicherheitsanalyse mithilfe von Monte-Carlo-Simulationen beantwortet werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die natürlichen Unsicherheiten der Vegetationsparameter in den meisten Fällen größer sind als die Unsicherheiten aufgrund der Modellwahl. Dies setzt jedoch voraus, dass das jeweilige Vegetationsmodell prinzipiell für die vorherrschenden Bedingungen geeignet ist. Zur Abbildung von überströmter Vegetation ist beispielsweise unbedingt ein Mehrschicht-Ansatz zu wählen.

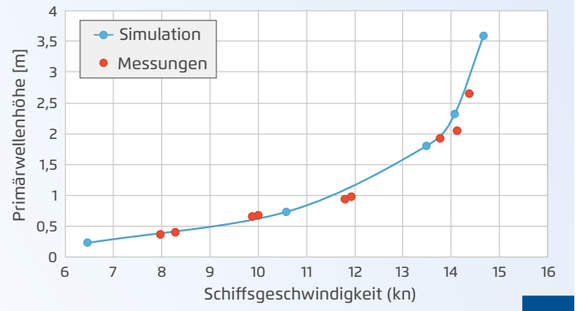
Mangels ausreichender Daten war bisher eine umfangreiche Validierung der Vegetationsmodelle nicht möglich. Dies liegt insbesondere darin begründet, dass Messungen bei relevanten Hochwasserereignissen äußerst anspruchsvoll sind, derartige Ereignisse nur selten auftreten und sie meist stark instationär ablaufen. Um dem zu begegnen, wurde an der BAW ein Labormodell im Maßstab 1:60 aufgebaut. Die größte Herausforderung für die Untersuchungen in diesem Modell besteht darin, die Vegetation, insbesondere die flexiblen Elemente, maßstäblich abzubilden. Neben den geometrischen müssen hierbei auch die biomechanischen Eigenschaften skaliert werden. Flexible Vegetationselemente verformen sich unter Strömungsangriff zu einem strömungsgünstigeren Zustand, woraus geringere Widerstandskräfte resultieren. Um diesen Effekt in einem maßstäblich verkleinerten Labormodell naturähnlich abzubilden, müssen die Elemente eine im Vergleich zur Natur deutlich höhere Flexibilität aufweisen. Gemeinsam mit dem LWI konnten hierzu spezielle Silikon-Elemente entwickelt werden (Bild 3). Mithilfe des skalierten Labormodells konnte ein umfangreicher Validierungsdatensatz generiert werden. Insgesamt zeigen die identifizierten Vegetationsansätze eine sehr gute Eignung für den Einsatz an den Bundeswasserstraßen.

Effizienz und Genauigkeit von Vegetationsmodellen hängen maßgeblich von der Verfügbarkeit und der Qualität der verwendeten Vegetationsparameter ab. Für großflächige Anwendungen ist es daher von zentraler Bedeutung, dass die Erhebung dieser Parameter sowohl effizient als auch zuverlässig erfolgt. Im Zuge einer Anwendungsstudie konnte gezeigt werden, dass Airborne Laserscanning (ALS)-Daten eine wertvolle Ressource für die Ableitung relevanter Vegetationsparameter darstellen. Die in vielen Gebieten für die Erstellung digitaler Geländemodelle erhobenen Daten bieten eine sehr gute Grundlage für die großflächige Bestimmung von Vegetationsparametern. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse der beiden entwickelten Methoden zur Modellierung von Mischbeständen sehr ähnliche Resultate. Dies bestätigt die Validität und Robustheit der Methode und stellt eine wichtige Erkenntnis für die Modellierung natürlicher Vegetationsbestände dar.

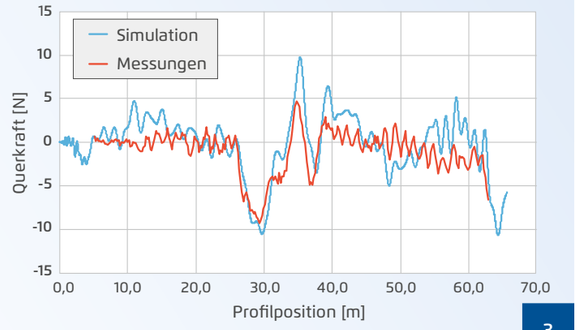
Mit dieser Arbeit konnten bestehende Wissenslücken hinsichtlich der großflächigen Bewertung des hydraulischen Widerstandes von Vorlandvegetation geschlossen und ein wesentlicher Beitrag zum Transfer bestehender Erkenntnisse aus der Wissenschaft in die Praxis geleistet werden. Das im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelte Verfahren stellt einen deutlichen Mehrwert bei der Abbildung von Vorlandrauheiten in 2D-HN-Modellen dar. Die Verwendung von Vegetationsmodellen und die Ableitung von Vegetationsparametern aus ALS-Daten ermöglichen eine detaillierte, objektive und reproduzierbare Abschätzung des Einflusses der Vegetation auf die hydrodynamischen Verhältnisse auf überströmten Vorländern.



1



2



3

Schiffserzeugte Belastung: Simulation in dreidimensionaler Bathymetrie

Die Bauwerke und Anlagen an den Ufern der Seeschifffahrtsstraßen werden durch Seegang und schiffserzeugte Wellen belastet. Durch die zunehmenden Abmessungen der Seeschiffe in den letzten Jahrzehnten hat die schiffserzeugte Wellenbelastung der Uferbauwerke und der Wattflächen stark zugenommen. Die Belastungsgrenze an den Uferbauwerken ist bereits vielerorts überschritten und es kommt auf langen Streckenabschnitten zu Schäden an den Bauwerken. Um eine sichere und belastbare Bemessung auch unter Berücksichtigung technisch-biologischer Bauweisen zu ermöglichen, muss die äußere Belastung durch Schiffswellen ermittelt werden. Dafür werden bei der BAW nach Stand von Wissenschaft und Technik Computermodelle eingesetzt, die die Entstehung und Ausbreitung der Schiffswellen simulieren. Dabei konnte bislang die Bathymetrie nur schematisiert berücksichtigt werden, die sich entlang der Fahrtrichtung des Schiffs nicht änderte (wie ein Kanal). Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens Integra3D verbessert die bisherigen Beratungsleistungen der BAW ganz wesentlich, da nun die schiffserzeugten Wellen unter Berücksichtigung der realen Bathymetrie ermittelt werden können. Dazu musste die reale Bathymetrie in das numerische Computermodell eingebaut werden und ein fahrendes Schiff als bewegliches Berechnungsgitter simuliert werden. Dieser modelltechnisch äußerst komplexe Aspekt wurde im nunmehr abgeschlossenen Forschungsprojekt Integra3D für die wasserbaulichen Fragestellungen der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes umgesetzt.

Das numerische Computermodell wurde bisher nur für schiffsdynamische Fragestellungen eingesetzt und validiert (Bechthold und Kastens 2020). Im Forschungsprojekt wurde das Computermodell nun auch für schiffserzeugte Belastungen validiert und kann damit als gutachterliche Methode eingesetzt werden.

Das zu Projektbeginn verfügbare Simulationsmodell zur Berechnung der Schiffsdynamik wurde weiterentwickelt und optimiert mit dem Ziel, das Primärwellensystem des Schiffes gut abzubilden. Bei der Optimierung zeigte sich, dass in engem, seitlich begrenztem Flachwasser die Simulation mit einem Propellermodell durchgeführt werden muss. Zur Modellvalidierung wurden die Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen aus den physikalischen Modellversuchen des Schiffswellenbeckens der BAW verglichen. Insgesamt wurden verschiedene Frachtschiffe mit einer Breite zwischen 32 m und 66 m in zwei unterschiedlichen schematischen Geometrien der Wasserstraße im Modellmaßstab untersucht. Die Kennwerte des Primärwellensystems wurden für unterschiedliche Situationen an mehreren Positionen errechnet und mit gemessenen Kennwerten verglichen (Bild 2). Dieser Vergleich der Wellen- und Strömungskennwerte ergab eine mittlere Abweichung von etwa 10 %, die der Genauigkeit der gemessenen Werte entspricht (Kochanowski und Kastens 2022).

Für die Integration der bathymetrischen Daten in die Computersimulation konnte ein effektiver Arbeitsablauf über die in der BAW vorhandenen Programme JANET und Bentley Microstation aufgebaut werden. Die Software Janet wird in der BAW zur Gittergenerierung für die Ästuarmodelle verwendet, sodass auf die vorhandene Expertise in dem Bereich aufgebaut werden konnte. Das Softwarepaket Bentley Microstation wurde dann zur Konversion in bekannte 3D-Datenformate benutzt, die die verwendete Strömungssimulationssoftware lesen und weiterverarbeiten kann. Für die Software der numerischen Strömungsberechnung und der Schiffsbewegung musste eine Strategie entwickelt werden, die handhabbare Simulationen von wenigen Millionen Zellen liefert. Die Abbildung der gesamten Bathymetrie kam nicht in Frage, da das Berechnungsnetz sonst viele hundert Millionen Zellen umfasst, was eine Berechnung mit den aktuell verfügbaren Ressourcen nahezu unmöglich macht. Letztendlich wird in der Software nur ein Teilgebiet um das Schiff herum simuliert (Bild 1). Dieses folgt dem Schiff in gewissen Zeitabständen. Hierzu wurden drei unterschiedliche Bewegungsmodelle miteinander kombiniert.

Erste Berechnungen in der Außenweser wurden mit diesem neuen Modell durchgeführt. Dazu sind in diesem Gebiet aus einem AIS-Datensatz Schiffe ausgewählt worden, die den in der BAW vorhandenen digitalen Schiffen zumindest in den Außenabmessungen ähneln. Daraufhin wurde die Fahrspur dieser Schiffe aus dem AIS-Datensatz extrahiert und diese so umgewandelt, dass die Fahrt durch Wasser als entscheidende Größe im Simulationsmodell dieselbe war wie in der Natur. Drei Schiffsfahrten wurden nachsimuliert. Die errechneten Primärwellenkennwerte waren vergleichbar mit zeitgleich stattgefundenen Naturmessungen. Auch hier lagen die Abweichungen zwischen Messungen und Rechnungen bei etwa 10 %.

Eine weitere Validierung der Strömungssimulation fand im Zusammenhang mit einem Kooperationsartikel mit Flanders Hydraulics Research (FHR), Pinkster Marine Hydrodynamics (PMH) und der Universität Strathclyde statt. Hierbei hat FHR den Modellaufbau sowie teilweise Messergebnisse aus ihren durchgeführten Versuchsserien zur Verfügung gestellt. Der Modellaufbau bestand aus einem Kanal, in dem je nach Versuch sowohl mittig als auch außermittig ein Schiff fährt. Entlang dieses Kanals kommt es in einem angeschlossenen Hafen zu einer zeitweisen Aufweitung des Querschnitts. Das Schiff erfährt dadurch bei Ein- und Ausfahrt wechselnde Querkräfte und Giermomente. Die Parameter dieser instationären Situation sowie die Strömungsgeschwindigkeit und die Wasserspiegelauslenkung an einigen Modellpositionen wurden in den Versuchen aufgezeichnet und den Modellierern am Computer zur Verfügung gestellt. Die Teilnehmenden konnten in einem ersten Schritt ihre jeweiligen Computermodelle anhand der Messungen kalibrieren. In einem zweiten Schritt wurde dann der Modellaufbau verändert. Die berechneten Ergebnisse dieses veränderten Aufbaus wurden an FHR geliefert, ohne die Messergebnisse zu kennen (Blindversuch). Die Ergebnisse aller Modelle sind im Journal-Artikel „Unsteady ship–bank interaction: a comparison between experimental and computational predictions“ dokumentiert (Delefortrie et al. 2023). Das zu diesem Zweck aufgebaute Computermodell konnte die bekannten und nicht bekannten Ergebnisse sehr gut reproduzieren (Bild 3). Von den eingesetzten Softwaremodellen war das Modell der BAW das aufwendigste Simulationsmodell. Jedoch konnte es den Verlauf der gemessenen Größen im Vergleich zu den anderen eingesetzten Modellen am besten wiedergeben.

Insgesamt steht nun die Möglichkeit zur Verfügung, Schiffsbewegungen in realistischen Bathymetrien sehr genau zu berechnen. Gleichzeitig kann das Modell eingesetzt werden, um schiffserzeugte Belastungen auf die Wasserstraße zu simulieren. Dieser Aspekt wird zukünftig detailliert weiter validiert werden, um das Modell für Fragestellungen am Ufer oder in Seitenbereichen einsetzen zu können.

1: Simulation eines Containerschiffs in der Außenweser: berechnete Wasseroberfläche im Modellausschnitt mit unterliegender Modellbathymetrie
2: Vergleich des berechneten und gemessenen Kennwerts Primärwellenhöhe für eine 66 m breites Containerschiff am Fahrrinnenböschungsfuß
3: Vergleich des gemessenen und berechneten Kraftverlaufs bei einer Aufweitung des Kanalquerschnitts für ein 58 m breites Containerschiff

Literatur:

Bechthold, J.; Kastens, M. (2020): Robustness and quality of squat predictions in extreme shallow water conditions based on RANS-calculations. In: Ocean Engineering 197, 2020, S. 106780.

Delefortrie, G.; Verwilligen, J.; Kochanowski, C.; Pinkster, J. A.; Yuan, Z. M.; Liu, Y. H. et al. (2023): Unsteady ship–bank interaction: a comparison between experimental and computational predictions. In: Ship Technology Research, S. 1–25. DOI: 10.1080/09377255.2023.2275372.

Kochanowski, C. A.; Kastens, M. (2022): Simulation and Validation of ship induced Waves in shallow and confined Water. In: Ghent University, University of Strathclyde und Flanders Hydraulics Research (Hg.): 6th Mashcon - International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water. Glasgow, UK, 22.-26.5.2022, S. 89–101.

Die Bundesanstalt für Wasserbau

→ Das Jahr 2023
→ Gute wissenschaftliche Praxis in der BAW
→ Daten und Fakten
→ Anhang

Das Jahr 2023

Kompensation im Zuge des Donauausbaus:
Auefließgewässer und Flussinsel bei Straubing

Das Jahr 2023

Messung der Real-Driving-Emissionen eines Binnenschiffs
mit neuem Motor und Abgasnachbehandlung auf dem Rhein

Bau der fünften
Schleusenkammer Brunsbüttel

Das Jahr 2023

Hamburger Hafenschlick: in der Steuerzentrale wird der Versuch geleitet, das Modellschiff gesteuert und die Messgrößen in Echtzeit überwacht

Das Modellschiff fährt Manöver durch den im Flachwasser eingebrachten und mit Wasser überlagerten Flüssigschlick

Das Jahr 2023

Neubau vor Kiel – Neues Mehrzweckschiff der WSV
auf dem Weg zur Fertigstellung bei Abeking & Rasmussen, August 2023

Das Jahr 2023

Verkehrsminister Volker Wissing bei der Fachkonferenz Digitale Testfelder

Fachkonferenz Digitale Testfelder in der BAW

Das Jahr 2023

Besuch Staatssekretärin Susanne Henckel in der BAW

Besuch Parlamentarischer Staatssekretär Michael Theurer in der BAW

Das Jahr 2023

Karlsruher Wissenschaftsfestival EFFEKTE

BAWMitteilungen „Strömungsinduzierte Schwingungen“

Das Jahr 2023

Jazzkonzert in der BAW

Gute wissenschaftliche Praxis in der BAW

Der Wissenschaftsrat hat in seinem Bericht über das Evaluierungsergebnis der BAW (2023) allen Fachdisziplinen sehr gute, teilweise herausragende Forschungsleistungen attestiert. Dieses hervorragende Ergebnis macht den hohen Stellenwert der Forschungs- und Entwicklungsarbeit in der täglichen Arbeit der BAW deutlich. Für die BAW als Ressortforschungseinrichtung gelten dabei die gleichen Qualitätsmaßstäbe wie für Hochschulen und weitere außeruniversitäre Forschungseinrichtungen.

Maßstäbe für die Qualitätssicherung

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gibt mit ihrem Kodex zur Sicherung einer guten wissenschaftlichen Praxis die Anforderungen an das wissenschaftliche Arbeiten in ihren Leitlinien vor. Gleichzeitig definiert die DFG damit auch die Grundvoraussetzungen für die Teilnahme an der Einwerbung von Drittmittelforschungsvorhaben. Die BAW hat diese Leitlinien mit der Überarbeitung der Geschäftsordnung im Jahr 2022 umgesetzt. Diese formal verankerten „Grundsätze zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ fassen die novellierten Regelungen und Arbeitsweisen in einem Dokument zusammen.

Aspekte guter wissenschaftlicher Praxis

Ein wesentlicher Aspekt dieser Grundsätze ist die Festlegung von klaren und transparenten Strukturen für die Planung und Durchführung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben. Ein weiterer Fokus liegt auf der Einhaltung ethischer Standards und dem nachvollziehbaren, verantwortungsvollen sowie nachhaltigen Umgang mit Forschungsergebnissen. Die Veröffentlichung dieser Ergebnisse spielt dabei eine wesentliche Rolle in der Umsetzung einer guten wissenschaftlichen Praxis. Die BAW verfolgt und unterstützt seit einigen Jahren aktiv die Open-Data-und Open-Access-Bewegung. Neben anderen namhaften wissenschaftlichen Einrichtungen hat die BAW im Jahr 2016 die Berliner Erklärung über den offenen Zugang zu wissenschaftlichem Wissen unterzeichnet und sich damit nach innen und außen deutlich positioniert. Diese Grundhaltung ist die Basis für die Wissenschaftskommunikation sowie das Datenmanagement in der BAW. Damit leistet die BAW als Ressortforschungseinrichtung des Bundes einen wichtigen fachlichen Beitrag sowohl für die Wissenschaftsgemeinschaft als auch für die breite Öffentlichkeit.

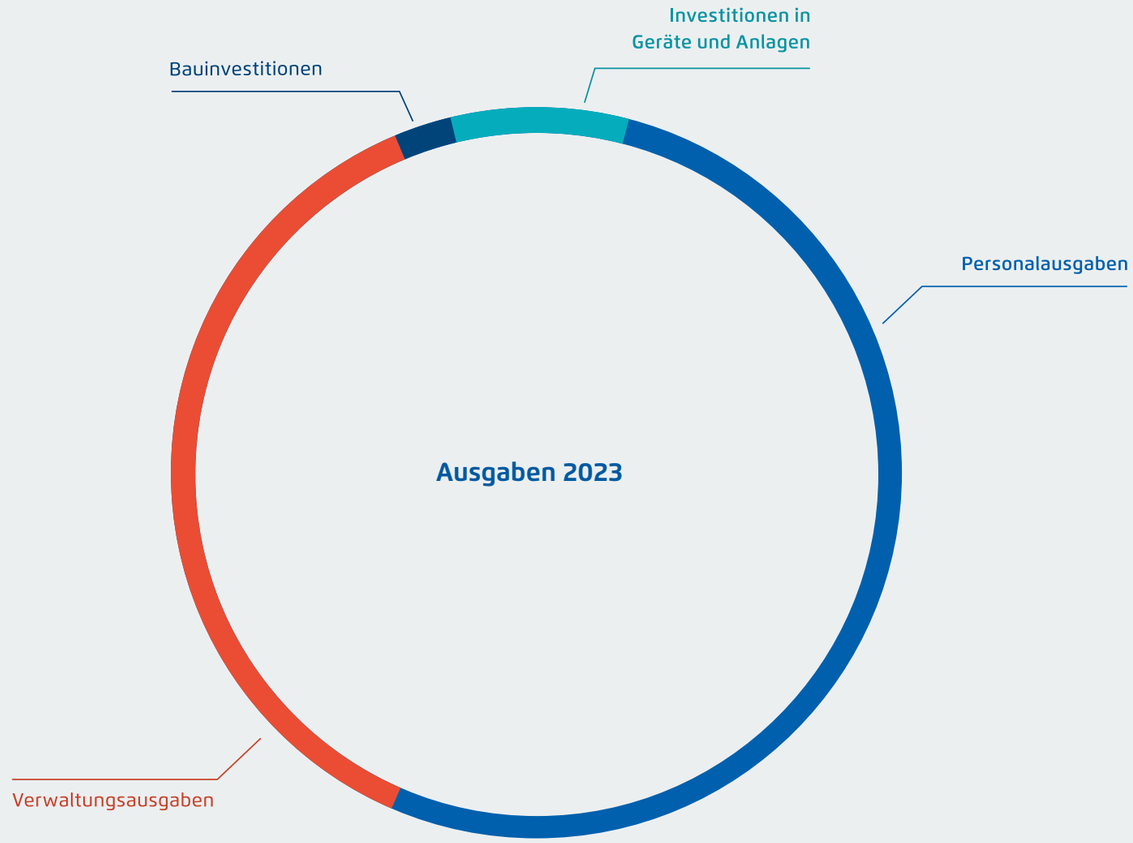
Qualität im Arbeitsalltag

Gute wissenschaftliche Praxis erfordert angemessene und gleichzeitig praktikable Rahmenbedingungen. Die BAW schafft dafür Strukturen und Regelungen, um den aktuellen Standards und Anforderungen zu entsprechen. Informationsangebote und Austauschformate an die Mitarbeitenden fördern kontinuierlich das Bewusstsein für die Bedeutung der guten wissenschaftlichen Praxis und begleiten die Umsetzung im Arbeitsalltag. Letztlich gewährleistet die Einhaltung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis im Arbeitsalltag unserer Mitarbeitenden die hohe Qualität der Forschungs- und Entwicklungsleistungen der BAW.

Daten & Fakten

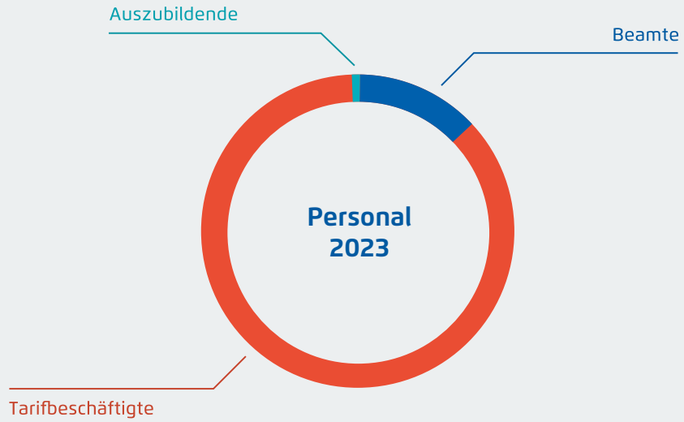
Ausgaben und Einnahmen

	2021	2022	2023
Personalausgaben	34.515.371 €	34.646.790 €	35.852.289 €
Verwaltungsausgaben	20.652.199 €	22.104.308 €	25.351.636 €
Bauinvestitionen	251.895 €	76.348 €	1.713.743 €
Investitionen in Geräte und Anlagen	4.424.089 €	5.983.809 €	5.137.440 €
Gesamtausgaben	**59.843.554 €**	**62.811.255 €**	**68.055.108 €**
Einnahmen aus Drittmittelprojekten	2.910.848 €	2.736.334 €	2.443.600 €



Personal

	2021	2022	2023
Beamte	63	66	62
Tarifbeschäftigte*	418	404	417
Auszubildende	10	7	4
Beschäftigte gesamt	**491**	**477**	**483**
*davon befristet Beschäftigte (ohne Auszubildende)	94	89	88



Daten & Fakten

238
TÄTIGKEITEN IN AUSSCHÜSSEN

23
LEHRAUFTRÄGE

15
KOLLOQUIEN & AUSSPRACHETAGE

5
PROMOTIONEN

Fiedler, Gerrit
Bemessung statischer Mischer für die Erzeugung gleichmäßiger Strömungen in Dotationsbecken von Fischaufstiegsanlagen

Folke, Frederik
Abbildung der Rauheitswirkung von Vorlandvegetation in der ingenieurtechnischen Anwendung

Kirchner, André
Lebenszykluskosten im Wasserbau – Implementierung eines ganzheitlichen Kostenmanagements in den Lebenszyklus von Wehranlagen

Lepper, Robert
A contribution to understanding the recently enhanced coastal siltation in the German Wadden Sea

Machaček, Helen
Analyse von Einflussfaktoren des Widerstands feinkörniger Böden bei hydraulischer Belastung

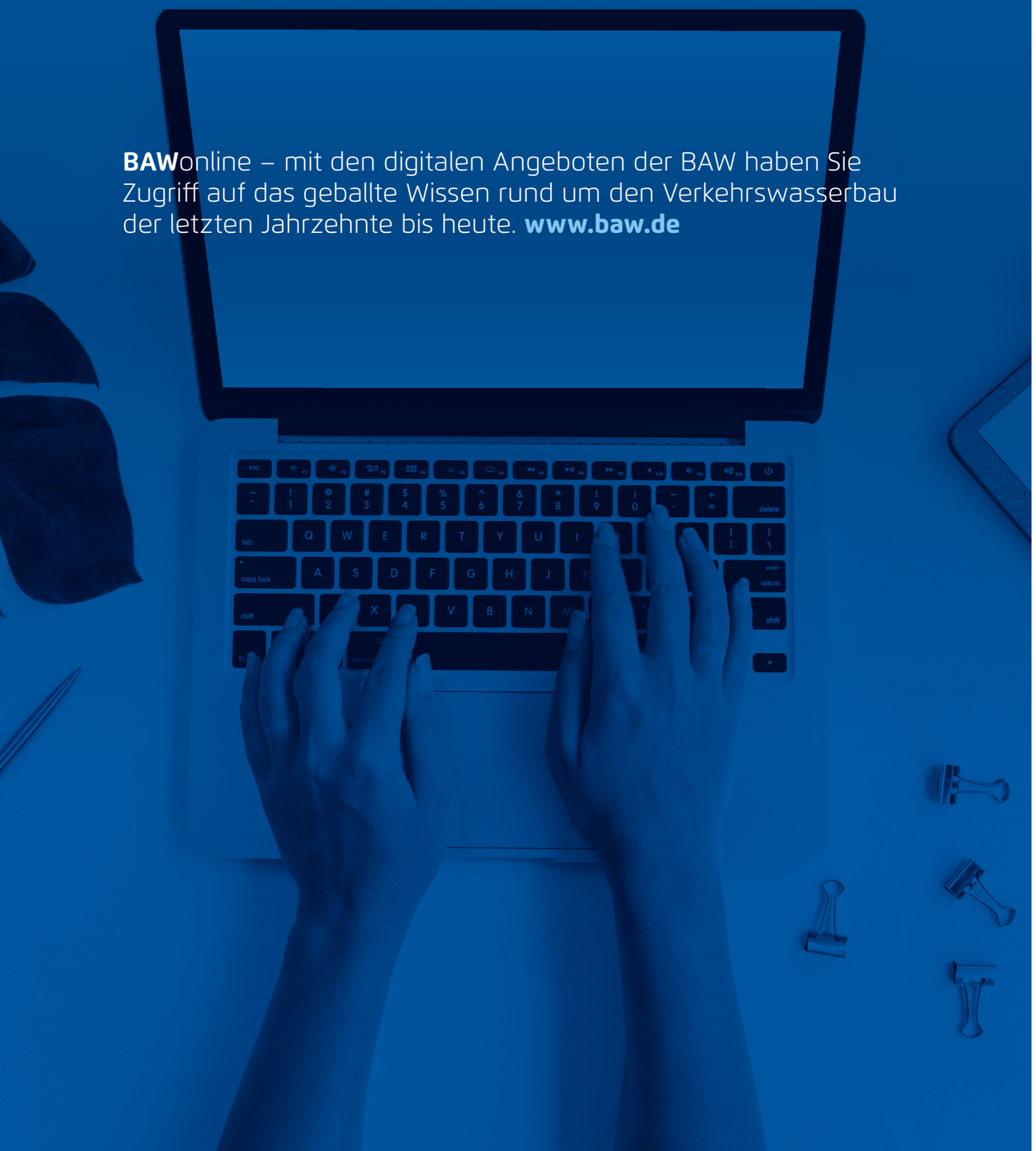
229
VERÖFFENTLICHUNGEN UND VORTRÄGE

124
FORSCHUNGSVORHABEN
IN 2023 ABGESCHLOSSEN: 17
AKTIV: 107

Veranstaltungen 2023

	Anzahl	Teilnehmende
Kolloquien	10	1022
Aussprachetage	5	419
Insgesamt	**15**	**1441**

Anhang



BAWonline – mit den digitalen Angeboten der BAW haben Sie Zugriff auf das geballte Wissen rund um den Verkehrswasserbau der letzten Jahrzehnte bis heute. **www.baw.de**

Veranstaltungen

Weitere Informationen finden Sie unter

https://www.baw.de/de/service/veranstaltungen/veranstaltungen.html

Veröffentlichungen & Vorträge

Weitere Informationen finden Sie unter

https://www.baw.de/de/publikationen/publikationen.html

Mitarbeit in Ausschüssen

Weitere Informationen finden Sie unter

Karriere bei der BAW

Weitere Informationen finden Sie unter

Forschung und Entwicklung

Weitere Informationen finden Sie unter

Social Media Kanäle

Weitere Informationen finden Sie unter

Impressum

Herausgeber (im Eigenverlag):
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe
Postfach 21 02 53, 76152 Karlsruhe
Tel. +49 (0) 721 9726-0
info@baw.de
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. Übersetzung, Nachdruck oder sonstige Vervielfältigung – auch auszugsweise – ist nur mit Genehmigung des Herausgebers gestattet.

ISSN 2190-9156
Karlsruhe · Juni 2024

Bildnachweis:

Seite 10	©Anke Beims
Seite 14	Infozentrum Wasserbau; abgerufen am 21.02.24
Seite 16	WSA Neckar
Seite 17 oben	Ed. Züblin AG; Bauwerkserhaltung TB Wien / TB Budapest mit Beteiligung von Fa. Klaas Siemens u. See-Ingenieure
Seite 17 unten	IRS
Seite 19	KIT, TMB
Seite 48/49	Abeking & Rasmussen, Harald Janssen
Seite 62	Floral Deco/Shutterstock.com
Seite 63 unten	iStock.com/TommL
Seite 64 oben	hxdbzxy/Shutterstock.com
Seite 65 unten	Bloomicon/Shutterstock.com

Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr