

20

21

Geschäftsbericht der BAW



BAWGeschäftsbericht

2021

Organigramm 2021

 Leiter Prof. Dr.-Ing. Christoph Heinzelmann Vertreter: Claus Kunz Gleichstellungsbeauftragte Dr.-Ing. Andrea Wahrheit-Lensing Datenschutzbeauftragter Sigfrid Knapp				
Abteilungen				
				
Abteilung Bautechnik Claus Kunz	Abteilung Geotechnik Dr.-Ing. Jan Kayser	Abteilung Wasserbau im Binnenbereich Prof. Dr. Ing. Andreas Schmidt	Abteilung Wasserbau im Küstenbereich Holger Rahlf	Abteilung Zentraler Service Peter Weinmann
Massivbau	Baugrund-erkundung	Wasserstraße und Umwelt	Küsteningenieurwesen Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen	Verwaltung
Stahlbau/ Korrosionsschutz	Grundbau	Flussbau	Ästuarsysteme I	Technischer Support
Baustoffe	Grundwasser	Wasserbauwerke	Ästuarsysteme II	Datenmanagement und Systemtechnik
Infrastruktur-management	Erdbau und Uferschutz	Schifffahrt	Schiffstechnik	
		Numerische Verfahren im Wasserbau	Geotechnik Nord	
			Geotechnik Küste	

Standorte und Projekte



679

WSV / BMVI Aufträge aktiv
+ 93 Aufträge, die in 2021 abgeschlossen wurden = 772

114

FuE aktiv
+ 16 FuE, die in 2021 abgeschlossen wurden = 130

58

Drittaufträge aktiv
+ 13 Drittaufträge, die in 2021 abgeschlossen wurden = 71

1 Karlsruhe
 Kußmaulstraße 17
 76187 Karlsruhe
 Tel.: +49 (0) 721 9726-0
 Fax: +49 (0) 721 9726-4540

2 Hamburg
 Wedeler Landstraße 157
 22559 Hamburg
 Tel.: +49 (0) 40 81908-0
 Fax: +49 (0) 40 81908-373

E-Mail
 info@baw.de

Internet
 www.baw.de

Wissenschaftliche Grundlagen zur Umsetzung des Koalitionsvertrags

Liebe Leserin, lieber Leser,

mit ihrem Koalitionsvertrag hat sich die neue Bundesregierung ambitionierte Ziele gesetzt. Oberste Priorität haben die Klimaschutzziele aus dem Übereinkommen von Paris aus dem Jahr 2015. Das Übereinkommen verpflichtet die Staaten, den globalen Temperaturanstieg auf möglichst 1,5 Grad zu begrenzen. Darüber hinaus soll die Fähigkeit, sich an die nachteiligen Auswirkungen des Klimawandels anzupassen, erhöht werden. In ihrer Funktion als wissenschaftlicher Dienstleister auf den Gebieten des Verkehrswasserbaus und des Spezialschiffbaus sowie als Ressortforschungseinrichtung des Bundes kann die Bundesanstalt für Wasserbau durch Politik- und Projektberatung die Umsetzung dieser Ziele wirkungsvoll unterstützen.

Schon vor mehr als 10 Jahren haben das heutige Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) und seine wissenschaftlichen Einrichtungen, namentlich der Deutsche Wetterdienst (DWD), die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), damit begonnen, die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Schifffahrt und Wasserstraßen zu untersuchen und

Anpassungsstrategien zu entwickeln. Extremwetterereignisse, wie die monatelang anhaltende Trockenheit im Jahr 2018, die die Schifffahrt auf dem Rhein nahezu zum Erliegen gebracht hat, oder die Flutkatastrophe in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen im Sommer 2021, die zu großem menschlichen Leid und hohen materiellen Schäden geführt haben, unterstreichen die Bedeutung und die Dringlichkeit einer vorsorgenden Klimaanpassungsstrategie. Zwischenzeitlich liegen wichtige Ergebnisse vor, die in den nächsten Jahren validiert und fortentwickelt werden sollen. Schon heute bilden sie Grundlagen für politische Entscheidungen. Zugleich stehen sie der interessierten Öffentlichkeit zur Verfügung und können beispielsweise für Unternehmensentscheidungen zu Standort- oder Logistikfragen herangezogen werden.

Aber auch zu einem verbesserten Klimaschutz leistet die BAW wichtige Beiträge. Zu den zentralen Vorhaben der Bundesregierung gehört der beschleunigte Ausbau der Windenergieanlagen auf See. Seit dem Bau der ersten Offshore-Windenergieanlagen in Nord- und Ostsee unterstützt die BAW das BSH bei der Genehmigung der Anlagen in Fragen zu Geotechnik, Wasserbau und

Korrosionsschutz. Hinzu kommen umfangreiche Baugrunderkundungen der BAW im Rahmen der Flächenvoruntersuchung für die zur Bebauung mit Windenergieanlagen vorgesehenen Flächen.

Im Jahr 2021 hat die BAW eine neue „Forschungsstrategie Verkehrswasserbau“ entwickelt. Die Verbesserung des Klimaschutzes spielt darin eine wichtige Rolle. Ein Schwerpunkt ist das klima- und ressourcenschonende Bauen, eine gewaltige Herausforderung vor dem Hintergrund der massiven Bauweise von Wasserbauwerken, wie z. B. Schleusen und Wehre, mit hohem Beton- und Stahlbedarf. Im Betonbau herrscht Forschungsbedarf, weil die künftige Verfügbarkeit technisch bewährter Baustoffe, wie Flugasche oder Hüttensande, sowie von Gesteinskörnungen aus natürlichen Ressourcen unsicher ist. Baustoffe und Bauverfahren mit verbesserter CO₂-Bilanz sind erforderlich, für die bislang keine Erfahrungen für den Einsatz im Verkehrswasserbau vorliegen. Prüfverfahren und Prüfkriterien für die Beurteilung der Verwendbarkeit neuer Baustoffe sind bis dahin nur in Ansätzen vorhanden und müssen dringend weiterentwickelt werden. Der Einsatz von Recyclingbaustoffen ist zu prüfen, um künftig ressourcenschonender zu bauen.

Diese Beispiele zeigen bereits den großen Forschungsbedarf. Hinzu kommt die Dringlichkeit, schnell praxistaugliche Lösungen zu entwickeln und die Forschungsergebnisse zügig in die Praxis zu überführen. Hierzu wird die BAW ihr bewährtes Netzwerk nutzen und zielführende Partnerschaften mit allen am Bau Beteiligten aus Wissenschaft, Verwaltung und Industrie bilden. Auf diese Weise kann es in doppelter Hinsicht gelingen, einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele des Koalitionsvertrags zu leisten: zum einen durch klima- und ressourcenschonendes Bauen und zum anderen durch Güterverkehrsverlagerung von LKW und Bahn auf die klima- und umweltfreundliche Binnenschifffahrt.

Eine interessante Lektüre wünscht Ihnen

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

Karlsruhe, im März 2022



Inhalt



Ein Beitrag der BAW zur Energiewende



Begutachtung und Beratung
zur Instandsetzung



Ermittlung, Vermeidung und Beseitigung
von Schwingungsphänomenen

6	Wissenschaftliche Beratung und Wissenschaftskommunikation Beitrag von Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Schlurmann, Geschäftsführender Leiter des Ludwig-Franzius- Instituts für Wasserbau, Ästuar- und Küsten- ingenieurwesen an der Leibniz Universität Hannover
8	Offshore-Windenergie Ein Beitrag der BAW zur Energiewende
16	Wehranlage Geesthacht Begutachtung und Beratung zur Instandsetzung
24	Schwingungen im Stahlwasserbau Ermittlung, Vermeidung und Beseitigung von Schwingungsphänomenen

32	Ausgewählte Forschungs- und Entwicklungsprojekte
32	FuE-Projekt Instandsetzung von Schleusenanlagen unter laufendem Betrieb (IuB)
34	GeoValML – Das interoperable Austauschformat für boden- und felsmechanische Kennwerte
36	Ferngesteuertes, koordiniertes Fahren in der Binnenschifffahrt (FernBin)
38	IMMERSE, IMplementing MEasuRes for Sustainable Estuaries in the North Sea Region

40	Die Bundesanstalt für Wasserbau
41	Das Jahr 2021
50	Digitale Arbeitswelt der BAW
52	Daten und Fakten
56	Anhang
61	Impressum



ZUR PERSON:

Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Schlurmann ist Geschäftsführender Leiter des Ludwig-Franzius-Instituts für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen an der Leibniz Universität Hannover und Mitglied des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesanstalt für Wasserbau

Wissenschaftliche Beratung und Wissenschaftskommunikation

Handlungsfelder und Entwicklungspfade der BAW

Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Schlurmann
Geschäftsführender Leiter des Ludwig-Franzius-Instituts für Wasserbau,
Ästuar- und Küsteningenieurwesen an der Leibniz Universität Hannover

Unter dem Leitmotto *Kompetenz für die Wasserstraßen* erbringt die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) als Ressortforschungseinrichtung des Bundes seit Jahrzehnten eigenständige Forschungs- und umfassende Beratungsleistungen im Verkehrswasserbau an den Bundeswasserstraßen im Binnen- und Küstenbereich. Insbesondere stützen die Fachkompetenzen und Erfahrungen der BAW die Planung und Umsetzung von Instandsetzungs-, Ausbau- und Neubauvorhaben der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Gleiches gilt für Dienstleistungen rund um Fragen des

Betriebs und der Unterhaltung der Wasserstraßen. Die BAW ist zudem intensiv in die Erfassung und Beschreibung des Feststofftransports sowie in die Aufstellung von Strategien zum Sedimentmanagement als sachverständige Beraterin eingebunden und leistet darüber hinaus wichtige Beiträge zur Wiederherstellung der Durchgängigkeit von Fließgewässern, z. B. in der Auslegung von Fischauf- und -abstiegsanlagen.

Dabei ist die Brückenfunktion zwischen Wissenschaft und Praxis für die BAW ein profilbildendes Merkmal und

entspricht dem typischen Leistungsbild einer modernen Ressortforschungseinrichtung. Der innere Antrieb der BAW liegt darin, Forschung auf dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik aktiv und qualitätsgesichert zu betreiben und verfolgt die Zielsetzung, erlangte wissenschaftliche Erkenntnisse mit unmittelbarem Anwendungsbezug als Grundlage für wissenschaftsbasierte Entscheidungen bereitzustellen. Aus dieser zugewiesenen Doppelfunktion, Forschung auf hohem, gesichertem Niveau zu betreiben und gleichzeitig eine wissenschaftliche Beratung zu leisten, resultiert unweigerlich ein Spannungsverhältnis. Dieses basiert zum einen auf Bedarfen und Nachfragen aus der Politik und der WSV und zum anderen dem Erreichen von Forschungszielen, einschließlich der qualitätsgesicherten Weiterentwicklung von Methoden nach wissenschaftlichen Maßstäben. Auf beiden Skalen muss sich die Qualität und Wirksamkeit der Ressortforschung messen und folglich auch überprüfen lassen.

Die BAW hat in den letzten Jahren, auch auf Empfehlung des Wissenschaftsrats, ihre Strukturen und Prozesse überarbeitet, um ihre Forschungstätigkeit stärker an den Grundsätzen des Wissenschaftssystems zu orientieren und die Qualität und Belastbarkeit wissenschaftlicher Beratungen noch robuster zu gestalten. Diese Profilschärfung kommt unter anderen in der unlängst aufgelegten *Forschungsstrategie Verkehrswasserbau* (2021) eindrucksvoll zum Ausdruck. Demnach adressiert und verantwortet die BAW ein breites Aufgabenspektrum im Verkehrswasserbau und wird als eigenständige wissenschaftliche Einrichtung wertgeschätzt. Diese Entwicklung kommt bspw. durch die in 2021 erfolgte Aufnahme als assoziiertes Mitglied in die Deutsche Allianz Meeresforschung (DAM) oder durch die Einbindung auf Leitungs- und Arbeitsebene in die *World Association for Waterborne Transport Infrastructure* (PIANC) zum Ausdruck. Die BAW interagiert mit einer Vielzahl wissenschaftlicher Akteur*innen und Einrichtungen intensiv und treibt darüber hinaus neue Entwicklungen mit an.

Die Integration in wissenschaftliche Netzwerke und die Vielzahl proaktiv angestoßener Kollaborationen befördert daher die Qualität und Validität der durch die BAW verantworteten wissenschaftlichen Beratungen im Verkehrswasserbau, da der eigene Wissensschatz erweitert sowie die entwickelten und zur Anwendung kommenden Werkzeuge im Wissenschaftssystem überprüft und ggf. nachjustiert werden. Hiermit wird der originäre Auftrag der BAW im Angebot von Beratungsleistungen im politischen Umfeld und auf Ebene der WSV auf solider wissenschaftlicher Basis überhaupt erst ermöglicht.

Dennoch sieht sich das Wissenschaftssystem, insbesondere die Ressortforschung des Bundes, vor neuen Herausforderungen und wird zunehmend mit den Anforderungen einer erfolgreichen Wissenschaftskommunikation vor dem Hintergrund des gesellschaftlichen Wandels konfrontiert.

Sowohl die Relevanz und Bedarfsorientierung als auch der Wirkungsnachweis und konkrete Nutzen von Forschung werden stärker als bisher nachgefragt. Wissenschaft wird heute daher auch funktionalisiert, was im Zusammenhang der Corona- und der Klimakrise deutlich wird.

„Dabei ist die Brückenfunktion zwischen Wissenschaft und Praxis für die BAW ein profilbildendes Merkmal und entspricht dem typischen Leistungsbild einer modernen Ressortforschungseinrichtung.“

Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Schlurmann

Dem Wissenschaftssystem wird dabei eine besondere Verantwortung eingeräumt, die auf evidenzbasierten Antworten und Lösungen für die drängendsten Fragen unserer Zeit beruhen. Die dazu erforderliche Kompetenz liegt in der Wissenschaftskommunikation und ist gemäß Einschätzung des Wissenschaftsrats (2021) für den *Transfer von erzieltem Wissen in außerwissenschaftliche Bereiche und den Austausch darüber mit der Gesellschaft, Kultur, Wirtschaft und Politik gekennzeichnet*. Im Grundsatzpapier des BMBF (2019) findet *Wissenschaftskommunikation in der, aus der und über die Wissenschaft* statt. Dies intendiert eine allgemeinverständliche, dialogorientierte Kommunikation und Vermittlung von Forschung und wissenschaftlichen Inhalten an Zielgruppen außerhalb der Wissenschaft. Der hohe Stellenwert der Fähigkeit zur Kommunikation von Wissenschaft ist heute als neue, institutionelle Aufgabe anerkannt und wird zukünftig noch stärker als integraler Bestandteil des Leistungsprofils wissenschaftlicher Einrichtungen, insbesondere in der Ressortforschung, auf Leitungs- bis auf Arbeitsebene wahrgenommen.

Die BAW hat diese Entwicklungen erkannt und die Wissenschaftskommunikation als Handlungsfeld in der jüngst aufgelegten *Forschungsstrategie Verkehrswasserbau* mit in den Fokus gestellt. Es gilt jetzt die dafür notwendigen Kompetenzen und Formate in der BAW auszubauen und die damit adressierten Zielstellungen transparent nach innen und außen zu formulieren. Diese Entwicklung muss mit einem Bekenntnis zu einer individuellen und institutionellen Anerkennung sowie Förderung der Wissenschaftskommunikation als Handlungsfeld und weiteren Entwicklungspfad im Aufgabenportfolio verknüpft werden, da die Kommunikation zum Transfer von Wissen neben der wissenschaftlichen Forschung und Beratung als neue, typische Handlungsfelder heranwachsen und die Systemrelevanz einer Ressortforschungseinrichtung auszeichnen werden.

Offshore-Windenergie

Ein Beitrag der BAW zur Energiewende

Zu den zentralen Vorhaben der Bundesrepublik Deutschland gehört die grundlegende Umstellung der Energieversorgung hin zu erneuerbaren Energien in den nächsten Jahren. Bei dieser komplexen und vor allem technisch herausfordernden Aufgabe kommt der Energie von See eine wichtige Rolle zu. Die BAW hat den Ausbau der Offshore-Anlagen von Beginn an mit ihrer umfassenden Expertise begleitet.

Hintergrund

Offshore-Windanlagen können besonders hohe Leistungen erbringen und sind damit ein wesentlicher Baustein der Energiewende. Im Jahr 2010 wurde mit „alpha ventus“ der erste Offshore-Windpark Deutschlands eingeweiht – und gleichzeitig der weltweit erste, der unter Hochseebedingungen in Betrieb ging. Aufgrund der damals gültigen Seeanlagenverordnung wurde die Genehmigung für den Bau durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) erteilt, das im Gebiet der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone verantwortlich ist. Als Schwesterbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) unterstützt die BAW das BSH seit Beginn des Pilotprojektes bei der Wahrnehmung seiner genehmigungsrechtlichen Aufgaben – mit fachübergreifender technisch-wissenschaftlicher Kompetenz in den Bereichen Geotechnik, Wasserbau und Korrosionsschutz.

Seitdem sind weitere Offshore-Windparks hinzugekommen, und die jahrzehntelangen Erfahrungen der BAW aus der fachlichen Begleitung großer Infrastrukturprojekte kommen bei der Durchführung der **Genehmigungsverfahren** sowie der **Standardisierung und Normung** im Offshore-Wind-Bereich zur Anwendung. Im Rahmen des 2017 in Kraft getretenen Gesetzes zur Entwicklung und Förderung der Windenergie auf See wurde das Aufgabenfeld des BSH erweitert. Die dort beschriebene **Flächenvoruntersuchung** umfasst mit Baugrunderkundung und -beschreibung weitere Kernkompetenzen der BAW, die in die fachliche Beratung des BSH einfließen.

Genehmigungsverfahren für Offshore-Windparks

Die Genehmigungen für den Bau und Betrieb eines Offshore-Windparks oder einer Konverterplattform werden stufenweise erteilt. Nach Erlass des Planfeststellungsbescheides können Antragsteller eine erste, zweite und dritte Freigabe erhalten, bevor letztendlich die Betriebsfreigabe erteilt wird. Die Mindestvoraussetzungen für die jeweilige Freigabe finden sich in den vom BSH veröffentlichten „Standards“. Sie behandeln die Themen Baugrunderkundung, Konstruktion sowie Untersuchung der Auswirkungen auf die Meeresumwelt. Erstellt wurden die Standards gemeinsam von Akteuren aus Wirtschaft (Energieversorger, Zertifizierungsgesellschaften, Baufirmen, Ingenieurbüros) und Wissenschaft (Hochschulen, Forschungsinstitute) sowie der öffentlichen Hand. Die Inhalte werden regelmäßig überprüft und überarbeitet, um den Innovationen im Bereich der Offshore-Windenergie sowie den Veränderungen von Gesetzen und Vorschriften Rechnung zu tragen.

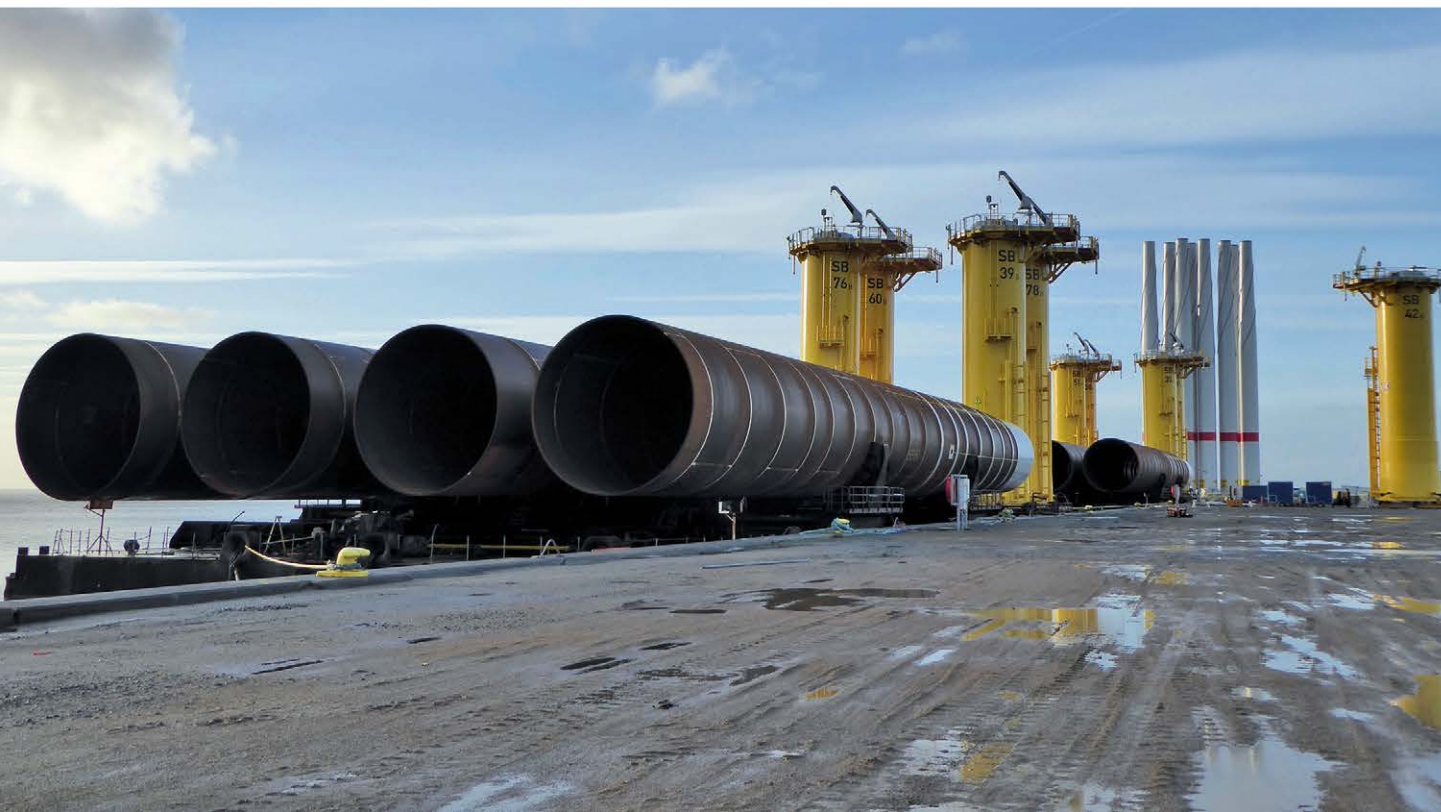
Die BAW unterzieht die eingereichten Dokumente der Antragsteller einer Plausibilitätsprüfung, um festzustellen, ob die vielfältigen Anforderungen aus den Bereichen Gründung, Baugrunderkundung, Korrosionsschutz und dem Wasserbau erfüllt sind. Neben den formalen Mindestanforderungen wird beurteilt, ob das Vorgehen in sich stimmig und die gewählten Methoden und Ansätze fachlich sinnvoll sind. Anschließend werden Empfehlungen für eine Freigabe abgegeben. Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) übernimmt die Plausibilisierung der stahlbaulichen Unterlagen.

„Häufig wird mit den geplanten Gründungen technisches Neuland betreten.“



Bild 2: Die Konverterplattformen HelWin alpha und beta mit unterschiedlichen Jacketgründungen, Nordsee

Bild 1: Komponenten einer Windenergieanlage, links Monopiles, mittig gelbe Übergangsstücke, hinten weiße Turmsegmente



Offshore-Gründungen

Der Entwurf von Gründungen für Offshore-Windenergieanlagen stellt Beteiligte vor große Herausforderungen. Die auf die Bauwerke einwirkenden Kräfte, seien es die Kombination aus Wind und Wellen oder die Betriebszustände der immer größer werdenden Turbinen, erfordern komplexe Bemessungsverfahren. So ist zum Beispiel das Verhalten von Böden unter den hier relevanten zyklischen und dynamischen Lasten ein anderes als unter überwiegend statischen Lasten. Häufig wird mit den geplanten Gründungen technisches Neuland betreten. Eine Kernaufgabe der BAW ist es, diese Entwicklung zu begleiten und den Stand der Wissenschaft voranzutreiben – durch eigene Forschungsvorhaben und durch die Beteiligung an Projektgruppen verschiedener Forschungseinrichtungen.

Die möglichen Gründungsformen reichen von Suction Caissons (nach unten geöffnete Stahlzylinder, die auf den Meeresboden gesetzt und ausgepumpt werden, sodass die auflastende Wassersäule das Fundament in den Boden presst) über Schwergewichtsgründungen bis hin zu

Pfahlgründungen. Jede dieser Gründungsformen bietet ihre Vorteile, bringt jedoch auch eigene Herausforderungen mit sich. Die am häufigsten verbaute Gründungsart für Windenergieanlagen ist in den letzten Jahren der Monopile, ein stählerner Einzelpfahl mit einem Durchmesser von bis zu 10 m und einer Gesamtlänge von bis zu 60 m (Bild 1). Parkinterne Umspannplattformen sowie Konverterplattformen (Bild 2), die für die Energieübertragung zum Land sorgen, stehen häufig auf Fachwerkkonstruktionen aus Stahlrohren, den Jackets. Diese bleiben zum Großteil unter Wasser verborgen und werden am Meeresboden über mehrere schlanke Pfähle im Untergrund verankert. Deren Durchmesser ist mit rund 2,5 m für Offshore-Verhältnisse gering.

Es ist derzeit noch offen, zu welchen Gründungsformen sich die Technik entwickelt, wenn mit fortschreitendem Ausbau der Windenergie die Parks in größeren Wassertiefen errichtet werden. Derzeit noch exotische Formen wie schwimmende Gründungen werden bereits diskutiert und im Ausland getestet.



Bild 3: Detail eines Jackets mit Lagervorrichtung, oben Korrosionsschutzbeschichtung und angefügte Opferanoden, Ostsee

Wasserbauliche Belastung und Kolksschutz

Aus wasserbaulicher Sicht steht neben den Belastungsansätzen für Wellen und Strömung die Entwicklung von Kollen im Fokus, d. h. die Erosion des Meeresbodens um die Gründungselemente herum. Große Kolke verringern die Einbindung der Gründung im Boden. Sie haben somit unmittelbar Einfluss auf Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit und müssen deshalb bei der Bemessung berücksichtigt werden. Bei Einzelpfählen kann die Kolkttiefe im Maximum ein Mehrfaches ihres Durchmessers erreichen. Bei komplexen Gründungsstrukturen wie Jacket-Gründungen mit mehreren Pfählen ist eine Vorhersage der Auskolkung schwierig, daher wird in der Regel von vornherein ein Kolksschutz aus geschütteten Wasserbausteinen vorgesehen. Der größer werdende Erfahrungsschatz der Windparkplaner und die zunehmende wirtschaftliche Optimierung führen dazu, dass häufig vom Stand der Technik abgewichen wird. Ein Beispiel ist der Verbau einlagiger, geometrisch offener Kolksschutzsysteme.

Aufgabe der BAW ist die Plausibilisierung der Kolksschutzbemessung. Dabei werden die getroffenen Annahmen, der Methodenansatz sowie das Konzept der langfristigen Überwachung bewertet. Zur langfristigen Überwachung ermitteln und bewerten die Parkbetreiber u. a. den Zustand des Kolksschutzes an ausgewählten Standorten durch wiederkehrende Prüfungen. Die Dokumentation der Prüfungen ist turnusmäßig bei der Behörde einzureichen und wird dort beurteilt.

Korrosionsschutz

Das dritte Themenfeld, das anhand der eingereichten Planungsdokumente plausibilisiert wird, ist der Korrosionsschutz. Die BAW beschäftigt sich dabei mit einer Vielzahl von Schutzmöglichkeiten, wie etwa organischen Beschichtungen, metallischen Überzügen oder dem kathodischen Korrosionsschutz (Bild 3). Hierfür werden die Auslegung bzw. der Aufbau der Schutzsysteme, die notwendige Oberflächenvorbereitung sowie die Applikation des Schutzes bewertet. Ein funktionierender Korrosionsschutz trägt ganz entscheidend zu einem nachhaltigen und ausfallsicheren Betrieb der Windenergieanlagen und Plattformen bei. Neben der Plausibilisierung von Unterlagen beteiligt sich die BAW aktiv an der Erstellung von Standards und Spezifikationen und leistet fachliche Beratung bei Zustimmungen im Einzelfall.

Leitungen und Ankerwurf

Die Netzanbindung von Offshore-Windparks erfolgt über Seekabel, die über spezielle Geräte wie Pflüge oder Fräsen in den Meeresboden eingebracht werden. Zum Schutz wird das Seekabel anschließend mit Bodenmaterial überdeckt. Die Durchführung von Ankermanövern infolge von Havarien oder Notfällen erfordert eine erhöhte Verlegtiefe, da die Kabel auch Schifffahrtsstraßen kreuzen. Bei schwierigen Untergrundverhältnissen ist das technisch aufwendig und teuer.

Die Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) und der für die Anbindung in der Nordsee verantwortliche Stromnetzbetreiber TenneT haben in der Vergangenheit vereinbart, ein Versuchsprogramm zur Ermittlung der tatsächlichen Eindringung von Ankern in den Nordseeboden durchzuführen, an dem die BAW in ihrer Beraterfunktion für die GDWS beteiligt war. Die Ergebnisse des Versuchsprogramms wurden publiziert (https://wiki.baw.de/de/index.php/Ankerzugversuche_2013) und dienen der Fachwelt u. a. als Referenz für numerische Simulationen. Derzeit wird die gleiche Problematik durch 50Hertz behandelt, den Netzbetreiber im Bereich der Ostsee. Er plant ein gesondertes Untersuchungsprogramm für die dort vorliegenden Untergrundbedingungen, bestehend aus Laborversuchen und numerischen Simulationen.

Flächenvoruntersuchung

Seit der Umstellung auf das sogenannte „zentrale Modell“ 2017 führt das BSH neben der Eignungsfeststellung auch eine Voruntersuchung aller Windparkflächen durch. Das zentrale Modell bezeichnet einen gestuften Planungs-

und Ausschreibungsprozess. Dabei werden neben der Erhebung von Umweltdaten (Wind, Ozeanografie, Meeresumwelt) auch Baugrunderkundungen durchgeführt. Die gesammelten Datenpakete für die einzelnen Windparkflächen werden frei veröffentlicht. In Form einer Auktion werden nachfolgend die Windparkflächen mit der zugehörigen maximalen Einspeisemenge vergeben. Auf Grundlage der vorab zur Verfügung gestellten Daten können Bietende die Kosten für die Entwicklung eines Windparks kalkulieren. Das Gebot mit der geringsten Einspeisevergütung erhält den Zuschlag.

Den Baugrunderdaten kommt hierbei eine zentrale Bedeutung zu, da sie die Grundlage für eine wirtschaftliche und sichere Dimensionierung der Windenergieanlagen und Plattformen sind, während sie gleichzeitig einen großen Zeit- und Kostenfaktor während der Planung darstellen. Da zum Zeitpunkt der Flächenvoruntersuchung lediglich die Anschlussleistung der Fläche an das Stromnetz feststeht, müssen Umfang und Qualität der Baugrunderkundung die Kalkulation unterschiedlichster technischer Lösungen bei der Bauwerksgründung ermöglichen und auch auf die Entwicklung von Innovationen gerichtet sein.

Neben diesen hohen Anforderungen ist die Baugrunderkundung aufgrund der auf See herrschenden Bedingungen eine große Herausforderung. Zudem ergibt sich aus den immer höher gesetzten Ausbauzielen und dem jährlichen Rhythmus der Flächenauktionen ein steigender Arbeitsumfang bei der Baugrunderkundung. Um trotz dieser Beschleunigung Ergebnisse auf einem hohen Qualitätsniveau zu erhalten, ist eine fachkundige Begleitung der Arbeiten auf See, in den Laboren und an den Schreibtischen durch die BAW erforderlich.

Baugrunderkundung

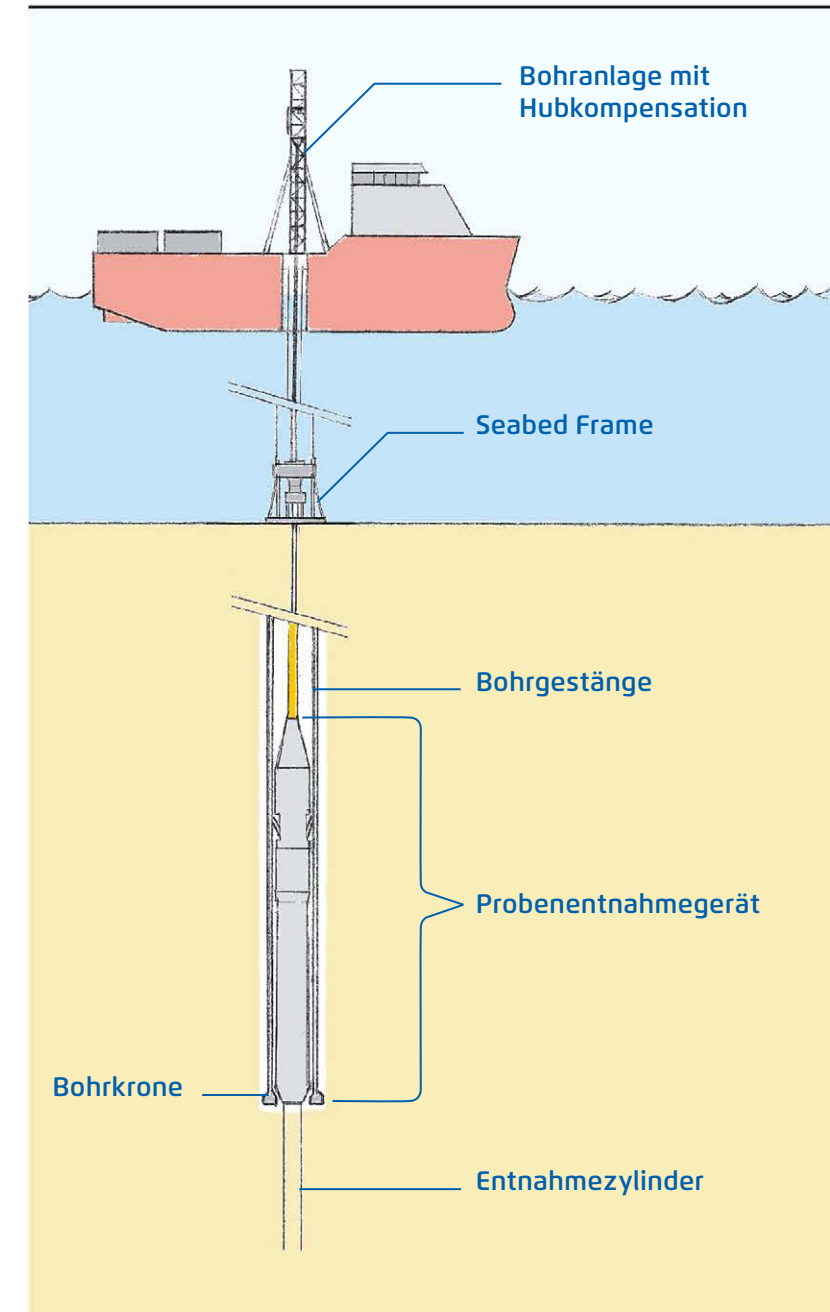
Ein entscheidendes Ziel der Voruntersuchung ist die Erstellung eines räumlichen geologischen Tiefenmodells des Untergrundes. Dieses wird auf Basis von geophysikalischen Untersuchungen sowie einer geotechnischen Baugrunderkundung entwickelt. Die BAW begleitet die Baugrunderkundung von der Konzeption über die Überwachung der Arbeiten auf See und im Labor bis zur abschließenden Berichterstellung. Dazu gehört auch die Unterstützung bei der Planung und Ausschreibung der Arbeiten.

Die geotechnische Baugrunderkundung wird an charakteristischen Lokationen durchgeführt, die auf Grundlage zuvor durchgeführter geophysikalischer Untersuchungen festgelegt werden. An jeder einzelnen Lokation umfasst der Erkundungsumfang mindestens eine Drucksondierung, eine separate Bohrung mit Probenentnahme sowie eine geophysikalische Bohrlochmessung, jeweils bis zu einer Tiefe von ca. 80 m unter dem Meeresboden. Ergänzend kommen seismische Drucksondierungen im oberflächennahen Bereich hinzu. Die relativ große Aufschlusstiefe und die genannten Verfahren gewährleisten eine gute Datenbasis für das geologische Tiefenmodell.

Die zu untersuchenden Flächen liegen teilweise über 100 km weit entfernt von den deutschen Nordseeinseln bei einer Wassertiefe von ca. 40 bis 50 m. Für die Durchführung der Baugrunderkundung wurden bisher speziell ausgerüstete Bohrschiffe eingesetzt, die über ein dynamisches Positionierungssystem sowie eine hubkompensierte Bohranlage verfügen. Dies bedeutet einen großen technischen Aufwand, da sich das Schiff trotz Strömung, Wind und Wellen nicht relativ zum Boden, in dem sich das Bohrgestänge befindet, bewegen darf (Bild 4 und 5). Die Schiffe sind in den Erkundungsgebieten bis zu 14 Tage ohne Pause

Bild 4:

Schema Offshore-Probenentnahme



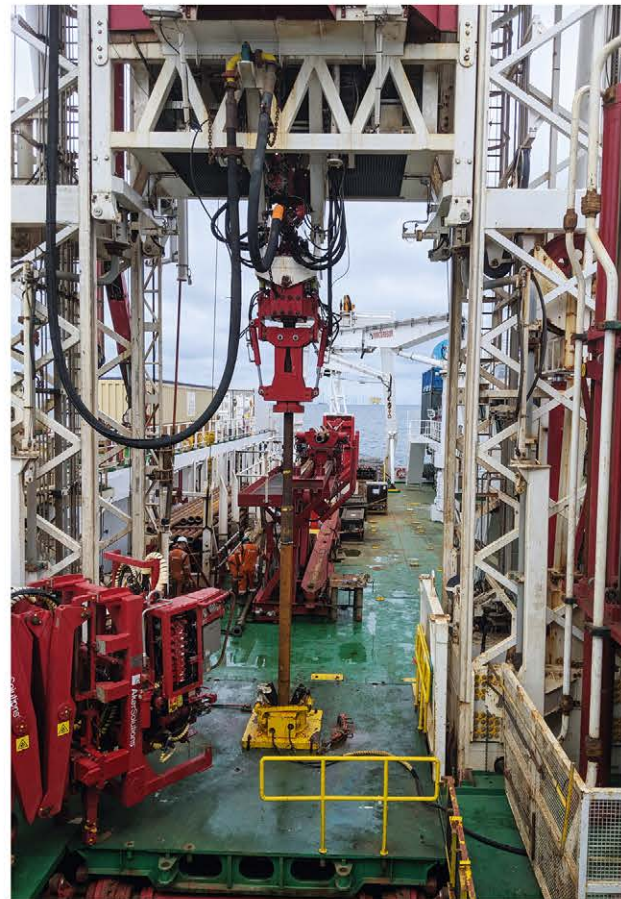


Bild 5:
Bohrgerät mit
Hubkompensation

umfassende Kenntnisse der üblichen Gründungssysteme und der von den Planern verwendeten Bemessungsmethoden. Die Anforderungen an die Versuche sind hoch und können nur von besonders qualifizierten Laboren durchgeführt werden. Gleichzeitig führt der Umstand, dass die Arbeiten einer Kampagne in der Regel im selben Kalenderjahr abgeschlossen werden müssen, dazu, dass Aufträge parallel in verschiedenen internationalen Laboren bearbeitet werden. Umso wichtiger ist die fachliche Begleitung, die dabei die Konsistenz und Qualität der Ergebnisse in der Gesamtschau sicherstellt.

Obwohl in den letzten Jahren viele Offshore-Wind-Projekte durchgeführt wurden, sind die Erfahrungen im Vergleich zu Onshore-Projekten noch begrenzt. Gründe hierfür sind die Dimensionen der Bauteile, die großen Gründungstiefen und auch die Beschaffenheit der Böden. Ein Beispiel sind eiszeitlich stark vorbelastete Sande, in denen Laborversuche mit Standardgeräten an ihre Grenzen kommen. Während bei einer Standard-Ödometerzelle für bodenmechanische Untersuchungen üblicherweise 20 kN Last auf eine Probe aufgebracht werden, können mit den Großbelastungsrahmen der BAW bis zu 300 kN Belastung mit unterschiedlichen Probenabmessungen gefahren werden (Bild 7). Dies ermöglicht eine deutlich realistischere Untersuchung des Last-Verformungsverhaltens der offshore-relevanten Böden. Hinzu kommen zyklische Triaxialversuchsgeräte sowie Bender Elements. Letztere dienen der Untersuchung des Verhaltens von Böden bei kleinen Dehnungen, wie sie bei Windenergieanlage-Gründungen vorkommen. Dies geschieht durch die Ermittlung der Scherwellengeschwindigkeit, ähnlich dem Verfahren der Bohrlochgeophysik, was die Labor- und Felduntersuchungen verbindet.

Die gesammelten Ergebnisse der Feld- und Laborarbeiten werden abschließend in dem geotechnischen Datenbericht zur Flächenvoruntersuchung je Windparkfläche zusammengefasst. Die BAW übernimmt die Erstellung der Berichte in Zusammenarbeit mit den dafür beauftragten Ingenieurbüros.

Datenbereitstellung

Um die gewonnenen Daten der Öffentlichkeit zugänglich zu machen, wurde ein online frei zugängliches Datenportal geschaffen. Das Portal mit dem Namen PINTA stellt in übersichtlicher Form die Ergebnisse der Flächenvoruntersuchung zur Verfügung. Neben Berichten im PDF-Format werden auch die ihnen zugrundeliegenden Rohdaten bereitgestellt. Die BAW hat an der Konzeptionierung des Portals mitgewirkt und unterstützt das BSH auch künftig bei dessen Betrieb. Das Portal ist unter <https://pinta.bsh.de/> zu erreichen.

im Einsatz, während 24 Stunden am Tag im Zweischichtsystem gearbeitet wird (Bild 6). Die über mehrere Monate dauernden Arbeiten müssen für die Qualitätssicherung durchgehend vor Ort überwacht und gesteuert werden. Diese Aufgabe der „Geotechnischen Begleitung“ wird von externen Ingenieurbüros und von der BAW geleistet. Die vor Ort gesammelten Erfahrungen haben sich bisher immer als wertvoll für die spätere Berichterstellung und für die Planung der künftigen Erkundungskampagnen erwiesen.

Die Überwachungstätigkeit an Bord der Schiffe mit internationaler Crew und die Kooperation mit externem Fachpersonal während der gemeinsamen Projektarbeit haben seit Beginn der ersten Erkundungskampagne zu einem regen fachlichen Austausch beigetragen. Darüber hinaus beteiligt sich die BAW an Abstimmungen zwischen dem BSH und Behörden anderer Staaten, z. B. im Rahmen von Workshops mit RVO (Niederlande) und Energinet (Dänemark).

Laboruntersuchungen

Neben den Offshore-Arbeiten stellen die Laborversuche an den gewonnenen Bodenproben den größten und zeitlich aufwendigsten Bestandteil der Erkundungskampagne dar. Das umfangreiche Laborversuchsprogramm wird gemeinsam von Auftragnehmer und Behörde aufgestellt und kontinuierlich fortgeschrieben. Versuchsrandbedingungen zur Festigkeitsbestimmung sowie zum Verformungsverhalten werden unter Berücksichtigung der auf See herrschenden Randbedingungen festgelegt. Das erfordert



Bild 6: Arbeitsschiff bei der Mobilisierung

Normung, Standardisierung

Die laufend fortgeschriebenen BSH-Standards bilden den Rahmen für die Planung, die Errichtung sowie den Betrieb von Offshore-Windparks. Wesentliche technische Inhalte lassen sich den Eurocodes sowie ihren nationalen Anwendernormen (z. B. DIN 1054 „Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau“ sowie DIN 4020 „Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke“) entnehmen. Die Windenergiebranche entwickelt sich durch stetige Innovationen rasch weiter. Eine zusätzliche Anwendernorm wurde nötig, die sich auf spezielle technische Erfordernisse der Planung und Ausführung bezieht. So wurde die internationale Nor-

menreihe DIN 18088 „Tragstrukturen für Windenergieanlagen und Plattformen“ entwickelt und anschließend in die BSH-Standards eingebunden. Zur Auslegung von Korrosionsschutzkonzepten stehen diverse internationale Normen und etablierte Regelwerke zur Verfügung. In Kooperation mit der VGB PowerTech e.V. als Kraftwerksverbandsvertreter wurde der VGB/BAW-Standard erarbeitet, der alle bisher geltenden Anforderungen vereint und an wichtigen Stellen nachschärft, um eine möglichst hohe Korrosionsschutzqualität zu gewährleisten. Dieser mehrteilige Standard ist größtenteils verbindlich für alle Offshore-Windparkprojekte.



Bild 7: Großbelastungs-
rahmen der BAW in
Hamburg

Wehranlage Geesthacht

**Begutachtung und Beratung
zur Instandsetzung**

An der Wehranlage Geesthacht sind nach 60 Jahren Betrieb umfangreiche Instandsetzungsmaßnahmen erforderlich. Die BAW unterstützt die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes im Rahmen der Voruntersuchungen mit ihrer bautechnischen, geotechnischen und wasserbaulichen Expertise.

Bei Geesthacht befindet sich die einzige Staustufe der Elbe auf deutschem Gebiet. Sie wurde von 1957 bis 1960 errichtet, um im Staubereich die Schifffahrtsverhältnisse zu verbessern sowie der Vertiefung durch Sohlerosion und dem Absinken der Wasserstände in Grundwasser und Oberflächengewässern entgegenzuwirken. Die Wehranlage definiert seitdem den Übergang von der deutschen Binnenelbe zu der durch die Tide beeinflussten Unterelbe. Die Anlage wurde als 4-feldrige Sektorwehr mit einer Wehrfeldbreite von jeweils 50 m ausgeführt. Nördlich grenzt ein ca. 60 m langer Erddamm an, der nur bei Hochwasser überströmt wird (Einstiegsbild). Das ursprünglich an dieser Stelle geplante Laufwasserkraftwerk wurde nie realisiert, da im Zuge der Planfeststellung das Stauziel abgesenkt und das Laufwasserkraftwerk damit unwirtschaftlich wurde. Nördlich und südlich der Wehranlage ist jeweils eine Fischaufstiegsanlage (FAA) angeordnet – beide erschließen oberhalb von Geesthacht ein großes Einzugsgebiet.

Nach 60 Jahren Betrieb sind umfangreiche Instandsetzungsmaßnahmen an der Wehranlage erforderlich. Auf Veranlassung des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamtes (WSA) Elbe wurden umfangreiche Voruntersuchungen durchgeführt. Das Wasserstraßen-Neubauamt (WNA) Hannover hat das Projekt 2020 übernommen und wird dabei von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) interdisziplinär unterstützt und beraten.

Bautechnische Aspekte

Ausgangslage

Die Voruntersuchungen ergaben erhebliche Schäden, u. a. durchgehende Trennrisse in den Wehrpfeilern (Bild 1) und plastische Verformungen eines Sektors. Diese entstanden

durch Sandablagerungen in der Sektorkammer, auf die sich der Verschluss beim Absenken einseitig ablegte und durch Torsion verformte.

Eine Besonderheit am Standort ist die hohe Eisfracht der Elbe und die Lage an der Tidegrenze. Aufgrund der zeitweise gegenläufigen Tidedrömung kann es bei hoher Eisfracht zu einem Eisstand kommen, der sich im Extremfall über die gesamte Flussbreite erstreckt. Dadurch entstehen feste Eisbarrieren zwischen den Pfeilern und im Unterwasser der Anlage. Bei abfließender Tide können diese Eisbarrieren mehrere Meter aus dem Wasser herausragen. Für diese setzungserzeugenden Lasten und Bauwerksbeanspruchungen wurde die Wehranlage jedoch nicht bemessen. Die hohe Eisfracht führt auch zu einer großen Beanspruchung der Sektoren. Alle Verschlüsse weisen heute entsprechende Schäden auf, wie Beulen in der Stauhaut und im Abfallboden, die darauf hindeuten, dass die Sektoren nicht für die Eisbeanspruchung dimensioniert wurden.

Schadensaufnahme

Zur Erweiterung der Planungsgrundlagen wurde zunächst eine umfangreiche Bauwerkserkundung mit Taucherunterstützung durchgeführt. Dabei wurden zahlreiche Wasserbausteine gefunden, die aus der Kolk sicherungsstrecke in das Tosbecken eingetragen wurden (Bild 2). Das erklärte auch die gravierenden Schäden durch Hydroabrasion, ein Verschleiß infolge der mit der Strömung transportierten Feststoffe. Die geschädigten Bereiche erstreckten sich über mehrere Quadratmeter. Teilweise war die Endschwelle vollständig zerstört. Örtlich konnte eine Schadenstiefe von bis zu 1,80 m bestimmt werden. Bei einer Sohldicke von 2,50 m bestand daher sofortiger Handlungsbedarf und es wurde deutlich, dass auch hydraulische Defizite an der Anlage vorhanden sind.

Bild 2:
Wasserbausteine aus der Kolk sicherungsstrecke und aus dem Tosbecken



Aufgrund des umfänglichen Schadensbildes musste der Planungsauftrag über die reine Instandsetzung der Wehrfelder hinaus erweitert werden. Die hydraulischen Bedingungen an der Wehranlage sollten geklärt und Möglichkeiten zur Verbesserung der hydraulischen Wirksamkeit des Tosbeckens erarbeitet werden. Außerdem waren erhebliche Schäden an der Uferwand und den Spundwänden des Fischpasses vorhanden, sodass diese in die Planung aufgenommen wurden. Diese erste Baumaßnahme wurde als „Uferwand Süd und Hauptzulauf“ ausgeschrieben.

Rissbewegung installiert. Die Messwerte werden über einen BAW-seitigen Webservice für den Betreiber online zur Verfügung gestellt. Obwohl der Riss im Winter zusätzlich durch Frost beansprucht wird, zeigte sich keine Tendenz, die eine Zunahme erwarten lässt. Der Riss öffnet und schließt sich entsprechend den jahreszeitlichen Schwankungen um etwa 1 mm (Bild 3).

Neben den Schäden an der Wehranlage wurde in dem nördlich angrenzenden überströmbaren Damm zufällig ein Schadensfall durch Materialaustrag festgestellt. Aufgrund eines drohenden Dammbruchs wurde der Damm teilweise wiederaufgebaut und gesichert. Dabei mussten die fünf Überlaufrinnen im Dammkörper überbaut werden.

Um die Entwicklung des Trennrisses mit einer Rissweite von 5 mm im Wehrpfeiler 4 besser beurteilen zu können, wurde Ende 2017 ein Messsystem zur Überwachung der



Bild 1:
Wehrpfeiler:
Trennriss und
Eisbeanspruchung

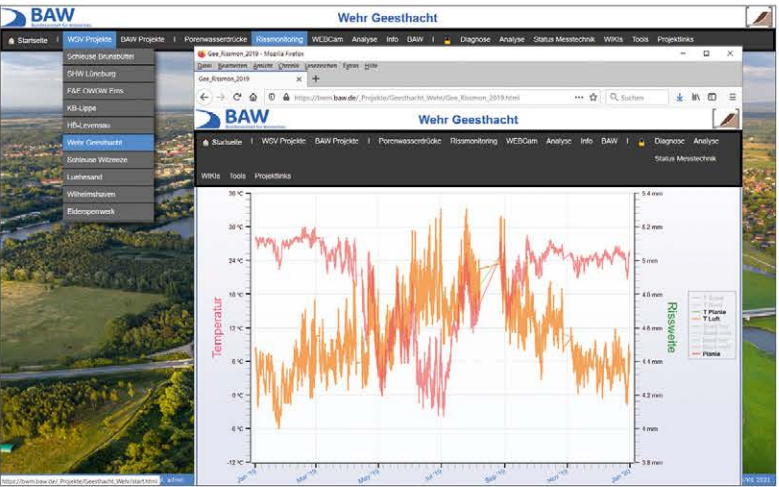


Bild 3: Screenshot interner Webservice Geo-Messtechnik, hier: Darstellung der Daten

„Die Wehranlage definiert den Übergang von der deutschen Binnenelbe zu der durch die Tide beeinflussten Unterelbe.“



Bild 4: Baugrunderkundung im Unterwasser; die Tide erfordert den Einsatz eines Hubpontons

Möglichkeiten zur Beseitigung der Schäden und Defizite

Nachfolgend sind die schwerwiegendsten Schäden und die Möglichkeiten für ihre Beseitigung zusammengestellt:

- **Trennrisse in den Wehrpfeilern:** Herstellung einer robusten und für späten Zwang aus Temperatur und Boden-Bauwerk-Interaktion bemessenen Stahlbetonvorsatzschale. Dabei müssen die geänderten Randbedingungen und die baulichen Veränderungen berücksichtigt werden. Eine genaue Erfassung des Baugrunds ist hierfür wesentlich.
- **Hydroabrasionsschäden im Tosbecken und an den Wehrpfeilern:** Herstellung einer ausreichenden Energieumwandlung durch ein tieferes und längeres Tosbecken sowie eine Anpassung der Kolsicherungsstrecke. Weiterhin sind zwingend Inspektionsmöglichkeiten für Sohle und Wände zu schaffen.
- **Plastisch verformter Sektor:** Herstellung neuer Verschlüsse unter Berücksichtigung der besonderen Randbedingungen der Anlage. Um Störungen beim Ablegen der Sektoren zu erkennen, ist die Installation geeigneter Messinstrumente zur Überwachung des Gleichlaufs erforderlich.
- **Sandeintrag in die Sektorkammern mit Folgeschäden:** Herstellung eines funktionsfähigen Sandfanges im Bereich des Hauptzulaufs, um den Sandeintrag zu minimieren.

Geotechnische Aspekte

Geologie und Grundwasserverhältnisse

Für eine sichere, dauerhafte und wirtschaftliche Dimensionierung sowie die Wahl der geeigneten Herstellverfahren wird immer ein geotechnisches Gutachten benötigt. Ziel

ist es, den geologischen Aufbau und die Grundwasserverhältnisse ans Licht zu bringen. Im Rahmen einer Baugrunderkundung erfolgten Bohrungen mit durchgehender Gewinnung von Kernen sowie Spitzendrucksondierungen zur Beurteilung der Festigkeiten bis in Tiefen von etwa -40 m NHN (Bild 4). Die Untersuchung der Proben erfolgte im bodenmechanischen Labor in Hamburg. Zuoberst stehen mitteldichte Sande an, gefolgt von einer Wechsellagerung aus Sanden, Kiesen und Schluffen, in die z. T. Steine und Braunkohle eingelagert sind. Diese Schicht trennt zwei Grundwasserstockwerke, kann jedoch nicht als undurchlässig angesehen werden. In größerer Tiefe folgen dann dicht bis sehr dicht gelagerte Feinsande, z. T. Grobschluffe, mit unterschiedlichen Einlagerungen. Zur Beobachtung der Grundwasserstände wurden Messstellen in den zwei Grundwasserstockwerken unterhalb und im Umfeld des Bauwerks angeordnet. Hierfür wurde ein adaptives Messsystem aufgebaut (Bild 5), welches die Daten qualitätsgesichert und tagesaktuell über einen BAW-Webservice zur Verfügung stellt. Der Zweck ist, gesicherte Grundwasserstände und -drücke für die Planungsphase zu ermitteln und diese auch während der Bauphase zu überwachen. Diese Arbeiten werden voraussichtlich 2022 abgeschlossen sein, sodass auf dieser Grundlage das Gutachten für die Grundinstandsetzung der Wehranlage erstellt werden kann.

Für die vorgezogene „Uferwand Süd und Hauptzulauf“ wurde bereits im Januar 2019 ein Teilgutachten erstellt. Parallel erfolgte eine fachtechnische Beratung zu diversen Fragestellungen, wie z. B. Sackungen infolge von Spundwandschäden durch Hydroabrasion. Des Weiteren wurden Hinweise zur Durchführung von Pfahlprobebelastungen für die erforderliche Rück- und Auftriebsverankerung gegeben. Die Baumaßnahme wurde 2021 durch das WNA Hannover vergeben, sodass die Arbeiten Ende 2021 starten konnten. In diesem Zusammenhang ist ein baubegleitendes Monitoring der Baugrunderkundung geplant, bei

dem Daten für die Erschütterungsprognose der späteren Grundinstandsetzung gesammelt werden.

Wechselwirkung von Bauwerk und Baugrund

Aktuell wird die Vergabe der Planungsleistungen für die Grundinstandsetzung der Wehrfelder vorbereitet. Die Herausforderung liegt dabei in der Wechselwirkung von alten und neuen Bauwerksteilen sowie der Interaktion mit dem Baugrund. Dies resultiert vor allem aus den veränderten Bauwerkssteifigkeiten, der geänderten Belastungssituation und den dadurch entstehenden Zwängungen. In Abstimmung mit der Bautechnik wird hierfür ein dreidimensionales Finite-Elemente-Modell mit der Software PLAXIS erstellt, das planungs- und baubegleitend fortgeschrieben werden soll. Es berücksichtigt die geplante Fugensituation im Bauwerk sowie aktualisierte Lastansätze, beispielsweise die Eigen- und Verkehrslasten der sich auf die Wehrpfeiler stützenden Straßenbrücke, die in Zukunft um zwei Fahrstreifen erweitert werden soll. Das Modell erlaubt es auch, die Zusatzbeanspruchungen aus Eisbarrieren zu untersuchen.

Neben den technischen Fragen erfolgt die fachliche Beratung zur HOAI-Vergabe der Planungsleistungen. Aufgrund der komplexen Fragestellungen ist neben der allgemeinen Tragwerksplanung die Vergabe eines möglichst vollständigen Leistungsbildes im Bereich der geotechnischen Fachplanung vorgesehen. Dies soll der klaren Abgrenzung der Planungsleistungen zu denen des WNA sowie der BAW als geotechnischer Sachverständiger dienen und mögliche Nachträge verhindern.

Im Zuge der laufenden Beratung wurde die BAW im Jahr 2019 hinzugezogen, als das WSA den Schadensfall an dem überströmbaren Damm zu bewältigen hatte. Die Gefährdungseinschätzung und die Durchführung der Sofortmaßnahmen erfolgten durch das WSA, das vor Ort unterstützt wurde. So war es möglich, die Gefahr eines Dammbruchs innerhalb eines Wochenendes abzuwenden und die Auswirkung auf die Schifffahrt zu minimieren. Im Nachgang folgten Empfehlungen für eine winterfeste Abdeckung des Dammes, der Entwurf eines Monitorings für Porenwasserdrücke innerhalb des nun gestörten Dammkörpers und eine Kameraüberwachung des Dammzustands. Das Porenwasserdruckmessnetz und die optische Überwachung wurden in das Messsystem und den BAW-Webservice integriert.

Hydraulische Aspekte

Wechselwirkung von Strömung und Sohle

Aus hydraulischer Sicht weist die Wehranlage besondere Randbedingungen auf. So führen Ebbe und Flut im Unterwasser der Wehranlage zu Wasserstandsschwankungen von etwa 3,5 m. Gerade die Tideniedrigwasserstände bestimmen dabei maßgeblich die Lagestabilität des Wechselsprungs und die Energiedissipation im Tosbecken. Außerdem weist die Elbe aufgrund der anstehenden überwiegend eng gestuften Sande in der Gewässersohle eine



Bild 5: Beispiel Geo-Messtechnik: Loggerkästen der einzelnen Messstellen an den Pfeilern

hohe natürliche Sohldynamik auf. Bereits während der Bauzeit hatten sich große Kolke unterhalb der Wehranlage gebildet. Wenige Jahre nach der Inbetriebnahme wurde die 40 m lange Kolsicherungsstrecke durch die Kolke angegriffen, sodass die die Standsicherheit der Wehranlage durch rückschreitende Erosion gefährdet war. Bis heute weist der Kolk eine hohe Dynamik auf und erreicht Tiefen, die bis zu 14 m unter dem mittleren Tideniedrigwasser liegen. Die Peilungen zeigen, dass sich der Kolk tendenziell bei Hochwasser durch den Sedimenteintrag von oberstrom auffüllt und sich bei Niedrig- bis Mittelwasser wieder vertieft. Zudem ist die Wehranlage ganzjährig in Betrieb, da das Laufwasserkraftwerk nicht realisiert wurde. Infolge von Unterhaltungsmaßnahmen und Bauwerksinspektionen gibt es lange Zeiträume, in denen nur drei Wehrfelder, teilweise sogar nur zwei Wehrfelder zur Verfügung stehen, mit der Folge einer erhöhten hydraulischen Belastung des Tosbeckens und der anschließenden Kolsicherungsstrecke.

Kombination verschiedener Modellarten

Ein vertieftes Prozessverständnis der Kolkentwicklung ist wichtig, da die geplante Kolsicherungsstrecke bis in den Kolk reichen wird und der Übergang so gestaltet werden muss, dass dieser lagestabil ist. Hierzu wurde ein Ausschnitt der Wehranlage im Maßstab 1:20 in einer Versuchsrinne aufgebaut.

Bei alluvialen Sedimenten, wie die der Elbe, ist eine maßstabsgerechte Skalierung nicht möglich, da sich durch eine Verkleinerung der Korngröße die physikalischen Eigenschaften der Sedimente verändern und zunehmend kohäsive Kräfte den Zusammenhalt des Gefüges bestimmen. Aus diesem Grund wurde ein Polystyrolgranulat mit einer geringeren Dichte verwendet. Ein eigens für diese Untersuchung entwickeltes photogrammetrisches Messsystem zeichnete die Kontur der Kolkentwicklung während der Versuchsdauer stetig und berührungslos auf. Der Tideeinfluss wurde über eine zeitabhängig gesteuerte Klappe simuliert.

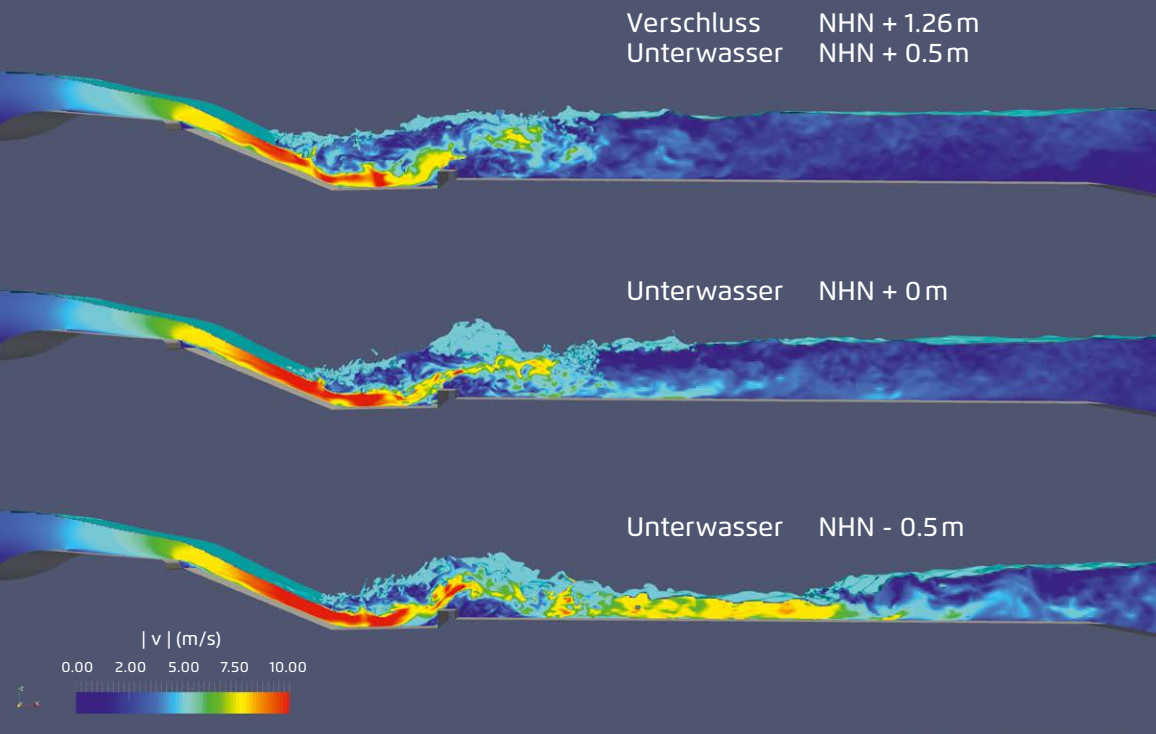


Bild 6:
Numerische Simulation
des Istzustandes:
Geschwindigkeitsverteilung
im Tosbecken in
Abhängigkeit vom
Unterwasserstand

Numerische Simulationen mit der Software OpenFOAM® dienten dazu, erste Erkenntnisse über die kritischsten Zustände der Wehranlage zu gewinnen, da nicht immer der maximale Abfluss für die Dimensionierung des Tosbeckens maßgebend ist (Bild 6). Mit Hilfe numerischer Voruntersuchungen wurden im Weiteren verschiedene Geometrien betrachtet und bewertet. Schließlich wurden für das Labormodell die Varianten ausgewählt, die aus hydraulischer Sicht zielführend und aus bautechnischer Sicht realisierbar sind (Bild 7). Zwar konnte durch keine der untersuchten Varianten eine Einkolkung verhindert werden, allerdings ergab sich im Vergleich, dass die Größe des Kolks bei einem abfallenden Wehrrücken kleiner ist und der Prozess der Kolkentwicklung verlangsamt wird.

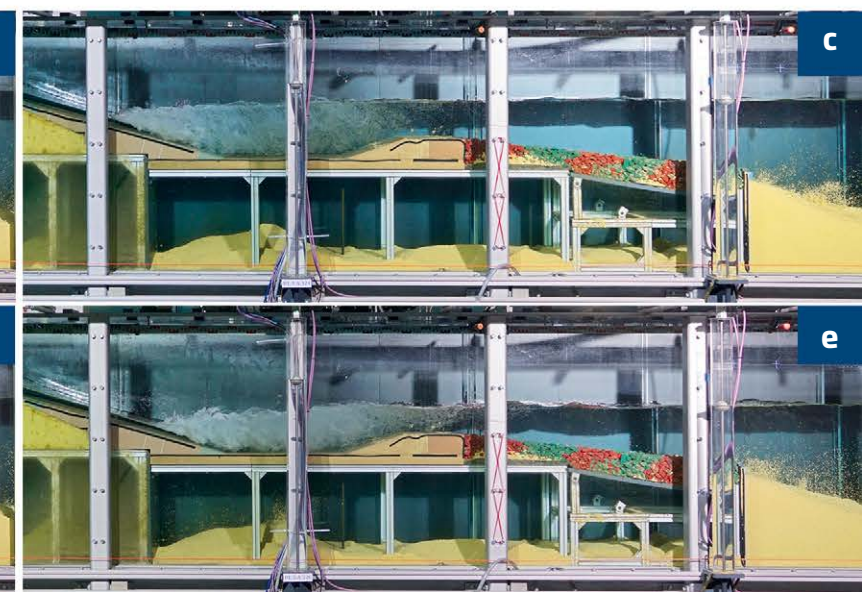
Strömungssituation während der Bauzeit

Da während der Instandsetzung das jeweils im Umbau befindliche Wehrfeld nicht zur Hochwasserabfuhr zur Verfügung steht und nicht ausgeschlossen werden kann,

dass ein weiteres Wehrfeld durch einen Stör- oder Revisionsfall ausfällt, wurden für die beiden Hochwasserbemessungsfälle numerische Simulationen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass für einen Abfluss von $4450 \text{ m}^3/\text{s}$ zwar ein Aufstau im Dezimeterbereich zu erwarten wäre, die Wasserspiegellagen aber immer noch unterhalb der Hochwasserschutzlinien liegen.

Eine weitere Fragestellung betraf den Einfluss der Baugrubenumschließung auf die Wasserstände bei einem Sturmflutereignis, der ebenfalls numerisch untersucht wurde. Die hydraulische Besonderheit ist dabei, dass es bei der betrachteten Sturmflut von 1976 über einen Zeitraum von sieben Stunden zu einer Strömungsumkehr kam und die Elbe mit etwa $1900 \text{ m}^3/\text{s}$ in Richtung Binnenland strömte. Die Simulationen zeigten aber auch hier, dass der Durchfluss während der Bauphase nur geringfügig eingeschränkt wird und die Wasserspiegellagen die Deichhöhen nicht überschreiten.

Bild 7: Laboruntersuchung für eine Tosbeckenvariante in Abhängigkeit vom Unterwasserstand:
a) NHN + 1.0 m; b) NHN + 0.5 m; c) NHN + 0.0 m; d) NHN - 0.5 m und e) NHN - 1.0 m



Ökologische Aspekte

Durchwanderbarkeit für Fische während und nach der Grundinstandsetzung

Als unterste Wehranlage in der Elbe ist eine gute ökologische Durchgängigkeit in Geesthacht wesentlich für das ökologische Potenzial des gesamten Einzugsgebiets. Das Wehr stellt für aufsteigende Fische ein Wanderhindernis dar, das erst durch die beiden Fischaufstiegsanlagen am Nord- und Südufer überwindbar wird, sodass Fische ihre Laichgebiete, Sommer- und Winterhabitate erreichen können. Für eine möglichst verzögerungsfreie Auffindbarkeit der Aufstiegsanlagen sind die geometrischen und hydraulischen Eigenschaften im Unterwasser des Wehres entscheidend.

Während der Grundinstandsetzung können maximal drei, teilweise nur zwei Wehrfelder beaufschlagt werden. Dadurch verändert sich die Hauptströmung in Lage und Geschwindigkeit. Zudem können Baugrubenumschließungen oder verlängerte Wehrpfeiler das Suchverhalten der Fische quer zur Strömung behindern. Bei Beaufschlagung bereits erneuerter Wehrfelder ändern sich Geschwindigkeiten und Turbulenzeigenschaften aufgrund der Tosbeckenvertiefung und -verlängerung.

Die hydraulischen und geometrischen Veränderungen wurden abgeschätzt und ihre Auswirkungen auf die Auffindbarkeit der Fischaufstiegsanlagen gemeinsam mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) bewertet. Aufgrund der besonderen Randbedingungen in Geesthacht wie Tideeinfluss, Gewässergröße und der speziellen Anordnung der Einstiege der Fischaufstiegsanlagen war hier neben der Beachtung des Standes der Technik auch die Experteneinschätzung beider Behörden erforderlich. Risiken konnten so frühzeitig benannt und Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt werden.

Der Einstieg der südlichen Fischaufstiegsanlage befindet sich etwa 60 m unterstrom der Wehranlage und wird bei höheren Unterwasserständen stark eingestaut. Ein zweiter Einstieg in unmittelbarer Nähe des Wehres würde

die Auffindbarkeit maßgeblich verbessern. BfG und BAW liefern hier Hinweise, die bereits bei der Wehrinstandsetzung planerisch berücksichtigt werden sollen, wie z. B. eine Öffnung im südlichen Wehrpfeiler und zusätzliche Rohrleitungen für den Wasserbedarf des zweiten Einstiegs, um eine spätere Anpassung der südlichen Fischaufstiegsanlage zu ermöglichen.

Wiederherstellung eines Strömungssignals für Fische im Unterwasser der Überlaufschwelle

Infolge der gravierenden Bauwerksschäden musste die südliche Fischaufstiegsanlage bis zum Abschluss der Maßnahme „Uferwand Süd und Hauptzulauf“ stillgelegt werden. Gleichzeitig wurden die Überlaufrinnen an der nördlichen Fischaufstiegsanlage überbaut, die im Unterwasser des überströmten Dammes dauerhaft ein Strömungssignal erzeugten, das aufsteigenden Fischen den Weg zur FAA Nord weisen sollte. Dieses Signal war nach Einschätzung verschiedenster Experten wesentlich für die Auffindbarkeit der FAA Nord. Um eine hinreichende Funktionsfähigkeit zumindest einer der beiden Fischaufstiegsanlagen zu erreichen, war mit hohem Zeitdruck die Funktion der Überlaufrinnen wiederherzustellen. Daraus resultierte in Abstimmung mit allen Beteiligten eine temporäre Lösung in Form von zehn Heberleitungen, die über den Damm geführt wurden (Einstiegsbild).

Ausblick

Die Wehranlage Geesthacht ist ein gutes Beispiel für den Umgang mit der alternden Wasserstraßeninfrastruktur, den gestiegenen ökologischen Anforderungen im Verkehrswasserbau und den interdisziplinären Herausforderungen, die sich aus dem Bauen im Bestand ergeben. Die gutachterlichen Aufgabenstellungen der BAW sind dabei sehr anspruchsvoll und vielfältig. Derzeit ist vorgesehen, eine geschlossene E-AU-Planung über alle vier Felder aufzustellen. Die Grundinstandsetzung soll dann wehrfeldweise unter Aufrechterhaltung des Betriebs aller Anlagenteile der Staustufe (Schleusen, Fischaufstiegsanlagen, Straßenbrücke) erfolgen.

Schwingungen im Stahlwasserbau

**Ermittlung, Vermeidung und Beseitigung
von Schwingungsphänomenen**

Schwingungsprobleme an Stahlwasserbauverschlüssen beschäftigen Betreiber damals wie heute. Die BAW unterstützt die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) in dieser Fragestellung mit einem Forschungs- und Entwicklungsvorhaben. Durch Analysen vor Ort, im Labor und in der Simulation wird ein Beitrag für einen störungsfreien und sicheren Betrieb geleistet.



Bild 1: Wehrwalze Kolbermoor, Mangfall

Einleitung

Strömungsinduzierte Schwingungen an Verschlüssen von Wehranlagen oder Schleusen können sehr unterschiedliche Ursachen haben und einzelne Teile oder den gesamten Verschluss betreffen. Die Auswirkungen reichen von starker Geräuschentwicklung über betriebliche Einschränkungen bis zur vollständigen Zerstörung. Die Schwingungsprobleme betreffen viele Anlagen der WSV, unabhängig vom Alter und Zustand der Bauwerke. Sowohl die Konstruktion schwingungsfreier Verschlüsse als auch die Entwicklung von Abhilfemaßnahmen bei akuten Schwingungserscheinungen verlangen eine tiefgehende Kenntnis der Thematik. Deshalb betrachtet die BAW das Thema von verschiedenen Seiten. Seit Beginn des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens im Jahr 2015 wurden zahlreiche Messungen im Bestand durchgeführt, Methoden zur numerischen Modellierung entwickelt und Labormodelle betrieben, um die Erregermechanismen zu verstehen, gefährdete Konstruktionen zu identifizieren und Verbesserungsvorschläge zu erarbeiten.

Auffallend ist, dass unter den betroffenen Anlagen vergleichsweise häufig Walzenwehre zu finden sind: Dieser Verschlussstyp wird seit über 100 Jahren in großer Zahl an den Wasserstraßen, insbesondere an Neckar und Main, eingesetzt und ist exemplarisch für sehr unterschiedliche Erregermechanismen. Die BAW führte 2018 für das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt (WSA) Neckar Messungen am Wehr Heidelberg und 2021 für das WSA Main Messungen

am Wehr Klingenberg durch. In Kooperation mit der Voie Navigable de France erfolgten 2018 zudem Messungen an zwei Wehranlagen an der französischen Mosel. Da sich die dabei gewonnenen Erkenntnisse auch auf andere, modernere Verschlussstypen übertragen lassen, lohnt es sich, Schwingungsprobleme an Walzenverschlüssen ausführlich zu betrachten.

Schwingungen an historischen Konstruktionen

Mit der Erfindung des Walzenverschlusses im Jahr 1900 konnten Wehre mit erheblich größeren Wehrfeldbreiten realisiert werden. Beim Walzenverschluss kann ein horizontal liegender, ausgesteifter hohler Blechzylinder an seinen Enden auf einer schrägen Ebene nach oben und nach unten „gewälzt“ werden. Der Durchflussquerschnitt wird damit geschlossen bzw. freigegeben. Dieser Verschlussstyp stellte damals ein Novum dar und bot einen deutlichen Vorteil für die Schifffahrt und die Wasserkraftnutzung, blieb jedoch nicht von Schwingungserscheinungen verschont. Viele dieser historischen Stahlwasserbaukonstruktionen sind noch heute in Betrieb. Eine der ersten Walzen, an denen Schwingungen beobachtet wurden, ist die 1905 gebaute Wehrwalze Kolbermoor am Fluss Mangfall (Bild 1). Sie zeichnet sich durch ihren kreisrunden Querschnitt mit großer Schlankheit aus. Dieser erste Walzentyp besaß noch keine Abrisskante, um bei Unterströmung eine definierte Strömungsablösung zu erzielen. Daher bleibt der Ablösepunkt der Strömung nicht an einer Stelle, er fluktuiert auf der gekrümmten Oberfläche der Walze, wodurch

„Neben der statischen Bemessung der Stahlwasserbauverschlüsse muss der konstruktiven Gestaltung ein hoher Stellenwert eingeräumt werden, um Druckschwankungen am Verschlusskörper auszuschließen oder zu minimieren.“

regelmäßig ablösende Wirbel und Druckschwankungen entstehen, die den Verschluss zu Schwingungen anregen können (Bild 2a). Diesen Erregermechanismus kann man auch bei überströmten Verschlüssen beobachten, beispielsweise bei Schlauchwehren, an denen die BAW in den letzten zwei Jahren ebenfalls umfangreiche Untersuchungen durchführte.

Neben der statischen Bemessung der Stahlwasserbauverschlüsse muss der konstruktiven Gestaltung ein hoher Stellenwert eingeräumt werden, um Druckschwankungen am Verschlusskörper auszuschließen oder zu minimieren. In Laboruntersuchungen der Technischen Hochschule Darmstadt wurde der fluktuierende Ablösepunkt bereits 1912 messtechnisch nachgewiesen und die Notwendigkeit einer scharfen Abrisskante erkannt. Dies führte zur Ausbildung des heute bekannten Querschnitts mit einem Stauschnabel. Die Länge des Stauschnabls bestimmt, wann die Walze nach einem Hochwasser zurück in den Abflussquerschnitt gedreht werden kann, ohne dass sich der abgelöste Strahl wieder an den Zylinder anlegt und Schwingungserscheinungen provoziert (Bild 2b).

Ein weiterer Aspekt ist die Lage des Wechselsprungs bei veränderlichem Unterwasserstand. Mit dem Hochrollen der Walze wird die Spaltbreite zwischen Stauschnabel und Wehrsohle und damit die Abflussmenge verändert. Der durch das Stauschild eingeschnürte, mit hoher Geschwindigkeit schießende Wasserstrahl geht auf der Unterwasserseite in strömenden Abfluss mit geringerer Geschwindigkeit über (Wechselsprung). Schwingungen können dann

auftreten, wenn der Wechselsprung durch ansteigende Unterwasserstände in Richtung Oberwasser wandert und auf die noch nicht mit Wasser gefüllte Walze trifft (Bild 2c). Diese Erkenntnisse waren nicht nur für das Walzenwehr von Bedeutung, sondern zeigten auch einen großen Forschungsbedarf für andere Verschlussstypen auf.

Bereits wenige Jahre nach Erfindung des Walzenverschlusses, der in geschlossenem Zustand auf der Wehrsohle aufliegt, wurden zusätzliche Anforderungen formuliert. Eis und Treibgut sollten über den Verschluss abgeführt und eine genauere Regelung des Oberwasserstandes durch eine Überströmbbarkeit ermöglicht werden. Man entwickelte versenkbare Walzen, bei denen eine schleifende Dichtung zwischen Verschlusskörper und Wehrsohle hergestellt werden musste. Schon kurz nach der Inbetriebnahme der ersten Versenkwalzen stellte man fest, dass durch die vorhandene Durchbiegung des Verschlusses und den nicht ausreichenden Dichtungsdruck keine zufriedenstellende Abdichtung hergestellt werden kann. Durch die unzureichende Abdichtung entsteht eine Spaltströmung, die einen Unterdruck zwischen Schwelle und Dichtungsbalken erzeugt. Dieser Unterdruck zieht den Balken in Richtung Wehrschwelle und der Spalt schließt sich. Im Wasserkasten bildet sich folglich ein Überdruck aus, der die Dichtung weiter andrückt. Durch die Rückstellkraft der Feder wird der Balken gelöst und der Spalt öffnet sich wieder. Dadurch beschleunigt sich die Strömung, es entsteht erneut ein Unterdruck und der Vorgang wiederholt sich von vorne. Diese selbsterregten Schwingungen werden in der Literatur auch als Press-Shut-Mechanismus bezeichnet (Bild 2d).

Bild 2:
Erregermechanismen an unterströmten Walzenverschlüssen

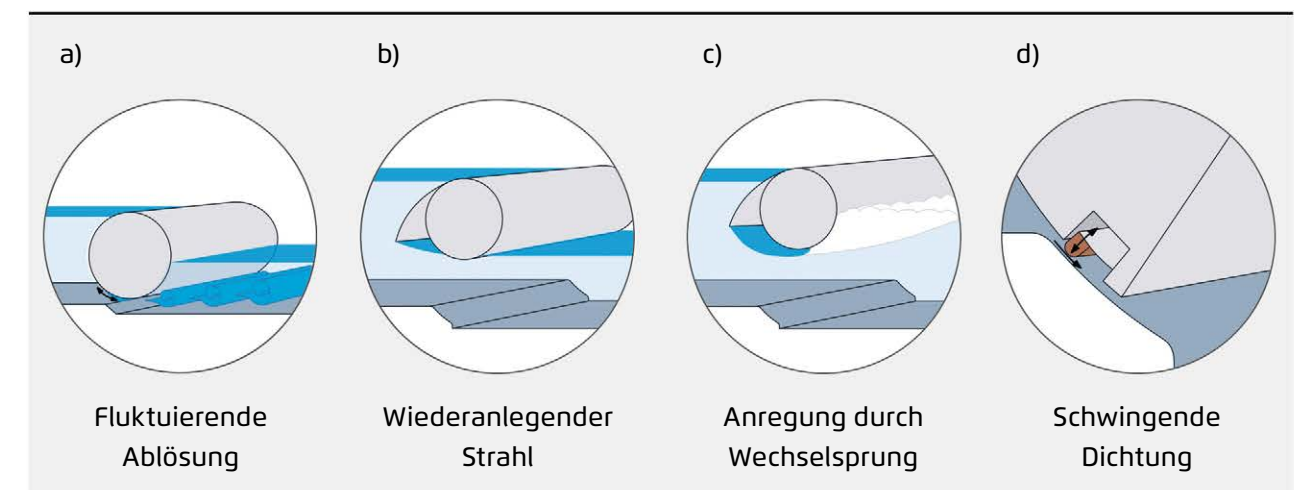
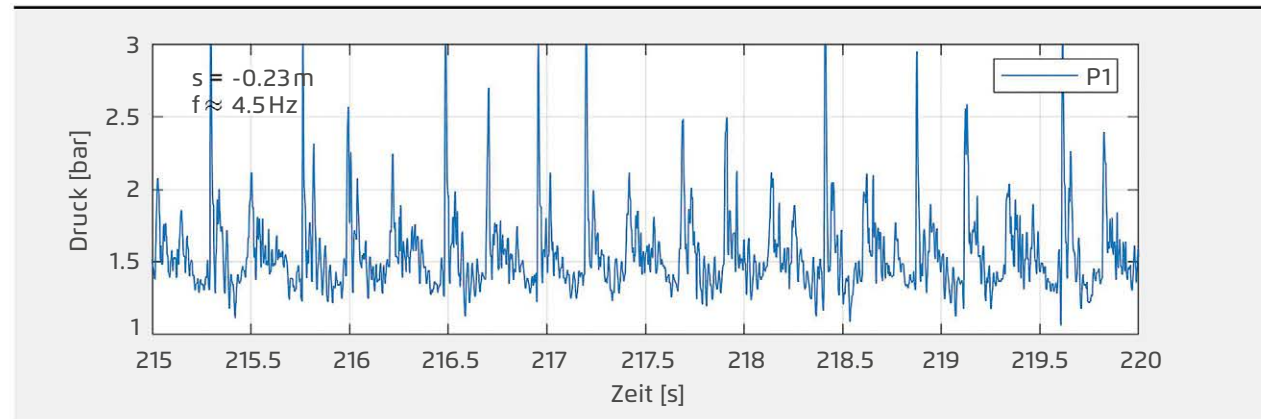


Bild 3:
Gemessene Druckschwankungen im Wasserkasten der Versenkwalze am Wehr Klingenberg am Main



Bei den Messungen der BAW an einer Versenkwalze am Wehr Heidelberg wurde an der Rückseite des Wasserkastens eine Drucksonde angebracht. Dabei konnte der oben beschriebene Erregermechanismus nachgewiesen und Frequenzen zwischen 6 und 7 Hz festgestellt werden. Im Vergleich dazu war die Frequenz an der etwas größeren Versenkwalze am Wehr Klingenberg mit 4,5 Hz etwas niedriger (Bild 3). Bemerkenswert ist dabei, dass der Druck im Wasserkasten um das Zwei- bis Dreifache höher ist als der statische Wasserdruck aus dem Oberwasser. Deutlich erkennbar sind die Druckspitzen, welche durch das schlagartige Schließen der Dichtung entstehen.

Der Press-Shut-Mechanismus konnte auch in einer numerischen Simulation der BAW abgebildet werden, bei der das Federblech als bewegliches Teil im Strömungsfeld modelliert wurde. Bild 4 zeigt die Geschwindigkeitsverteilung in der Spaltströmung und die Druckverteilung im Wasserkasten zu einem Zeitpunkt, als sich die Dichtung in Richtung der Schwelle bewegt. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass der Druck im Wasserkasten, der auf das Federblech wirkt, auf bis zu 60.000 Pa (entsprechend 0,6 bar) ansteigt. Die Fließgeschwindigkeiten in der Spaltströmung erreichen dabei bis zu 10 m/s.

Bei der zweiten Generation der Versenkwalzen wurde die Dichtung mit Hilfe von Gestängen, die mit Federn vorgespannt wurden, gegen die Wehrsohle gedrückt (Bild 5). Die Federn wurden aufgrund der Durchbiegung des Verschlusses unterschiedlich stark vorgespannt. Dabei unterschied man zwischen einer Winter- und Sommereinstellung, um auf temperaturbedingte Verformungen der Walze zu reagieren. Häufig sind diese Federkonstruktionen allerdings nicht richtig eingestellt, sodass kein ausreichender Dichtungsdruck erzeugt wird und durch eine Spaltströmung ebenfalls strömungsinduzierte Schwingungen entstehen, die deutlich hör- und messbar sind. In Argancy an der französischen Mosel konnte die BAW im Rahmen einer Messkampagne Frequenzen von etwa 10 Hz feststellen, die auf Schwingungen der Sohldichtung zurückzuführen waren. Ursache dafür war eine nicht fachgerechte Auslegung und Einstellung der Federkonstruktion, die im Rahmen einer Instandsetzung ausgetauscht wurde.

Diese Beispiele zeigen allerdings, dass die Versenkwalze aufgrund der schwierigen Dichtungssituation im Sohlbereich schon früh zu Problemen führte. Bis heute sind beide Sohldichtungstypen im Einsatz. Die Empfehlungen der BAW zielen daher für den Bestand auf betriebliche

Bild 4:
Numerische Modellierung einer schwingenden Federblechdichtung. Dargestellt ist die Geschwindigkeit $|u|$ in der Spaltströmung und die Druckverteilung p im Wasserkasten

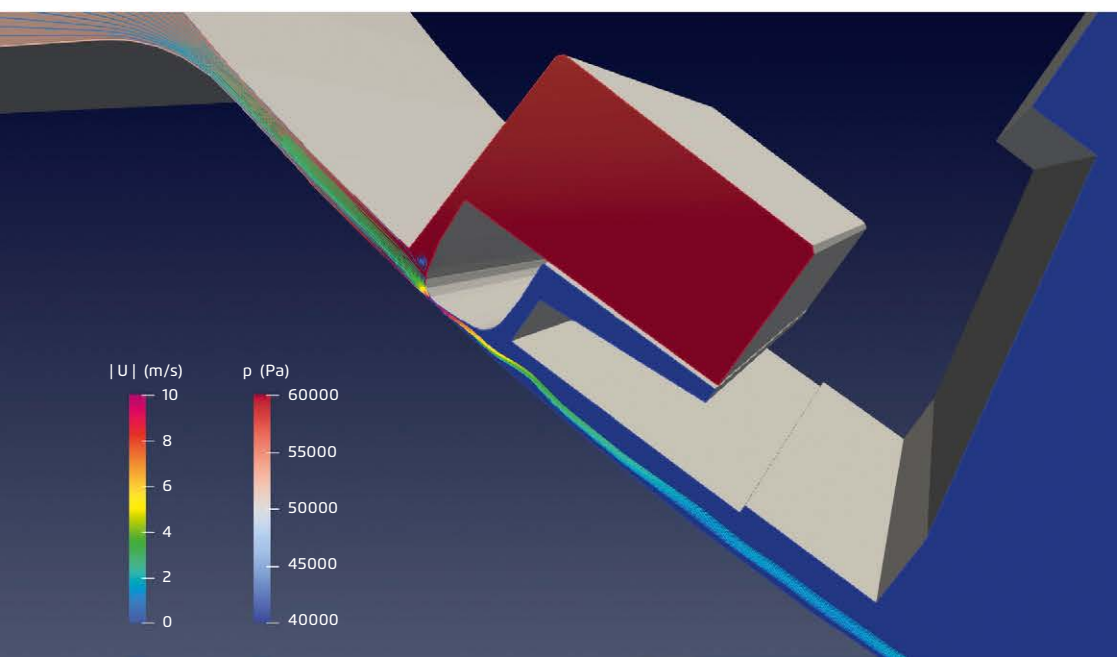


Bild 5:
Versenkwalze mit
Federgestänge



Lösungen, z. B. die Vermeidung von kritischen Öffnungsweiten, bis die Lebensdauer erreicht ist und gegebenenfalls ein Verschlusswechsel in Betracht gezogen werden kann.

Entwicklungen für den Neubau

Bei großen Stauhöhen sollen in Zukunft standardmäßig Drucksegmente mit Aufsatzklappen die Walzenverschlüsse ersetzen, wie beispielsweise in Viereth am Main. Dieser Verschlussstyp besticht bautechnisch durch die eindeutige Lastabtragung in die Wehrpfeiler. Hydraulisch stellt die Aufsatzklappe ein sehr gutes Feinregulierungsorgan dar, während die Hochwasserabfuhr über die angehobenen Drucksegmente erfolgt. Erfahrungen mit neueren Verschlüssen dieser Art zeigen aber, dass auch bei diesem Verschlussstyp Fehler bei der konstruktiven Gestaltung zu Schwingungen führen können.

In-Situ-Messungen

Die Einflüsse problematischer Schwingungen sind auch für Laien sichtbar, hörbar und spürbar. Dabei ist zu Beginn oft unklar, ob ein Teil des Verschlusses oder der Verschluss selbst schwingt, bei welchen Öffnungsweiten und Wasserständen die Schwingungen auftreten. Die Analyse von Schwingungen vor Ort durch In-situ-Messungen und Beobachtungen liefern hier wertvolle Informationen über den möglichen Erregungsmechanismus und die Schwingform. So kann sich beispielsweise bei einem Drucksegment die Frage stellen, ob es sich um eine Rotations- oder eher um eine Biegeschwingung handelt. Die Frequenzen geben Aufschluss über die Ursache der Schwingungen. Dabei gilt: je größer die Frequenz, desto kleiner die Masse und damit das schwingende Bauteil. Bei schwingenden Gummidichtungen liegen die Frequenzen typischerweise im Bereich von 40 bis 50 Hz, bei Verschlussteilen, wie federgelagerten Sohldichtungsträgern, im Bereich von 5 bis 20 Hz und bei Schwingungen des gesamten Verschlusses im Bereich von 1 bis 5 Hz. Das macht sich meist auch im Wellenbild im Oberwasser einer Wehranlage bemerkbar: je größer die Wellenhöhe, desto größer das betroffene Bauteil (Bild 6).

Bild 6: Wellenbild im Oberwasser einer Wehranlage bei einer Dichtungsschwingung (oben), einem schwingenden Sohldichtungsträger (Mitte) und einem schwingenden Verschluss (unten)



In Kooperation mit der Voie Navigable de France wurden beispielsweise an einem Drucksegment mit Aufsatzklappe Schwingungen bei Unterströmung (Bild 6, unten) gemessen und intensive Ursachenforschungen betrieben. Die von der BAW eingesetzte Messtechnik besteht aus

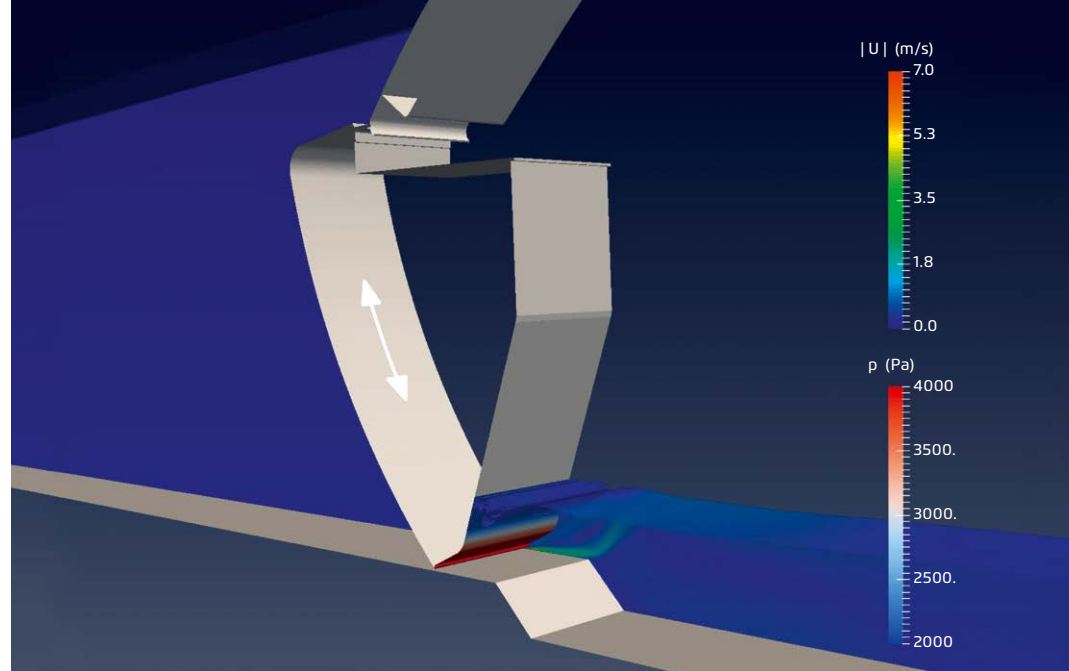


Bild 7:
Wehranlage Liègeot –
numerische Simulation
des unterströmten
Drucksegmentes mit den
Fließgeschwindigkeiten $|U|$
im Strömungsfeld und der
Druckverteilung p an der
Schützunterkante

Beschleunigungs- und Wegaufnehmern sowie frontbündigen Drucksensoren. Mit einer Messfrequenz von 2 kHz können zeitlich hoch aufgelöste Zeitreihen erstellt werden (Bild 8). Die Messtechnik wurde bereits bei einigen Messkampagnen erfolgreich eingesetzt.

Numerische Modellierung

Die Messungen vor Ort liefern zwar Informationen über den Erregermechanismus, die Frequenz und Amplitude der Schwingung, allerdings nur für die Umgebungs- und Abflussbedingungen am jeweiligen Tag der Messkampagne. Die Untersuchung von verschiedenen Abfluss- und Betriebszuständen ist aus logistischen Gründen aufwändig und schwierig zu organisieren. Sie ist aber notwendig, um mögliche Schwingungsprobleme zu identifizieren, die nur unter bestimmten Randbedingungen auftreten. Hier bietet die numerische Simulation die Möglichkeit, den Verschluss bei verschiedenen Abflüssen,

Öffnungsweiten und Unterwasserständen zu untersuchen und die Schwingungsgefährdung zu beurteilen.

Voraussetzung für die Simulation von selbsterregten Schwingungen ist ein Modell, das sowohl die Strömung als auch das bewegte Schütz abbildet. An der BAW wird dafür die Software OpenFOAM® verwendet. Die Kopplung aus Strömung und bewegter Struktur ist rechen-technisch aufwändig, die Rechenzeit lang und die Simulation numerisch nicht immer stabil. Um den Aufwand zu minimieren, muss die Simulation vereinfacht werden. Eine Möglichkeit besteht darin, den Verschluss mit vorgegebener Amplitude und Frequenz zu bewegen und anschließend die auf den Verschluss wirkenden Kräfte auszuwerten. Aus der Kraft- und der Bewegungszeitreihe kann so die geleistete Arbeit berechnet werden. Wird die Arbeit mit der in der Schwingung gespeicherten Energie ins Verhältnis gesetzt, erhält man einen Anfachungsfaktor. Dieser gibt an, ob die Schwingung

gedämpft ist oder angefacht wird und dient als Maß für die Schwingungsgefährdung. Der Anfachungsfaktor kann so für jeden Betriebszustand bestimmt werden.

Diese Methode wurde in der BAW entwickelt und bereits erfolgreich angewandt, u. a. für das WSA Weser zur Beurteilung der Schwingungsgefährdung der Wehranlage Dörverden und für die Voie Navigable de France zur Untersuchung der Schwingungsursachen an der Wehranlage Liègeot an der französischen Mosel. Hier wurden im Rahmen einer Grundinstandsetzung die vorhandenen Verschlüsse durch Drucksegmente mit Aufsatzklappen ersetzt und es traten deutliche Schwingungen bei Unterströmung auf. Die numerischen Simulationen zeigten, dass das Drucksegment bei kleinen Öffnungsweiten zu starken Schwingungen neigt, was auf die Konstruktion und Formgebung des Hohlkastens zurückzuführen ist.

In Bild 7 sind die Simulationsergebnisse für eine Öffnungsweite von etwa 1,7 cm dargestellt. Im Strömungsfeld sind die Fließgeschwindigkeiten und die Druckverteilung auf der Unterseite des Hohlkastens visualisiert. Der fluktuierende Druck regt den Verschluss zu einer radialen Schwingung mit einer Frequenz von etwa 3,5 Hz und einer Amplitude von etwa 0,7 cm an. Beides wurde im Rahmen einer Messkampagne bestimmt und der Simulation als Randbedingung vorgegeben. Bild 8 zeigt auf der linken Seite die Ergebnisse der Messung vor Ort und auf der rechten Seite die Ergebnisse aus der Simulation des entsprechenden Betriebszustandes. Dargestellt ist jeweils die Bewegung des Drucksegmentes sowie der Druck an zwei Messpunkten P1 und P2 unter dem Hohlkasten des Schützes. Dabei ist zu erkennen, dass der Druck während der Aufwärtsbewegung ansteigt und während der Abwärtsbewegung abnimmt. Dadurch wird der Verschluss angefacht und es entsteht eine selbsterregte Schwingung. Bis auf die hochfrequenten Anteile im Drucksignal der Messung ist die Übereinstimmung aus Naturmessung und Numerik sehr gut.

Laboruntersuchungen

Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen an der Wehranlage Dörverden und der Wehranlage Liègeot zeigten, dass der Geometrie des Verschlusses, insbesondere des Hohlkastens und der Verschlussunterkante, besondere Aufmerksamkeit zu schenken ist, um eine schwingungsfreie Konstruktion zu erzielen. Für weitergehende Untersuchungen wurde daher im Labor der BAW ein Versuchsstand mit einem schwingfähigen Drucksegment im Maßstab von etwa 1:5 aufgebaut (Bild 9). Der Radius des Segmentes beträgt 1,2 m. Die Geometrie des Hohlkastens und des Abfallbodens kann dabei verändert und die Eigenfrequenz des Verschlusses über die Federsteifigkeit der Blattfedern eingestellt werden. Mit einem Seilzugsensor wird die Bewegung des Schützes und über Drucksensoren mit frontebener Membran die Drücke an der Schützunterseite gemessen. Der Versuchsstand wurde im Laufe des Jahres 2021 in Betrieb genommen und dient neben der Optimierung der Geometrie auch zur weiteren Validierung der numerischen Methode. Ziel ist es, bestehen-



Bild 9: Versuchsaufbau mit schwingendem Drucksegment

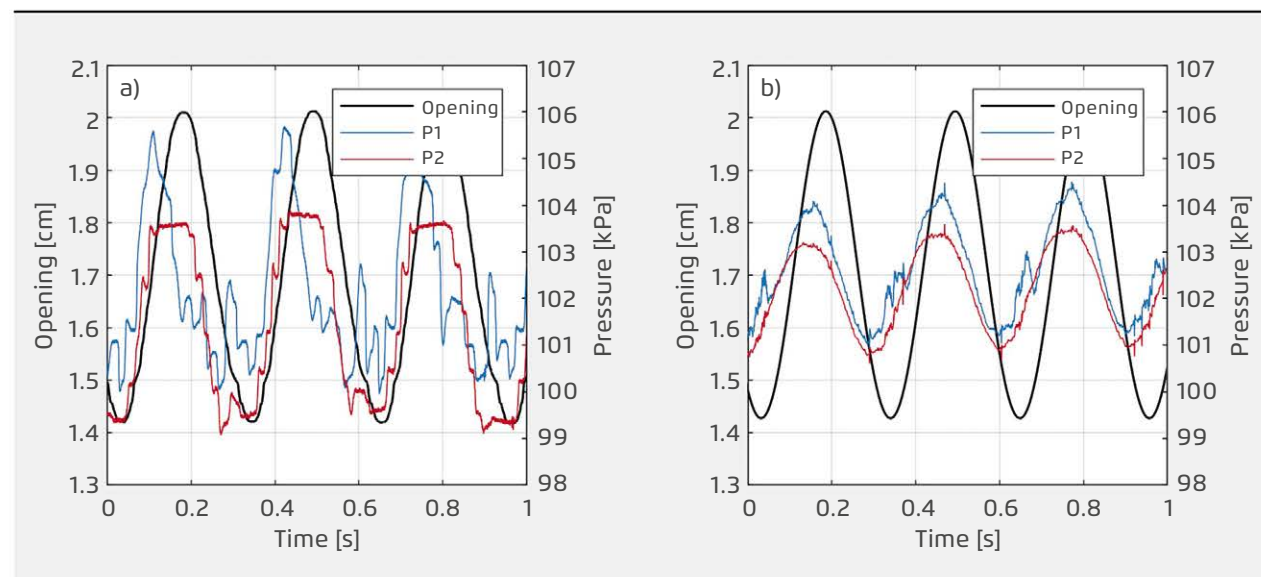
de Konstruktionsempfehlungen zu überprüfen, weiterzuentwickeln und der WSV somit Standards für zukünftige Planungen an die Hand geben zu können.

Fazit

Strömungsinduzierte Schwingungen sind ein altbekanntes, aber immer wiederkehrendes Problem. Sie können zu Störungen im Betrieb, zu frühzeitiger Ermüdung oder im schlimmsten Fall zum Versagen eines Verschlusses führen. Die Entwicklung des Walzenverschlusses zeigt, dass Schwingungsursachen sehr unterschiedlich sein können und einer sorgfältigen Analyse bedürfen, bevor über Verbesserungsmöglichkeiten nachgedacht werden kann. Gerade aber an der Versenkwalze wird deutlich, dass die Sohldichtung ein komplexes Detail des Verschlusses ist, das über Jahrzehnte verändert wurde, ohne dass Schwingungen dadurch gänzlich verhindert werden konnten. Daher sollte zum Ende der Lebensdauer ein Verschlusswechsel ggf. überprüft werden. Das Drucksegment mit Aufsatzklappe stellt hier eine gute Alternative dar, wie die Instandsetzung der Wehranlage Viereth zeigt. Die Automatisierung und Fernüberwachung sowie die häufigere Wasserführung der Wehre infolge zunehmender Kraftwerksabschaltungen erfordern in Zukunft betriebssichere Lösungen. Daher ist abzusehen, dass sich aus einzelnen Beratungen und aktuellen Forschungsaktivitäten eine Daueraufgabe für die BAW entwickeln wird. Ziel muss es sein, einerseits Konstruktionsempfehlungen u. a. für Drucksegmente zu entwickeln, andererseits Abhilfemaßnahmen für alte Verschlüsse zu schaffen, die nach wie vor in großer Anzahl vorhanden sind und noch über Jahrzehnte weiter betrieben werden müssen.

Bild 8:

Wehranlage Liègeot – Öffnungsweite des Drucksegmentes und Drücke an den Messpunkten P1 und P2 an der Schützunterkante

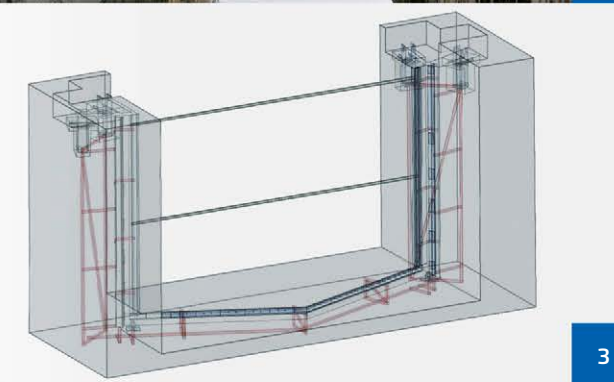




1



2



3

FuE-Projekt Instandsetzung von Schleusenanlagen unter laufendem Betrieb (IuB)

Für ein funktionierendes Wasserstraßennetz in Deutschland ist die Verfügbarkeit von Schleusenanlagen unerlässlich. Bedingt durch ein hohes Alter und Abnutzungen ist für viele dieser Bauwerke mit einem Instandsetzungsbedarf zu rechnen. Im Hinblick auf eine weitere mittel- und langfristige Nutzung besteht daher teilweise ein erheblicher Handlungsbedarf.

Die Instandsetzung einer Schleuse bedingt bislang eine Außerbetriebnahme des Bauwerks von durchschnittlich fünf Jahren. Eine besondere Herausforderung stellen Schleusenkammern dar, bei denen während einer solchen konventionellen Instandsetzung außer Betrieb (IaB) nicht auf eine zweite Kammer oder eine alternative Wasserstraße ausgewichen werden kann. Lange Außerbetriebnahmen und die damit einhergehende Unterbrechung der Schifffahrt stoßen bei den Nutzern auf wenig Akzeptanz und bergen das Risiko einer dauerhaften Verlagerung insbesondere des Güterverkehrs auf andere Verkehrswege. Als Alternative bleibt bislang, sofern die Platzverhältnisse dies zulassen, nur der Ersatzneubau mit hohem Kosten- und Zeitaufwand. Um die vorgenannten Probleme und Risiken einzuschränken bzw. zu vermeiden, stellt die Instandsetzung unter Betrieb (IuB), also eine Instandsetzung ohne komplette Unterbrechung der Schifffahrt für längere Zeiträume, zumindest fallweise, eine Alternative zu IaB und Ersatzneubau mit großem Potenzial dar.

Ziel von IuB ist neben der grundsätzlichen Aufrechterhaltung des Betriebs während der Instandsetzung die langfristige Weiternutzung der Anlage. Damit muss eine IuB-Maßnahme grundsätzlich den gleichen verkehrswasserbauspezifischen Anforderungen hinsichtlich Dauerhaftigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Standsicherheit wie IaB-Maßnahmen nach ZTV-W LB 219 entsprechen. Zudem sind bei IuB spezielle Randbedingungen zur Gewährleistung der Schifffahrt während der Maßnahme zu beachten. Besonders zu berücksichtigen sind projektspezifisch festzulegende Sperrzeiten, außerhalb derer die Schleusenkammer ohne Einschränkungen und Risiken für die Schifffahrt zur Verfügung stehen muss.

Zu den Zielsetzungen des Projekts gehört neben der Sammlung und Aufbereitung weltweit vorhandener Erfahrungen mit IuB-Maßnahmen die Entwicklung von IuB-Lösungsansätzen für Schleusenanlagen. Die bislang vorliegenden Erkenntnisse und Ergebnisse wurden im Jahr 2021 systematisiert und in Form einer umfangreichen Informationssammlung, dem sog. Modulbaukasten, für die WSV und deren beauftragte Planer bereitgestellt (<https://izw.baw.de/wsv/planen-bauen/instandsetzung-unter-betrieb>).

Zum Nachweis der tatsächlichen, baupraktischen Machbarkeit und zur Erfassung von Leistungsdaten ist eine

bauliche Umsetzung der entwickelten Lösungsansätze unverzichtbar. Realitätsnahe Bauteilversuche (BTV) bieten die Möglichkeit, die Durchführbarkeit dieser Lösungsansätze in der Praxis nachzuweisen und Prozesse zu optimieren, um diese anschließend als Handlungsempfehlung an die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) weitergeben zu können. Beispielsweise konnte im Rahmen eines Bauteilversuchs an der Schleuse Feudenheim bereits die Realisierbarkeit einer bewehrten Vorsatzschale mit schnell erhärtendem Spritzbeton dargestellt werden (Bild 1). Vor diesem Hintergrund plant die BAW derzeit zusammen mit dem Wasserstraßen-Neubauamt Heidelberg (WNA HD) und dem Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB) des KIT umfassende BTV an der rechten, derzeit außer Betrieb befindlichen Kammer der Schleusanlage Oberesslingen (BTV OES) am Neckar (Bild 2). Für die BTV OES wurden tägliche Bauzeiten von 12 h im Wechsel mit simulierten Schifffahrtszeiten von ebenfalls 12 h festgelegt. Während den Schifffahrtszeiten ist die Einhaltung eines Lichtraumprofils von 11,80 m an der Schleuse mit ansonsten 12 m nutzbarer Breite in der Schleuse sicherzustellen. Der Schifffahrtsbetrieb in der Nachbarkammer der Doppelschleuse darf zu keinem Zeitpunkt beeinträchtigt werden. Angestrebt wird eine von Kraneinsätzen auf der Planie unabhängige Umsetzung der Maßnahmen von Pontons aus, weil Einschränkungen hinsichtlich Lasteinleitungen über die Planie oder die Hinterfüllung an nicht wenigen Schleusen der WSV anzutreffen sind. Unter diesen und weiteren Randbedingungen sind folgende Maßnahmen vorgesehen:

- Temporäre Trockenlegung: Im Unterhaupt der Schleusenkammer wird ein mobiler Revisionsverschluss eingesetzt. Dieser soll nicht nur eine kurzfristige, komplette Trockenlegung der Schleusenkammer

- 1: IuB an der Schleuse Feudenheim
- 2: Rechte Kammer Schleuse Oberesslingen
- 3: Rahmenlösung (Quelle: Machbarkeitsstudien IRS, 2019)

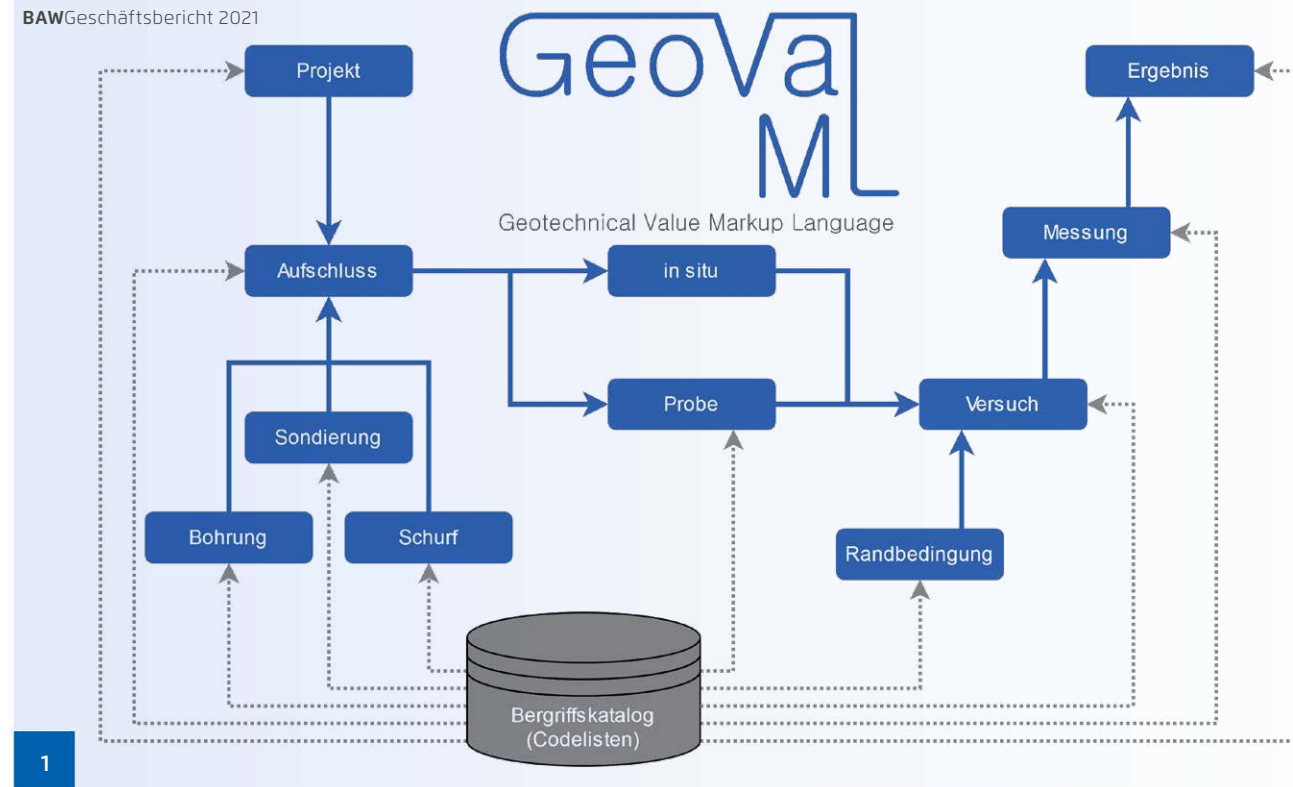
ermöglichen, sondern aus objektspezifischen Gründen (kein Untertor vorhanden) auch für den höchsten Wasserstand ausgebildet sein, der für Arbeiten von schwimmendem Gerät innerhalb der Schleusenkammer aus notwendig wird.

- Betonabtrag: Über einen Leistungsvergleich der beiden Varianten Hochdruckwasserstrahlen und Fräsen soll eine objektspezifische Vorzugsvariante ausgewählt werden.
- Reprofilierung: Über die gesamte Kammerwandhöhe werden Vorsatzschalen aus bewehrtem Ortbeton, Spundwänden mit Hinterfüllbeton, Fertigteilen mit Hinterfüllbeton sowie bewehrtem Spritzbeton hergestellt. Die beiden letztgenannten Varianten werden zusätzlich mit Hilfe eines am Ponton befestigten Arbeitsraums ohne Trockenlegung oder Wasserspiegelabsenkung nur zwischen Planie und 1,0 m unter Unterwasserstand durchgeführt.

In einer zweiten Phase der BTV OES ist eine sog. Rahmenlösung zum Stemmtoraustausch am Unterhaupt vorgesehen. Dabei handelt es sich um einen vorgefertigten Stahlrahmen, der als Schablone für die Einbauteile eines Stemmtors dient und zeitaufwändige Justierungsmaßnahmen überflüssig machen soll (Bild 3). Der Rahmen wird mittels Zweitbeton in das Bauwerk integriert. Innerhalb von max. 4 Wochen soll damit ein kompletter Stemmtoraustausch ermöglicht werden.

Die BTV OES beinhalten nicht nur alternative technische Lösungen. Auch vergabe- und vertragsrechtlich wird hier ein innovativer Weg verfolgt. Durch die Abwicklung über ein sogenanntes Partnering-Paket-Modell werden Planung und Bauausführung im Paket vergeben, womit möglichst frühzeitig eine enge Kooperation beider Bereiche und die Nutzung des Wissens der bauausführenden Firmen angestrebt werden soll. Durch eine partnerschaftliche Zusammenarbeit zwischen Auftragnehmer und Auftraggeber sollen zudem Innovationspotenziale in einer frühen Phase erkannt und in die fortschreitenden Planungen aufgenommen werden.

Neben der Weiterentwicklung bereits im Modulbaukasten abgebildeter Lösungsansätze und der baupraktischen Umsetzung als besonders vorteilhaft identifizierter Instandsetzungsverfahren sollen im Rahmen des FuE-Projekts IuB auch Lösungsansätze im Hinblick auf die Verlängerung von Schleusen bzw. den Ersatzneubau von Häuptern unter Betrieb erarbeitet werden.



GeoValML – Das interoperable Austauschformat für boden- und felsmechanische Kennwerte

Im Rahmen der Forschungsinitiative mFUND fördert das heutige Bundesministerium für Digitales und Verkehr seit 2016 Forschungs- und Entwicklungsprojekte rund um digitale, datenbasierte Anwendungen für die Mobilität 4.0. Neben der finanziellen Förderung unterstützt der mFUND mit verschiedenen Veranstaltungsformaten die Vernetzung zwischen Akteuren aus Politik, Wirtschaft und Forschung. Im Herbst 2017 stellte die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) den Antrag auf Förderung für das Projekt „GeoValML – Das interoperable Austauschformat für boden- und felsmechanische Kennwerte – Aufbau und Betrieb einer geotechnischen Kennwertdatenbank“.

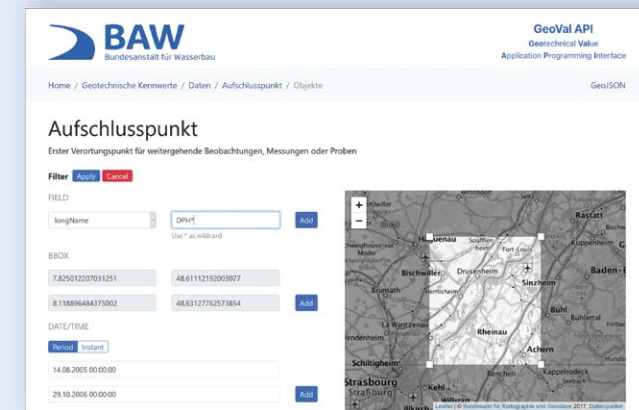
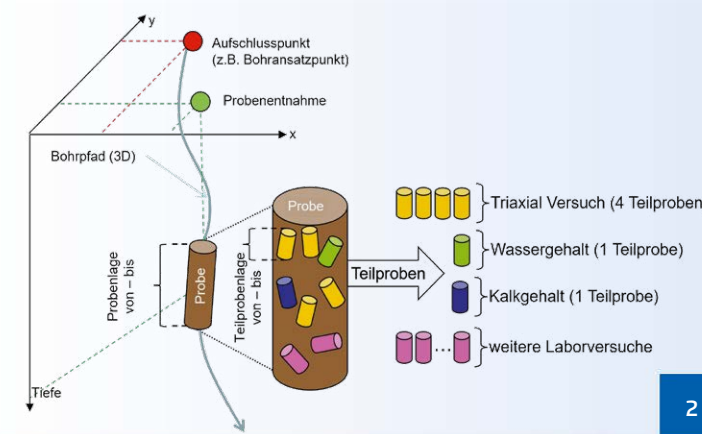
Projekt- und aufgabenbezogene Untersuchungen der bodenmechanischen und felsmechanischen Eigenschaften von Boden- und Felsproben sind mit erheblichem zeitlichem und finanziellem Aufwand verbunden. Die Nutzung der gewonnenen Erkenntnisse für andere Aufgabenstellungen ist ein volks- und betriebswirtschaftliches Gebot. Mit der freien Bereitstellung einer Datenbank für die systematische Sammlung von Versuchsergebnissen wird eine wichtige Voraussetzung für die Nutzung des angesammelten Wissens geschaffen. Eine große Anzahl von Behörden (Bund, Land, Kommune) und Universitäten unterhalten Datenbanksysteme oder Datensammlungen zu geotechnischen Versuchen. Dieser „Datenschatz“ liegt praktisch dispers vor. Ziel ist die Aggregation

dieser Daten in einer gemeinsamen Datenstruktur sowie die Verknüpfung von Datenbanken mit vergleichbaren Fragestellungen. Für die wertige Nutzung einer solchen Datenstruktur müssen grundlegende Randbedingungen eingehalten werden, wie zum Beispiel die Bewertungsfähigkeit der Kennwerte sowie die Herkunftsangaben (Quelldatenbank, Sammlung).

Der Vergleich oder die Bewertung einzelner geotechnischer Kennwerte setzt voraus, dass Informationen über dessen Gewinnung, die angewandte Methode, die verwendete Versuchstechnik sowie die Herkunft der Rohdaten bzw. die Rohdaten selbst im System hinterlegt werden können. Der Aufbau des Systems sollte modular und erweiterungsfähig gestaltet werden.

Die Kernziele des Projektes GeoValML waren:

- Entwicklung eines interoperablen Austauschformats für boden- und felsmechanische Kennwerte,
- Aufbau und Betrieb einer geotechnischen Kennwertdatenbank,
- Erweiterungsfähigkeit des Austauschformates und der Datenbank,
- Überführung von Altdaten,
- maschinenlesbare Bereitstellung der Daten,
- Unterstützung der Open-Access-Strategie bzw. des FAIR-Prinzips.



- 1: Konzeptueller Aufbau von GeoValML
- 2: 3D-Lage und Verläufe von Bohrungen, Proben und Teilproben
- 3: Räumliche und textuelle Suche von Daten – Schnittstelle OGC API Features

- Aufträge und Unteraufträge sowie deren Beziehung zu Infrastrukturobjekten (z. B. Bundeswasserstraßen),
- Ansatzpunkte von Bohrungen, Sondierungen, Schürfen, Proben und Teilproben,
- 3D-Lage und Verläufe von Bohrungen, Sondierungen und Proben bzw. Teilproben (Bild 2),
- In Situ Messlokalationen,
- Versuche/Methoden sowie deren Randbedingungen,
- Beobachtungen, Messungen und Messergebnisse.

Ansatzpunkte, Bohrfade, Proben, Teilproben, und Messergebnisse sind räumlich verortet. Zusätzlich zur Ablage von Daten in der Datenbank besteht die Möglichkeit, Dokumente über die Angabe einer URL oder eines Dateipfades zu verlinken.

Die GeoVal-Datenbank wurde für die Fachdomäne Geotechnik und hier explizit für die Speicherung von geotechnischen Kennwerten optimiert. Der Aufbau der Datenbank erfolgte sehr allgemein und ist sehr einfach hinsichtlich der Versuche, Methoden und Messungen erweiterbar.

Durch das Konzept der Codelisten (Schlüssellisten) und dem dazugehörigen Datenmodell genügt es zur Implementierung eines neuen Versuchs oder einer neuen Methode die entsprechenden Codelisteneinträge zu ergänzen. Zur Veröffentlichung der Daten wird ein OGC-konformer Web Feature Service (Open Geospatial Consortium: gemeinnützige Organisation, die sich zum Ziel gesetzt hat, die Entwicklung von raumbezogener Informationsverarbeitung auf Basis allgemeingültiger Standards zum Zweck der Interoperabilität festzulegen) der neuesten Generation eingesetzt (OGC API – Features).

Die Vorteile der neuen Schnittstelle sind:

- Die Vereinfachung des Zugriffs auf verteilte Geodaten,
- einfachere Integrierbarkeit in beliebige Webanwendungen und Prozesse,
- Indizierung über Suchdienste,
- einfaches Sichten der zur Verfügung gestellten Daten über eine Webseite (Bild 3).

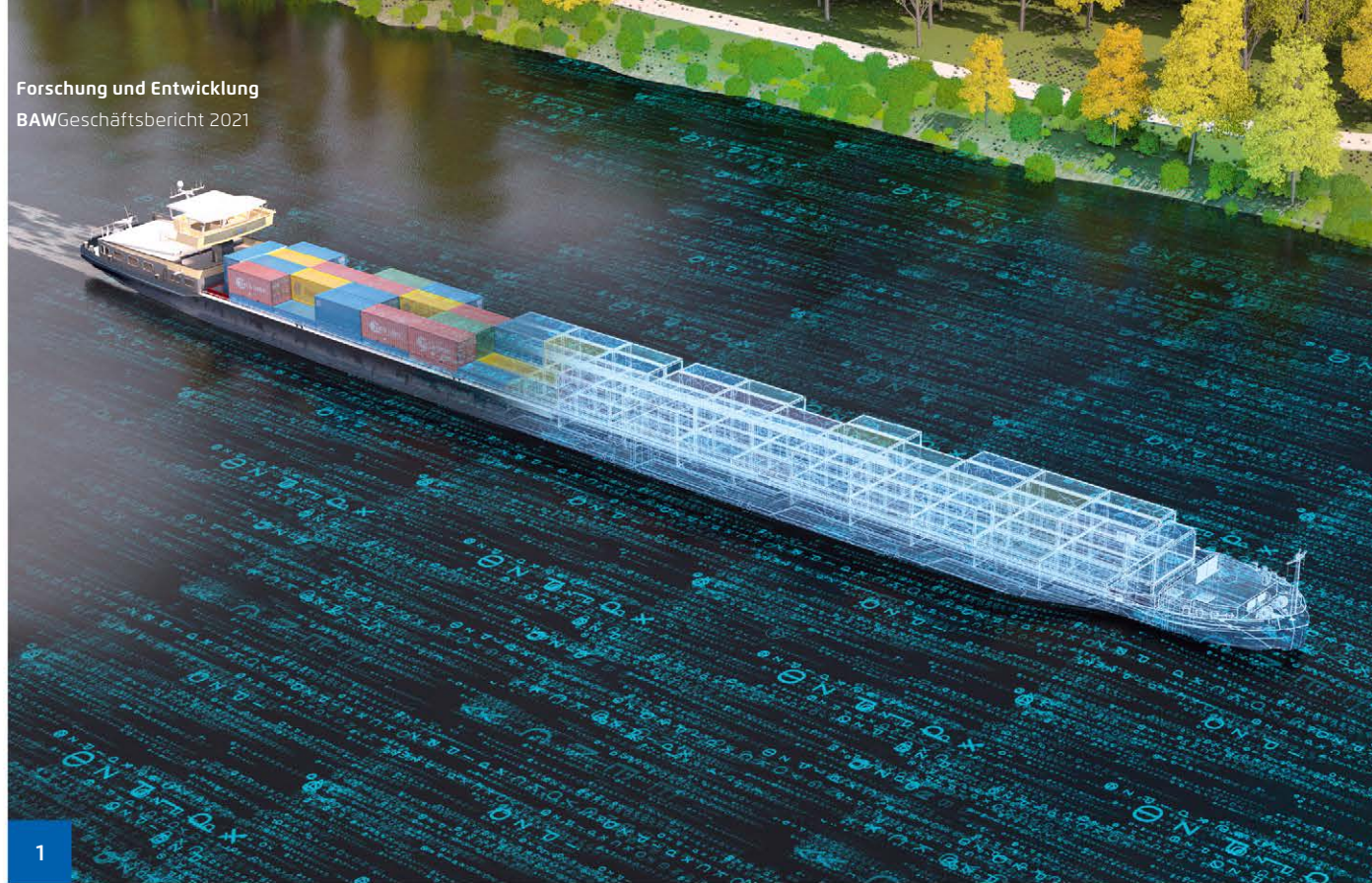
Der Dienst ist bei der BAW unter der Adresse <https://baugrund-daten.baw.de/> menschen- und maschinenlesbar verfügbar.

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

FAIR steht für Findable, Accessible, Interoperable und Reusable, zu Deutsch: auffindbar, zugänglich, interoperabel und wiederverwertbar. Das Prinzip wurde 2016 in der Fachzeitschrift Scientific Data veröffentlicht. GeoValML wurde generisch aufgebaut und berücksichtigt die modernen Ansätze konzeptueller Datenmodelle und Datenbanken. Die fachliche Herkunft spielt aus Sicht der Daten eigentlich keine Rolle. Daten (Messwerte, Kennwerte) bleiben Daten, ob sie im Feld gemessen, mittels einer Probenentnahme klassifiziert oder durch eine weitere Prozessierung oder Laboranalyse gewonnen wurden. Notwendig ist eine Differenzierung aber für die Semantik, d. h. die eindeutige Zuordnung der Daten zu bestimmten Disziplinen sowie für eine Abbildung der Beziehung der Daten untereinander (den Ontologien). Dafür unerlässlich ist sowohl die Erstellung von Vokabularen (Begriffskatalog/Codelisten) als auch die Verknüpfung von Daten und Vokabularen über Ontologien. Für diese Aufgabe ist sogenanntes Domänen- bzw. Expertenwissen zwingend notwendig. Der Aufbau von abgestimmten Vokabularen ist von essenzieller Bedeutung. Als Grundlage für den Aufbau von abgestimmten Vokabularen werden die in nationalen und internationalen Normen verwendeten Begrifflichkeiten genutzt.

GeoValML greift im Kern auf Ansätze des Schemas von „Observations & Measurements“ zurück. Dadurch wird die Erweiterungsfähigkeit des Modells erreicht. Zusätzlich zu dem Datenmodell von GeoValML ist ein Datenmodell für die Vokabularen notwendig. Nur durch die Abbildung der vorhandenen Abhängigkeiten der Codelisten untereinander können die Metadaten eindeutig festgelegt werden.

Die Datenbank wurde als PostgreSQL-Datenbank realisiert. Ausgehend vom konzeptuellen Modell wurde ein Implementierungsmodell erzeugt. Im Implementierungsmodell lassen sich unter anderem folgende Daten ablegen:



1



2

3

- 1: Digitalisierung in der Binnenschifffahrt
- 2: Für die Bereitstellung der Daten aus 2D-HN-Modellen werden diese auf ein flussachsenorientiertes Raster (schwarz dargestellte Punkte) interpoliert
- 3: Ausrüstung des Testschiffs mit Messtechnik während eines Werftaufenthalts

Ferngesteuertes, koordiniertes Fahren in der Binnenschifffahrt (FernBin)

Das Verbundprojekt „FernBin“ wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz im Rahmen des „Maritimen Forschungsprogramms“ gefördert und von einem Konsortium aus verschiedenen Forschungseinrichtungen und mittelständischen Unternehmen im Verbund bearbeitet. Übergeordnetes Ziel ist die zuverlässige und sichere Fernsteuerung von Binnenschiffen. Dies stellt einen wichtigen Zwischenschritt auf dem Weg zum vollautomatisierten Fahren in der Binnenschifffahrt dar. Perspektivisch sollen derartige Technologien die zukünftige Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der Binnenschifffahrt insbesondere im Kontext der multimodalen Transportkette sichern. Hierfür ist zum einen eine Erhöhung der Attraktivität des Berufs des Binnenschiffers nötig, um den Fachkräftemangel in diesem Bereich zu entschärfen. Zum anderen müssen die Sicherheit und Leichtigkeit der Binnenschifffahrt durch den Einsatz von intelligenten, adaptiven Navigationssystemen weiterhin gewährleistet werden.

In diesem Projekt wird den genannten Herausforderungen durch sowohl technologische als auch den Arbeitsablauf betreffende Entwicklungen begegnet. Die Attraktivität des Arbeitsplatzes soll durch eine Verbesserung der Arbeitsbedingungen erhöht werden. Außerdem lässt sich der Mangel an Fachkräften auch durch eine reduzierte Bordmannschaft mindern. Letzteres kann durch zuverlässige Automatisierung und Fernsteuerung zudem neue Betriebskonzepte ermöglichen. So wäre z. B. eine Steuerung von

mehreren kleinen Schiffseinheiten durch einen einzelnen Schiffsführer denkbar, wodurch die Binnenschifffahrt an Flexibilität gewinnen würde. Um hierbei die Sicherheit und Leichtigkeit nicht zu gefährden, muss eine zuverlässige Fernsteuerung der Schiffe gewährleistet werden. Dies soll durch eine umfangreiche Datenbasis erreicht werden, die dem Schiffsführer alle notwendigen Informationen liefert und ihn bei der Navigation aktiv unterstützt. Des Weiteren sind wohldefinierte Abläufe und Schnittstellen zwischen Schiff, Leitstelle und Fernsteuerstand für den sicheren Betrieb eines ferngesteuerten Binnenschiffs essenziell. Diese sollen mittels Workflow-Analysen untersucht und festgelegt werden. Außerdem ist eine zuverlässige Datenverbindung von zentraler Bedeutung, damit der fernsteuernde Schiffsführer jederzeit genauestens über die aktuelle Lage informiert ist.

Die Projekthalte der BAW konzentrieren sich zum einen auf die Bereitstellung von Verkehrs- und Infrastrukturdaten sowie von Messdaten des Testschiffs, zum anderen auf die Analyse dieser Daten zur Unterstützung des fernsteuernden Schiffsführers bei der Navigation.

Grundsätzlich erfolgt die Datenbereitstellung über einen von der BAW eingerichteten Datenserver. Für den Abruf der Daten durch Systeme des Leit- und Fernsteuerstands sowie durch Navigationseinrichtungen des Testschiffs werden aktuell passende Web-Schnittstellen (APIs) implementiert. Hiervon ausgenommen sind Verkehrsdaten

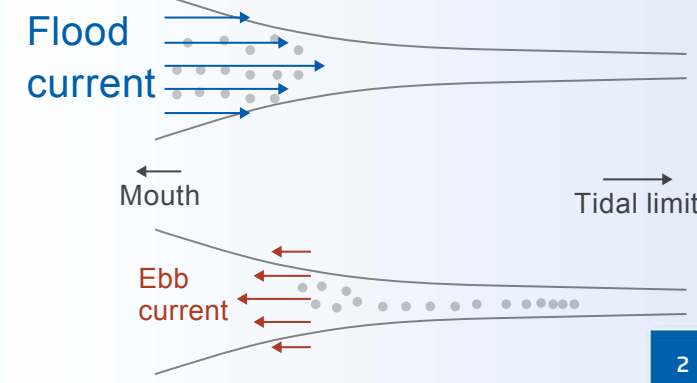
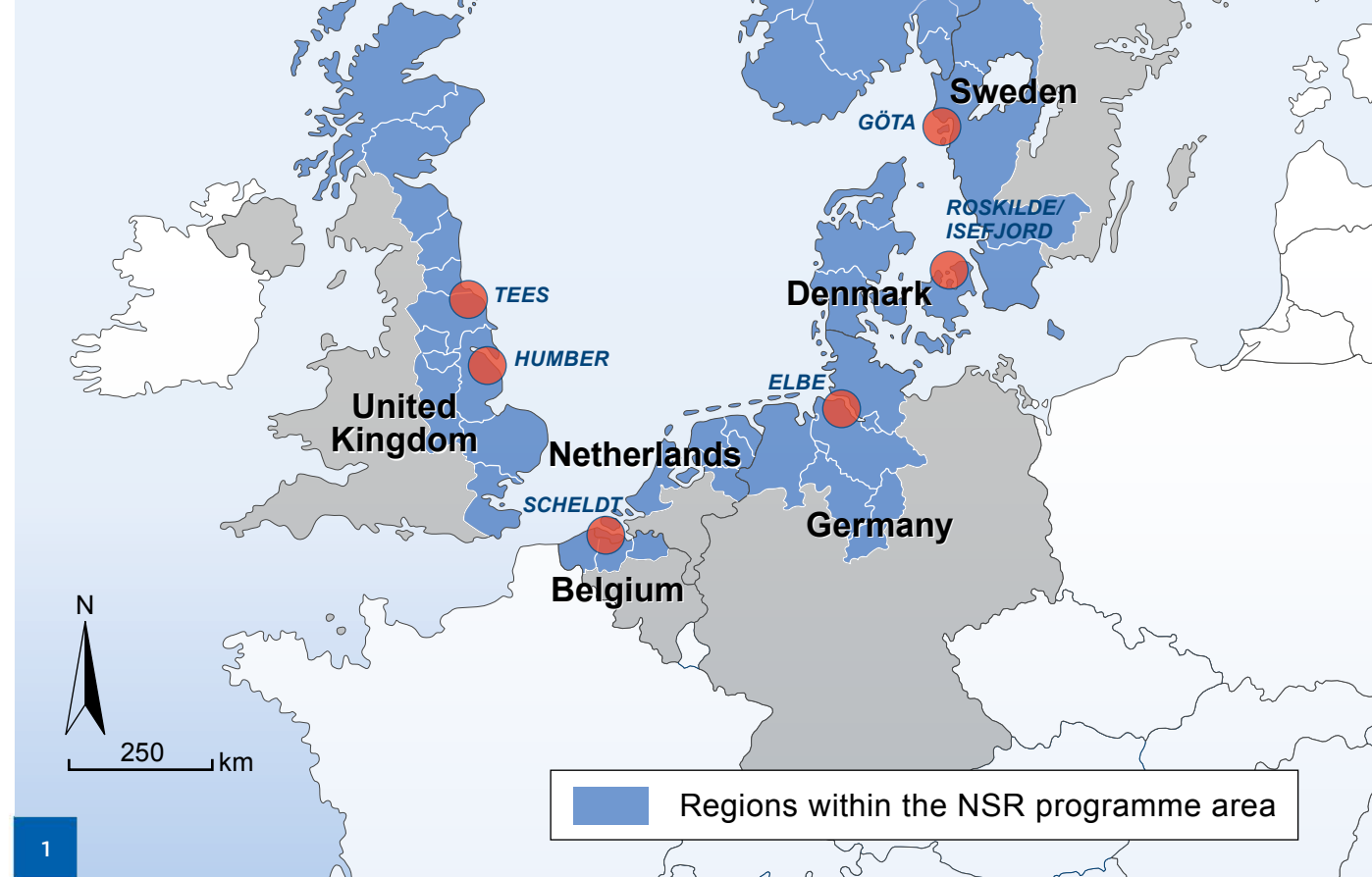
(AIS), da es sich dabei um schiffsbezogene und damit in der Regel zugleich um personenbezogene Bewegungsdaten handelt. Diese Daten werden der BAW durch die Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt zur Verfügung gestellt. Eine Weitergabe dieser Daten innerhalb des Projekts ist nur individuell und nach sorgfältiger Prüfung sowie Anonymisierung möglich. Hierfür wurde ein mehrstufiges Konzept entwickelt und in Form eines Softwaremoduls umgesetzt. Darüber hinaus wird an Auswertungsmethoden gearbeitet, die eine statistische Analyse der Verkehrsdaten innerhalb der BAW erlauben. Dies macht z. B. eine Einschätzung des Verkehrsaufkommens oder die Auslastung von Liegestellen möglich. Im späteren Verlauf des Projekts sollen diese Daten außerdem für Verkehrsprognosen herangezogen werden. Mithilfe von Methoden der Statistik und des maschinellen Lernens soll das Fahrverhalten und damit die zukünftige Bewegungstrajektorie des Eigenschiffs sowie von Fremdschiffen in der Umgebung präzisiert werden. Ziel ist eine frühzeitige Erkennung von potenziell kritischen Verkehrssituationen, welche die fernsteuernden Schiffsführer bei der sicheren Navigation unterstützen soll. Darüber hinaus können die hierfür entwickelten Methoden und Modelle zur Prognose von Ankunftszeiten am Zielort oder an wichtigen Zwischenzielen, wie z. B. Schleusen, verwendet werden.

Die im vorherigen Abschnitt angesprochenen Prognosen setzen eine umfassende Datengrundlage hinsichtlich der Wasserstraßeninfrastruktur voraus. Hierfür wurden bereits einige hydrodynamisch-numerische Simulationen durchgeführt, um Daten wie z. B. Strömungsgeschwindigkeit oder Wassertiefe für einen breiten Abflussfächer bereitstellen zu können. Für den effizienten Abruf dieser Daten mittels einer API, werden diese, wie in Bild 2 gezeigt, auf ein flussachsenorientiertes Raster interpoliert und sind so, z. B. für einen bestimmten Bereich um

das eigene Schiff herum, abrufbar. Dies ermöglicht es, lokale Gegebenheiten wie Querströmungsfelder, z. B. bei Kursprognosen oder bei der Entwicklung von Bahnregelsystemen, zu berücksichtigen. Ergänzend werden Daten u. a. zu Flussbauwerken, Fahrrinne und Verkehrszeichen zur Verfügung gestellt.

Neben den Infrastrukturdaten werden Schiffsdaten für eine genauere Analyse des Fahrverhaltens der Schiffe herangezogen. Hierzu wurde zusammen mit den Projektpartnern ein Testschiff ausgewählt und mit umfangreicher Sensorik ausgestattet. Bild 3 zeigt das Testschiff während des Werftaufenthalts. Zur Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit in einem Bereich von bis zu 50 m vor dem Schiff hat die BAW zwei Horizontal-ADCPs (Acoustic Doppler Current Profiler) im Bug des Schiffs installiert. Hierfür wurden spezielle Hülsen für die Aufnahme sowie Vorrichtungen für die genaue Positionierung und Ausrichtung der Messtechnik angefertigt und in den Rumpf eingeschweißt. Des Weiteren wurden durch Projektpartner ein hochpräzises GNSS-System (Global Navigation Satellite System), Beschleunigungssensoren, Ladungssensoren sowie Kameras und Laserscanner für die Umfelderkennung installiert. Außerdem werden Schiffsdaten wie Ruderkraft und -lage sowie Drehmoment und Drehzahl des Antriebs erfasst. Für den Zugriff auf Sensorik und Aktorik des Schiffs sowie für die Aufzeichnung und den Transfer von Messdaten auf den Datenserver der BAW dient eine zentrale Datenplattform. Die BAW plant, im Rahmen des Projekts ein weiteres Schiff mit einem präzisen Positionierungssystem auszustatten. Da die ausgerüsteten Schiffe Daten während des regulären Fahrbetriebs erfassen, sind sie für fahrdynamische Analysen von großem Wert. Ergänzt wird dieser Datensatz durch Daten der Schiffe, die die BAW im Rahmen des Projekts PROMINENT ausgerüstet hat und deren Daten auch weiterhin aufgezeichnet werden. So steht eine umfangreiche und wertvolle Datenbasis für Entwicklungen im Bereich der automatisierten und zukünftig autonomen Binnenschifffahrt zur Verfügung.

Die im Projekt gesammelten Erfahrungen sind auch längerfristig für die Automatisierung der Binnenschifffahrt relevant. Die Entwicklung von Kursprognose oder die Bereitstellung einer umfangreichen Datenbasis werden auch über das Projekt „FernBin“ hinaus von großem Nutzen sein.



- 1: Estuaries of interest within the IMMERSE project (the map is produced by and used with the permission of Nordregio, <https://northsearegion.eu>)
- 2: Tidal pumping, caused by an asymmetry between flood and ebb currents inducing upstream transport of sediments
- 3: Still fresh water body Dove Elbe, southeast of Hamburg, in 1952 cut-off from the tidal Elbe

IMMERSE, Implementing MEasuRes for Sustainable Estuaries in the North Sea Region

Many estuaries at the North Sea Region are dynamic environments, highly populated, subject to pressures like increased tidal amplification or intensified tidal pumping: pressures that involve changes in the flow currents and sediment transport. Changes on the characteristic tidal dynamics of an estuary system affect established activities and uses of the estuary services: for instances, the intensification of tidal pumping increase the net upstream transport of sediments and alter sedimentation rates, and these alterations have repercussions on the maintenance of estuarine waterways that guarantee necessary water depths and vessel draught for safe navigation and sea port access. The sea level rise, the loss of habitats and sediment pollution are also estuary pressures present in different estuaries within the North Sea region. Authorities and waterways administrators require innovative solutions in line with the EU-regulations, i.a. Natura 2000 and the Water Framework and Marine Strategy Framework Directives, to counteract the impact of those pressures. Moreover, the implementation of promising solutions

with high potential benefits demand large investments, long planning periods and the commitment of locals and stakeholders. These challenges in developing and implementing measures can be observed in most European estuary regions and therefore solutions are of general interest in Europe.

Against this backdrop, 10 organisations from six countries (research institutions, governmental administrations and enterprises) together with the BAW initiated the EU-Interreg-project IMMERSE to exchange their knowledge and expertise, and improve state-of-the-art solutions for estuary pressures in sediment management, flood protection and estuarine habitats.

The IMMERSE project built on the results of previous transnational Interreg-projects, in which the BAW contributed as an important and reliable expert: TIDE project (2010) which focused on sharing knowledge about estuary functioning and management plans and measures, and the EMOVE project (2014), which

focused on the strengthening of stakeholder integration in estuary management. Based on the findings of these projects, the IMMERSE project moves in the development and implementation of estuary solutions that contribute to a sustainable management of North Sea ecosystems. Different measure types and sediment management strategies have been investigated and evaluated. Pilots and feasibility assessments for the re-creation of former estuary flood spaces have been conducted and discussed in Transnational Estuary Exchange Labs (TEEL). The BAW evaluated within the project the hydraulic effects and benefits of reconnecting the cut-off anabranch Dove Elbe to the tidal river Elbe (BAW, 2021), an assessment based on 3D numerical modelling required for decision-making at the stakeholder dialog within the Forum Tideelbe (www.forum-tideelbe.de).

During the TEEL organized in November 2020, the results of the BAW assessment were presented and discussed with participants from different estuary regions. Three IMMERSE-solutions concerning measures for the sustainable sediment management in the Elbe and Scheldt were here discussed. It was concluded that future investigations in estuary management require a combination of different measure types, for instances, large-scale measures that follow a vision to improve the morphological state of the estuary, together with short-term adaptive and sustainable maintenance works; the participants indicated the importance of knowledge exchange for future investigations. It has been pointed out that pilots might be necessary in measure planning to obtain validation data for quality proof of complex numerical models at state-of-the-art, which are required

to estimate the measure effects in the estuary system. To make model estimations more understandable and further measure acceptance, it was advised to involve stakeholders very early in the development of measures, and to communicate the scientific background in a plain language accessible for a broad audience.

Four TEELs have been organized focusing in sediment management, ecological restoration and innovative treatment methods of contaminated sediments. They brought about a platform for future collaborations between research institutions and estuary managers and the knowledge exchange on pressures and engineering solutions furthered the use of best practices at the state of knowledge in issues related to the estuarine waterways.

Because of the success and advancement in the estuary solutions, the project has been extended until March 2023 to explore solutions related to estuary pollution. The BAW will carry out two studies to advance the model techniques in estimating the spread of particle-bound pollutants. Beyond the project lifetime, these studies will contribute to develop solutions in estuary management concerning the riverine import of particle-bound pollutants into the tidal Elbe.

Overall, the cooperation and participation in the previous and current EU-Interreg-projects show that the expertise of the BAW in waterways engineering is asked across Europe. The BAW is recognized as a reliable partner that provides valuable impulses for the sustainable development of the estuaries.

Die Bundesanstalt für Wasserbau

- Das Jahr 2021
- Digitale Arbeitswelt der BAW
- Daten und Fakten
- Anhang



Das Jahr 2021



Elbe bei Otterndorf

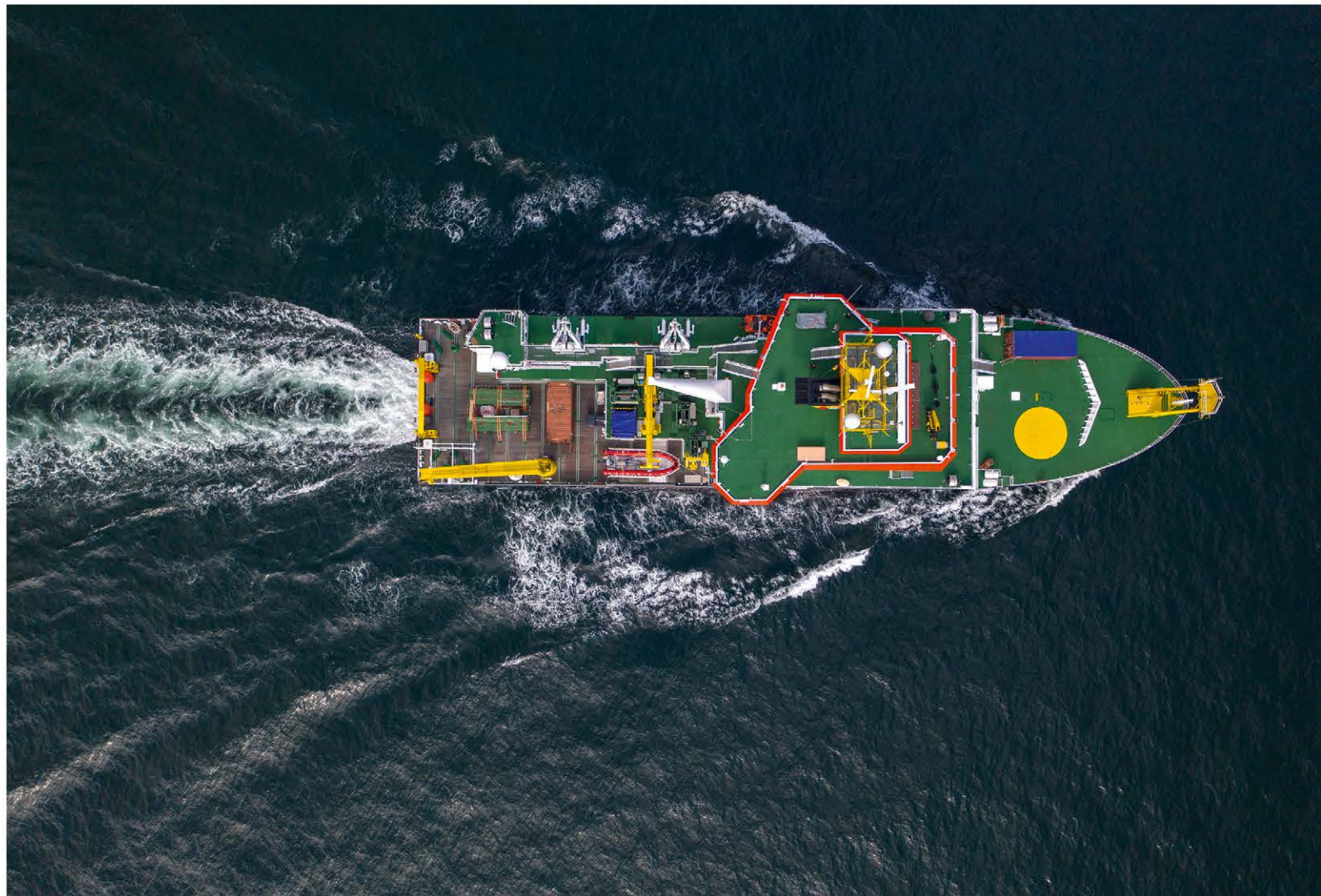
Das Jahr 2021

Bau der fünften Schleusenkammer Brunsbüttel



**Hochbrücken über den
NOK bei Kiel-Levensau**

Das Jahr 2021



Vermessungs-, Wracksuch- und Forschungsschiff ATAIR

Das Jahr 2021

Imagebroschüre der BAW



Forschungsstrategie der BAW

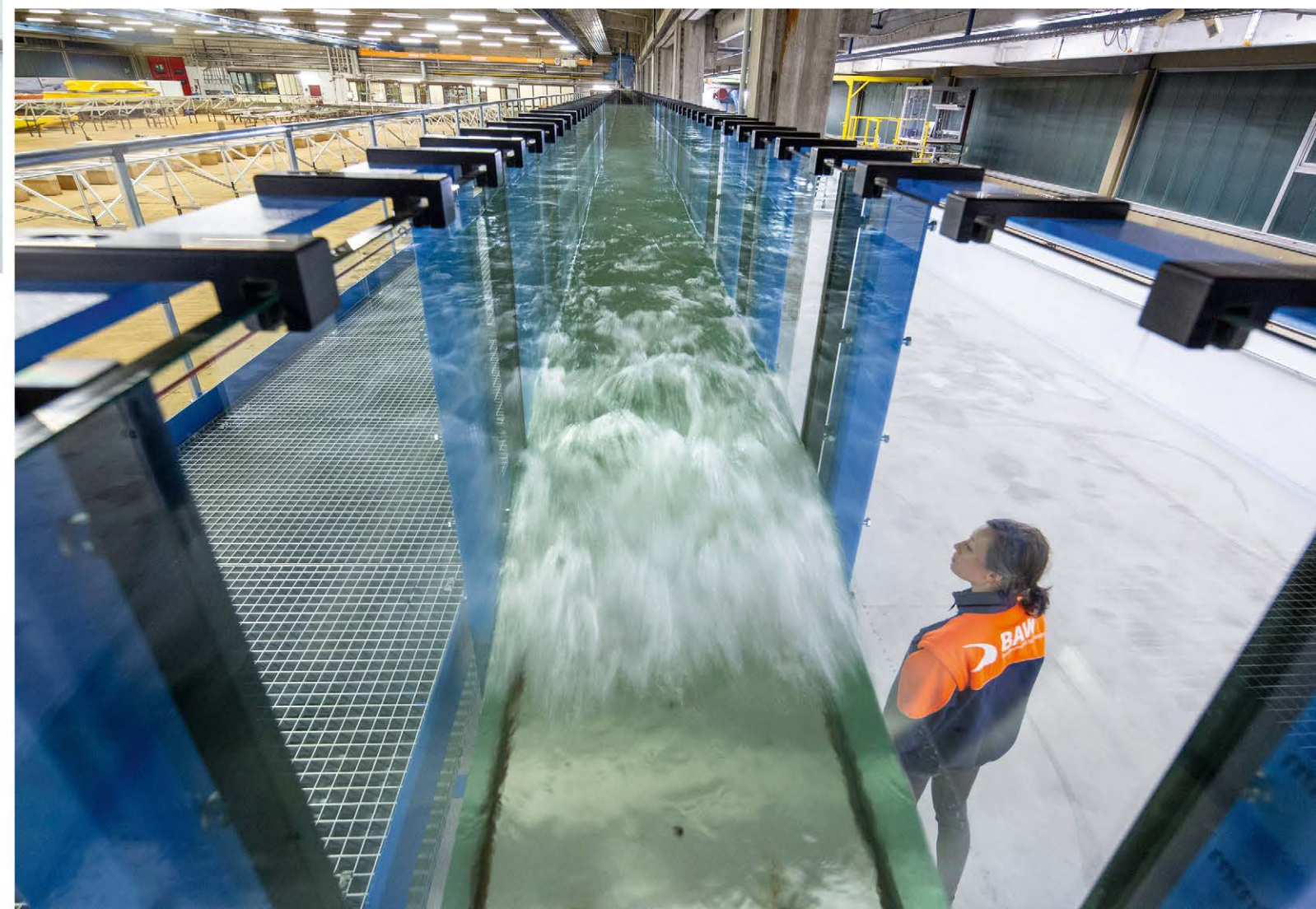


Das Jahr 2021



Hochleistungsrechner in Karlsruhe

Umlaufrinne mit
Tideströmung in Hamburg



Digitale Arbeitswelt der BAW

Unter dem Stichwort „Digitale Arbeitswelt der BAW“ wurde die bisherige Organisation der BAW hinsichtlich der Herausforderungen einer modernen Arbeitswelt auf den Prüfstand gestellt und für die digitale Zukunft neu ausgerichtet. Digitalisierung bedeutet ganz allgemein die Nutzung digitaler Techniken und Lösungen. Für die BAW geht dies aber einen bedeutenden Schritt weiter: sie verbindet die physische mit der virtuellen Welt – es geht um die Vernetzung von Menschen und Inhalten durch den Einsatz neuer Technologien.



Arbeitsorganisation und Zusammenarbeit

Leitsatz

„Die BAW bietet große Flexibilität zur Ausgestaltung unseres Arbeitsalltags, geprägt von einer vertrauensvollen Zusammenarbeit und offenen Kommunikationskultur zur Erfüllung unserer Aufgaben.“

Ziele

Flexibilisierung unserer Arbeitswelt
Die BAW schafft den Rahmen, unsere Arbeit ortsunabhängig und zeitlich flexibel gestalten und durchführen zu können. Dabei achten wir auf die individuellen Möglichkeiten innerhalb der Berufsbilder, Funktionen und Aufgaben. Auch in der digitalen Arbeitswelt haben Arbeits- und Gesundheitsschutz für uns eine hohe Bedeutung.

Vereinbarkeit von Privat- und Berufsleben
Für die BAW als familienfreundlicher und zukunftsorientierter Arbeitgeber ist die Vereinbarkeit von dienstlichen und privaten Belangen ein wesentliches Ziel. Hierzu schaffen wir die technischen und organisatorischen Voraussetzungen für eine optimale Zusammenarbeit.

Vertrauensvolle Zusammenarbeit
Flexibilisierte Arbeitsmodelle erfordern eine ausgeprägte Vertrauenskultur, Transparenz und klare Verantwortlichkeiten in der Zusammenarbeit. Es erwarten uns bei der Erfüllung unserer Aufgaben neue Herausforderungen, denen wir uns kollegial stellen und die wir aktiv ausgestalten. Die Führungskräfte sind für eine transparente Steuerung verantwortlich und nehmen in ihrer Rolle eine Vorbildfunktion ein.

Neue Wege der Kommunikation
Die ortsunabhängige und zeitlich flexible Gestaltung unseres Arbeitsalltags erfordert neue Wege der Kommunikation. So wird der persönliche Austausch durch die Nutzung digitaler Instrumente ergänzt. Mit der Formulierung gemeinsamer Werte und Regeln für die persönliche und digitale Kommunikation tragen wir zu einer guten und offenen Zusammenarbeit bei. Das Zusammenspiel von Erreichbarkeit und der Möglichkeit zur Abgrenzung von Beruflichen und Privatem ist dabei wesentlich.

Raumkonzept
Flexibilisierte Arbeitsmodelle und eine gute IT-Infrastruktur bieten neue Möglichkeiten für die Nutzung und Gestaltung unserer Räumlichkeiten.



Wissensmanagement

Leitsatz

„Unsere Arbeit lebt von einem aktiven Wissensmanagement und wir fördern einen offenen Dialog zu verkehrswasserbaulichen Fragestellungen.“

Ziele

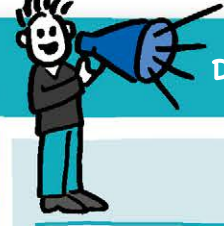
Wissensspeicher und -vermittler
Durch den Auf- und Ausbau digitaler Werkzeuge zur dauerhaften Bereitstellung und Vermittlung von Fachwissen stärken wir die Position der BAW als ingenieurtechnisches und wissenschaftliches Kompetenzzentrum für den Verkehrswasserbau und den Spezialschiffbau.

Interne Vernetzung von Fachwissen
Wir teilen unser Fachwissen mit unseren Kolleginnen und Kollegen, indem wir es digital verfügbar machen und vernetzen. Somit fördern wir die aktive Nutzung und stetige Weiterentwicklung unseres internen Wissensspeichers und sichern die Qualität des darin enthaltenen Fachwissens.

Wissensaustausch mit der Fachwelt
Wir teilen unsere fachliche Expertise gemäß den Grundsätzen von Open Data und Open Access und gestalten den Stand der Wissenschaft aktiv mit. Über zukunftsorientierte Formate ermöglichen wir den Wissensaustausch mit der Fachwelt und stärken damit unsere eigenen Kompetenzen.

Digitale Lern- und Entwicklungsprozesse
Zur Förderung von Lern- und Entwicklungsprozessen sowie des fachwissenschaftlichen Austauschs gestalten wir eine digitale Lernplattform für den Verkehrswasserbau.

Die moderne Arbeitswelt ist von Diskontinuitäten, sich häufig ändernden Rahmenbedingungen und Disruptionen beeinflusst, was die Corona-Pandemie eindrücklich verdeutlicht hat: sie ist dynamischer und volatiler geworden. Die Pandemie hat ein Umdenken der bisherigen, präsenzorientierten Strukturen notwendig gemacht: die BAW musste schnell und trotzdem strukturiert auf die



Datenmanagement

Leitsatz

„Qualitätsgesicherte Daten sind das Fundament unserer technisch-wissenschaftlichen Arbeit.“

Ziele

Portale und Dienste
Als Kompetenzzentrum für den Verkehrswasserbau in Deutschland forcieren wir ein serviceorientiertes Management von Fachdaten. Dies umfasst/beinhaltet die Bereitstellung von Datenportalen und Informationsdiensten für die Fachwelt zur plattformunabhängigen Mehrfachnutzung von Daten.

Open Government
Wir bekennen uns zur Open-Government-Initiative des Bundes und unterstützen diese aktiv. Unsere Fachdaten sowie die zugehörigen Metadaten werden über standardisierte Zugänge zur freien Nachnutzung für die Öffentlichkeit bereitgestellt.

BAW als aktiver Teil der Wissenschaftsgemeinschaft
Wir sind uns des Wertes unserer Daten für uns und andere bewusst. Die Transparenz, Vernetzung sowie nutzerorientierte Bereitstellung von Daten und Informationen ist unser aktiver Beitrag zur Wissenschaftsgemeinschaft.



Prozesse, Produkte und Services

Leitsatz

„Mit der Digitalisierung unserer Prozesse, Produkte und Services sichern wir deren Qualität und ermöglichen ein flexibles, effizientes Arbeiten.“

Ziele

Prozesse und Services bedarfsgerecht digitalisieren
Mit der Digitalisierung unserer Prozesse, Produkte und Services sichern wir deren Qualität und ermöglichen ein flexibles, effizientes Arbeiten.

Qualitätssicherung durch Digitalisierung
Durch die gezielte Digitalisierung unserer Prozesse und Services sowie einem digitalen Qualitätsmanagement steigern wir die Transparenz und Qualität unserer Arbeit.

Produkte zielgruppenorientiert weiterentwickeln
Wir nutzen die vorhandenen und die sich aus der fortschreitenden Digitalisierung ergebenden Potenziale, um unsere Produkte mit Fokus auf die individuellen Anforderungen und Bedürfnisse unserer Kunden, der Fachwissenschaft und der Öffentlichkeit weiterzuentwickeln.

veränderten Bedingungen reagieren. Daher ist es besonders wichtig zu betonen, dass der Wandel hin zu einer verstärkt digitalen Arbeitswelt nur gelingen kann, wenn er nicht Selbstzweck ist, sondern einen echten Mehrwert für den Alltag darstellt. Hiervon kann die gesamte BAW in hohem Maße profitieren und ihre Expertise weiter professionell ausbauen.



IT-Servicemanagement

Leitsatz

„Die BAW ermöglicht eine sichere und unabhängige Nutzung der IT und richtet ihre IT-Services an den Bedürfnissen der Anwendenden aus.“

Ziele

Anwendende im Fokus
Wir nutzen die Potenziale der IT und bauen die Angebote bedarfsgerecht aus, um flexibel, sicher und nachhaltig in der digitalen Arbeitswelt agieren zu können. Bei der Ausgestaltung der IT-Services stehen die Anwendenden im Fokus.

Digitale Souveränität
Wir fördern den Einsatz von Open Source, offenen Standards und standardisierten Dateiaustauschformaten für einen sicheren und souveränen IT-Einsatz in der BAW.

Offene und sichere digitale Kommunikation
Wir leben und fördern eine offene und sichere digitale Kommunikation für eine gute Zusammenarbeit.

Green-IT
Wir gestalten unsere IT nachhaltig und setzen diese für eine umweltschonende Arbeitsweise ein.

Digitale Kompetenz
Wir fördern die digitale Kompetenz der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter als Teil ihrer fachlichen Kompetenz.

Es wurde ein abteilungsübergreifendes Projekt ins Leben gerufen, um die digitale Arbeitswelt für die gesamte Organisation aktiv und bedarfsorientiert umzusetzen und Grundsteine für künftige Arbeitsmodelle zu legen. Im Fokus standen die zeitgemäße Weiterentwicklung und das Identifizieren der Chancen und Potenziale, die eine konsequente digitale Transformation für die Gestaltung der Zusammenarbeit hat. Zunächst wurde intensiv an der Formulierung interner Ziele gearbeitet, die Orientierung für das Handeln und Wirken geben und richtungsweisend für die Kultur und Organisation der Zusammenarbeit sind. Insgesamt wurden fünf Zielbildthemen identifiziert und anschließend von verschiedenen Arbeitsgruppen mit passenden Maßnahmen ausgestaltet (siehe Abbildungen).

Die Nutzung neuer technischer Möglichkeiten setzt eine hohe Digitalkompetenz der Beschäftigten voraus, die somit zu einer bedeutenden Schlüsselkompetenz wird. Das Motto „Mutig sein und einfach mal etwas ausprobieren“ wurde von allen Beteiligten verinnerlicht und in den Projektstrukturen gelebt – dies bedeutete, dass die Beschäftigten die festgelegten Maßnahmen auf ihre Realisierbarkeit hin überprüften und die Entwicklung aktiv mitgestalten konnten. Mit einer neuen Dienstvereinbarung wurde der Grundstein für einen verlässlichen Rahmen für die Ausgestaltung eines flexiblen Arbeitsalltags auch über die Pandemiesituation hinaus gelegt. Gleichzeitig werden der Wissenstransfer gefördert und mit Hilfe zielgruppenspezifischer Angebote neue (Digital)Kompetenzen aufgebaut. Es wird eine transparente, offene und vertrauensvolle Arbeitskultur geschaffen, die ein flexibles und effizientes Arbeiten ermöglicht.

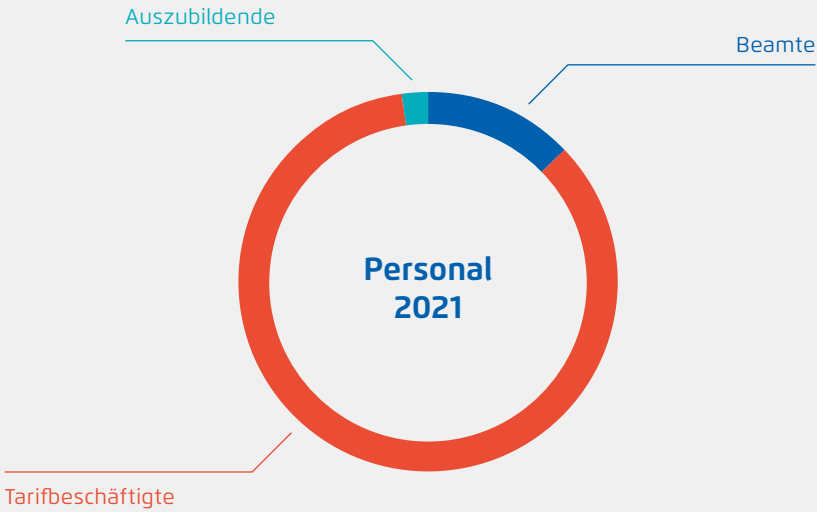
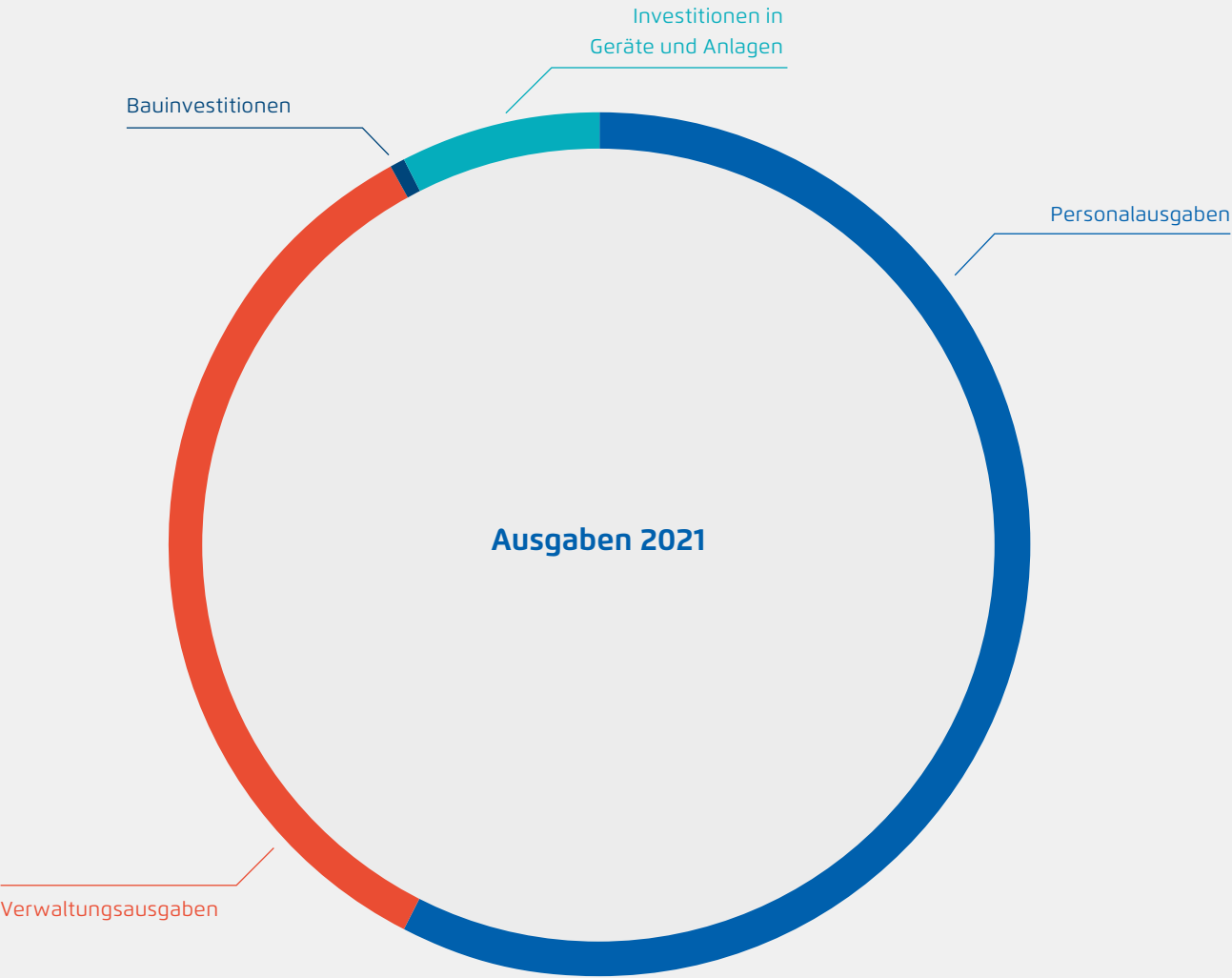
Daten & Fakten

Ausgaben und Einnahmen

	2019	2020	2021
Personalausgaben	29.981.312 €	32.919.268 €	34.515.371 €
Verwaltungsausgaben	18.118.051 €	19.222.248 €	20.652.199 €
Bauinvestitionen	350.585 €	525.623 €	251.895 €
Investitionen in Geräte und Anlagen	5.623.250 €	6.725.985 €	4.424.089 €
Gesamtausgaben	54.073.198 €	59.393.124 €	59.843.554 €
Einnahmen aus Drittmittelprojekten	1.821.165 €	2.716.238 €	2.910.848,10 €

Personal

	2019	2020	2021
Beamte	62	63	63
Tarifbeschäftigte*	397	420	418
Auszubildende	11	11	10
Beschäftigte gesamt	470	494	491
*davon befristet Beschäftigte (ohne Auszubildende)	99	106	94

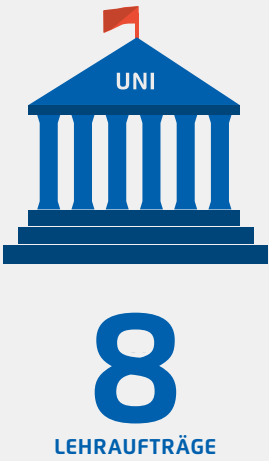


Daten & Fakten



Sorgatz, Julia
Towards reliability-based bank revetment design: Investigation of limit states and parameter uncertainty

Ungewitter, Chistian
Entwicklung eines Arbeitsablaufs zur Ermittlung charakteristischer Festigkeits- und Steifigkeitsparameter veränderlich-fester Gesteine unter Berücksichtigung des Porenwasserdrucks



Veranstaltungen 2021

	Anzahl	Teilnehmer
Kolloquien	3	1.049
Aussprachetage	4	334
Insgesamt	7	1.383

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



[www.baw.de/DE/service_wissen/veranstaltungen/
veranstaltungen.html](http://www.baw.de/DE/service_wissen/veranstaltungen/veranstaltungen.html)

Veröffentlichungen & Vorträge

Weitere Informationen finden Sie unter



[www.baw.de/DE/service_wissen/publikationen/
publikationen.html](http://www.baw.de/DE/service_wissen/publikationen/publikationen.html)

Mitarbeit in Ausschüssen

Weitere Informationen finden Sie unter



Forschung und Entwicklung

Weitere Informationen finden Sie unter



Aktuelle Kooperationspartner

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
Fax +49 (0) 721 9726-4540
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 aus-
zugsweise – ist nur mit Genehmigung des Herausgebers gestattet.

ISSN 2190-9156
Karlsruhe · März 2022

Bildnachweis:	
Seite 33, Bild 3	Quelle: Machbarkeitsstudien IRS, 2019
Seite 38, Bild 1	Quelle: Nordregio, https://northsearegion.eu
Seite 46/47	@mileswork – stock.adobe.com (Mockupfotos)
Seite 56	Floral Deco/Shutterstock.com
Seite 57 unten	iStock.com/Tomml
Seite 58 oben	hxdbzxy/Shutterstock.com
Seite 58 unten	iStock.com/mediaphotos
Seite 59 unten	Bloomicon/Shutterstock.com



