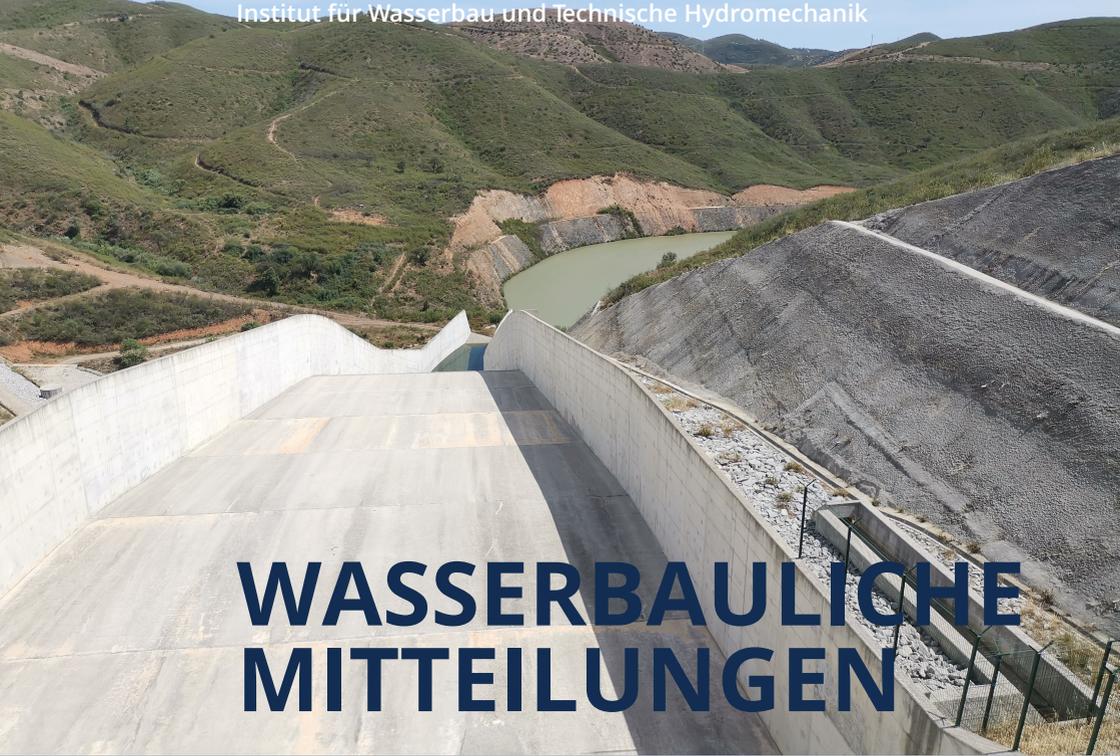




**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Bauingenieurwesen

Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik



WASSERBAULICHE MITTEILUNGEN

Heft 74

**Konstruktiver Wasserbau -
Innovationen, Planungen, Technologien**

Constructive Hydraulic Engineering -
Innovations, Planning, Technologies

Dresdner Wasserbaukolloquium 2025



Institut für
Wasserbau und
Technische Hydromechanik



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Bauingenieurwesen Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen
Heft 74



Konstruktiver Wasserbau - Innovationen, Planungen, Technologien

Constructive Hydraulic Engineering -
Innovations, Planning, Technologies

48. Dresdner
Wasserbaukolloquium 2025
06.-07. März 2025



**Gesellschaft der Förderer des
Hubert-Engels-Instituts**
für Wasserbau und Technische Hydromechanik
der Technischen Universität Dresden e. V.

Bibliografische Informationen der deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://dnb.dnb.de> abrufbar.

Konstruktiver Wasserbau - Innovationen, Planungen, Technologien

Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen,
Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik.

Dresden: Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, 2025
(Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen; Heft 74)
Zugl.: Dresden, Techn. Univ., 2025
ISBN 978-3-86780-794-4

Herausgegeben im Auftrag der Rektorin der Technischen Universität Dresden von:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Stamm

Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik
01062 Dresden

Tel.: +49 (0)351 463 34397
E-Mail: wasserbau@tu-dresden.de
WWW: <http://www.iwd.tu-dresden.de>

Redaktionsschluss: 04.03.2025

Verlag: Selbstverlag der Technischen Universität Dresden

Grafik Titelseite: Foto: Tom Rößger (IWD)

ISSN 0949-5061
ISBN 978-3-86780-794-4

Inhaltsverzeichnis

A2 Neue Normen und Regelwerke

Wasserbau-Normung im Zeichen des Klimawandels	1
Claus Kunz, Jörg Megow	
Resilienz in Hochwasser- und Starkregenrisikomanagement	10
Robert Jüpner, Reinhard Pohl	
Überarbeitung der ZTV-W LB 215 für den Verkehrswasserbau - Aktueller Stand und Ausblick	17
Frank Spörel, Andreas Westendarp	
Realisierungsgeeignete Normen und Regelwerke im Küstenschutz und der tidebeeinflussten Wasserwirtschaft	26
Olaf Müller, Gabriele Gönnert, Ella Hedwig-Albrecht, Francois Leesch, Karlotta-Franziska Seitz, Jan-Moritz Müller, Clais von Mirbach, Antje Grimpe, Karsten Winat	
Bewertung der Freisetzung umweltrelevanter Stoffe aus Geokunststoffen	34
Christian Dietrich, Anna Maria Bell, Sebastian Buchinger, Arne Wick, Thomas A. Ternes	

A3 Projekte und Technologien I

Kainzmühlsperre – Sanierung und Ertüchtigung	40
Barbara Tönnis, Dominik Fiedler, Martin Zetterer	
Anbindung des neuen Duisburg Gateway Terminals an den Straßenverkehr	48
Thomas Groß	
Schleuse Lüneburg – Sparschleuse mit größter Hubhöhe und besonderen hydraulischen Herausforderungen	58
Teresa Weber, Franz Dichgans, Lukas Brodersen	
Innovative Schleusenammerkonstruktion mit Einsatz von Fertigteilen	65
Maximilian Kaiser, Tobias Zowada, Jacqueline Schmied, Stefan Lühr, Christoph Stephan, Matthias Pahn	

A4 Projekte und Technologien II

- „ABCD - Global Water and Climate Adaptation Centre“** 75
Holger Schüttrumpf, Jürgen Stamm, S.A. Sannasiraj, Mukand Babel, Firas Aljanabi, Edeltraud Günther, Daniel Karthe, André Lindner, Fabian Falter, Danish D R
- Modellierung einer 70 m tiefen Schlitzwand an der Talsperre Arkun zur Rissvorhersage beim Erseinstau** 84
Ronald Haselsteiner
- Innovatives Monitoring von Geschiebesperre! Wie wirken unsere Schutzbauwerke im Ereignisfall?** 92
Rolf Rindler, Lisa Puschmann, Lukas Unger, Matthias Schitter, Sabrina Schwarz, Dorian Shire-Peterlechner, Andrea Lammer, Markus Moser
- Anschluss der zukünftigen Lausitzer Seenkette an die Schwarze Elster - Neubau des Ableiters Tagebaurestsee Sedlitz und Ausbau der Rainitza** 101
Matthias Höhne, Holger Haufe
- Daten- und risikobasierte Entwicklung innovativer Bauweisen für eine klimaadaptierte Verkehrsinfrastruktur: FuE-Vorhaben „Pave4Climate“** 109
Ringo Rocha Reboucas, Alejandra Gabriela Orozco Nande, Josef Keller, Ulf Helbig, Anita Blasl, Jürgen Stamm, Alexander Zeißler
-
- ## **B1 Digitalisierung, BIM, KI-Anwendungen**
- RiverCloud – Autonome Über- und Unterwasservermessung für die HN-Modellierung von Bundeswasserstraßen mit einem USV/UAV-Tandemsystem** 112
Siyu Chen, Ralf Becker, Kristiina Leismann, Thomas Gattung, Rebekka Kopmann, Jörg Blankenbach
- Einsatz von AR-Brillen und smart devices in der Wasserwirtschaft: Optimierung von Fahrtzeiten und Remote-Assistenz zur Fehlerbehebung** 120
Ronny Herrmann
- BIM-Implementierung im Wasserbau - Ein Einblick in die Praxis und ein Ausblick auf die Chancen** 126
Marvin Braun, Katjana Lorenz, Torsten Strampe, Gabriele Gönnert

Erfahrungsbericht zur Organisation eines Multiprojekts im IFC-Datenformat	134
Udo Winterberg, Michael Puhe	
Stadthafen Rostock – Sanierung Kempowskiufer, Liegeplätze 86 - 91	143
Marec Philipp Durgut	
<u>B2 Extremereignisse, Resilienz, Klimaanpassung</u>	
Der klimaangepasste Umgang mit Wasser – eine Herausforderung!	147
Uwe Müller	
Berücksichtigung der Folgen des Klimawandels in Planungsprozessen der WSV	158
Benno Wachler, Dörthe Eichler, Janka Schneider, Simon Bruns	
Hochauflösende Simulationen urbaner Sturzfluten auf unterschiedlichen räumlichen Skalen in Berlin	168
Franziska Tügel, Yangwei Zhang, Lennart Steffen, Katrin Nissen, Uwe Ulbrich, Reinhard Hinkelmann	
Einfluss der räumlichen Variabilität von Bodeneigenschaften auf die Bestimmung von Versagensstellen von Küstenschutzbarrieren bei extremen Sturmfluten	178
Saber Abdelaal, Matthias Fritz	
Der Einfluss von klimabedingten Feucht-Trocken-Wechseln auf mineralische Oberflächendichtungen von Deichen	181
Lorenz Spillecke, Antje Bornschein, Alexander Knut, Ralf Thiele	
<u>B3 Ökologische Aspekte im Wasserbau</u>	
BIBOB - Grenzüberschreitendes Biberdamm-Management im Kontext des Klimawandels	192
Torsten Heyer, Aleš Vorel, Tomáš Dostál, Cordula Jost, Lukáš Poledník	
Naturbasierte Lösungen zum Schutz von Fischpopulationen – Erfahrungen zur Um-setzung und innovatives Monitoring	199
Barbara Grüner, Walter Reckendorfer	
Mikrobiell induzierte Korrosion (MIC) in neuem Gewand – Untersuchungen der Korrosionserscheinungen an der Schleuse Niegripp	206
Kristine Eberhardt, Sven-Erik Wulf, Jan Küver	

Rückbau Wehranlage Walkmühlenwehr an der Spree in Bautzen	216
Simon Seemüller, Andre Jurides, Nancy Ullrich	
Hochwassersicherheit und Naturschutz vereint: Neue Schutzlinie und Retentionsfläche in Boizenburg	224
Jens Hucklenbroch, Marieke Röders, Jürgen Scheuermann	
<u>Information</u>	
Übersicht erschienener „Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen“	230

Wasserbau-Normung im Zeichen des Klimawandels

Claus Kunz
 Dr. Jörg Megow

Stichworte: Klimawandel, Wasserbau-Normung, Klimaresilienz, Klima-Dachnorm

1 Problemstellung

Das Jahr 2024 wird seit Beginn der Wetteraufzeichnungen als das wärmste Jahr identifiziert. Es war das erste Jahr, das die kritische 1,5-Grad-Marke gegenüber dem vorindustriellen Niveau überschritten hat. Erschreckende Extremwetterereignissen wie Tornados in Nordamerika, Rekordhitze mit > 52 ° C in Indien, verheerende Überschwemmungen in Deutschland und in Spanien sowie gigantische Tropenstürmen waren in der Natur zu verzeichnen. MunichRe (2025) führt derartige Ereignisse eindeutig auf den Klimawandel zurück und beziffert den Schaden für 2024 mit rund 320 Mrd. \$, was einer Steigerung gegenüber dem Vorjahr von 20% bedeutet, Tab. 1. Darin werden zum Beispiel die Überschwemmungen in Spanien, in Deutschland und in angrenzenden Ländern mit rund 31 Mrd. \$ beziffert, die starken Tornados in den USA mit rund 105 Mrd. \$. Nur rund 40% dieser Schäden sind versichert.

Tabelle 1: Natural Disasters (Quelle: MunichRe, 2025)

	The figures of the year 2024	The figures of the year 2023 (adjusted for inflation)	Average of the last 5 years (2019 – 2023) (adjusted for inflation)	Average of the last 10 years (2014 – 2023) (adjusted for inflation)	Average of the last 30 years (1994 – 2023) (adjusted for inflation)
Overall losses in US\$ bn	320	268	261	236	181
Insured losses in US\$ bn	140	106	106	94	61
Fatalities (approx.)	11,000	77,600	23,000	17,500	42,000

Konkrete Statistiken für Deutschland zeigen zum Beispiel, dass der Meeresspiegel seit 2006 im Mittel um 3 mm ansteigt, dass neun der zehn wärmsten Jahre seit 1981 nach 2000 aufgetreten sind, dass während der trockenen Sommerzeiten in 2018, 2019 und 2022 die Wasserstände auf dem Rhein so stark abgesunken sind, dass Binnenschiffe nur mit starken Behinderungen oder gar nicht fahren konnten.

Doch trotz der dramatischen Ereignisse hinken globale und nationale Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen den dringenden Erwartungen und Erfordernissen hinterher.

Im DIN-NAW (DIN Normenausschuss Wasserwesen) wurden die Arbeitsausschüsse durch einen Beiratsbeschluss in 2022 verpflichtet, bei der Normungsarbeit sowohl Klimaschutz als auch Anpassung an den Klimawandel zu berücksichtigen (DIN-NAW, 2022). Einige Normen wurden in diesem Zusammenhang bereits überarbeitet. Weitere und fachlich tiefer gehende Anstrengungen sind erforderlich.

2 Klimawandel in Normen

2.1 Sohlenbauwerke – DIN 19664

DIN 19664 (2023) ist anzuwenden für Planung, Bemessung, Bauausführung, Betrieb und Instandhaltung von Sohlenbauwerken wie

- Sohlenstufen (Raue Rampen, Störsteinrampen, Beckenrampen) und
- Schwellen (Sohlenschwellen und Grundswellen)

des Wasserbaus. Sohlenbauwerke dienen vorrangig der Sohlenstützung und verhindern Erosion der Sohle. Sohlenbauwerke sind unter hydromorphologischen Gründen nur dann erforderlich, wenn das Sohlengefälle I_{Sohle} ohne Sohlenbauwerk größer als das lokal charakteristische und typkonforme Sohlengefälle ist.

Im Rahmen der planerischen Randbedingungen unter Abschnitt 4.2 der Norm müssen die für das Bauwerk relevanten Niedrig- und Hochwasserverhältnisse berücksichtigt werden. Die zugehörige Anmerkung empfiehlt, Einflüsse des Klimawandels bei der Ermittlung von Hochwasser- und Niedrigwasserabflüssen zu berücksichtigen und verweist auf einen Klimawandelzuschlag oder -abschlag, auch unter Hinweis auf LAWA (2017).

DIN 19664 formuliert ferner unter dem Abschnitt 7.5.1, Baustoffe, dass sich die Wahl der Baustoffe nach den geplanten Maßnahmen, den örtlichen Vorkommen, den mechanischen, hydraulischen, temperaturbedingten und chemischen Einwirkungen sowie nach konstruktiven und statischen Erfordernissen richtet. Das Landschaftsbild und Gesichtspunkte der Ökologie sind zu berücksichtigen. Bemerkenswert ist dabei die Anmerkung: „Sofern Bewertungsverfahren für die Nachhaltigkeit zur Verfügung stehen und erprobt sind, sollten zusätzliche Nachhaltigkeitsaspekte Berücksichtigung finden.“, was auf ein weiteres Zukunftsthema hinweist, zu dem Entwicklungsbedarf besteht.

2.2 Sicherung von Gewässern, Deichen und Küstendünen – DIN 19657

DIN 19657 (2023) gilt für Planung, Bau und Unterhaltung von Sicherungen in und an oberirdischen Gewässern und Oberflächensicherungen von Deichen, Stauhaltungsdämmen und Küsten. Die Norm gilt entsprechend für den gesamten Küstenschutz einschließlich des Tidebereiches von Flüssen. Sie muss auch für rutschgefährdete Hänge angewendet werden, die das Abflussprofil einengen könnten.

Die Auswirkungen des Klimawandels werden in der Norm berücksichtigt. Die Priorisierung der naturnahen Sicherungen führt zu positiven Nebeneffekten bei der Dämpfung klimatischer Extremereignisse z.B. bei Niedrig- oder Hochwasser, wie in der Einleitung erwähnt wird. Im Abschnitt 4.6, in dem es um die Bemessung von Sicherungen an Gewässern, Deichen und Küsten und deren Standsicherheit, Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit geht, sind gegebenenfalls Klimazuschläge für die Bemessung vorzusehen.

2.3 Bauwerke in, an und über Gewässern – DIN 19661

DIN 19661 (2025) adressiert Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung von neuen Bauwerken in, an, über und unter oberirdischen Gewässern im Sinne des Wasserhaushaltsgesetzes. Zusätzlich werden die Auswirkungen auf oberirdische Gewässer für die Wirkräume der Bauwerke nach dieser Norm betrachtet. Typische Arten der Bauwerke, auf die sich die Norm bezieht, sind:

- Kreuzungsbauwerke, wie z. B. Brücken, Überleitungen, Düker und Leitungsdüker, Durchlässe, Verrohrungen und Furten,

- Längsbauwerke, wie z. B. Ufersicherungen nach DIN 19657, Stützmauern/-wände und Medienleitungen,
- Einzel- und Sonderbauwerke, wie z. B. Einlass- und Auslassbauwerke, Siele, höhengleiche Gewässerkreuzungen, abflussbeeinflussende Verkehrsanlagen (z. B. Straßendämme, Bahndämme, Straßenbegrenzungen, Lärmschutzanlagen und vergleichbare Anlagen), Tunnel und Unterführungen.

Bei der Wahl des wasserwirtschaftlichen Bemessungsereignisses, Abschnitt 6.2.2 der Norm, wird üblicherweise das HQ_{100} als Richtwert für das Bemessungsereignis angesetzt. Dabei sind aber die Auswirkungen des Klimawandels zu berücksichtigen. Dies gilt auch für die Bestimmung von extremen Abflüssen, Abschnitt 7.2, bei denen, sowohl, falls vorhanden, ein HQ_{extrem} aus historischen Abflussdaten als auch die Auswirkungen des Klimawandels berücksichtigt werden sollen. In Bezug auf Letzteres soll insbesondere die Möglichkeit der künftigen Überschreitung von bisherigen Beobachtungen infolge des Klimawandels einbezogen werden.

2.4 Die DIN-Klimatoolbox und Klima-Normenscreening

Bei DIN ist seit 2024 die DIN-Klimatoolbox in Benutzung, die zu den drei Themen Klimaschutz, Klimaanpassung und Zirkularität kurze Fragelisten enthält. Diese Fragelisten können von DIN-Gremien genutzt werden, um einzuschätzen, ob die Überarbeitung einer konkreten Norm in Bezug auf die genannten Themen sinnvoll sei. Bei Bedarf können die DIN-Projektmanager*innen Ihren Gremien weitere Dokumente aus der Klimatoolbox zur Verfügung stellen, die diese Gremien bei der Berücksichtigung dieser Themen unterstützen.

Seit Ende 2024 werden in den DIN-NAW Fachbereichen 2 und 5 alle Normen im Rahmen der systematischen Überprüfung (regulär alle 5 Jahre) ebenfalls dahingehend überprüft, ob ein Potential bezüglich Klimaschutz, Klimaanpassung und/oder Zirkularität vorhanden ist. Die Fragelisten aus der Klimatoolbox wurden dazu weiter verkürzt, siehe Tab. 2. Dieses bei DIN-NAW FB 2 und 5 stattfindende Klima-Normenscreening wird entsprechende relevante Normen identifizieren.

Tabelle 2: Klima-Normenscreening im DIN-NAW

Fragen	Antwortmöglichkeiten
Wie groß ist das Potential einer Modifizierung der Norm in Bezug auf Klimaschutz, Klimafolgenanpassung und Zirkularität?	„Niedriges Potential“, „Mittleres Potential“, „Hohe Potential“ oder „Nicht zutreffend“
Kann eine Modifizierung der Norm signifikante Treibhausgasemissionen maßgeblich reduzieren?	Ja (Kommentar erforderlich)/ Nein/ Kann ich nicht beantworten
Kann eine Modifizierung der Norm Risiken reduzieren, die durch Extremwetterereignisse oder veränderte klimatische Bedingungen verursacht sind?	Ja (Kommentar erforderlich)/ Nein/ Kann ich nicht beantworten
Kann sich eine Modifizierung der Norm positiv auf die Zirkularität von Produkten oder Werkstoffen auswirken, das heißt auf Lebensdauer, Wiedernutzung und Reparatur bzw. auf die Recyclingfähigkeit?	Ja (Kommentar erforderlich)/ Nein/ Kann ich nicht beantworten

2.5 Einwirkungen auf Bauwerke – DIN EN 1991 (mehrere Teile)

CEN hat im Zuge der Überarbeitung der Eurocodes in eine 2. Generation ein Mandat M/526 „Climate Change“ eingerichtet. Die Einwirkungsnormen, die klimatische Parameter adressieren, wie die für Schneelasten (prEN 1991-1-3), für Windlasten (prEN 1991-1-4), für Temperatur (prEN 1991-1-5) und für atmosphärische Eisbildung (prEN 1991-1-9) haben den Klimawandel zu berücksichtigen. Die Berücksichtigung erfolgt durch entweder einen additiven oder einen multiplikativen Term. Nachfolgende Formel (1) aus prEN 1991-1-5 zeigt exemplarisch die Bestimmungsgleichung für eine um den Klimawandel-Zuschlag-Term $\Delta T_{cc,max}$ erhöhte charakteristische Maximal-Lufttemperatur im Schatten T_{max} , dann als T'_{max} . $\Delta T_{cc,max}$ ist mit einem Wert ≥ 0 festzulegen. Analog wird mit Minimal-Temperaturen verfahren.

$$T'_{max} = T_{max} + \Delta T_{cc,max} \quad (1)$$

In den prEN's werden nur die Regeln aufgestellt, während die Mitgliedsländer die Terme entsprechend ihrer nationalen Sicherheitsbedürfnisse in ihren

jeweiligen Nationalen Anhängen gestalten sollen. Sowohl Bestimmungsgleichung als auch die Klimawandel-Zuschlag-Terme sind im zur EN zugehörigen Nationalen Anhang länderspezifisch zu regeln.

3 Die (Idee zur) Klima-Dachnorm

3.1 Veranlassung

Die vorgenannten Ausführungen zeigen, dass in verschiedenen Normen erste Anforderungen zur Berücksichtigung des Klimawandels formuliert wurden, ohne jedoch konkretisiert worden zu sein. Da aber die benötigte Klima-Expertise in vielen Gremien fehlt und gleichzeitig eine kohärente Behandlung der Themen Klimaanpassung und Klimaschutz im DIN-NAW angestrebt wird, soll eine modular aufgebaute und mit Wissens- und Entscheidungsfortschritt flexibel anpassbare Klima-Dachnorm für den NAW erarbeitet werden. Ziel ist es, schneller den Klimawandel betreffende Anforderungen und Empfehlungen bereit zu stellen.

3.2 Umsetzung

Die Klima-Dachnorm soll sich in zwei Hauptteile gliedern: „Anpassung an den Klimawandel“ und „Klimaschutz“, jeweils mit normativen und informativen Anhängen, Abb. 1. Die Hauptteile sollen in Kürze die grundsätzlichen Prinzipien regeln, während die Anhänge fach- bzw. ausschussspezifische Regelungen, Kennwerte und/oder Strategien enthalten sollen. Da im föderalen Deutschland wasserwirtschaftliche Regelungen von Bundesland zu Bundesland unterschiedlich sein können, sollen zunächst Empfehlungen formuliert werden.

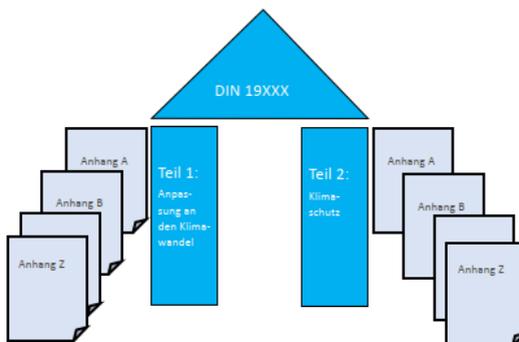


Abbildung 1: Skizzierter Aufbau der angedachten Klima-Dachnorm

Der Teil „Anpassung an den Klimawandel“ soll die Berücksichtigung des Klimawandels zum Beispiel durch Anpassungsfaktoren für Abflüsse, Temperaturen, etc., aber auch Strategien wie No-/Low-regret-Maßnahmen, enthalten. Binnengewässer, Meere, oder auch andere Wasserbau-Systeme werden adressiert. Im Teil „Klimaschutz“ sollen Anforderungen an Baustoffe im Lebenszyklus, z. B. CO₂-Bilanzierung, definiert werden sowie wasserbau-spezifische Bauweisen, wie z. B. Tragsysteme, Dämme, etc. und Baustoffe, wie z.B. Beton, Stahl, Boden, etc. adressiert werden.

Hauptteile und Anhänge sollen den Diskussionsprozess mit Stakeholdern (LAWA, „nasse“ Behörden der Landesverwaltungen, BMDV, BMU, „nasse“ Behörden der Bundesverwaltung, Wasser-Verbände, Umweltverbände, usw.) widerspiegeln. Das Dokument soll weiterhin Kooperationen, Schnittstellen, Verweisungen oder auch Abgrenzungen zu anderen Normenausschüssen (z.B. NABau, NAGUS, usw.) enthalten. Die NAW-Dachnorm soll ein Pilot für die Behandlung von Klimaanpassung und Klimaschutz auch in anderen DIN-Normenausschüssen sein.

4 Vernetzung

Zusammen mit DKE und VDI hat DIN in 2024 die 3. Staffel des Klimafrühstücks mit virtuell 8 Terminen am Dienstag-Morgen, 08:00 bis 08:45 Uhr, zu Aspekten des Klimawandels fortgesetzt, DIN-DKE-VDI (2024). Im April 2025 wird die 4. Staffel der Reihe fortgesetzt werden. Im Rahmen der Reihe wird regelmäßig über die Rolle von Normung und Standardisierung in Bezug auf die Themen Klimaschutz und Klimaanpassung informiert.

Für DIN hat die Unterstützung seiner Stakeholder in Bezug auf Klimaschutz und auf die Anpassung an den Klimawandel eine sehr hohe Priorität.

DIN ist das deutsche Mitglied beim europäischen Komitee für Normung, kurz CEN, sowie bei der internationalen Organisation für Normung, ISO. Mit seiner eigens gegründeten DIN-geführten Koordinierungsgruppe (COG) „Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel“ trägt CEN den Forderungen der gleichnamigen EU-Strategien Rechnung. CEN hat die europäischen Normungsorganisationen aufgerufen, zu den Bemühungen beizutragen, Europa

klimaresistenter zu machen. Ein entsprechender Normungsauftrag der europäischen Kommission, der die Überprüfung von europäischen Infrastruktural-Normen fordert, wird zeitnah erwartet.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Der Klimawandel ist eine der drängendsten Herausforderungen für die Gesellschaft und bedarf der Berücksichtigung im täglichen Leben und damit auch im wasserbaulichen Handeln und seinen Regelwerken. Regelwerke nehmen dabei eine Schlüsselrolle bei der Stärkung der Klima-Resilienz ein. DIN-NAW hat die Thematik innerhalb des DIN, aber auch mit Verbundpartnern aufgenommen. Neben der Berücksichtigung des Klimawandels in einzelnen Normen ist eine Klima-Dachnorm angedacht, die Klima-Aspekte modular, effizienter und flexibler in dem Normenwerk verankern möchte.

6 Literatur

- DIN-DKE-VDI (2024): <https://www.din.de/de/din-und-seine-partner/termine/din-dke-vdi-fruehstuecksreihe-klima-und-normung-1044052>. Zuletzt abgerufen 2025-01-07.
- DIN-NAW (2022): Beiratsbeschluss 8/2022. Bericht über die 99. Sitzung des NA 119 BR „Beirat des DIN-Normenausschusses Wasserwesen (NAW)“ am 2022-03-24. (unveröffentlicht).
- DIN 19657 (2023): Sicherungen von Gewässern, Deichen und Küsten. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 19661 (2025): Bauwerke in, an, über und unter oberirdischen Gewässern. DIN Media, Berlin.
- DIN 19664 (2023): Sohlenbauwerke im Wasserbau. Beuth-Verlag, Berlin.
- LAWA (2017): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft – Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder. Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (Hrsg.)
- Munich-Re (2025): https://www.epo.de/index.php?option=com_content&view=article&id=17366:munich-re-klimakatastrophen-verursachten-2024-weltweit-320-milliarden-dollar-schaden&catid=227&Itemid=100198; zuletzt abgerufen 2025-01-07.
- prEN 1991 (2024): Actions on structures (drafts). Parts 1991-1-3: Snow loads; 1991-1-4: wind actions; 1991-1-5: temperature; 1991-1-9: atmospheric icing. CEN.

Autoren:

LBDiR a.D. Dipl.-Ing. Claus Kunz
Sense of Safety
Vorsitzender DIN-NAW (ehrenamtl.)
Salbeiweg 41
76149 Karlsruhe

Dr. Jörg Megow
DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
Projektkoordinator Klimawandel
Burggrafenstrasse 6
10787 Berlin

Tel.: +49 157 50284215
E-Mail: claus.kunz@sensos.tech

Tel.: +49 2601 2564
Fax: +49 2601 4 2564
E-Mail: Joerg.Megow@din.de

Resilienz in Hochwasser- und Starkregenrisikomanagement

Robert Jüpner
Reinhard Pohl

Stichworte: *Resilienz, Hochwasserrisikomanagement, Starkregenrisikomanagement, Klimaanpassung*

1 Einführung

In der Fachwelt werden Ansätze zur Verbesserung des bestehenden Systems des Hochwasser- und Starkregenrisikomanagements intensiv diskutiert. Basierend auf den Erfahrungen der vergangenen katastrophalen Hochwasserereignisse, u. a. im Juli 2021 im Ahrtal, sowie im Hinblick auf die Notwendigkeit der Anpassung an den Klimawandel, erscheinen Ansätze zur Verbesserung der Resilienz erfolversprechend. Die DWA-Arbeitsgruppe „Resilienz in Hochwasser- und Starkregenrisikomanagement“ hat 2018 die Aufgabe übernommen, dieses Themenfeld zu bearbeiten und in einem Themenband den aktuellen Stand der Fachdiskussion, bereits entwickelte (oder in der Entwicklung befindliche) methodische Ansätze sowie konkrete Beispiele ausführlich darzustellen. Arbeitsfortschritt und verschiedene inhaltliche Aspekte waren Gegenstand verschiedener Fachveröffentlichungen, u. a. Jüpner et. al., 2018 und Jüpner et. al., 2023. Im April 2024 erschien der Themenband T2/2024 (DWA, 2024); die wesentlichen fachlichen Inhalte werden nachfolgend kurz dargestellt.

2 Begriffsbestimmung Resilienz im Hochwasser- und Starkregenrisikomanagement

Was genau bedeutet Resilienz im Hochwasser- und Starkregenrisikomanagement? In der Fachliteratur ist dazu eine Vielzahl von Begriffsbestimmungen und Interpretationen zu finden. Es existieren unterschiedliche Definitionen des Begriffs, aber die Übersetzung in konkretes Management von Hochwasser und Starkregen bleibt hierbei oft vage. Was unter Resilienz verstanden wird, hängt von der Fachdisziplin bzw. der thematischen Perspektive ab.

Das DWA-Themenheft trägt theoretische, konzeptuelle sowie methodische Ansätze zusammen. Dabei steht weniger eine vollständige Aufarbeitung im Zentrum, sondern eine Operationalisierung und Konkretisierung für das Hochwasser- und Starkregenrisikomanagement. Es können drei wesentliche Merkmale für die Beschreibung und Analyse von Resilienz im Hochwasser- und Starkregenrisikomanagement abgeleitet werden. Diese sind durchaus als ein Kontinuum zu verstehen und umfassen folgende Eigenschaften (Abb. 1):

- (1) Resistenz (Widerstandskraft): Beschreibt die Fähigkeit eines Systems, einer Störung bzw. einer Krise zu widerstehen und die Ausgangsbedingungen zu erhalten
- (2) Erholung (Wiederherstellung(szeit), recovery): Beschreibt die Fähigkeit eines Systems, nach einer Störung zur ursprünglichen oder gewünschten Systemfunktion (möglichst bald) zurückzukehren
- (3) Transformation: Beschreibt die Ermöglichung bzw. die Erleichterung des Übergangs zu neuen, weniger verwundbaren Bedingungen (adaptiv, build back better)

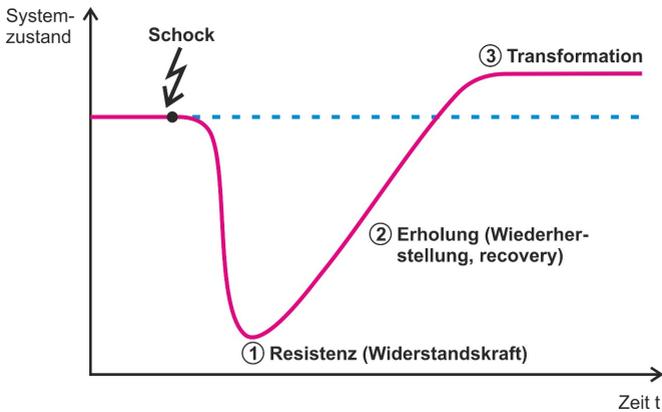


Abbildung 1: Reaktion eines resilienten Systems auf ein Schockereignis (DWA, 2024)

Ein sehr resilientes System ist somit durch eine hohe Widerstandskraft bzw. beim Eintreten eines Schocks durch eine hohe Erholungskapazität (bzw. möglichst kurze Rückkehr- oder Wiederherstellungszeit) definiert. Während der Erholungsphase können Übergänge zu weniger verwundbaren Bedingungen geschaffen werden (build back better).

3 Resilienz als Erweiterung von Hochwasser- und Starkereignisrisikomanagement

Die Resilienz kann als Erweiterung des Risikokonzeptes angesehen werden, die insbesondere den Aspekt des „Wiederaufstehens bzw. der Erholung“ (recovery) betont. Sie beinhaltet auch die Fähigkeit, den Wiederaufbau schneller zu ermöglichen, indem Hindernisse systematisch reduziert werden. Bisher fehlt es noch an belastbaren, umfassenden Schadensdaten, die eine Bewertung des Wiederaufstehens transparent und objektiv ermöglichen. Die Bemessung von Resilienz ist naturgemäß schwierig und Ansätze zur quantitativen Messung von Resilienz stoßen schnell an ihre Grenzen. In der wissenschaftlichen Debatte wird Resilienz mitunter auch in verschiedenen Dimensionen (Sachzusammenhängen) diskutiert. Der Vorteil einer solchen multidimensionalen Betrachtung liegt darin, deutlich zu machen, dass

Resilienz kein absolutes und deterministisches Konzept ist, das durch objektiv tatsächlich messbare Befunde überprüft werden kann, sondern auch immer von sozialen Gegebenheiten abhängt und im Kern normative und sogar politische Aspekte beinhaltet, die sich einer rein ingenieurwissenschaftlichen Herangehensweise zum Teil entziehen (DWA, 2024). Ein multidimensionales Verständnis von Resilienz bedeutet, dass die verschiedenen Dimensionen ortsspezifisch und kontextabhängig abgewogen werden müssen. Geht man etwa von vier Dimensionen aus, (1) physisch-konstruktive Resilienz (also etwa durch angepasste Bauwerke), (2) finanzielle Resilienz (die Kapazität, die Schäden monetär abzufangen), (3) sozio-psychologische Resilienz (also die Fähigkeit der betroffenen Personen und Gemeinschaften, mit einem Ereignis umzugehen) und (4) Ökosystemresilienz (bezogen auf die betroffene Umwelt), kann man diese in einem Tetraeder veranschaulichen (Abb. 2). Darin ließe sich die Systemresilienz für jede Hochwasser- oder Starkregensituation einordnen und durch einen Punkt im Inneren des Körpers visualisieren, dessen möglicherweise unterschiedlichen Abstände zu den jeweiligen Eckpunkten anzeigen, in welcher Hinsicht (Dimension) das System besonders resilient ist und in welcher nicht.

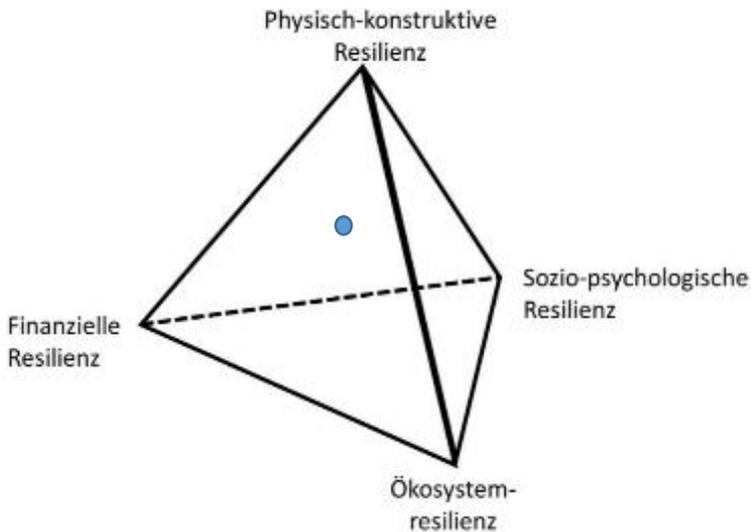


Abbildung 2: Vier Dimensionen der Resilienz (DWA, 2024)

4 Beispiele für die Bestimmung von Resilienz

Im DWA-Themenheft „Resilienz in Hochwasser- und Starkregenrisikomanagement“ werden verschiedene Verfahren und Vorschläge zur Beschreibung, Ermittlung oder Quantifizierung von Resilienz mit Beispielen unterlegt und erläutert. Die Ergebnisse dieser Ansätze sollen eine vergleichende Einschätzung der Resilienz von Objekten und Systemen (Rinnert et. al., 2019) gestatten. Außerdem wird es möglich, die Wirkung von Maßnahmen auf die zeitliche Reaktion unterschiedlich resilienter Systeme auf ein Schockereignis (Chen & Leandro, 2019) abzuschätzen. Folgende Ansätze werden unterschieden:

- Resilienz als qualitative Eigenschaft
- Resilienz als Bemessungs- und Rechengröße
- Resilienz ausgedrückt durch Indikatoren
- Resilienz als Erweiterung einer modellbasierten, multikriteriellen Hochwasserrisikoanalyse
- Erweiterte Betrachtungen durch Einbeziehung der Funktionalität

Diese Ansätze werden im Themenheft erläutert und mit Beispielen unterlegt.

Ein wichtiges Anliegen der Resilienzforschung ist die Einbeziehung dieser Überlegungen in Bemessungskonzepte für Bauwerke der Wasserwirtschaft und Infrastruktur. Angesichts unscharfer Eingangswerte aus der Natur (z. B. Hochwasser, Erdbeben) stellt sich die Frage nach einem möglichst zutreffenden Bemessungskonzept. Während der Nutzungszeiten der meisten langlebigen Anlagen können sich auch auf der Widerstandsseite schwer zu erfassende Veränderungen infolge Alterung ergeben, was die Unschärfe insgesamt erhöht. Nachdem lange Zeit eine deterministische Bemessung mit Globalsicherheiten erfolgte, wird nun meist eine semiprobabilistische Bemessung mit Teilsicherheitsbeiwerten durchgeführt in deren Ergebnis ein Ausnutzungsgrad bestimmt wird. Auch die beiden nächsten Bemessungslevels werden z. T. schon angewendet: die probabilistische und die risikobasierte Bemessung. Die risikobasierte Bemessung bezieht zusätzlich zur Wahrscheinlichkeitsabschätzung die Konsequenzen zur Ermittlung des Risikos $R = P \times C$ ein. Mit einem weiteren Schritt, der Beurteilung der Resilienz, ließen sich noch zusätzliche Informationen zur Pufferkapazität und bezüglich der Rückkehrzeit bis zum Wiedererreichen vollen Funktionalität des Systems

nach einer starken Einwirkung (Schock) ergänzen und somit Bauweisen auswählen oder Instandsetzungsvarianten favorisieren, die dem Resilienzgedanken bestmöglich entsprechen.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die DWA-Arbeitsgruppe „Resilienz in Hochwasser- und Starkregenrisikomanagement“ hat mit der Erarbeitung des gleichnamigen Themenbandes eine umfassende Abhandlung der Thematik vorgelegt, die sowohl theoretische Grundlagen als auch praktische Beispiele enthält und zur notwendigen weiteren Fachdiskussion eine fundierte Basis liefern wird.

Resilienz spielt zunehmend im Zusammenhang mit den Auswirkungen des Klimawandels eine Rolle im Hochwasser- und Starkregenrisikomanagement und darüber hinaus. Auch das Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015 - 2030 (UNISDR, 2017) zielt darauf ab, Katastrophen zu verhindern und die Vulnerabilität und Gefährdung zu verringern sowie die Reaktions- und Wiederherstellungsbereitschaft zu erhöhen, und widmet sich daher speziell der Stärkung der Resilienz. In Deutschland sind durch die Bundesländer verschiedene diesbezügliche Umsetzungsbemühungen zu erkennen. Zum Beispiel wurde mit der „Wasserzukunft Bayern 2050“ eine integrale Strategie der bayerischen Wasserwirtschaftsverwaltung zur mittel- bis langfristigen Bewirtschaftung der Wasserressourcen erarbeitet, die für bislang absehbare Folgen des Klimawandels und weitere Veränderungsfaktoren Anpassungsmaßnahmen formuliert.

(https://www.stmuv.bayern.de/themen/wasserwirtschaft/wasserzukunft_bayern_2050/index.htm). Es ist zu erwarten, dass weitere Bundesländer diesem Beispiel folgen werden.

6 Literatur

Jüpner, R.; Bachmann, D.; Huber, N .P.; Fekete, A.; Hartmann, T.; Pohl, R.; Schmitt, T.; Schulte, A. (2018): Resilienz im Hochwasserrisikomanagement. In: Korrespondenz Wasserwirtschaft: KW, Heft 11 | 18, S. 656 – 663, Hennef: GFA - ISSN: 1865-9926

Jüpner, R.; Bachmann, D.; Christoffels, E.; Disse, M.; Hartmann, T.; Kron, W.; Leandro, J.; Pohl, R. (2023): Resilienz im Hochwasser- und

Starkregenrisikomanagement - Bericht aus der DWA-Arbeitsgruppe HW
4-7. In: Korrespondenz Wasserwirtschaft, Heft 7/2023, S. 410 – 414

Chen, K.; Leandro, J. (2019): A conceptual time-varying flood resilience index for
ur-ban areas: Munich city, Water 11 (4), 830

Rinnert, C., Pohl, R., Jüpner, R. (2019): Ist Resilienz messbar? Ein Beitrag aus
Sicht des Hochwasserrisikomanagements. In: Wasserwirtschaft
109(2019)12, S. 52-55, ISSN 0043-0978

UNISDR (2017): Build Back Better. In recovery, rehabilitation and reconstruction.
Available online at https://www.unisdr.org/files/53213_bbb.pdf

Autoren:

Prof. Dr. Robert Jüpner

Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft
Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau
Paul-Ehrlich-Strasse 14
67663 Kaiserslautern

Tel.: +49 631 205 3805

Fax: +49 631 205 3904

E-Mail: robert.juepner@rptu.de

Prof. Dr.-Ing habil. Reinhard Pohl

Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik
Technische Universität Dresden
George-Bähr-Straße 1
01062 Dresden

Tel.: +49 351 46335693

Fax: +49 351 46337141

E-Mail: reinhard.pohl@tu-dresden.de

Überarbeitung der ZTV-W LB 215 für den Verkehrswasserbau - Aktueller Stand und Ausblick

Frank Spörel
Andreas Westendarp

1 Einleitung

Neubau und Instandsetzung massiver Verkehrswasserbauwerke gehören zu den zentralen Aufgaben der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes im Hinblick auf den Erhalt und die Modernisierung ihres Bauwerksbestands. Sowohl beim Neubau wie auch bei der Instandsetzung massiver Wasserbauwerke sind besondere verkehrswasserbauspezifische Einwirkungen, Anforderungen und Randbedingungen zu berücksichtigen. Exemplarisch genannt seien hier Einwirkungen wie der allgegenwärtige Wasserdruck, Hydroabrasion oder ein besonders intensiver Frostangriff, aber auch die Notwendigkeit einer angemessenen Bemessung der zumeist massigen Bauteile hinsichtlich Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit. Angestrebt werden im Regelfall Nutzungsdauern der Bauwerke von mindestens 100 Jahren bei möglichst minimalen Ausfallzeiten.

Gängige Regelwerke des allgemeinen Hoch- und Ingenieurbaus oder des Brückenbaus können (und sollen auch) den vorgenannten verkehrswasserbauspezifischen Anforderungen zumindest nicht vollumfänglich gerecht werden. Hier besteht für den Bereich des Verkehrswasserbaus ergänzender Regelungs- bzw. Handlungsbedarf. Der Verkehrswasserbau war und ist dabei stets bestrebt, europäische und nationale Regelungen aufzunehmen und möglichst nur um das Notwendigste zu ergänzen.

Die ZTV-W LB 215 gelten für Wasserbauwerke aus Beton und bauen auf die Grundnormen zur Bemessung (DIN EN 1992-1-1, DIN 1045-1), zum Beton (DIN 1045-2) und zur Bauausführung (DIN 1045-3) auf. Die zugrunde liegende Normenreihe der DIN 1045 wurde in den letzten Jahren überarbeitet

und im August 2023 veröffentlicht. Die bauaufsichtliche Einführung in den Bundesländern soll bis März 2025 erfolgen.

Alein vor diesem Hintergrund ergibt sich umfangreicher Anpassungsbedarf des zentralen verkehrswasserbauspezifischen Regelwerkes für den Neubau. Neben einer Anpassung an die neue DIN 1045 gab es zahlreiche fachliche Themen, welche in den letzten Jahren bei Baumaßnahmen der Wasserstraßen und Schifffahrtsverwaltung (WSV) relevant waren oder in Forschungsvorhaben der BAW erarbeitet wurden. Bei der Überarbeitung der ZTV-W LB 215 wurden diese Themen ebenfalls berücksichtigt sowie die bestehenden Regelungen kritisch hinterfragt.

2 Überarbeitungsbedarf

2.1 ZTV-W LB 215 und zugehörige BAW-Merkblätter

Überarbeitungsschwerpunkt der ZTV-W LB 215:2025 waren die Anpassung an Struktur und Inhalte der neuen DIN 1045:2023-Reihe sowie die Integration der umfassend überarbeiteten Regelungen zur Bemessung von massigen Bauteilen von Verkehrswasserbauwerken im Hinblick auf frühen und späten Zwang. Letztgenannte Regelungen werden in einem grundsätzlich überarbeiteten BAW-Merkblatt Rissbreitenbegrenzung für Zwang in massiven Wasserbauwerken (BAW-MRZ) zusammengestellt, auf welches die ZTV-W LB 215 Bezug nimmt.

Das BetonBauQualitäts-Konzept (BBQ-Konzept) der DIN 1045:2023, welches in erster Linie der Differenzierung des Anforderungsniveaus in technischer Hinsicht sowie der Sicherstellung einer angemessenen schnittstellenübergreifenden Kommunikation über Planung, Bauausführung und Baustoffe hinweg dienen soll, wurde in die ZTV-W LB 215 übernommen. Vergleichbare Ansätze hierzu waren bereits in der bisherigen ZTV-W LB 215 enthalten.

Mit Bezug zur ZTV-W LB 215 wurden folgende BAW-Merkblätter überarbeitet bzw. neu erstellt:

1. BAW Merkblatt Rissbreitenbegrenzung für Zwang in massiven Wasserbauwerken (MRZ), siehe Absatz 3.2
2. BAW Merkblatt Bestimmung der adiabatischen Temperaturerhöhung von Beton (MATB), siehe Absatz 3.3

3. BAW Merkblatt Entmischungssensibilität von Beton (MESB), siehe Absatz 3.4
4. BAW Merkblatt Zweitbeton (MZB)
 - Anpassung an DIN 1045:2023 und DAfStb-RL Vergussbeton
5. BAW Merkblatt Bau massiver Wasserbauwerke im Meerwasserbereich (MBM), siehe Abschnitt 3.8
6. BAW Merkblatt Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC)
 - Anpassungen hinsichtlich der Anwendung von Bemessungsansätzen
7. BAW Merkblatt Frostprüfung von Beton (MFB)
 - Ergänzung eines Anhangs Statistik
8. BAWMerkblatt Abdichten von Bewegungsfugen (MAB)
 - Zusammenstellung von Informationen zur Abdichtung von Bewegungsfugen im Neubau und im Bestand sowie zwischen Altbeton- und Neubetonbauteilen und zwischen Beton- und Stahlwasserbau- teilen

Für die ZTV-W LB 215 und die vorgenannten Merkblätter Nr. 1 bis 4 wurde das Gelbdruckverfahren im Dezember 2024 eröffnet. Die Merkblätter Nr. 5 bis 8 sollen voraussichtlich Ende März 2025 in das Gelbdruckverfahren überführt werden.

3 Inhaltliche Themen

3.1 DIN 1045

Im BBQ-Ansatz der DIN 1045-1000 finden sich viele Ansätze, die im Verkehrswasserbau bereits seit vielen Jahren gängige Praxis sind, insbesondere die kommunikativen Aspekte oder das Betonbaukonzept. Die BBQ-Klassen bzw. die darunter angesiedelten Planungs-, Beton- und Ausführungsklassen und die damit in den Teilen der DIN 1045 verknüpften Festlegungen stellen sich als hilfreich für eine im Gelbdruck der ZTV-W LB 215 neu eingeführte Differenzierung dar. In Abhängigkeit verschiedener Kriterien erfolgt eine Einord-

nung von Bauwerken mit unterschiedlichem Anforderungsprofil. Als Kriterien dienen Randbedingungen aus der späteren Nutzung der Bauwerke, wie das Gefährdungspotential, der Verfügbarkeitsanspruch, die Zugänglichkeit für etwaige Instandsetzungen sowie die Nutzungsdauer (siehe Gelbdruck ZTV-W LB 215, Teil 1000, Tabelle 1).

3.2 Zwang/Risse

Das Thema Zwang/Risse hat bei den in der Regel massigen Betonbauteilen im Verkehrswasserbau eine hohe Bedeutung. Den in den letzten Jahrzehnten stetig gestiegenen Bewehrungsmengen wurde bereits seit 2004 für den frühen Zwang mit dem BAWMerkblatt MFZ begegnet, welches 2011 fortgeschrieben und 2019 in einem ersten Gelbdruck zum BAWMerkblatt MRZ auch für die Berücksichtigung des späten Zwangs, erweitert wurde. Durch die Überarbeitung des Gelbdrucks wird nun ein angemessener Umgang mit dem Zwang massiger Betonbauteile im Verkehrswasserbau möglich. Inhaltliche Erläuterungen können (Schlick, Krenn, Lühr 2025) entnommen werden. Parameterstudien mit dem verformungskompatiblen Ansatz haben gezeigt, dass beispielsweise die Bandbreite, in der sich die adiabatische Temperaturerhöhung gängiger Betone für massige Bauteile in unterschiedlichen Expositionsclassen bewegt, aber auch andere Betoneigenschaften eine vergleichsweise geringe Auswirkung auf die erforderliche Zwangbewehrung haben. Andere Aspekte, wie die Festlegung von Betonierabschnittshöhen wirken sich weit deutlicher auf die Bewehrungsmengen aus (Lühr et al. 2025). Der Planung und Festlegung der Betonierabschnitte kommt so eine höhere Verantwortung bei der angemessenen Verwendung der Bewehrung mit allen Folgen hinsichtlich Nachhaltigkeit, Betonierbarkeit und Baufortschritt zu. Das Thema Zwang ist relevant in allen Bauphasen, so dass sich aus der Überarbeitung Auswirkungen auf die Teile 1, 2 und 3 der ZTV-W LB 215 ergeben haben. So konnten die Anforderungen der aktuellen ZTV-W LB 215 in der Tabelle 2 nahezu vollständig zurückgenommen werden. Um die Einhaltung der verbliebenen Temperaturanforderungen sicherstellen zu können, ist jedoch nach wie vor die Verwendung von LH-Zement erforderlich. Insbesondere beim Thema Zwang ist eine ganzheitliche Betrachtung im Baugeschehen unter Berücksichtigung der o.g. Aspekte angebracht.

3.3 Adiabatische Temperaturerhöhung

Der zentrale Eingangsparameter für den frühen Zwang ist die adiabatische Temperaturerhöhung des Betons. In Verbindung mit der Frischbetontemperatur und den Bauteilabmessungen ist sie auch relevant hinsichtlich einer Gefährdung des Bauwerks durch sekundäre Ettringitbildung. In der derzeit noch aktuellen ZTV-W LB 215 wird die Bestimmung der adiabatischen Temperaturerhöhung in der Anlage 1 beschrieben. Zentrales Element ist dort der großformatige Betonblock. Alternative Bestimmungen mittels Laborversuch oder auf rechnerische Art sind dort zwar auch aufgeführt, jedoch ohne nähere Spezifizierung. Sie kommen nur zur Anwendung, wenn sie ausdrücklich in der Leistungsbeschreibung vereinbart sind. Die Erfahrung bei Bauprojekten der WSV hat gezeigt, dass insbesondere zum rechnerischen Nachweis Handlungsbedarf hinsichtlich einer Präzisierung vorlag. Im Rahmen eines Forschungsprojektes (BAW 2022; Spörel und Westendarp 2024) wurde sich dem Laborversuch und der rechnerischen Bestimmung gewidmet. Auf dieser Basis wurde für beide Varianten eine Vorgehensweise festgelegt. Die Ermittlung der adiabatischen Temperaturerhöhung mit den drei Methoden ist nun im Gelbdruckentwurf des BAWMerkblatts MATB beschrieben. Die Auslagerung der Inhalte aus der ZTV-W LB 215 in ein Merkblatt hat den Vorteil, dass auch durch die ZTV-W LB 219 auf das Merkblatt zurückgegriffen werden kann.

3.4 Entmischungssensibilität

Im Rahmen von Kontrollprüfungen durch den Auftraggeber konnten in den letzten Jahren Erfahrungen mit der baupraktischen Anwendung der Prüfverfahren nach BAWMerkblatt MESB gesammelt werden, welche Betone hinsichtlich deren Entmischungssensibilität bewerten. Nachteilig war der hohe Prüfaufwand beim Auswaschversuch nach Anlage A des Merkblatts und es zeigten sich Schwierigkeiten bei der Auswertung des Kleinbauteilversuchs nach Anlage C. Im Gelbdruckentwurf des Merkblatts wurde auf Grundlage von Literaturerkenntnissen sowie Laboruntersuchungen im Rahmen einer Masterarbeit das alternative Auswerteverfahren zum Auswaschversuch nach Abschnitt A.4.3 durch eine einfachere Methodik ersetzt, welches eine Bewertung über die Frischbetondichte ermöglicht. So kann der gesamte Auswaschvorgang entfallen und die Prüfung wird erheblich vereinfacht und beschleunigt. Erfahrungen mit dieser Methodik zur Ablösung des Auswaschversuches sind jedoch noch erforderlich. Auf Basis der Praxiserfahrungen wurde auch der Kleinbauteilversuch nach Anlage C angepasst.

3.5 Zemente

Die derzeitige ZTV-W LB 215 nimmt im Vergleich zum DIN Fachbericht 100 Einschränkungen bei den zulässigen Zementen vor. Hintergrund dieser Einschränkungen waren langjährige positive Erfahrungen mit bestimmten Zementen sowie umfangreiche Grundlagenuntersuchungen. Vor dem Hintergrund der in der neuen DIN 1045-2 deutlich erweiterten Bandbreite der Zemente erfolgte eine Neubewertung der Situation. Diese führte zu einer deutlichen Aufweitung der zulässigen Zemente.

3.6 Rezyklierte Gesteinskörnung

Rezyklierte Gesteinskörnung ist nach aktueller ZTV-W LB 215 von der Verwendung ausgeschlossen. Hintergrund waren u.a. die Ergebnisse eines Forschungsvorhabens (BAW 2009). Die Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten für rezyklierte Gesteinskörnung in der neuen DIN 1045 wurde zum Anlass genommen zu bewerten, ob künftig eine Verwendung auch im Anwendungsbereich der ZTV-W LB 215 angemessen erscheint. Eine Übersicht der Betrachtungen kann (Adams und Breit, 2025) entnommen werden. Insbesondere aufgrund normativer Einschränkungen sowie nicht geklärter Randbedingungen, zum Beispiel das Verhalten von RC-Beton unter nicht vorwiegend ruhender Belastung, bieten sich nicht viele Anwendungsbereiche im Verkehrswasserbau an. Dennoch konnten Randbedingungen zu Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung festgelegt werden.

3.7 Wasserabführende Schalungsbahnen

Regelungen zum Einsatz wasserabführender Schalungsbahnen sind bereits seit vielen Jahren in der ZTV-W LB 215 enthalten. Erfolgreiche Anwendung im Bereich der WSV gab es bereits seit den 1980er Jahren. Auch Probeanwendungen in den letzten Jahren zeigten einen erfolgversprechenden Ansatz. Anlass war die in letzter Zeit oftmals nicht zufrieden stellende Ausführungsqualität der Betonoberflächen bei Verwendung einer Schalhaut nach ZTV-W LB 215, ohne dass sich die Randbedingungen hinsichtlich der Betonzusammensetzung oder Bauteilgeometrien signifikant geändert haben. Während beispielsweise in Mock-up-Versuchen gezeigt wurde, dass eine gewohnt hohe Oberflächenqualität erzielt werden kann, wurde diese im anschließenden Baufortschritt nicht mehr erreicht. Kosten- und zeitintensive Nachbesserungen der geschalteten Betonoberflächen sind die Folge.

Daher wurden im Gelbdruckentwurf zur ZTV-W LB 215 die Randbedingungen zum Einsatz wasserabführender Schalungsbahnen angepasst und für bestimmte, besonders exponierte Bereiche im Sinne einer robusten Bauweise als Standardanwendung festgelegt. Erkenntnisse aus einem BAW-Vorhaben zur Nachbehandlung von Betonflächen (BAW 2012) wurden ebenfalls berücksichtigt.

3.8 Meerwasserbauwerke

Für Meerwasserbauwerke können verschiedene Vorgehensweisen gewählt werden. Dies betrifft deskriptive Festlegungen bei der Betonzusammensetzung, eine Dauerhaftigkeitsbemessung nach BAW-Merkblatt MDCC oder die Verwendung von Betonstahl mit erhöhtem Korrosionswiderstand. Weitere Vorgehensweisen, die tendenziell weniger geeignet sind, sind grundsätzlich auch denkbar. Die Vorgehensweisen sowie deren Anwendung werden im Gelbdruckentwurf zum neuen BAW-Merkblatt MBM beschrieben, welches derzeit erarbeitet wird.

4 Übergangsregelungen

Mit der Musterverwaltungsbestimmung technischer Baubestimmungen (MVV TB 2024/1) wird die Grundlage für die Einführung der Normenreihe DIN 1045:2023, Tragwerke aus Beton, Stahl-beton und Spannbeton, im bauaufsichtlichen Bereich der Länder geschaffen. Die bauaufsichtliche Einführung der Normenreihe DIN 1045:2023 soll in allen Bundesländern bis zum 28.02.2025 erfolgt sein. Die Normenreihe DIN 1045:2023 ist bereits heute als anerkannte Regel der Technik anzusehen, auf den Planer und bauausführende Firmen ihre Auftraggeber berechtigterweise hinweisen werden. Eine Verwendung der aktuellen verkehrswasserbauspezifischen Regelwerke in Verbindung mit der neuen DIN 1045:2023 ist allerdings nicht möglich. Daher wurden Anfang Januar 2025 seitens des BMDV/WS12 entsprechende Übergangsregelungen eingeführt, um für den Zeitraum bis zur Einführung des künftigen verkehrswasserbauspezifischen Regelwerks eine einheitliche Vorgehensweise bei Planung, Ausführung und Baustoffauswahl sicherzustellen und Vertragssicherheit zu gewährleisten (BMDV 2025).

5 Literatur

- Adams, R., Breit, W. (2025): Rezyklierte Gesteinskörnung – Anwendungsmöglichkeiten im Bereich von Verkehrswasserbauwerken. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Aktuelle Regelwerke für Neubau und Instandsetzung massiver Verkehrswasserbauwerke. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.
- Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2009): Verwendung von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen bei Verkehrswasserbauten. FuE-Abschlussbericht A39510110050. Projekt Nr. 8161. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106996>
- Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2012): Untersuchung des Einflusses von Schalung und Nachbehandlung auf die Dauerhaftigkeit geschalter Betonflächen massiger Betonbauteile. FuE-Abschlussbericht A39510310141. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105129>
- Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2024): Gelbdruck BAWMerkblatt Bestimmung der adiabatischen Temperaturerhöhung von Beton (MATB). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien)
- Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2024): Gelbdruck BAWMerkblatt Entmischungssensibilität von Beton (MESB). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien)
- Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2024): Gelbdruck BAWMerkblatt Rissbreitenbegrenzung für Zwang in massiven Wasserbauwerken" (MRZ). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien)
- Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2024): Gelbdruck BAWMerkblatt Zweitbeton (MZB). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien)
- Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2022): Messverfahren Hydratationswärme. FuE-Abschlussbericht B3951.03.04.70004. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/109066>
- Bundesministerium für Digitales und Verkehr (Hg.) (2024): Gelbdruck Zusätzliche Vertragsbedingungen – Wasserbau für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton, Leistungsbereich 215, Ausgabe 12/2024
- Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) (2025): Anwendung der Normenreihe DIN 1045:2023, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton. Erlass WS 12/5257.6/1

- DIN 1045-1000: 2023-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1000: Grundlagen und Betonbauqualitätsklassen (BBQ).
- DIN 1045-1: 2023-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Planung, Bemessung und Konstruktion.
- DIN 1045-2: 2023-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton
- DIN 1045-3: 2023-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 3: Bauausführung
- DIN 1045-4: 2023-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 4: Betonfertigteile - Allgemeine Regeln.
- Lühr, S.; Borschneck, F.; Schlicke, D.; Krenn, C., (2025): Bemessung im verformungskompatiblen Ansatz nach MRZ Stand 2024, Bemessungsbeispiel und Parameterstudien. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Aktuelle Regelwerke für Neubau und Instandsetzung massiver Verkehrswasserbauwerke. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.
- Schlicke, D., Krenn, C., Lühr, S.: MRZ Stand 2024, Historie, Hintergründe und Neuerungen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Aktuelle Regelwerke für Neubau und Instandsetzung massiver Verkehrswasserbauwerke. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau..
- Spörel, Frank; Westendarp, Andreas (2024): Bestimmung der adiabatischen Temperaturerhöhung von Beton, Teil 1+Teil 2. In: beton 74 (3). S. 60-65, 74 (4). S. 112-116. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/114023>, <https://hdl.handle.net/20.500.11970/114024>

Dr. Frank Spörel

Andreas Westendarp

Bundesanstalt für Wasserbau
Abteilung Bautechnik
Kussmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

Bundesanstalt für Wasserbau
Abteilung Bautechnik
Kussmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

Tel.: +49 721 97265850
E-Mail: frank.spoerel@baw.de

Tel.: +49 721 97263290
E-Mail: andreas.westendarp@baw.de

Realisierungsgeeignete Normen und Regelwerke im Küstenschutz und der tidebeeinflussten Wasserwirtschaft

Olaf Müller, Gabriele Gönnert, Ella Hedwig-Albrecht, Francois Leesch, Karlotta-Franziska Seitz, Jan-Moritz Müller, Clais von Mirbach, Antje Grimpe und Karsten Winat

Stichworte: Küstenschutz, Normen, Richtlinie, Deiche, Gewässermodellierung, Gefährdungsbeurteilung, Regenwasserbehandlung, Bauverwaltung

1 Einführung

Rund 3.900 DIN-Normen betreffen nach *DIN e. V. (2024)* das Bauwesen. Der Küstenbereich wird jedoch seit jeher von DIN-Normen praktisch nicht umfasst. Vielmehr wird bei der Umsetzung von tidebeeinflussten Deichbauwerken durch die öffentliche Bauverwaltung auf empirisches Wissen zurückgegriffen. Weiterhin ergibt sich durch Urteile des Bundesverwaltungsgerichtes, z.B. zum Fahrrinnenausbau der Elbe, dass in der Planung angewandte Methoden öffentlicher Auftraggeber nach Stand der Wissenschaft und Forschung durchgeführt werden müssen. Hierbei müssen Fach- und Erfahrungswissen nachvollziehbar sein (*BAW, 2017*).

Letztlich zeigen die Fortschritte zur Anwendung von hydronumerischen Modellen eine breite Methoden- und Anwendungsvielfalt, die wasserrechtliche Festsetzungen betreffen und gar verändern können. Aufgrund von fehlenden DIN-Normen oder sonstiger Vorgaben hat der Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer (LSBG) innerhalb der letzten Jahre umfassende eigene Regelwerke aufgestellt und herausgegeben, welche im Weiteren kurz vorgestellt werden.

2 Ausgangslage

DIN EN 45020:2007-03 „Normung und damit zusammenhängende Tätigkeiten - Allgemeine Begriffe“ definiert eine Norm als ein „Dokument, das mit Konsens erstellt [...] und das für die allgemeine und wiederkehrende Anwendung Regeln, Leitlinien oder Merkmale für Tätigkeiten oder deren Ergebnisse festlegt, wobei ein optimaler Ordnungsgrad in einem gegebenen Zusammenhang angestrebt wird.“

Die Grundsätze der Normungsarbeit des DIN Deutsches Institut für Normung e. V. stellen unter anderem Konsens, Einheitlichkeit, Widerspruchsfreiheit, Ausrichtung am Stand der Wissenschaft und Technik, allgemeiner Nutzen sowie Sachbezogenheit dar (*DIN e. V., 2024*). Bei der Verwendung von öffentlichen Geldern und somit bei der Umsetzung von Maßnahmen durch die öffentliche Bauverwaltung sind Wirtschaftlichkeit und Sparsamkeit zu beachten. Dieses grundlegende Prinzip des Verwaltungshandelns ist insbesondere in der Bundes- bzw. Landeshaushaltsordnung festgeschrieben und findet bei der Erarbeitung von DIN-Normen keine Berücksichtigung.

2.1 Normung für Deichbauwerke

Deiche können als Ingenieurbauwerke mit Tradition beschrieben werden. Jahrhundertlang wurden sie nach dem Prinzip von „Trial-and-Error“ hergestellt. Erfahrungswissen wurde bei Neubau, Erhöhung oder durch Beobachtungen in der Deichunterhaltung gesammelt. Im Planungsprozess der öffentlichen Hand wird zudem unter anderem auf empirisches Wissen, wie beispielsweise „Die Küste, Heft 88 – EAK 2002 Empfehlungen für Küstenschutzbauwerke“ des *Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)*, zurückgegriffen.

Es ist festzustellen, dass für Ästuardeiche, welche in Hamburg als Hauptdeiche bezeichnet werden, nahezu keine DIN-Normen vorliegen. Als planungsrelevante Normen für Deichbauwerke lassen sich zwar beispielsweise DIN 19657:2023-12 „Sicherungen von Gewässern, Deichen und Küsten“, DIN 19712:2013-01 „Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern“ oder DIN 1186-1:2024-08 „Deckwerke aus Beton im Wasserbau – Teil 1: Anforderungen an verzahnte Deckwerke“ aufzählen. Diese sind jedoch nicht direkt auf die in Hamburg vorliegenden Bedingungen entlang der Tideelbe übertragbar.

Die öffentliche Bauverwaltung benötigt zur Umsetzung ihrer Maßnahmen pragmatische und damit realisierungsgerechte Vorgaben hinsichtlich Planungsanforderungen, Qualitätssicherung sowie dem Umgang mit dem Prinzip der Wirtschaftlichkeit und Sparsamkeit.

2.2 Anforderungen der Planung

Eine wesentliche Größe zur Dimensionierung eines Deichbauwerks stellt der Bemessungswasserstand dar, welcher auf Grundlage von hydronumerischen Modellen ermittelt wird. Für die Erstellung ebendieser Modelle ist ein einheitliches Verfahren notwendig, um die Vergleichbarkeit von Maßnahmen zu ermöglichen.

Das Vorgehen bei der geotechnischen bzw. geohydraulischen Nachweisführung ist z.B. durch DIN EN 1997-1:2014-03 Eurocode 7 in Kombination mit DIN 1057:2021-04 festgelegt, jedoch sind hydrodynamische und statische Einwirkungen speziell für tidebeeinflusste Deichbauwerke nicht definiert. Konstruktionsmerkmale und Regelzeichnungen bilden eine weitere wichtige Grundlage im Planungsprozess. Nur wenn Standards festgelegt sind, kann in Einzelfällen begründet davon abgewichen werden. Diese Standards stellen zudem die Planungsqualität sowie wirtschaftliches und sparsames Handeln sicher. Sie können darüber hinaus zu Prüfzwecken hinzugezogen werden. Varianten- und Nachhaltigkeitsuntersuchung sind je nach Projektgröße aufgrund von Rechtsprechungen durchzuführen. Auch diese sind nur mit Standards für Bewertungskriterien und Zielen vergleichbar.

Bundesweit wird allgemein die Verkürzung der Dauer von Genehmigungsverfahren gefordert. Dafür schaffen einheitliche Vorgaben und formelle Standards ebenfalls Effizienz. Zuletzt kann das Erhaltungsmanagement genannt werden, für welches einheitliche Vorgaben zur Dokumentation unabdingbar sind.

Besondere Herausforderung stellen in Hamburg zusätzlich die vielfältigen Schnittstellen im urbanen Raum dar, besonders zum Flächenmanagement, der Verkehrsführung, dem Naturschutz und dem Hafengebiet.

2.3 Methoden wasserbaulicher Anlagen

Bei der Planung von tidebeeinflussten Deichbauwerken kommen verschiedene Methoden zum Einsatz:

- Bemessungswasserstand mit fachlichem Multimethodenansatz
- 3D-Modellierung

- Extremwertstatistik
- Numerische bzw. analytische Nachweise
- Erdstatische Nachweisführung
- Geohydraulische Nachweise
- Empirische Nachweisführung mit juristischen Multimethodenansatz
- Building Information Modelling (BIM) im Wasserbau

Der Umfang und die Unterschiedlichkeit der anzuwendenden Methoden machen deutlich, wie komplex und vielseitig der Planungsprozess von Ingenieurbauwerken im Wasserbau sowie in der tidebeeinflussten Wasserwirtschaft ist.

3 Regelwerke des LSBG

Erstens ist aufgrund des demografischen Wandels und Fachkräftemangels das Verschriftlichen von Erfahrungswissen von besonderer Bedeutung. Das Verfassen von eigenen Regelwerken garantiert einen Wissenstransfer von Erfahrenen an Jüngere innerhalb des LSBG. Zweitens bitten in Ermangelung realisierungsgerechter Normen und Regelwerke Planer um Vorgaben seitens des öffentlichen Auftraggebers.

Der LSBG hat daher umfassende eigene Regelwerke erarbeitet, um fachliche Hilfestellung für Planer zu geben, rechtlichen Anforderungen zu genügen und um Qualität zu sichern.

3.1 Richtlinie Hauptdeiche

Hauptdeiche stellen eine Kombination aus Küstenschutzbauwerk und Flussdeich dar. Wie dargelegt, fehlen hier realisierungsgerechte Regelwerke, auf welche im Planungsprozess zurückgegriffen werden kann.

Mit der Veröffentlichung der Richtlinie Hauptdeiche, Geotechnische Nachweise und Bemessung im Jahr 2020 werden für den LSBG einheitliche Fachbegriffe eingeführt. Zudem wird festgelegt, dass der Deich als Regellösung umgesetzt werden soll. Des Weiteren wird für die Abweichung von der Regellösung oder bei Argumentation von strittigen Sachverhalten der sogenannte Multimethodenansatz als Abhandlung bzw. empirischer Nachweis eingeführt. Hierbei werden Sachverhalte grammatikalisch, juristisch und historisch sowie zweckmäßig eingeordnet. Zudem wird das Vorgehen der

Deichquerschnittbemessung vorgegeben. Außerdem werden hydraulische, statische und dynamische Einwirkungen sowie zu führende geotechnische und geohydraulische Nachweise festgelegt.

Mit der Veröffentlichung der Richtlinie Hauptdeiche, Planungsgrundlagen im Jahr 2024 wird die Richtlinie Hauptdeiche fortgeschrieben. Die weitere Richtlinie definiert das Projektmanagement unter Berücksichtigung von digitalen Tools. Zusätzlich werden Hamburger Planungsbesonderheiten im Umgang mit Baugrund, Kampfmitteln, Natur-, und Bodenschutz unter Berücksichtigung der entsprechenden Rechtsgrundlagen erläutert. Auch in der Bauausführung zu berücksichtigende Randbedingungen werden dargestellt.

3.2 Richtlinie Gewässermodellierung

Zur Erreichung der übergeordneten Ziele „Schutz vor dem Wasser“ und „Schutz des Wassers“ in Hamburg wird ein umfangreiches und ganzheitliches Verständnis der Hydrologie und Hydraulik von Gewässereinzugsgebieten und Gewässern, sowie deren Reaktionen auf anthropogene Einflüsse benötigt.

Wichtige Werkzeuge hierfür bilden hydrologische und hydraulische Simulationsmodelle. Ihre Anwendung ist Grundlage für die Arbeiten und Entscheidungen in der Wasserwirtschaft. Die Komplexität der Fragestellungen in der Freien und Hansestadt Hamburg wie die Kombination aus tideabhängigen und tideunabhängigen Gewässern erfordert die Anwendung von Modellen und deren kontinuierliche Weiterentwicklung nach dem Stand von Wissenschaft und Forschung.

Mit der Richtlinie Gewässermodellierung hat der LSBG einschlägige Vorgaben erarbeitet, wie Gewässermodelle in Hamburg nach einheitlichen Grundlagen aufzubauen sind. Dabei soll die Kompatibilität der Modelle selbst untereinander sichergestellt und die Vergleichbarkeit der Berechnungsergebnisse gewährleistet werden. Die Richtlinie beinhaltet die fachlichen Grundlagen der Modellierung, Anforderungen an Qualität und Formate vorliegender oder zu erfassender Eingangsdaten, modellspezifische Einstellungen zur Durchführung von Simulationsrechnungen, Methoden und Größen zur Modellkalibrierung, -plausibilisierung und -validierung, Ableitung von statistischen Kennwerten und Bemessungsgrößen sowie Verfahren zur Ergebnisaufbereitung, Qualitätssicherung, Darstellung und Dokumentation.

Darüber hinaus werden die Softwaremöglichkeiten aufgeführt, welche erfahrungsgemäß die spezifischen Anforderungen der wasserwirtschaftlichen Modellierung in Hamburg erfüllen.

3.3 Gefährdungsbeurteilung Regenwasserbehandlungsanlagen

Mit der Erstellung eigener Regelwerke werden neue Wege ermöglicht. Naturnahe Regenwasserbehandlungsanlagen in offener Bauweise, wie der Retentionsbodenfilter haben neben der effektiven Reinigung und Rückhaltung des Niederschlagswassers außerdem den Vorteil, dass sie durch ihr Erscheinungsbild gut in den öffentlichen Raum integrierbar sind. Aus technischer Sicht handelt es sich bei Regenwasserbehandlungsanlagen jedoch um Abwasserbehandlungsanlagen, welche in der Regel mit hohen Zäunen abgesichert werden. Dies schränkt die Erlebbarkeit der Anlagen stark ein und erschwert die Integrierbarkeit.

Durch das Fehlen von Normen oder Richtlinien, zur multicodierten oder integrativen Planung von Regenwasserbehandlungsanlagen in den öffentlichen Raum, wurde die Umsetzung entsprechender Anlagen erschwert. Der LSBG hat daher eine anlagen- und standortbezogene Gefährdungsbeurteilung erarbeitet (*LSBG 2021*). Zu Grunde liegen die verfügbaren Vorgaben aus Normen und Gesetzen zur Verkehrssicherheit in Wassernähe und von Abwasserbehandlungsanlagen. Hieraus wird ein Prüfschema erarbeitet, bei dem zunächst in Abhängigkeit vom Standort ein Gefährdungspotential ermittelt wird. Unter Berücksichtigung der Gefahren der Anlage und des Gefährdungspotentials für die Umgebung werden geeignete Verkehrssicherungsmaßnahmen empfohlen. Im Ergebnis entstehen Anlagen, die Wasser erlebbar machen ohne Einschränkung der Verkehrssicherheit. Hohe Zäune lassen sich beispielsweise durch eine Verringerung der Wassertiefe oder Abflachung der Böschung der Regenwasserbehandlungsanlage vermeiden. Die Richtlinie bildet damit einen wichtigen Bestandteil Regenwasserbehandlungsanlagen vor allem in Räumen mit hohen Nutzungskonflikten muldicodiert und für den Menschen auch als Teil ihres Lebensraumes zu gestalten.

4 Fazit und Ausblick

Die Kombination von eigenen und allgemeinen Regelwerken erleichtert den Planungsprozess. Zudem wirkt sie hinsichtlich des Prinzips der Wirtschaftlichkeit und Sparsamkeit, welches maßgeblich das Handeln der öffentlichen

Bauverwaltung prägt. Nur wenn Qualitätsstandards entsprechend den eigenen Anforderungen festgelegt werden, könne Über- und Unterbemessung, Kostensteigerung sowie lange Bauzeiten vermieden werden.

Besonders während des demografischen Wandels und Fachkräftemangels ist die Verschriftlichung von Erkenntnissen und Erfahrungen für einen Wissenstransfer notwendig. Ingenieure der Bauverwaltung sowie der freien Wirtschaft benötigen Fachbegriffe und Methoden, welche nicht verloren gehen dürfen.

Selbstverständlich wird die Überarbeitung und Ergänzung der Regelwerke als fortlaufender Prozess verstanden, da sich Randbedingungen besonders in Zeiten von Klimawandel und Digitalisierung ständig verändern. Auch aktuelle Rechtsprechungen sind dabei zu berücksichtigen. Nur so können Flexibilität und Handlungsspielraum gewahrt werden.

5 Literatur

- BAW (Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg) (2017): Tagungsband BAWKolloquium, Projekte und Entwicklungen für aktuelle Fragestellungen im Küstenwasserbau, 15. Juni 2017, Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg, Hamburg 2017
- DIN e.V. (Deutsches Institut für Normung e. V.) (2024): Normenausschüsse, NABau, FAQ zum Thema Bauen und Normen, Zugriff am 17.01.2025, Verfügbar unter: <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nabau/baukosten-normen>
- DIN e.V. (Deutsches Institut für Normung e. V.) (2024): Normen & Standards, Alles über DIN-Normen, Grundsätze und Regeln der DIN-Normungsarbeit, Zugriff am 17.01.2025, Verfügbar unter: <https://www.din.de/de/ueber-normen-und-standards/din-norm/grundsaeetze>
- LSBG (Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer) (2020): Richtlinie Hauptdeiche. Richtlinie für Planungen im öffentlichen Hochwasserschutz der Freien und Hansestadt Hamburg. Geotechnische Nachweise und Bemessung. Müller, O. et al. Projektbericht Gewässer und Hochwasserschutz Nr. 12/2020, Hamburg 2020
- LSBG (Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer) (2021): Gefährdungsbeurteilung für Regenwasserbehandlungsanlagen. Berichte des Landesbetriebes Straßen, Brücken und Gewässer Nr. 18/2021. Hamburg 2021.
- LSBG (Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer) (2024): Richtlinie Gewässermodellierung. Richtlinie für die Gewässermodellierung in der

Freien und Hansestadt Hamburg. Müller, O. et al. Projektbericht Gewässer und Hochwasserschutz Nr. 09/2023, Hamburg 2024

LSBG (Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer) (2024): Richtlinie Hauptdeiche. Richtlinie für Planungen im öffentlichen Hochwasserschutz der Freien und Hansestadt Hamburg. Planungsgrundlagen. Kopischke, L. et al. Projektbericht Gewässer und Hochwasserschutz Nr. 07/2024, Hamburg 2024

Autoren:

Dr.-Ing. Olaf Müller

Gewässer und Hochwasserschutz

Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer

Sachsenfeld 3-5

20097 Hamburg

Tel.: +49 40 428 26 25 00

E-Mail: olaf.mueller@lsbg.hamburg.de

Prof. Dr. Gabriele Gönnert, M.Sc. Ella Hedwig-Albrecht, M.Sc. Francois Leesch, Dr.-Ing. Karlotta-Franziska Seitz, M.Sc.

Jan-Moritz Müller, Dipl.-Ing. Clais von Mirbach, Dipl.-Ing. Antje Grimpe und Dipl.-Ing. Karsten Winat

Gewässer und Hochwasserschutz

Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer

Sachsenfeld 3-5

20097 Hamburg

Tel.: +49 40 428 26 20 60

E-Mail: ella.hedwig-albrecht@lsbg.hamburg.de

Bewertung der Freisetzung umweltrelevanter Stoffe aus Geokunststoffen

Christian Dietrich
Anna Maria Bell
Sebastian Buchinger
Arne Wick
Thomas A. Ternes

Stichworte: Geotextilien, Schadstoffe, Auslaugung, DSLT

1 Einleitung

Bei der Errichtung und der Erhaltung von Bauwerken kommen je nach Verwendungszweck unterschiedliche Baustoffe zum Einsatz. Letztere enthalten oft Substanzen, welche durch verschiedene Prozesse in die angrenzenden Umweltmedien gelangen und dort negative Auswirkungen haben können. Derartige Umwelteinflüsse sollten bereits bei der Planung berücksichtigt und die entsprechenden Informationen für die Genehmigungsverfahren zur Verfügung gestellt werden, um den gesetzlichen Umweltanforderungen Rechnung zu tragen. Letztere umfassen u.a. das WHG, das BBodSchG und die BBodSchV, die OGewV und die GrwV.

Für umweltverträgliches und nachhaltiges Bauen ist die Kenntnis der Freisetzung von (Schad-)Stoffen aus Baumaterialien und Bauwerken von besonderer Bedeutung. Insbesondere im Wasserbau ist eine direkte Freisetzung ins Gewässer nahezu jederzeit möglich. Allerdings ist oft nicht ausreichend bekannt, welche Substanzen emittiert werden können und inwieweit diese Stoffe die Qualität von Umweltmatrizes wie Oberflächenwasser, Boden oder Grundwasser beeinflussen.

In Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Straßenwesen, dem Deutschen Zentrum für Schienenverkehrsforschung und der Bundesanstalt für Wasserbau wurde ein verkehrsträgerübergreifendes Bewertungskonzept für

die flächenbezogene Freisetzung von umweltrelevanten Stoffen aus Geokunststoffen entwickelt, welches perspektivisch für Bundesfernstraßen, Bundeswasserstraßen und das Schienennetz des Bundes angewandt werden soll.



Abbildung 1: Neu eingebautes Geotextil in einer Bundeswasserstraße

2 Methoden

Zur Untersuchung der Umweltverträglichkeit werden Freisetzungstests in Reinstwasser nach dem sogenannten „Dynamic Surface Leaching Test“ (DSL) nach DIN EN 16637-2 durchgeführt. Hierbei wird ein Prüfkörper mit definierter Oberfläche für insgesamt 64 Tagen in einem definierten Volumen Reinstwasser ausgelaugt. Innerhalb dieses Zeitraums erfolgt zu 8 vorgegeben Zeitpunkten ein Austausch des Auslaugmittels.

Die freigesetzten Stoffe werden durch eine Kombination von chemischen und biologischen Analysen detektiert, identifiziert und hinsichtlich ihrer ökotoxikologischen Effekte untersucht.

Die Bewertung der Freisetzung erfolgt anhand der Messwerte im einzelnen Eluat oder über die Summe der jeweils gemessenen Konzentrationen über alle 8 Eluate als „kumulierte flächenbezogene Freisetzung“.

3 Ergebnisse

3.1 Modellbetrachtungen

Für die Betrachtung der Freisetzung aus Geokunststoffen ins Oberflächenwasser werden langsam fließende Bundeswasserstraßen und schiffbare Kanäle betrachtet. Als Ort der Beurteilung wird das Porenwasser der typischerweise auf dem Geotextil verbauten Deckschicht definiert, da das Porenwasser einerseits durch den direkten Kontakt mit dem Baumaterial die stärkste Exposition erfährt und andererseits als Lebensraum und Rückzugsort aquatischer Organismen als besonders schützenswert zu betrachten ist. Entsprechend der in (Horstmann *et al.*, 2023) näher beschriebenen Ableitung steht 1 m² Geotextil in Kontakt zu 280 L Porenwasser. Auf Basis der Umweltqualitätsnormen der OGewV für den Jahresdurchschnitt (JD-UQN) und einem angenommenen täglichen Wasseraustausch werden maximale Freisetzungsraten ($\max. E_{\text{kum}}$) pro Quadratmeter Geotextil pro Jahr ermittelt. Nach DIN EN 16637-2 erfolgt die Umrechnung auf die Testdauer von 64 Tagen:

$$\max. E_{\text{kum}} = \text{UQN} \times \frac{1 \text{ mg/L}}{1000 \text{ µg/L}} \times 280 \frac{\text{L}}{\text{m}^2} \times 365 \text{ d} \times 1 \text{ d}^{-1} \times \sqrt{\frac{64}{365}} \quad (1)$$

Für den Einbau im Boden müssen die Umweltmedien ungesättigte Bodenzone und Grundwasserzone betrachtet werden. Hierfür wird die zeitliche Entwicklung von Stoffkonzentrationen und -frachten mit Hilfe des eindimensionalen Modells ALTEX-1D quantitativ abgeschätzt (LABO, 2018). Als Ort der Beurteilung werden die Prüf- bzw. Vorsorgewerte der BBodSchV. und die GFS-Werte der LAWA (2016) herangezogen. Details zur Modellierung, zur Wahl der einzelnen Modellierungsparameter und zu den verwendeten Transportschichten sind in Horstmann *et al.* (2023) näher beschrieben.

3.2 Ableitung maximaler Emissionswerte regulierter Schadstoffe

Mit Hilfe der oben aufgeführten Modelle wird die Konzentration am Ort der Beurteilung auf einen Elutionswert aus dem Geokunststoff zurückgerechnet und damit tolerierbare Emissionswerte abgeleitet. Tabelle 1 enthält eine Auswahl vorläufiger Berechnungsergebnisse.

Tabelle 1: Ableitung maximaler Freisetzungsraten ausgewählter Substanzen (vorläufige Berechnungsergebnisse)

Parameter	Szenario Oberflächenwasser		Szenario Boden und Grundwasser	
	JD-UQN (nach OGewV)	max E _{kum}	Ort der Beurteilung	max E _{kum}
Benz(a)- pyren	1,7 x 10 ⁻⁴ µg/L	0,007 mg/m ²	Vorsorge- wert Boden	43 mg/m ²
Benzol	10 µg/L	428 mg/m ²	Prüfwert Sickerwasser	1,28 mg/m ²
DEHP	1,3 µg/L	55,6 mg/m ²	-	-
PAK	6,3 x 10 ⁻³ µg/L (Fluoranthen)	0,27 mg/m ²	Prüfwert Sickerwasser	0,83 mg/m ² (Anthracen)
PFOS	6,5 x 10 ⁻⁴ µg/L	0,028 mg/m ²	Prüfwert Sickerwasser	0,021 mg/m ²

Beim Vergleich der maximalen Freisetzungsraten (Tabelle 1) erkennt man den direkten linearen Zusammenhang zur JD-UQN. Die Werte für Benzol sind entsprechend vergleichsweise hoch. Bei einer weiteren Betrachtung der Auswirkungen auf Boden und Grundwasser zeigt sich, dass die Bewertung für Benzol unter Berücksichtigung des Prüfwertes für Sickerwasser der BBodSchV deutlich strenger ausfällt. Weitere Details hierzu können (Horstmann et al., 2023) entnommen werden. Für eine verkehrsträgerübergreifend einheitliche Bewertung sollen zukünftig die maximal tolerierbaren Emissionswerte jeweils aus den niedrigeren maximalen Emissionswerten über alle betrachteten Umweltmatrices hinweg abgeleitet werden.

3.3 Bewertung ökotoxikologischer Wirkungen

Zur Erfassung schädlicher Summenwirkungen freigesetzter Stoffe werden ökotoxikologische Testverfahren eingesetzt. Hierbei orientiert sich die Vorgehensweise und Bewertung an den „Anforderungen an umweltrelevante Bauteile aus organischen Materialien bezüglich biologischer Auswirkungen“ des Anhangs 10 der MVV TB (ABuG), bzw. Teil A 3.2.3 der VV TB-W.

3.4 Bisherige Untersuchungsergebnisse

Laboruntersuchungen an 6 verschiedenen Geokunststoff-Produkten zeigten hinsichtlich der chemischen Parameter nur geringe oder nicht nachweisbare Freisetzungen regulierter Verbindungen. In ökotoxikologischen Untersuchungen führte ein Produkt zu nachweisbaren Effekten im Daphnientest mit *Daphnia magna* ($G_D = 32$) im ersten Eluat des DSLT. Für ein weiteres Produkt wurden Effekte im Leuchtbakterien-Lumineszenz-Hemmtest mit *Aliivibrio fischeri* in den ersten vier Eluaten des DSLT beobachtet ($G_{L,Eluat1} = 64$, $G_{L,Eluat2} = 26$, $G_{L,Eluat3} = 9$, $G_{L,Eluat4} = 3$). In beiden Fällen zeigte sich eine deutliche Abnahme der Effekte im zeitlichen Verlauf des Elutionstests, was auf anfängliche Abwaschungen von Substanzen von der Oberfläche der Geokunststoffe hindeutet. Die leuchtbakterientoxischen Effekte des zweiten Produkts konnten in einer weiteren Studie auf das anionische Tensid Monododecylphosphat zurückgeführt werden, welches als Gleitmittel bei der Herstellung von Geotextilien eingesetzt wird (Brüggemann et al., 2024).

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Umweltverträgliches und nachhaltiges Bauen erfordert insbesondere im Wasserbau die Berücksichtigung möglicher Auswirkungen auf das meist direkt in Kontakt mit dem Bauwerk stehende Oberflächengewässer. Mit dem Ziel der Verwendung möglichst umweltfreundlicher Baustoffe rückt die Forderung nach einheitlichen Bewertungen von stofflichen Freisetzungen vermehrt in den Fokus.

Für den Bereich der Geokunststoffe wird das hier skizzierte Bewertungskonzept derzeit für die Einführung im Bereich des Verkehrswasserbaus vorbereitet und soll in diesem Zusammenhang die BAW-Richtlinie zur „Prüfung von Geokunststoffen im Verkehrswasserbau“ (RPG) bezüglich der Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen konkretisieren.

5 Literatur

ABuG (2020): Anforderungen an umweltrelevante Bauteile aus organischen Materialien bezüglich biologischer Auswirkungen, Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV-TB) Anhang 10, Deutsches Institut für Bautechnik

- Brüggemann, C.; Schweyen, P.; Bell, A.M.; Wick, A.; Ternes, T.A. (2025): Release and quantification of organic and inorganic contaminants from geotextile materials in dynamic surface leaching test, *Journal of Hazardous Materials*, 482, 136330, doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.136330
- Horstmann, B.; Dietrich, C.; Schmid, M.; Bell, A. M.; Schweyen, P.; Bode, G. E.; Fischer, M.; Ternes, T.; Kocher, B. (2023): Ableitungssystematik von umweltverträglichen Emissionswerten für Baustoffe im Verkehrswegebau, Produktbericht des Schwerpunktthemas Bau- und bauwerksbedingte Emissionen / Immissionen in Wasser und Boden (SPT-204) im Themenfeld 2 des BMDV-Expertenetzwerks, https://www.bmdv-expertennetzwerk.bund.de/DE/Publikationen/Projektberichte/Horstmann_et_al_2023.html?nn=1371986
- LABO (2018): ALTEX-1D Benutzungsanleitung Version 3. Hg. v. Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO).
- LAWA (2016): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser. Hg. v. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA). Düsseldorf.
- MVV-TB (2024): Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen, Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin.
- Heine, K. (2002): Wenn die roten Rosen wieder blühen – oder die Abhandlung über die Biologie der Pflanzen. Neuer Verlag der Kunst am Stück, München 2002
- Meier, A. (2000): Die verrückte Datei im Zeichen der Zeit – wollen die Leute diese Hinweise nicht verstehen. Aufbau Verlag, Berlin 2000

Autoren:

Dr. Christian Dietrich

Bundesanstalt für Gewässerkunde
Referat G2 - Gewässerchemie
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz

Tel.: +49 261 1306 5970
Fax: +49 261 1306 5302
E-Mail: christian.dietrich@bafg.de

Dr. Anna Maria Bell

Dr. Sebastian Buchinger
Dr. Arne Wick
Prof. Thomas A. Ternes
Bundesanstalt für Gewässerkunde
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz

Tel.: +49 261 1306 0
Fax: +49 261 1306 5302
E-Mail: posteingang@bafg.de

Kainzmühl Sperre – Sanierung und Ertüchtigung

Dr.-Ing. Barbara Tönnes
Dipl.-Ing. Dominik Fiedler
Dipl.-Ing. Martin Zetterer

Stichworte: Dauerhaftigkeit, Dichtungsschleier, Dichtungssystem, Gebrauchstauglichkeit, Injektionsschleier, Kunststoffdichtungsbahn, Sanierung, Speicher, Talsperre, Tragsicherheit, Zuverlässigkeit

1 Vorhabensbeschreibung

Die Kainzmühl Sperre ist Teil der Kraftwerksgruppe Pfreimd. Die Pumpspeicherkraftwerke Reisach und Tanzmühle nutzen als gemeinsames Oberbecken den Hochspeicher Rabenleite. Die Trausnitzsperre und die Kainzmühl sperre sind die zugehörigen Unterbecken.

Die Kainzmühl Sperre wurde in den Jahren 1923/1924 als Gewichtsstaumauer aus Beton errichtet. In den Jahren 1954/1955 sind umfangreiche Sanierungsmaßnahmen im Zuge der Erhöhung der Staumauer durchgeführt worden.

In den vergangenen Jahrzehnten erfolgten Bauzustandsuntersuchungen, Tragsicherheitsberechnungen und Auswertungen des Bauwerksmonitorings, die den allgemein schlechten Zustand der Bausubstanz dokumentieren. Im Ergebnis wurde im Jahr 2019 von der Aufsichtsbehörde schrittweise eine Stauspiegelbegrenzung angeordnet. Die letzte Begrenzung auf 456,40 m ü. NN, d. h. 1,6 m unterhalb des Vollstauziels, war bis zum baubedingten Abstau der Talsperre gültig.

In ihrer Verantwortung für die Talsperrensicherheit hat die ENGIE Deutschland Erneuerbare GmbH (EDEG) als Eigentümer und Betreiber

- die Veränderungen von Messwerten untersuchen lassen,

- weitere Bauzustandsuntersuchungen durchgeführt und
- Sofortmaßnahmen zur Erhöhung der Tragsicherheit umgesetzt,

um auf diesen Erkenntnissen eine fundierte Entscheidung über ein Sanierungskonzept mit dem Ziel der Gewährleistung bzw. Wiederherstellung der normgerechten Zuverlässigkeit (Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit) der Staumauer bei den genehmigten Stauzielen treffen zu können.

Durch die Sanierungsmaßnahmen müssen folgende Ziele erreicht werden:

- Verhinderung der Durchsickerung der Staumauer,
- Reduzierung des Sohlenwasserdruckes und des Eindringens von Wasser aus dem Untergrund in die Staumauer sowie die
- Anpassung der Anlagen der messtechnischen Bauwerksüberwachung.

2 Sanierungsmaßnahmen an der Kainzmühlsperre

2.1 Beschreibung des Bestandsbauwerkes

Die Kainzmühlsperre ist eine Gewichtsstaumauer aus Beton mit gerade Mauerrachse, einer Kronenlänge von ca. 120 m und einer Bauwerkshöhe von 22 m über der Gründungssohle. Mit einem Stauvolumen von ca. 1,1 Mio. m³ ist die Talsperre der Klasse 1 nach DIN 19700-11 zuzuordnen.

Unter der Bezeichnung Pfreimdalsperre wurde die Talsperre für die Stromerzeugung mit einer Ausbauleistung 1.800 kW betrieben. Im Zuge der Errichtung der Pumpspeichergruppe Jansen (heute: Kraftwerksgruppe Pfreimd) wurde die Talsperre in den Jahren 1954/1955 umgebaut und erhielt die Bezeichnung Kainzmühlsperre.

Folgende wesentliche Anpassungen wurden 1954/1955 vorgenommen:

- Erhöhung des Vollstauziels von 455,00 m ü. NN auf 458,00 m ü. NN.
- Erhöhung der Staumauer (Mauerkrone auf 460,1 m ü. NN), verbunden mit dem Rückbau/Abbruch der nicht standfesten Betonflächen der alten Staumauer, der Injektion des alten Mauerkörpers (Kernbeton) und dem beidseitigen Einbau einer Vorsatzbetonschale. Zum besseren Verbund zwischen dem porösen Kernbeton und der

neuen Vorsatzschale wurden Haftarbeiten Ø 14 mm Betonstahlgüte I, die auch als Schalungsverankerung dienten, eingebaut (siehe Abbildung 1).

- Außerbetriebsetzung des Kraftwerks der Pfreimdalsperre, Nutzung des Gebäudes als Schalthaus bzw. Erholungsheim (nicht im Eigentum der EDEG).
- Neubau und Inbetriebnahme des Eulengrundstollens.



Abbildung 1: Ansicht der Wasserseite während des Umbaus 1954/1955 [EDEG]

Im Ergebnis von Sicht- und Materialprüfungen seit 2019 wies der Beton starke Abwitterungen in der Wasserwechselzone auf. In den Fugenbereichen wurden tiefere Ausbrüche bis in den Dezimeterbereich festgestellt. Vorhandene Risse zeigten Wasserläufigkeiten, d.h. in der Mauer, insbesondere im porösen Kernbeton, steht Wasser. Messungen ergaben teilweise hohe Sohlwasserdrücke in der Gründungsfuge.

Zu einem in der Bestandsdokumentation erwähnten Injektionsschleier am wasserseitigen Fuß der Staumauer wurden keine zuverlässigen Angaben bzgl. Tiefe, Neigung, Bohrlochabstand und Injektionsmittel gefunden.

2.2 Geplante Sanierungsmaßnahmen

Mit der Instandsetzung der Staumauer sollen die Tragsicherheit, Betriebssicherheit, Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit bei den genehmigten Stauzielen wiederhergestellt und für einen Zeitraum von mindestens fünfzig Jahren gewährleistet werden.

Die Maßnahmen zur Wiederherstellung der Zuverlässigkeit umfassen im Wesentlichen:

- Herstellung/Sanierung eines Dichtungsschleiers im Untergrund,
- Einbau eines Dichtungssystems mit Kunststoffdichtungsbahn an der Wasserseite der Staumauer,
- Sanierung/Ergänzung der Anlagen der messtechnischen Bauwerksüberwachung.

Zusätzlich muss die vorhandene Steuerzelle auf der Mauerkrone durch einen Anbau erweitert werden.

Im Jahr 2022 wurden die erforderlichen Kartierungen am Standort ausgeführt und auf deren Grundlage die naturschutzfachlichen Gutachten erstellt.

Der Genehmigungsantrag wurde am 31. März 2023 eingereicht.

3 Bauliche Umsetzung der Sanierungsmaßnahmen

Im Vorfeld der Sanierungsmaßnahmen wurde die Talsperre im September 2023 entleert und der überwiegende Teil der Fisch- und Krebsfauna sowie der Muscheln entnommen und in die unterhalb liegende Trausnitzsperre umgesetzt. Ohne erneute Befischung wurde die Talsperre im März 2024 abgestaut. Die Baumaßnahmen wurden von März bis Oktober 2024 umgesetzt.

Die Bautätigkeiten begannen mit der Beräumung und seitlichen Lagerung der Sedimente sowie der Herstellung der Baustraße im wasserseitigen Bau-feld. Bei der Einrichtung der Baustelle wurde festgestellt, dass auf der wasserseitigen Betonfläche ein PAK-haltiger Anstrich vorhanden war, der aufwändig durch Fräsen beseitigt werden musste.

Der Dichtungsschleier wurde einreihig, in zeitlich aufeinander folgenden Reihen (A-, B-, C- und D-Reihe) ausgeführt. Zur Verhinderung von Verbindungen der Bohrlöcher untereinander wurden zunächst die Primärbohrungen (A-Reihe) mit einem Abstand von ca. 8 m hergestellt. Erst nach der Injektion der

Primärbohrlöcher wurden dazwischen die Sekundärbohrlöcher (B-Reihe) und anschließend die Tertiärbohrungen (C-Reihe) hergestellt. Nach Auswertung des bisher erreichten Dichtungserfolges wurde in einigen Abschnitten mit den D-Bohrungen der Bohrlochabstand auf 1 m reduziert.

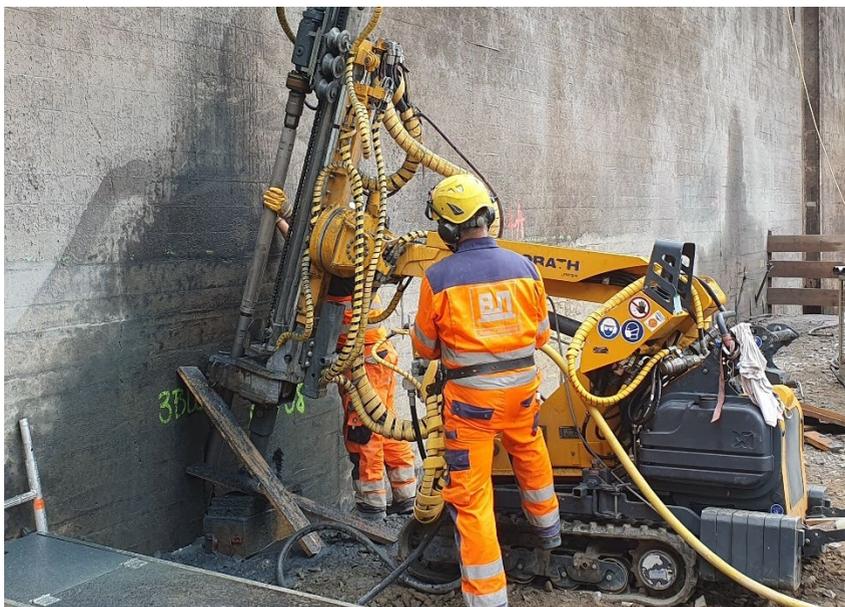


Abbildung 2: Herstellung des Dichtungsschleiers an der Wasserseite der Staumauer

Die Bohrungen wurden vom wasserseitigen Baufeld aus als Kernbohrungen ca. 8 m im Vorsatzschalenbeton und ca. 8 m im Fels mittels Im-Loch-Hammerbohrungen hergestellt (siehe Abbildung 2). Die Bohr- und Injektionsarbeiten mussten aufgrund von Hochwasserereignissen mehrfach unterbrochen werden. Durch Umstellung des Bohrverfahrens auf Im-Loch-Hammerbohrung und Abteufen von Bohrungen von der Mauerkrone aus konnten die Arbeiten beschleunigt und somit fristgerecht fertig gestellt werden.

Vor Einbau des Dichtungssystems mit Kunststoffdichtungsbahn erfolgten die Arbeiten zur Verpressung der Block- und der Arbeitsfugen im Mauerbeton. Größere Hohlräume wurden verfüllt. Weiterhin mussten die Bohrungen der Sickerwasserableitungsrohre fertiggestellt und ausgebaut sein, um zu gewährleisten, dass ggf. anfallendes Wasser hinter dem Dichtungssystem zur Luftseite der Staumauer kontrolliert abgeführt werden kann.

Oberhalb der Grundablasses wurde in der Nische für den Revisionsverschluss ein Oberflächenschutzsystem auf den Vorsatzbeton aufgetragen.

Aufgrund der unplanmäßigen Fräsarbeiten an der Wasserseite der Staumauer war die Ebenheit des Untergrundes für das Dichtungssystem mit KDB aus Sicht der Fremdüberwacher nicht ausreichend, so dass händisch herausstehende Ecken abgeschlagen und unterhalb des Drängitters ein zusätzliches Schutzvlies verlegt werden mussten. Weiterhin war es erforderlich, in den Bereichen der druckwasserdichten Befestigungen die raue Oberfläche mit Mörtel zu glätten.

Die Montage des Dichtungssystems erfolgte von Hebebühnen aus, die an Traversen auf der Mauerkrone befestigt waren. Die Traversen konnten in U-Profilen, die auf der Mauerkrone positioniert wurden, horizontal verfahren werden. Die Arbeiten mussten aufgrund von Hochwasserereignissen kurzzeitig unterbrochen werden. Mit einer angepassten persönlichen Schutzausrüstung konnten die Arbeiten über den eingestauten Bereichen fortgeführt und fristgerecht beendet werden. Nach Abschluss der Dichtungsarbeiten wurden die Anbauten an der Wasserseite der Staumauer, z. B. Pegellatte, Eisluff Freihaltungsanlage, montiert (siehe Abbildung 3).

Zeitgleich mit den beschriebenen Arbeiten wurden durch neue Messstellen der Bauwerksüberwachung zusätzliche Messprofile geschaffen sowie die Erweiterung der Steuerzelle hergestellt. Die Sanierungsmaßnahme wurde genutzt, die automatisierte Messanlage der Bauwerksüberwachung zu modernisieren und das trigonometrische Überwachungsnetz mit neuen Festpunkten zu optimieren.

Weiterhin erfolgten die Tiefbauarbeiten luftseitig der Staumauer für die Ableitung von ggf. anfallendem Sickerwasser hinter dem Dichtungssystem. Aufgrund nicht vorhandener Bestandsunterlagen sowie der Automatisierung der Messstellen und geänderten Kabelwegen gestalteten sich diese Arbeiten umfangreicher als geplant.

Der Probestau erfolgte gemäß Probestauprogramm vom 22.10.2024 bis zum 15.11.2024. Die Auswertung aller Messungen und Beobachtungen im Abschlussbericht bestätigte das Erreichen der vorgesehenen Sanierungsziele und der Nachweise der normgerechten Zuverlässigkeit in den genehmigten Stauzielen.



Abbildung 3: Einstau während des Probestaus am 22.10.2024

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die im Rahmen der Sanierung durchgeführten Maßnahmen haben zu einer Reduktion des Sohlenwasserdruckes geführt. Die Dauerhaftigkeit der Staumauer ist durch den niedrigeren Wasserstand im Bauwerk und die wesentlich geringere Durchsickerung des Bauwerks im Vergleich zum Zustand vor der Sanierung, wesentlich verbessert worden.

Sickerwasser aus dem wasserseitigen Dichtungssystem kann schadlos über die vorhandenen Sickerwasserableitungsrohre in der Staumauer zur Luftseite abgeführt werden. An den Sickerwasserableitungsrohren der Kunststoffdichtungsbahn treten sehr geringe Wassermengen aus (Tropfen). Die Zuverlässigkeit der Staumauer wird davon nicht ungünstig beeinträchtigt.

Die Baumaßnahme konnte dank der konstruktiven Mitwirkung aller Beteiligten, d. h. Bauherr, Planer, Gutachter, Behörden und Bauunternehmer im vertraglich vereinbarten Zeitrahmen und im vorgesehenen Kostenrahmen abgeschlossen werden.

In den Jahren 2025/2026 werden die Baumaßnahmen zur Schaffung einer zusätzlichen, unabhängig bedienbaren Verschlussebene im Grundablass umgesetzt. Sie umfassen neben Anpassungsmaßnahmen am Bestandsbauwerk im Wesentlichen:

- Herstellung eines Kastenfangedammes im Tosbecken als Kranstandort,
- Herstellung eines begehbaren Schachtbauwerkes auf der Luftseite,
- Einbau eines Rollschützes als zweiten Betriebsverschluss,
- Instandsetzung bestehender Stahlwasserbauteile und
- Verbesserung der Zugänglichkeit der Verschlüsse im Grundablassstollen.

5 Literatur

DIN 19700-11 Stauanlagen - Teil 11: Talsperren. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin Juli 2004

Autoren:

Dr.-Ing. Barbara Tönnis

Tractebel Hydroprojekt GmbH
Geschäftsbereich Weimar
Rießnerstraße 18
99427 Weimar

Tel.: +49 3643 746 210

Fax: +49 3643 746 435

E-Mail: barbara.toennis@tractebel.engie.com

Dipl.-Ing. Dominik Fiedler
Tractebel Hydroprojekt GmbH
Geschäftsbereich Dresden
Mendelssohnallee 8
01309 Dresden

Tel.: +49 351 211 23 0

Fax: +49 351 211 23 88

E-Mail: dominik.fiedler@tractebel.engie.com

Dipl.-Ing. Martin Zetterer
ENGIE Deutschland Erneuerbare GmbH
Portfolio Management Hydro
Seestraße 6
92555 Trausnitz

Tel.: +49 9655 92 28-329

Fax: +49 9655 92 28-306

E-Mail: martin.zetterer@engie.com

Anbindung des neuen Duisburg Gateway Terminals an den Straßenverkehr

Thomas Groß
Hülskens Wasserbau, Deutschland

1 Einleitung

Dieser Beitrag berichtet über ein großes Bauprojekt am Duisburger Hafen, genauer gesagt, vor der Einfahrt in das Hafenbecken A. Duisburg ist stolzer Besitzer des größten europäischen Binnenhafens und hat eine lange Geschichte im Umschlag von diversen Massengütern unter Anderem Kohle. Diese historische Verbindung spiegelt sich im alten Namen des Standorts dieses Bauprojektes wider - der Kohleninsel. In Beitrag werden wir die Anbindung des neuen Containerterminals an den Straßenverkehr darstellen, das nicht nur einen neuen Schwerpunkt des Hafens darstellt, sondern künftig auch den Endpunkt der Neuen Seidenstraße markiert.

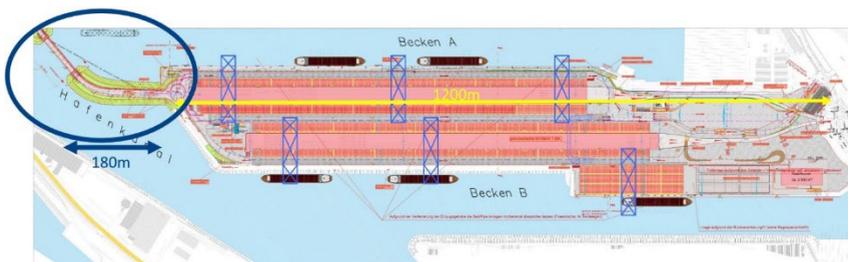


Abbildung 1: Grundriss Terminal mit Lage des Brückendamms

2 Duisburg als Dreh- und Angelpunkt im Containerverkehr

Der Standort des Bauprojekts liegt mitten im Stadtgebiet von Duisburg und umfasst eindrucksvolle 235.000 Quadratmeter Terminalfläche. Mit 65.000 Quadratmetern Containerstellfläche, sechs Krananlagen und zwölf Ganzzuggleisen wird dieser Standort von entscheidender Bedeutung für den Warenverkehr in Europa sein. Die Duisburger Hafen AG zeichnet verantwortlich für dieses ambitionierte Projekt und hat den Bau unter Anderem in die erfahrenen Hände der Hülskens Wasserbau GmbH & Co. KG gelegt.



Abbildung 2: Lage des Bauvorhabens im Duisburger Hafen

3 Funktionaler Pauschalvertrag

Der Vertrag für dieses herausragende Projekt sind mehrere unterschiedliche funktional ausgeschriebene Pauschalverträge. Dazu gehören z.B. die Kampfmittelsondierung (wiederum unterteilt in Ost- und Westseite), die technische Bearbeitung der ursprünglichen angedachten Spundwandkonstruktion, die technische Bearbeitung für eine Ausführungsänderung von einem reinen Betonbauwerk der Widerlagerbereiche mit Tiefgründung zu einer Rohrwandkonstruktion mit Betonauflegerkörpern sowie die Herstellung der Stahlbetonwiderlagerkörper für die Brücke und natürlich der Brückendamm selbst.

Die Planung erfolgte in ständiger intensiver Zusammenarbeit mit den Bauherren, so dass das gegenseitige Knowhow gut einfließen konnte und eine an die spätere Funktion angepasste wirtschaftliche Lösung umgesetzt wurde.

4 Zeitlicher Rahmen

Die Bauarbeiten erstreckten sich nach einer gut einjährigen Vorplanung über den Zeitraum von 2021 bis 2023, wobei die Fertigstellung des Containerterminals im Jahr 2024 erfolgen wird.

5 Die Schlüsselrolle: Herstellung der Dammkörper

Das zentrale Element dieses Projekts besteht in der Errichtung von zwei Dammkörpern, die die Straßenanbindung des neuen Containerterminals DGT auf der Westseite der alten Kohleninsel ermöglichen. Diese Dammstrukturen erstrecken sich sowohl rechts als auch links der Hafeneinfahrt in das Hafenbecken A.

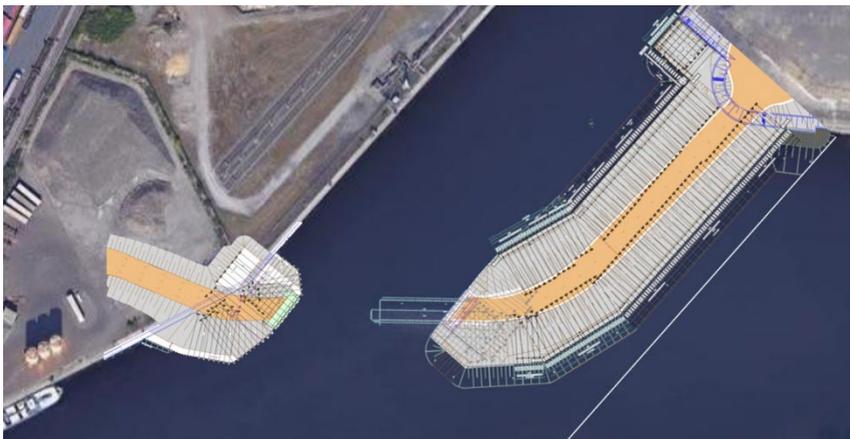


Abbildung 3: Grundriss der beiden Seiten des Brückendamms

Der rechte Dammkörper verfügt über eine Länge von etwa 180 Metern und ist von zwei nahezu parallel verlaufenden Spundwänden umgeben. Der Abschluss des Damms erfolgt durch eine Rohrwand. Im Gegensatz dazu ist der

linke Dammkörper kürzer, mit einer Länge von rund 40 Metern, und wird von einem Spundwand- und Rohrwandbauwerk begrenzt. Am Ende der Erdkörpern werden zur Auflagerung der späteren Verbindungsbrücke über die Hafeneinfahrt des Hafenbeckens A zwei Stahlbetonwiderlagerbalken errichtet. Ursprünglich sollte eine reine Spundwandkonstruktion erstellt werden und nachfolgend von einem Zwischenplateau eine auf Bohrpfählen gegründete Stahlbetonkonstruktion mit ca. 15 Meter hohen aufgehenden Wänden. Diese Lösung wurde aber im Dialog zwischen Auftragnehmer und Auftraggeber auch aufgrund der unzähligen Konfliktpunkte zwischen Verankerung der Spundwandkonstruktion und Bohrpfahlgründung verworfen, und zugunsten einer Stahlrohrwandlösung, auch Kombiwand genannt, mit kleinerem Stahlbetonauflegerkörper umgeplant. Auch die Bauzeit verkürzte sich durch die gewählte Konstruktion, da die Erdarbeiten des Verfüllkörpers im Zuge der Verankerungsarbeiten der Rohrwand erfolgen konnten. Dies wäre bei der Stahlbetonlösung nicht möglich gewesen.

6 Materialien und Mengen im Überblick

Für die Konstruktion dieser Dämme wurden erhebliche Materialmengen verwendet, darunter 1.500 Tonnen Spundwandstahl, 700 Tonnen Rohre bis zu 35,20 Meter lang sind, 13 Stk. Auflagerrohre (700to) mit einer Einzellänge von 30,20 Metern und 231 Stück Rundstahlanker bis zu einem Durchmesser von M160 und Längen bis zu 28,50m. Zusätzlich werden 6.500 Tonnen Wasserbausteine sowie eine Vorschüttung aus LD-Schlacken von 27.600 Tonnen für die wasserseitige Dammsicherung eingebaut. In den Dammkörpern werden insgesamt 167.000 Kubikmeter LD-Schlacken und Bodengemische als Verwertung für die Verfüllung verwendet, was etwa 334.000 Tonnen Bodenmassen entspricht. Die Verfüllmaterialien wurde landseits per LKW aus dem regionalen Umfeld angeliefert und von einem umfangreichen Monitoring begleitet.

7 Die Bauarbeiten

Zu Beginn der Maßnahme wurden zunächst die Kampfmittelsondierung mit anschließender Beräumung durchgeführt.

Dies geschah während zeitgleich noch die technische Bearbeitung lief. Im Laufe der technischen Bearbeitung wurde das Konzept der Widerlager noch einmal grundlegend geändert.

Geplant war eine Spundwand als Hülle für den Bodenkörper und dann eine Pfahlgründung für die Brückenwiderlager innerhalb des so geschaffenen Verfüllkörpers. Dies wurde umgestellt auf eine Gründung des Brückenwiderlagers direkt in der Achse der äußeren Begrenzung des der Dammumschließung in Form einer Rohrwand bzw. Kombiwand mit einige weiteren in der Verfüllung liegenden Rohren. Die zuerst geplante Variante war wegen der Räumlichen Enge, bauzeitlicher Faktoren und der Überschneidungen mit den Rückverankerungen kaum durchführbar.

Nach der Kampfmittelfreiheit wurde mit dem Rammen der Spundwände beginnend an der alten Kohleninsel bis zum Beginn der Rohrwände gestartet.

Begleitend zu den ersten fertiggestellten Abschnitten der Spundwände wurde mit dem Antransport und Einbau der Bodenmassen für den Körper des Fangedamms begonnen. Dies war aufgrund der Zeitschiene, sehr wichtig, da es sich bei den Verfüllungen um große Mengen handelt. Die Bodenmassen wurden landseits per LKW aus dem regionalen Umfeld angeliefert. Die täglichen Liefermengen lagen zwischen 500 und 3.500to pro Tag.

Die Verfüllmassen wurden unterhalb der Wasserlinie mit Rüttelbohlen kontrolliert verdichtet und anschließend über der Wasserlinie konventionell. Die Verfüllung unterlag sowohl bodenmechanisch als auch chemisch ständig laufenden intensiven Überwachungen.

Ab einem definierten Niveau der Verfüllung startete der Stahlwasserbau zum Anbringen der Gurtungen und der Körper der „Totmann“-Verankerung. Die Anker hatten sehr große Abmessungen und Längen, so dass hier für alle Teile immer ein Hebegerät, zum Teil ein Kranschiff oder Ponton, nötig war.

Die Toten Männer wurden im Verfüllkörper an Ankertafeln angeschlossen, die zuvor mit einem Mäklengerät eingebracht wurden.

Begleitend zu den Auffüllarbeiten wurde weiter mit dem Rammen der Rohre für die Gründung des Brückenwiderlagers fortgefahren. Danach erfolgte wieder ein umfangreicher Stahlwasserbau, um die Anschlüsse für die Rückverankerungen an den Rohren zu montieren. Nach Herstellung aller Anschlüsse an den Rohren wurden die Füllbohlen eingebaut und die Rohre ausbetoniert.

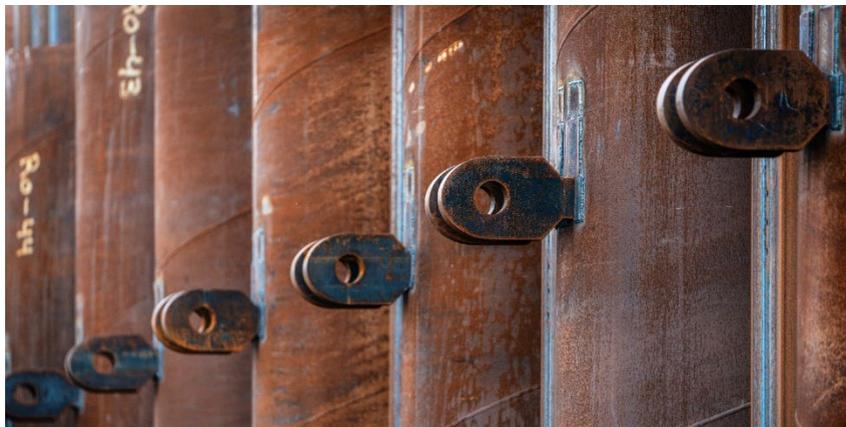


Abbildung 4: Aufnahme für die Rückverankerungen an den Pfählen/Rohren

Nachdem die Ramm- und Stahlwasserbauarbeiten im Wesentlichen beendet waren und die Verfüllung die Oberkante der Rohrwand erreicht hatte, konnten die Stahlbetonarbeiten beginnen und die Widerlager als Betonkörper hergestellt werden. Die Herausforderung für die Stahlbetonarbeiten war die Lage der Betonkörper auf den Rohren der Rohrwand und die Lage direkt an der Wasserkante mehr als 10,00m über dem Wasserspiegel. Für die Montage der wasserseitigen Schalung war also ebenfalls schwimmendes Gerät mit entsprechenden Hubgeräten erforderlich.



Abbildung 5: Grundriss der beiden Seiten des Brückendamms

Im Anschluss an die Betonarbeiten folgen noch die Arbeiten zur Herstellung der Oberfläche den Böschungen sowie die Erdarbeiten und der Straßenbau auf dem Damm.



Abbildung 6: Blick auf das Hafenbecken A während der Arbeiten

Die durch einen weiteren Unternehmer an Land im Bereich des westlichen Dammkörpers hergestellte Brücke wird zukünftig voraussichtlich im November 2023 eingeschwommen und montiert. Die Brücke wird im Endausbau ein Gewicht von ca. 1.500to und eine Spannweite von 85 Metern haben.

8 Die Herausforderung der Montage

Die Installation der Rammelemente erforderte den Einsatz für den Binnenbereich beeindruckender Großgeräte. Hierzu gehörte das MKS Stormvogel, ein 86 Meter langes und 11,20 Meter breites Schiff mit einem 200-Tonnen-Kran und einer Maximalhubkraft von 90 Tonnen bei 20 m Ausladung. Es verfügt über einen Ausleger von bis zu 42 Metern. Die Schiffsladung kann bis zu 1.740 Tonnen betragen. Ein weiteres wichtiges Arbeitsgerät war das Stelzenponton 2, welches eine Größe von 39,20 Metern mal 11,40 Metern aufweist und mit einem Seilbagger von 100 Tonnen Arbeitsgewicht ausgestattet ist. Das Einheben der größten Rammelemente erfolgte durch das Kranschiff, die Sicherung des Rammgutes während des Aufsetzens der Rammgeräte erfolgte durch den Ponton. Als Rammgerät kam ein Vibrationsrüttler MS-62 HFV zum Einsatz, der ein Einsatzgewicht von 17 Tonnen hatte. Nach dem Stellen der Rammrohre mittels Vibration erfolgte das Einbringen bzw. Nachschlagen der Rohre für die Rohrwände mithilfe eines Hydraulikhammers vom Typ IHC S-150, der ein Gewicht von 18 Tonnen aufwies und einen Schlaghaubendurchmesser von 2,0 Metern hatte. Dieser Schlaghaubendurchmesser war nötig, da die Rohre im Bereich des Stahlbetonwiderlagers einen Durchmesser von 1520mm haben. Zur Sicherstellung der präzisen Lage der Rammelemente kam eine modulare Rammführung zum Einsatz, die die unterschiedlichen Rohrdurchmesser (760mm, 1016mm, 1520mm) berücksichtigte. Durch die unterschiedlichen Rohrdurchmesser änderte sich das Achsmaß der Rohre in Rammrichtung in jeder Rammführung, so dass die Rammführung permanent angepasst werden musste.

Auch die großen Rohrlängen stellten eine große Herausforderung dar und sind sicherlich im Binnenbereich bislang in dieser Form nicht verarbeitet worden. Die maximale Rohrlänge im Bereich der Stahlbetonwiderlager beträgt 35,20m bei einem Rohrdurchmesser von 1520mm. In Verbindung mit der Lage der Rammführung ca. 2,0m über die Wasserlinie wurde eine Hakenhöhe beim Einstellen in die Führung von 40m über Wasser benötigt. Durch die vergleichsweise geringe Wassertiefe von 4 bis 5 Metern und die

geringe Einsinkung des Rammgutes in die Hafensohle wurde auch das Aufsetzen der Rammgeräte in größerer Höhe durchgeführt. Hier war besonnenes und erfahrenes Personal erforderlich.



Abbildung 6: Übersicht zu den verschiedenen Gewerken und Tätigkeiten

9 Eine wegweisende Entwicklung für den Duisburger Hafen

Die Baustelle vor der Einfahrt in das Hafenbecken A in Duisburg ist zweifellos ein Meilenstein in der Geschichte des Duisburger Hafens. Die Transformation der Kohleninsel in ein hochmodernes Containerterminal markiert nicht nur die kontinuierliche Entwicklung des Hafens, sondern unterstreicht auch die Bedeutung von Duisburg als zentraler Verkehrsknotenpunkt entlang der Neuen Seidenstraße. Die beeindruckende Konstruktion der Dammkörper und die präzise Installation der Rammelemente sind nur einige Beispiele für die herausragende Ingenieursleistung und das Fachwissen, die bei diesem Projekt zum Tragen kamen. Wir schauen mit Spannung auf die zukünftigen Entwicklungen und deren Auswirkungen auf den internationalen Handel.

10 Autor

Dipl.-Ing. Thomas Groß, Geschäftsführer
Thomas.gross@huelskens.de
Hafenstr. 3
46483 Wesel
www.huelskens-wasserbau.de
Tel.: +49 281 204 – 230

Schleuse Lüneburg – Sparschleuse mit größter Hubhöhe und besonderen hydraulischen Herausforderungen

Teresa Weber
Franz Dichgans
Lukas Brodersen

Stichworte: Schleuse, Sparschleuse, Elbe-Seitenkanal, Hydraulik

1 Einführung

Der Elbe-Seitenkanal (ESK) verbindet den Hamburger Hafen mit dem Mittel-landkanal und spielt eine zentrale Rolle bei der nachhaltigen Verteilung von Transportgütern in Deutschland. Ein wesentlicher Bestandteil dieser Infrastruktur ist das bestehende Schiffshebewerk in Scharnebeck bei Lüneburg. Dieses Bauwerk erreicht jedoch im Jahr 2050 das Ende seiner Lebensdauer und muss daher ersetzt werden. Nach umfangreichen Voruntersuchungen wurde die Planung einer neuen Sparschleuse beauftragt. Diese wird mit einer Hubhöhe von 38,25 m eine der weltweit größten Sparschleusen sein.

2 Bauwerksbeschreibung

Die Schleuse wird parallel zum bestehenden Schiffshebewerk ausgerichtet. Die Kammerlänge beträgt 232,50 m bei einer Kammerbreite von 12,50 m. Dies ermöglicht die Schließung von Schubverbänden ohne Kopplungsvorgänge oder z.B. die gleichzeitige Schließung eines Europaschiffs und eines übergroßen Großmotorgüterschiffs (üGMS). In den Kammerwänden werden beidseitig der Schleusenammer je 8 Sparbecken und 2 Pufferbecken auf insgesamt 10 Beckenebenen angeordnet.



Abbildung 1: Abbildung 1: Ausschnitt eines gerenderten Modells der Schleuse Lüneburg (vorne im Bild), visualisiert neben dem bestehenden Schiffshebewerk

Die besondere Konstruktion der Schleuse erfordert ein spezielles Füllsystem, um die hydraulischen Randbedingungen für die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt zu gewährleisten. Die Sparbecken werden dazu über insgesamt 10 Zentralschächte angesteuert. Jede Spar- und Pufferbeckenebene ist mit 10 Zylinderschützen ausgestattet, die zentral gesteuert werden. Am Boden der Zentralschächte wird der Abfluss in zwei Verteilerarme aufgeteilt und in die Horizontale umgelenkt. So wird der Zufluss in den Längskanal, der parallel zur Kammer verläuft, vergleichmäßig. In den beiden Längskanälen wird schließlich der Zufluss der jeweiligen Schleusenseite gesammelt und durch jeweils 86 Fülldüsen sohnah in die Kammer geleitet. Die Kammersohle ist 2 m unterhalb der unterwasserseitigen Gewässersohle angeordnet, sodass ein erhöhtes Wasservolumen zur Energiedissipation zur Verfügung steht. Umlaufkanäle dienen im geplanten Bauwerk nur zur Füllung und Entleerung der Pufferbeckenebenen. Die obere Pufferbeckenebene wird während des Schleusungsvorgangs langsam aus dem Oberwasser befüllt und gibt am Ende der Bergschleusung ihr Volumen in die Schleusenkammer ab. Dadurch wird das über das Obertor zuzuführende Restfüllungsvolumen reduziert und die Sunkwelle im Oberwasser minimiert. Analog erfolgt am Ende der Talschleusung die Füllung der unteren Pufferbeckenebene aus der Schleusenkammer und eine verlangsamte Abgabe ins Unterwasser während des restlichen Schleusungsvorgangs.

3 Hydraulische Untersuchungen

Für die Bemessung der Schleuse wurden umfangreiche hydraulische Untersuchungen durchgeführt, um die Funktion insbesondere im Hinblick auf die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs sicherzustellen. Durch die besondere Konstruktion und Betriebsweise sind zudem übliche Berechnungsverfahren oftmals nicht anwendbar.

Die grundlegende Funktion des hydraulischen Systems wurde mittels eines Netzwerkmodells in der Software TFSIM untersucht. Diese Software ist eine Weiterentwicklung von LOCKSIM, ein speziell für Schleusen entwickeltes hydraulisches Netzwerkmodell. In diesem Modell wurden die grundlegenden Fließzustände bei der Tal- und Bergschleusung betrachtet. Die vereinfachte Methodik erlaubt durch schnelle Rechenzeiten eine effiziente Variantenuntersuchung, kann jedoch die Strömungsvorgänge und Abflussverteilung insbesondere in der Kammer auf Grund der Verwendung statischer Ansätze nur eingeschränkt abbilden.

Daher wurden die Füll- und Entleerungsvorgänge zusätzlich mit hydrodynamisch-numerischen Methoden untersucht. Die Modellierung erfolgte dreidimensional mittels der OpenSource CFD-Toolbox OpenFOAM® in ein- und zweiphasigen Ausschnittsmodellen. Durch die Simulation des Füllsystems der Schleuse konnte insbesondere die räumliche Abflussverteilung in Längskanal und Schleusenammer besser erfasst werden.

Von besonderem Interesse für einen sicheren Schleusenbetrieb sind die auf die zu schleusenden Fahrzeuge einwirkenden Strömungskräfte. Zu hohe Kräfte können dabei z.B. zu brechenden Trossen führen und sind daher zu vermeiden, da zurückschnellende Trossenenden zu schweren Verletzungen führen können (*Belzner, 2024*). Für die Abschätzung der Längskräfte wurde von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) das Berechnungsprogramm „Lock Model“ (LoMo) entwickelt (*Belzner et al, 2018*). Es ermittelt in einem 1D-Ansatz die auf einen Schiffsquerschnitt wirkenden Kräfte bei Füll- und Entleerungsvorgängen. Insbesondere für diese Berechnungen ist eine möglichst genaue Kenntnis der räumlichen Abflussverteilung in der Schleusenammer notwendig, da Ungleichverteilungen maßgeblich zu der Entstehung von Längskräften beitragen. Vergleichsrechnungen mit in OpenFOAM® ermittelten Kammerzuflüssen und den Kammerzuflüssen aus dem vereinfachten Netzwerkmodell TFSIM zeigten, dass bei der Verwendung der vereinfachten Abflussverteilung die Schiffskräfte um bis zu 1/3 unterschätzt werden.

Während für die Längskräfte mit LoMo ein Nachweisverfahren zur Verfügung steht, ist die Abschätzung der Querkräfte noch Gegenstand der Forschung und erfordert die Verwendung von hydrodynamisch-numerischen Berechnungsverfahren. Untersuchungen der BAW haben gezeigt, dass selbst Berechnungen mit dynamischen Gittern signifikanten Unsicherheiten unterliegen (Thorenz & Schulze, 2021). Um dennoch eine erste Abschätzung zu ermöglichen, wurde mittels eines statischen Ansatzes eine Abschätzung der Querkräfte auf ein zu schleusendes übergroßes Großgütermotorschiff (üGMS) durchgeführt.

Die Füllung und Entleerung der Spar- und Pufferbecken erfolgt über Zylinderschütze. Für diese Sonderbauteile mussten die Verlustbeiwerte zur Verwendung in den vereinfachten Modellen ermittelt werden. Hierzu wurden detaillierte 3D-Modelle für verschiedene Öffnungszustände erzeugt. Mit zweiphasigen OpenFOAM®-Modellen wurden daraus Verlustbeiwerte sowohl für den Füllvorgang als auch für den Entleerungsvorgang ermittelt.

Zur Ermittlung der Sparrate und Schleusungsdauer wurde ein Volumen-Ansatz gewählt. Mit dem Python-basierten, selbstentwickelten Berechnungsprogramm SLUsim werden die Abläufe in der Schleuse bei variablen Ober- und Unterwasserständen simuliert. Durch die vorhergehenden Berechnungen können dabei die Fließvorgänge vereinfacht abgebildet und die Berechnungen somit über eine vereinfachte Volumenbilanzierung durchgeführt werden. So konnten nicht nur für die verschiedenen Betriebsszenarien die Kammer- und Beckenwasserstände sowie Ablaufzeiten untersucht, sondern auch der Schleusenbetrieb über langfristige Zeitreihen simuliert werden.

Ein wesentlicher Punkt für den sicheren Schleusenbetrieb ist weiterhin der Lufteintrag bei der Kammerfüllung. Ein übermäßiger Lufteintrag kann nicht nur zu Schäden im Füllsystem führen, sondern auch die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt während des Schleusungsvorganges beeinträchtigen. Allerdings ist nach derzeitigem Stand der Technik der Lufteintrag nur näherungsweise z.B. mit numerischen Methoden abzuschätzen. Daher wurden durch verschiedene planerische Maßnahmen, wie z.B. die Gewährleistung ausreichender Überdeckungshöhen der Schützöffnungen und schnelle Öffnung der Schütze die Risiken für den übermäßigen Lufteintrag über die Zylinderschütze reduziert.

Um in den geschlossenen Sparbecken bei Füll- und Entleerungsvorgängen Über- und Unterdrücke zu vermeiden, müssen diese mit Belüftungsmöglichkeiten versehen werden. Die Auslässe der dafür notwendigen Rohre müssen über dem maximal möglichen Wasserstand liegen, um Wasseraustritte bei Fehlfunktionen zuverlässig zu vermeiden. Daher werden die Lüftungsrohre in den Außenwänden des Bauwerks auf die Planie geführt. Da aus tragwerksplanerischen Gründen die Rohrdurchmesser begrenzt sind, kann es durch hohe Fließgeschwindigkeiten zu strömungsinduzierter Geräuschentwicklung kommen. Um diese zu vermeiden bzw. zu reduzieren werden strömungsakustische numerische Untersuchungen zur Analyse und Optimierung des Lüftungssystems durchgeführt.

4 Building Information Modeling

Das Schleusenbauwerk wird vollständig in einem dreidimensionalen BIM-Modell entworfen, wodurch eine präzise und integrative Planung durch die Erfassung und Visualisierung aller relevanten Bauwerksdaten ermöglicht wird. Die Einbindung aller Fachplanenden fördert aktiv die interdisziplinäre Zusammenarbeit, indem sie den Austausch von Informationen und die Koordination der Arbeiten erleichtert. Weiterhin konnten die 3D-Daten als Eingangsgeometrie für numerische Untersuchungen verwendet werden, so dass der Modellierungsaufwand und die Fehleranfälligkeit reduziert sind.

Durch die Anwendung von BIM werden darüber hinaus potenzielle Konstruktionskonflikte frühzeitig identifiziert und behoben, was zu einer erhöhten Effizienz und Genauigkeit im Planungsprozess führt.

5 Nachhaltigkeit

Obwohl der Ersatzneubau der Schleuse den Einsatz erheblicher Mengen an Baumaterialien wie Beton und Stahl erfordert, werden im Rahmen der technischen und ökologischen Möglichkeiten Nachhaltigkeitsaspekte berücksichtigt.

Der Transport mittels Schifffahrt stellt eine nachhaltige Art des Güterverkehrs dar. Durch die Nutzung des Elbe-Seitenkanals können große Mengen

Güter effizient und mit einem vergleichsweise niedrigen CO₂-Ausstoß transportiert werden. Dies trägt zur Reduktion der Umweltbelastung bei und unterstützt die Ziele einer nachhaltigen Logistik.

Die Schleuse wird als Sparschleuse konzipiert, was eine erhebliche Ressourcenschonung ermöglicht. Hierdurch kann pro Schleusungsvorgang etwa 80% des Wassers in den Sparbecken gespeichert werden, wodurch die Entnahme von Wasser aus der oberen Kanalhaltung des Elbe-Seitenkanals signifikant reduziert wird.

Zusätzlich wird die Schleuse mit einer Photovoltaikanlage ausgestattet, die sich über drei der freistehenden Fassadenseiten, sowie Teile des angrenzenden Damms erstreckt. Der erzeugte Strom wird in das lokale Stromnetz eingespeist. Von dem durch PV erzeugten Strom werden jährlich ca. 1/3 direkt für die Schleuse verwendet. Dies reduziert den externen Energiebedarf und fördert die Nutzung erneuerbarer Energien.

Zudem werden bei der Planung Einsparpotentiale bei den Betonmengen betrachtet. So wird z.B. die Verwendung von Hohlkörpern in massigen Betonbauteilen untersucht, um die benötigten Betonmengen und somit auch die CO₂-Emissionen zu reduzieren.

6 Ausblick

Aktuell befindet sich die Schleuse in der Entwurfsplanungsphase, wobei die hydraulischen Berechnungen bereits abgeschlossen wurden. Ein physikalisches Modell wird von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) erstellt, das sich auf das Füll- und Entleerungssystem der Schleuse konzentriert. Dieses Modell dient unter anderem der Validierung der entstehenden Schiffskräfte, um die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt zu gewährleisten.

7 Literatur

Belzner, Fabian (2024): Entwicklung eines semi-probabilistischen Bemessungskonzepts zur Optimierung der Füllung einer Binnenschifffahrtsschleuse. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAWDissertationen, 11). https://doi.org/10.18451/bawd_11

Belzner, Fabian; Simons, Franz; Thorenz, Carsten (2018): An application-oriented model for lock filling processes. In: PIANC (Hg.): Proceedings of the PIANC-World Congress Panama City, Panama 2018, May 7 to 11. Panama: PIANC.
Thorenz, Carsten; Schulze, Lydia (2021): Numerical Investigations of Ship Forces During Lockage. In: Journal of Coastal and Hydraulic Structures 1. <https://doi.org/10.48438/jchs.2021.0005>

Autor:innen:

Teresa Weber, M.Sc.
Dipl.-Ing. Franz Dichgans

Lukas Brodersen, M.Sc.

Ramboll Deutschland GmbH
Marine & Civil Engineering

Wasserstraßen-Neubauamt Hannover
Projektgruppe Schleuse Lüneburg

Jürgen-Töpfer-Str. 48
22763 Hamburg

Nikolaistraße 14/16
30159 Hannover

Tel.: +49 40 3281 8177
E-Mail: teresa.weber@ramboll.com

Tel.: +49 511 9115 5818

Innovative Schleusenammerkonstruktion mit Einsatz von Fertigteilen

Maximilian Kaiser, M.Sc.; Tobias Zowada, M.Sc.;
Jacqueline Schmied, M.Sc.; Dipl.-Ing. Stefan Lühr
Dr.-Ing. Christoph Stephan; Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn

Stichworte: Schleuse, Betonfertigteile, Verkehrswasserbau

1 Einleitung

Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) steht vor der dringenden Aufgabe, geschädigte und am Ende ihrer Lebensdauer befindliche Wasserbauwerke durch Ersatz-Neubauten zu erneuern. Dabei stellt die Fertigteilbauweise eine vielversprechende Alternative zur traditionellen Ort betonbauweise dar, um die Effizienz und Nachhaltigkeit solcher Bauprojekte zu verbessern. Während die Fertigteilbauweise im Hoch- und Industriebau seit Jahren etabliert ist, soll ihre Anwendung nun auch im massiven Verkehrswasserbau untersucht und systematisch angewendet werden. Dieses Ziel wird seit 2020 im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsprojekts (FuE) an der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) verfolgt. Das Forschungsprojekt ist Teil des Expertennetzwerks des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) und wird in Kooperation mit dem Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU) sowie der Professur für Konstruktionswerkstoffe und Bauwerkserhaltung der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg (HSU) durchgeführt.

2 Ausgangssituation und Zielsetzung

In den letzten Jahren hat sich gezeigt, dass die Herstellung neuer Schifffahrtsschleusen zunehmend zeitintensiver wird und Defizite in der Qualität der Beton-Randbereiche aufweist, welche für die Dauerhaftigkeit der Bauwerke

von entscheidender Bedeutung sind. Das vorgestellte Forschungsprojekt setzt hier an, um diesen Herausforderungen mit dem Einsatz vorgefertigter Bauelemente zu begegnen. Es zielt darauf ab, eine Fertigteilbauweise für Schleusenammerwände zu entwickeln, die sowohl tragfähig als auch robust ist und sich gleichzeitig durch eine hohe Ressourceneffizienz auszeichnet.

Unter anderem befassen sich die Betrachtungen im Forschungsprojekt mit statisch-konstruktiven Untersuchungen zur Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit der Fertigteillemente. Dabei wird ein robustes Bauverfahren entwickelt, das langfristig dazu beitragen soll, die Fertigteilbauweise als Standard im Verkehrswasserbau zu etablieren. Diese Bauweise ermöglicht eine ressourcenschonende, nachhaltige und qualitativ hochwertige Umsetzung, die den steigenden Anforderungen moderner Wasserbauprojekte gerecht wird.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird ein Leitfaden für das Planen und Bauen mit Fertigteilen im Verkehrswasserbau erarbeitet. Dieser enthält konkrete Empfehlungen für Planende, Bauausführende, Fertigteilwerke und Betreibende, um die Vorteile der Fertigteilbauweise, insbesondere eine beschleunigte Bauzeit und eine verbesserte Bauqualität, optimal zu nutzen. Zudem werden die spezifischen Anforderungen an Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit im Verkehrswasserbau berücksichtigt.

Im Folgenden werden, die bereits bearbeiteten, sowie die aktuell laufenden Arbeitsschwerpunkte vorgestellt.

3 Arbeitsschwerpunkte im FuE-Projekt

3.1 Zentrale Betrachtungen im FuE-Projekt

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt umfasst verschiedene zentrale Aspekte, die für Planung, Bemessung und Realisierung von **Schleusenammerwänden** in Fertigteilbauweise von Bedeutung sind. Dazu gehören die Grundlagenermittlung und Planung, die Entwicklung technischer Konzepte, die Konstruktion und Fertigung sowie die Logistik. Ergänzend spielen Überwachung und Monitoring eine entscheidende Rolle, um eine durchgängige Qualitätskontrolle und Dokumentation sicherzustellen.

Für den Bereich der Grundlagen sowie der Planung steht die Erstellung eines umfassenden Lastenhefts im Fokus, das die Anforderungen an die Planung

und den Bau massiver Schleusenkammerwände in Fertigteilbauweise beschreibt. Dieses Dokument dient als Orientierung für Planer, Tragwerksplaner und Bauausführende. Zudem werden mögliche Geometrien der Fertigteile betrachtet, um realisierbare Lösungen aufzuzeigen. Nachhaltigkeitsaspekte werden ebenfalls berücksichtigt, indem die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen im Vergleich zur Ort betonbauweise untersucht werden.

Im Bereich der Bemessung und technischen Konzepte werden spezialisierte Tools entwickelt, um die Berechnung und Analyse der Fertigteile sowie deren Anschlüsse einfach und anwenderfreundlich zu ermöglichen. Zur Sicherstellung der Tragfähigkeit der Fertigteile werden Methoden zur Biege- und Querkraftbemessung betrachtet und angewendet. Parallel dazu erfolgt eine Analyse der Verformungen unter Beanspruchung sowie die technische Ausarbeitung der Fugenkonstruktionen, die sowohl Dichtigkeit als auch eine zuverlässige Kraftübertragung sicherstellen.

Die Konstruktion und Fertigung umfassen die detaillierte Ausarbeitung der Bewehrungsverbindungen zwischen den Fertigteilen und der Sohle, um eine kraftschlüssige Verbindung zu gewährleisten. Zudem wird die Ausbildung und der Anschluss eines Kopfbalkens untersucht, wobei unterschiedliche Bauweisen wie Fertigteil-, Halfertigteil- oder Ort betonbauweise berücksichtigt werden. In Abschnitt 5 befindet sich die detaillierte Beschreibung der Konstruktion. Die Fertigteile werden entsprechend den festgelegten Maßen und normativen Vorgaben konstruiert, wobei ein besonderer Fokus auf die Verbindungsdetails zwischen Kopfbalken und Fertigteilen gelegt wird, um eine optimale Kraftübertragung und Dichtigkeit zu gewährleisten.

Für die Montage und Logistik werden Konzepte für den Transport und die Montage der Fertigteile vor Ort entwickelt, wobei eine effiziente Baustellenlogistik im Vordergrund steht.

Für den Einsatz bei zukünftig möglichen Pilot- und Baumaßnahmen wird ein digitales, automatisiertes Mess- und Überwachungskonzept entwickelt, das vollständig in ein Building Information Modeling (BIM)-System integriert ist. Dieses Konzept ermöglicht eine kontinuierliche digitale Dokumentation und Verwaltung der Projektdaten während der Bauphase und späteren Nutzung.

3.2 Erstellung eines Leitfadens

Durch die gewonnenen Erkenntnisse der zentralen Betrachtungen im FuE-Projekt wird ein Leitfaden zum Einsatz von Fertigteilen im massiven Verkehrswasserbau erstellt, der Empfehlungen zu Planung, Baustoffen und Bauausführungen enthält, die die Anwendung dieser Bauweise im massiven Verkehrswasserbau ermöglichen.

3.3 Umsetzung eines Pilotprojekts

Die Umsetzung einer Pilotmaßnahme dient als Testphase, um die für den Leitfaden entwickelten Konzepte zu validieren und zu optimieren. Das in Abschnitt 3.1 beschriebene digitale Überwachungs- und Monitoringkonzept wird bei der Umsetzung der Pilotmaßnahme ebenfalls angewendet.

4 Entwicklungen im FuE-Projekt

Die initialen Überlegungen zum Einsatz von Fertigteilen im massiven Verkehrswasserbau konzentrierten sich auf die Verwendung von Teilfertigteilen als verlorene Schalung (Lühr et al., 2020). Eine schematische Darstellung dieser Bauweise ist in der nachfolgenden Abbildung 1 dargestellt. Mit dieser Bauweise soll das dichte Betongefüge der Fertigteile den inneren Betonkern der Schleusenammerwand zuverlässig vor den vorherrschenden Expositionen schützen. Allerdings wird das Potenzial der Fertigteilbauweise in diesem Ansatz nicht vollständig ausgeschöpft, da weiterhin umfangreiche Ergänzungen mit Bewehrung und Ortbeton erforderlich sind.

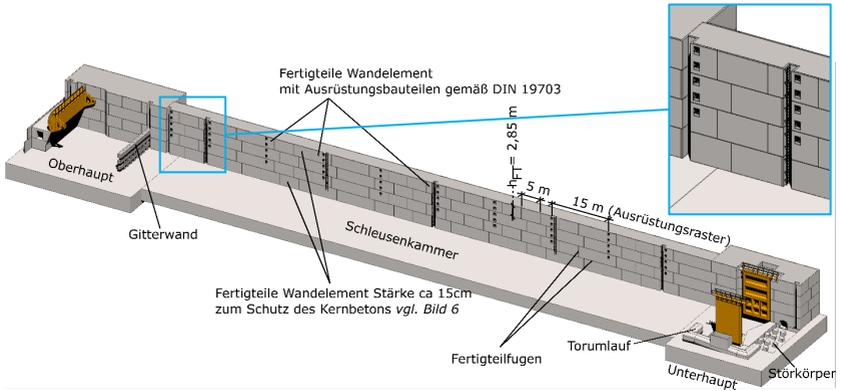


Abbildung 1: Binnenschleuse mit Teilfertigteilen als verlorene Schalung, Systemmaß nach DIN 19703 (Lühr et al., 2020)

Zu Beginn des Projekts wurde eine umfassende Analyse der Fertigteilbauweise durchgeführt, die auf einer Kombination aus Recherche und Experteninterviews basiert (Hasselder, 2021). Ein Ergebnis dieser Untersuchungen ist die Neuausrichtung mit dem Fokus auf tragende Fertigteile, die mit minimalem Bewehrungsaufwand und ergänzendem Ortbeton realisiert werden können.

Die Bewertung unterschiedlicher Querschnittsvarianten für tragende Fertigteile in massiven Schleusenammerwänden erfolgte im weiteren Projektverlauf mithilfe einer multikriteriellen Entscheidungsanalyse. Dabei zeigt sich die Schleusenammerwand mit Hohlkastenelementen als besonders vielversprechende Lösung. Diese Variante weist ein hohes Potenzial für eine effiziente und robuste Umsetzung der Fertigteilbauweise auf (Hasselder et al., 2022).

In Abbildung 2 ist die Entwicklung der Varianten der Fertigteilgeometrie im zeitlichen Verlauf des Forschungsprojekts schematisch dargestellt.

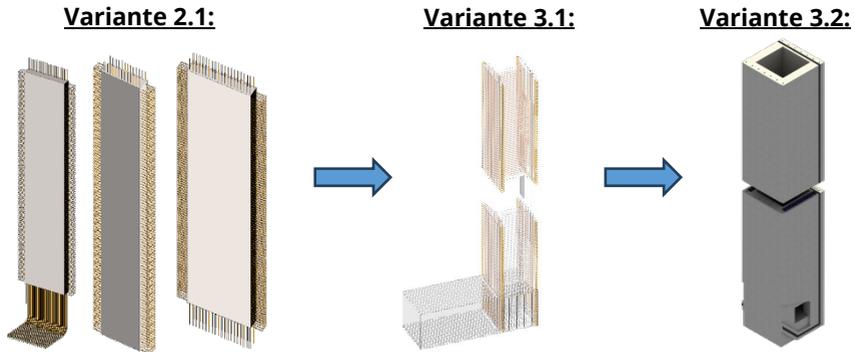


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Fertigteilentwicklung im zeitlichen Verlauf des Forschungsprojekts (v. l. n. r.); Variante 2.1: Platten mit Ortbetongergänzung in den Stoßfugen; Variante 3.1: Doppel-T-Querschnitt; Variante 3.2: Hohlkastenquerschnitt (Hasselder, 2021; RPTU)

5 Beschreibung der Konstruktion

Die Tragkonstruktion für Schleusenammerwände basiert auf rechteckigen Hohlkastenelementen, die im unteren Bereich biegesteif in eine monolithische Ortbetonsohle eingebunden werden. Am oberen Ende erfolgt der Anschluss an einen monolithischen Kopfbalken aus Ortbeton, der ein gemeinsames Trag- und Verformungsverhalten zwischen den Fertigteilreihen sicherstellt. Vertikal werden die Hohlkästen durch übergreifende Bewehrung kraftschlüssig miteinander verbunden. Die Hohlräume der Fertigteile werden zur Auftriebssicherung mit Recyclingmaterial oder alternativen Schüttgütern befüllt, um Ressourcenschonung und Nachhaltigkeit zu fördern, ohne den Lastabtrag zu beeinflussen (Hasselder, 2021). Eine Betonfüllung wird auf wenige, für konzentrierte Lasteinleitungen durch Poller oder ähnliche Einbauteile ausgerüstete Fertigteile, reduziert.

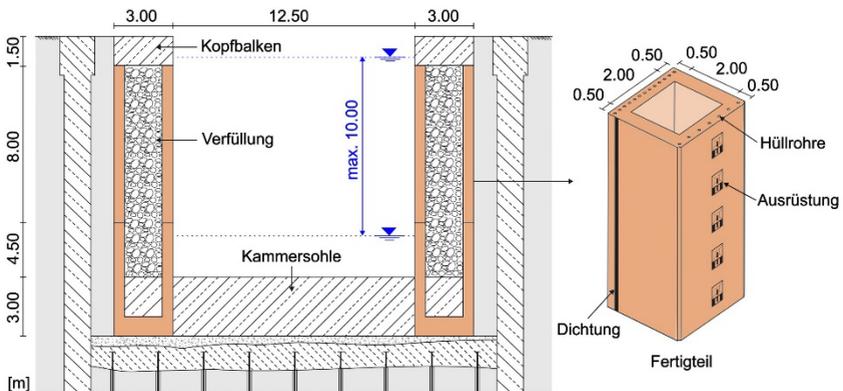


Abbildung 3: Querschnitt einer Schleusenammer als Stahlbetonhalbrahmen mit Einsatz von tragenden Fertigteilen in Form von Hohlkästen in Anlehnung an (Schmied et al., 2024)

Die rechteckigen Hohlkastenquerschnitte der Fertigteile bilden die Basis des Tragsystems der Kammerwand. Diese Querschnitte, wie in Abbildung 3 dargestellt, sind insbesondere bis zu einer Hubhöhe von 10 m geeignet, die über 90 % der Schleusen an Bundeswasserstraßen abdeckt. Um logistische Herausforderungen zu bewältigen, ist das Gewicht der Fertigteile auf 100 t begrenzt, wobei der Transport bevorzugt über Wasserstraßen erfolgt, da dieser ökologisch vorteilhaft ist und alle Baustellen naturgemäß eine Anbindung an die Wasserstraße haben.

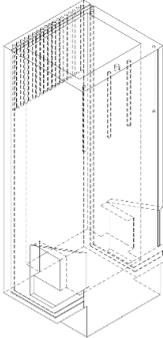
Die Fertigteile sind, wie in Abbildung 4 dargestellt, in zwei Typen unterteilt:

- Fertigteiltyp 1.1: Dieses untere Fertigteil enthält die Tragbewehrung der unteren Rahmenecke und der Kammerwand sowie Vergusstaschen, durch die Ortbeton aus der Sohle in das Fertigteil fließt. Das Fertigteil verfügt des Weiteren im Anschlussbereich an Fertigteiltyp 1.2 über Hüllrohre, um einen Übergreifungsstoß ausbilden zu können.
- Fertigteiltyp 1.2: Dieses obere Fertigteil bindet in den monolithischen Kopfbalken ein und verfügt über Hüllrohre für die Montage einer durchlaufenden Tragbewehrung.

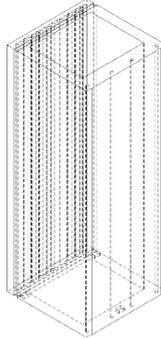
Zur Herstellung biegesteifer Verbindungen sind in den Fertigteilen werkseitig integrierte Hüllrohre vorgesehen, die während der Montage mit Tragbeweh-

nung versehen und anschließend vergossen werden. Zusätzliche Dichtungsmaßnahmen gewährleisten eine durchgängige Dichtungsebene, die die Vergusstaschen und die Ortbetonsohle einbezieht.

Fertigteiltyp 1.1:



Fertigteiltyp 1.2:



Fertigteilquerschnitt:

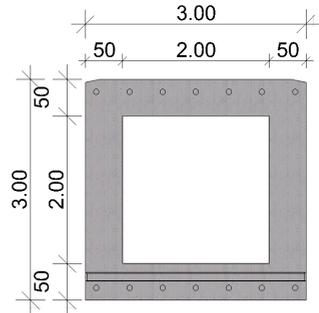


Abbildung 4: links: Darstellung des Fertigteiltyps 1.1 zur Einbindung in die monolithische Kammersohle ohne Ausrüstungsgegenstände und Bewehrung; mittig: Darstellung des Fertigteiltyps 1.2 zur Einbindung in den monolithischen Kopfbalken ohne Ausrüstungsgegenstände und Bewehrung; rechts: bemaßter Fertigteilquerschnitt in [cm] bzw. [m] (Kaiser et al., 2023)

Bedingt durch die Höhe und Länge einer Schleuse ist eine Segmentierung der Schleusenammerwand in Elemente notwendig. Daraus ergibt sich ein geplantes und regelmäßiges Fugenbild aus horizontalen und vertikalen Fugen, welche für den Schleusenbetrieb wasserdicht auszubilden sind.

Die horizontalen Fugen sind als Arbeitsfugen auszubilden und übertragen Schubkräfte. Die eingelegte Tragbewehrung steuert die Rissbreite unter Beanspruchung und begrenzt die Rissbreiten auf den in der DIN 19702 vorgegebenen Rechenwert (90 %-Quantil) von $w_k \leq 0,25 \text{ mm}$. Da im erdberührten Bereich der Fertigteile (Zugbandseite) die geringsten Temperaturschwankungen sowie die geringsten Beanspruchungen während der Nutzungsdauer auftreten, ist es vorgesehen eine Dichtung in diesem Bereich anzuordnen.

Die vertikalen Fugen können kraftschlüssig durch Vergusstaschen oder nicht kraftschlüssig durch beispielsweise Pressfugen mit entsprechenden Dichtungselementen ausgebildet werden. Sie kompensieren Element- und Montageteranzen sowie Versatzverformungen in der jeweiligen Konstruktion,

die zum Beispiel durch lokale Lasteinleitung aus dem Schleusenbetrieb resultieren. Die Erarbeitung optimaler Fugenkonstruktionen ist derzeit noch Gegenstand der Forschung im FuE-Projekt.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die bisher im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojekts gewonnenen Erkenntnisse verdeutlichen das Potenzial der Fertigteilbauweise im massiven Verkehrswasserbau. Die Fertigteilbauweise bietet eindeutige Chancen in Bezug auf Bauzeitverkürzung, Qualitätssteigerung und Nachhaltigkeit gegenüber der traditionellen Ort betonbauweise.

Ein zentraler Meilenstein des Projekts ist die Erstellung eines Leitfadens, der die Anwendung dieser Bauweise für Planende, Bauausführende und Betreibende praxisnah unterstützt. Die Integration eines digitalen Mess- und Überwachungskonzepts sowie die Nutzung von Building Information Modeling (BIM) schaffen eine Grundlage für die langfristige Überwachung und Optimierung solcher Bauwerke. Die geplante Pilotmaßnahme spielt eine zentrale Rolle, um die Anwendbarkeit der entwickelten Konzepte unter realen Bedingungen zu demonstrieren, Annahmen zu validieren und die Bauweise zu optimieren.

Zukünftig ist es von großer Bedeutung, die Fertigteilbauweise weiter zu standardisieren, um ihren Einsatz in der Baupraxis zu fördern. Zudem sollten ökologische Aspekte, einschließlich der Nutzung von Recyclingmaterialien und des Transports über Wasserstraßen, intensiver untersucht werden. Die gewonnenen Erkenntnisse können nicht nur für den Verkehrswasserbau, sondern auch für andere Bereiche des Infrastrukturbaus maßgeblich dazu beitragen, die Herausforderungen an Effizienz, Nachhaltigkeit und Qualität zu bewältigen.

7 Literatur

- Binder, G.; Meinhold, W. (2012): Empfehlungen zum Pollerzug (Trossenzugansatz) für Binnenschiffsschleusen, Bundesanstalt für Wasserbau, FuE-Abschlussbericht A39510210106.
- DIN 19703:2014-06: Schleusen der Binnenschiffahrtsstraßen - Grundsätze für Abmessungen und Ausrüstung.
- DIN 19702:2013-02: Massivbauwerke im Wasserbau - Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit.

- Hasselder (2021): Einsatz von Fertigteilen im massiven Verkehrswasserbau. In: Kolloquium Angewandte Forschung, von der Forschung in die Praxis, Bundesanstalt für Wasserbau.
- Hasselder, M; Lühr, S.; Stephan, C.; Pahn, M.; Kaiser, M. (2022): Entwicklung einer zukunftsorientierten Bauweise für Schleusenammerwände. In: punctum.betonbauteile, 6. Ausgabe, S. 32-36.
- Kaiser, M., Pahn, M. and Lühr, S. (2023). Großformatige Fertigteile in Zellenbauweise – Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit. BAW-Kolloquium Instandsetzung und Neubau von Verkehrswasserbauwerken, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 22./23. November 2023.
- Lühr, S.; Westendarp, A.; Stephan, C.; Kunz, C. (2020): Einsatz von Fertigteilen im massiven Verkehrswasserbau. In: Bautechnik. Jahrgang 97, Heft 6, S. 404-414.
- Lühr, S., Stephan, C. and Kunz, C. (2023). Einführung in das Thema „Fertigteile im Verkehrswasserbau“. BAW-Kolloquium Instandsetzung und Neubau von Verkehrswasserbauwerken, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 22./23. November 2023.
- Schmied, J., Zowada, T., Kaiser, M., Lühr, S., Stephan, C. and Pahn, M. (2024): Use of load-bearing precast elements for ship locks. World Bridge Engineering Conference, Miami, 11.-13.12.2024.

Autoren:

M.Sc. Maximilian Kaiser,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn

Fachgebiet Massivbau und
Baukonstruktion
Rheinland-Pfälzischen Technische
Universität Kaiserslautern-Landau

Paul-Ehrlich-Straße, Gebäude 14
67663 Kaiserslautern

Tel.: +49 631 205 5496
+49 631 205 3083

Fax: +49 631 205 3555
+49 631 205 3555

E-Mail: maximilian.kaiser@rptu.de
matthias.pahn@rptu.de

M.Sc. Tobias Zowada,
M.Sc. Jacqueline Schmied,
Dipl.-Ing. Stefan Lühr,
Dr-Ing. Christoph Stephan

Bundesanstalt für Wasserbau
Bautechnik
Kußmaulstraße 17
76135 Karlsruhe

Tel.: +49 721 9726-2190

+49 721 9726-2165

+49 40 81908-309

+49 721 9726-2440

E-Mail: tobias.zowada@baw.de

jacque-

line.schmied@baw.de

stefan.luehr@baw.de

christoph.stephan@baw.de

„ABCD - Global Water and Climate Adaptation Centre“

Holger Schüttrumpf
Jürgen Stamm
S.A. Sannasiraj
Mukand Babel
Firas Aljanabi
Edeltraud Günther
Daniel Karthe
André Lindner
Fabian Falter
Danish D R

Stichworte: Internationalisierung, Klimaanpassung, Wasser

1 Einführung

Globale Herausforderungen verlangen nach globalen Lösungen und globaler Zusammenarbeit. Der Klimawandel ist eine solche globale Herausforderung mit vielfältigen Auswirkungen auf die Verfügbarkeit und Qualität von Wasserressourcen (Wang et al. 2023), die nur in internationaler Zusammenarbeit unter vereinten Anstrengungen bewältigt werden kann. Es ist von entscheidender Bedeutung, Anpassungsstrategien in das Wassermanagement zu integrieren, um sowohl kurzfristige Herausforderungen als auch langfristige Resilienz zu adressieren. Insbesondere die Unterscheidung zwischen Klimaschutz und Klimaanpassung ist hierbei essenziell: Während Klimaschutz darauf abzielt, die Ursachen des Klimawandels zu bekämpfen, konzentriert sich die Anpassung darauf, bestehende und künftige Risiken durch flexible und maßgeschneiderte Maßnahmen zu bewältigen. Inter- und transdisziplinäre Maßnahmen mit Bezug zum Thema Wasser stehen hierbei an erster Stelle

und betreffen sowohl die Klimaanpassung an Extremereignisse (Hochwasser, Dürre) wie auch Maßnahmen zum Erhalt und zur Verbesserung der Wasserversicherheit.

Insgesamt werden vom Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) vier Klimazentren zwischen 2001 und 2025 in Phase I gefördert, die zur Unterstreichung der globalen Bedeutung des Klimawandels themendifferenziert und geographisch verteilt sind (Schüttrumpf et al., 2022). Das „African Climate and Environment Center – Future African Savannas“ (AFAS) ist geographisch auf Kenia und die Elfenbeinküste sowie thematisch auf Fragen von Klimawandel und Biodiversität fokussiert. Das „Regional Centre for Sustainable Adaptation to Global Change in the Middle East“ (SAGE) trägt zur Entwicklung von Klimaanpassungsmaßnahmen für das Jordan-Einzugsgebiet bei. Das „Transnational Centre for Just Transitions in Energy, Climate & Sustainability“ (TRAJECTS) zielt auf die Entwicklung von Maßnahmen zur Klimawandelmitigation durch nachhaltige Energiegewinnung und Landnutzung in Kolumbien und Südafrika.

Das vom DAAD mit Mitteln des Auswärtigen Amtes geförderte Klimaanpassungszentrum „ABCD – Global Water and Climate Adaptation Centre“ stellt sich den Herausforderungen der Klimaanpassung mit den Säulen Forschung, Lehre und Transfer (Abbildung 1) in Süd- und Südostasien. Das ABCD Centre ist ein Konsortium aus fünf Universitäten (RWTH **A**achen, AIT **B**angkok, IITM **C**ennai, TU **D**resden und UNU FLORES / **D**resden in vier Städten, in drei Ländern auf zwei Kontinenten und mit einem gemeinsamen Ziel (5 – 4 – 3 – 2 – 1).



Abbildung 1: Die drei Pfeiler des ABCD-Klimaanpassungszentrums: Lehre, Forschung und Transfer

Das ABCD-Centre legt großen Wert auf interdisziplinäre Zusammenarbeit und fördert den Dialog zwischen Wissenschaft und Gesellschaft. Dies wird durch praxisnahe Workshops und Diskussionsforen erreicht, die Experten aus verschiedenen Bereichen zusammenbringen.

2 Forschung

Das ABCD Klimaanpassungszentrum fördert durch Austausch von Studierenden, Promovierenden und Dozenten in beide Richtungen zwischen Asien und Europa gezielte Forschungsthemen in den Bereichen Wassersicherheit, Wasserwirtschaft, Naturbasierte Lösungen und resiliente Ökosysteme, tradiertes Wissen, ökonomische Resilienz und soziale Akzeptanz mit Bezug zur Weiterentwicklung von Klimaanpassungsmaßnahmen (Abbildung 2). Ein zentraler Bestandteil dabei ist die Entwicklung von adaptiven Strategien im Wassersektor, die unmittelbare, inkrementelle und transformative Maßnahmen umfassen (Henriksen et al. 2023). Sofortmaßnahmen adressieren akute Probleme und sind besonders in Katastrophensituationen von Bedeutung. Inkrementelle Strategien, wie z.B. die schrittweise Modernisierung der Wasserinfrastruktur, schaffen eine Brücke zwischen kurzfristiger Anpassung und langfristiger Systemresilienz. Transformative Ansätze hingegen umfassen umfassende Änderungen, wie die Umgestaltung urbaner Wassersysteme und die Integration von Klimaprojektionen in die Wasserpolitik. Gezielte Ansätze werden in diesem Rahmen durch das ABCD-Centre initiiert und ggf. durch zusätzliche Förderprogramme weiterentwickelt. Ingenieurwissenschaftliche, naturwissenschaftliche und gesellschaftswissenschaftliche Perspektiven werden kombiniert und integriert.



Abbildung 2: Abbildung 2: Die drei thematischen Forschungscluster des ABCD-Centre und ihre Implikationen für einen zielgerichteten Beitrag zu den Nachhaltigkeitszielen der Vereinten Nationen

Ein zentrales Ziel dieser Zusammenarbeit ist es, Lösungen für die am stärksten vom Klimawandel betroffenen Regionen zu finden. Dies umfasst die Entwicklung innovativer Wassermanagementstrategien sowie die Förderung von naturbasierten Lösungen zur Klimaanpassung. Gemeinsame Publikationen – wie z.B. das Buch „Maritime Hydraulics“ (Sundar et al., 2024) sind ein Ergebnis der intensiven gemeinsamen Arbeit deutscher, indischer und thailändischer Projektpartner.

3 Lehre

Ein besonderes Highlight der bisherigen Arbeiten von ABCD ist die Etablierung eines internationalen gemeinsamen Masterstudiengangs „Water Security and Global Change“. Hierbei handelt es sich um den ersten Joint-Master – zumindest im Wassersektor – der von einer asiatischen und zwei europäischen Universitäten gemeinsam organisiert wird. Studierende starten ihr Studium in Chennai, wechseln nach einem Semester nach Dresden und schließlich für ein weiteres Semester nach Aachen. Über die drei Semester hinweg nehmen sie auch online an Kursen der jeweils anderen Universitäten teil. Die Masterarbeit kann ausgerichtet am persönlichen Profil an einer der beteiligten Hochschulen angefertigt werden. Bei einem erfolgreichen

Studienabschluss erhalten sie dann eine gemeinsame Masterurkunde und ein gemeinsames Masterzeugnis der beteiligten Universitäten.

Die fachlichen Inhalte des Studiengangs, der in englischer Sprache gelehrt wird, sind in Abbildung 3 dargestellt. Die einzelnen Masterveranstaltungen fokussieren hierbei Aspekte der Hydrologie, der Wasserwirtschaft, des Wasserbaus, des Küsteningenieurwesens sowie weitere relevante Themen. Neue Lehrveranstaltungen, z.B. *Water, Health and Hygiene* am IIT Madras und *Climate Adaptation in Hydraulic and Coastal Engineering* an der RWTH Aachen, wurden entwickelt, um passgenau die Ziele des Studiengangs zu erreichen.

Die Lehrmethoden des Programms beinhalten innovative digitale Unterrichtsformate, um Studierenden weltweit den Zugang zu hochwertiger Ausbildung zu ermöglichen.

Die fachlichen Inhalte des Studiengangs wurden zudem intensiv abgestimmt, um Dopplungen zu vermeiden und Synergien zu nutzen. Die größte Herausforderung beim Aufbau des Studiengangs war es, die unterschiedlichen Lehr- und Lernkonzepte der beteiligten Hochschulen zusammenzuführen. Herausforderungen wie unterschiedliche Startzeitpunkte der Semester, der Zeitunterschied zwischen Indien und Deutschland, verschiedene Notensysteme sowie divergierende Lehr- und Lernmethoden galt es zu synchronisieren, ohne dabei die jeweiligen rechtlichen Rahmenbedingungen an den verschiedenen Standorten zu verletzen. Dies betraf übrigens nicht nur die internationale Zusammenarbeit, auch zwischen der RWTH Aachen und der TU Dresden wurden große Unterschiede sichtbar. Diese Unterschiede betrafen dabei weniger die fachlichen, sondern vielmehr rechtliche und administrative Aspekte.

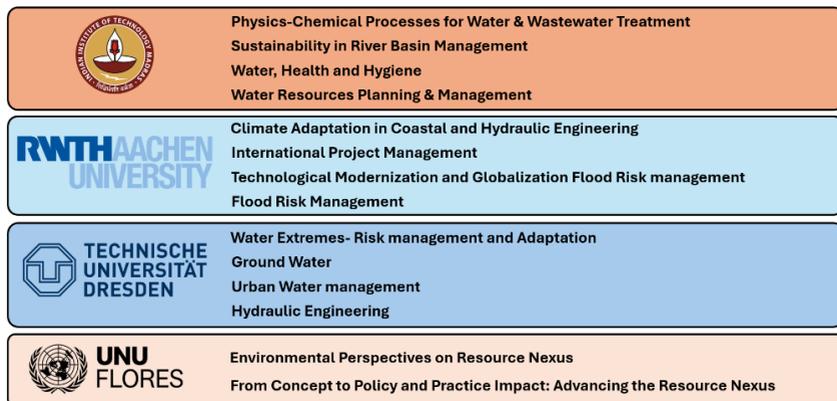


Abbildung 3: Lehrveranstaltungen (Stand 2024) im Masterstudiengang „Water Security and Global Change“

Die erste Kohorte von Studierenden befindet sich zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Beitrags kurz vor dem Wechsel vom IIT Madras, Indien, zur TU Dresden, Deutschland. Besondere Herausforderungen sind hierbei die rechtzeitige Visa-Erteilung, die Wohnungssuche sowie finanzielle Aspekte. Derzeit sind die beteiligten Universitäten optimistisch, dass der Wechsel gelingen wird und die Studierenden erfolgreich zum Studienabschluss geführt werden können. Ein besonderer Dank gilt hierbei dem DAAD als Förderorganisation des ABCD-Centres für die finanzielle Unterstützung des Studienprogramms.

4 Transfer

Weiterhin sind die beteiligten Hochschulen aktiv in der Durchführung von Transferworkshops mit Akteuren aus der Praxis. Durch die sehr praxisnahe Ausrichtung der Workshops können einerseits Forschungsergebnisse direkt an die Praxis weitergegeben werden, andererseits entstehen durch die Kommunikation mit der Praxis neue und relevante Forschungsfragen, die im Rahmen der zweiten Säule des Klimaanpassungszentrums (Forschung) aufgenommen und bearbeitet werden können.

Der Transfer von Wissen und Technologien wird besonders durch die Zusammenarbeit mit lokalen und internationalen Partnern gefördert. Dies ermöglicht es, dass Forschungsergebnisse direkt in den betroffenen Regionen

implementiert werden. Insbesondere durch die Einbindung der Universität der Vereinten Nationen wird darüber hinaus auch ein Wissenstransfer zwischen dem ABCD-Centre und dem UN-System erreicht.

Bislang konnten erfolgreich mehrere Transferworkshops zu verschiedenen Themen in Dresden, Chennai (Indien), Kerala (Indien), Pune (Indien), Port Louis (Mauritius) und Kathmandu (Nepal) durchgeführt werden. Darüber hinaus veranstaltete das ABCD Center am IIT Madras, Chennai, eine Konferenz zum Thema Wassersicherheit und Klimaanpassung (WSCA). Weitere Workshops in Vietnam, Indonesien, Malaysia und auf Sansibar sind derzeit in Planung. Themen der bisherigen Transfer-Workshops waren beispielsweise:

- Geotextiles
- Flood Pollution
- Coastal Protection and Coastal Adaptation of Small Islands
- Climate and Water-Induced Disasters – From Risk to Resilience
- Adapting to Climate Hazard to become Climate Resilient
- Managed aquifer recharge (MAR) for Climate change Adaptation
- Measuring Urban Water Security using Water Security Assessment Tool (WATSAT)

Die jeweiligen Workshops kombinieren Vorträge, Podiumsdiskussionen und Exkursionen, um den Teilnehmenden und den Dozenten einen maximalen Austausch miteinander zu ermöglichen. Die Unterschiedlichen Perspektiven der lokalen Stakeholder bieten dabei immer wieder interessante Ansätze für weitere Forschungsvorhaben innerhalb des Klimaanpassungszentrums.

Der Erfolg von Transfermaßnahmen hängt maßgeblich davon ab, wie effektiv sozio-ökonomische Herausforderungen adressiert werden können. In vielen Regionen fehlt es an finanziellen Ressourcen, technischer Expertise und institutioneller Unterstützung, um groß angelegte Anpassungsprojekte umzusetzen (United Nations, 2024). Hier spielt die Bewusstseinsbildung eine entscheidende Rolle: Durch umfassende Kommunikations- und Bildungsinitiativen können die Akzeptanz und das Verständnis für notwendige Anpassungsmaßnahmen in der breiten Öffentlichkeit gefördert werden. Das Transferkonzept wird daher kontinuierlich hinsichtlich seiner Wirkung evaluiert und optimiert.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das ABCD „Global Water and Climate Adaptation Centre“ ist ein neues vom DAAD gefördertes Format, das einen intensiven Austausch in den Bereichen Forschung, Lehre und Transfer zwischen indischen, thailändischen und deutschen Partnern ermöglicht. Neben bekannten Austauschformaten stellt insbesondere der neuentwickelte Masterstudiengang „Water Security and Global Change“ ein Alleinstellungsmerkmal der erfolgreichen internationalen Zusammenarbeit dar.

Danksagung – Die Veröffentlichung basiert auf den Darstellungen des zugrundeliegenden DAAD-Verbundforschungsantrags für das „Global Water and Climate Adaptation Centre“. Zum Erfolg des Verbundprojekts haben zahlreiche Personen beigetragen, die hier nicht alle namentlich genannt werden können, und denen an dieser Stelle gedankt wird. Das Projekt wird gefördert vom Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD, Az. 57592537) mit Mitteln des Auswärtigen Amtes der Bundesrepublik Deutschland.

6 Literatur

- Wang, Q.; Deng, H.; Jian, J. Hydrological Processes under Climate Change and Human Activities: Status and Challenges. *Water* 2023, 15, 4164. <https://doi.org/10.3390/w15234164>
- Schüttrumpf, Holger; Stamm, Jürgen; Zimmermann, Rocco; Diederich, Stefan; Lindner, André; Günther, Edeltraud; Karthe, Daniel (2022) Das Global Water and Climate Adaptation Centre. In: *Wasser und Abfall : WA* 24(5), 41-44, ISSN1436-9095
- Henriksen, H.J.; Schneider, R.; Koch, J.; Ondracek, M.; Troldborg, L.; Seidenfaden, I.K.; Kragh, S.J.; Bøgh, E.; Stisen, S. A New Digital Twin for Climate Change Adaptation, Water Management, and Disaster Risk Reduction (HIP Digital Twin). *Water* 2023, 15, 25. <https://doi.org/10.3390/w15010025>.
- Sundar, V.; Schüttrumpf, H.; Sannasiraj, S.A.; Sriram, V. (2024) Maritime Hydraulics. Flow Structure Interaction. *Advanced Series on Ocean Engineering*. World Scientific. Volume 58. <https://doi.org/10.1142/13867>
- United Nations. The United Nations World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace; UNESCO: Paris, France, 2024. Available online: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388948>

Autoren:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen University
Mies-van-der-Rohe-Str. 17
52056 Aachen, Germany
Tel.: +49 241 80 25262
E-Mail: schuettrumpf@iww.rwth-aachen.de

Prof. Dr. S.A. Sannasiraj
Department of Ocean Engineering
Indian Institute of Technology

Chennai-600036, India
Tel.: +91 44 22574817
E-Mail: sasraj@iitm.ac.in

Dr. Firas Aljanabi
Institut für Wasserbau und Hydromechanik
TU Dresden
August-Bebel-Straße 30
01219 Dresden, Germany
Tel.: +49 351 463-40547
E-Mail: firas.aljanabi@tu-dresden.de

Prof. Dr. Edeltraud Günther
United Nations University – Institute for Integrated Management of Material Fluxes and of Resources
Ammonstr. 74
01067 Dresden, Germany
Tel: +49-351-8921 9371
Email: Guenther@unu.edu

Dr. André Lindner
TU Dresden
Bereich Bau und Umwelt
Helmholtzstr. 10
01069 Dresden, Germany
Tel: +49-351-463-34899
Email: andre.lindner@tu-dresden.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm
Institut für Wasserbau und THM
TU Dresden
August-Bebel-Straße 30
01219 Dresden, Germany
Tel.: +49 351 463-34397
E-Mail: juergen.stamm@tu-dresden.de

Prof. Dr. Mukand Babel
Department of Water Resources and Environmental Engineering (CIE)
Asian Institute of Technology, Thailand
58 Moo 9, Km. 42, Paholyothin Highway,
Klong Luang, Pathum Thani 12120
Tel.: +66 2524 5790
E-Mail: msbabel@ait.asia

Dr. Fabian Falter
International Office, RWTH Aachen
Templergraben 57
52062 Aachen, Germany
Tel.: +49 241 80 90609
E-Mail: fabian.falter@zhv.rwth-aachen.de

Prof. Dr. Daniel Karthe
United Nations University – Institute for Integrated Management of Material Fluxes and of Resources
Ammonstr. 74
01067 Dresden, Germany
Tel: +49-351-8921 9374
Email: karthe@unu.edu

Mr. Danish D R
Global Water and Climate Adaptation Centre (ABCD Centre)
Indian Institute of Technology Madras
Chennai – 600036. Tamil Nadu, India.
Tel: +91-44-2257 5830
Email: abcd@doe.iitm.ac.in

Modellierung einer 70 m tiefen Schlitzwand an der Talsperre Arkun zur Rissvorhersage beim Ersteinstau

Ronald Haselsteiner

Stichworte: Schlitzwand, σ - ε -Modellierung, CFSGD, Talsperre, Arkun, Türkei

1 Einleitung

Die Talsperre Arkun befindet sich am Fluss Coruh im Nordosten der Türkei. Das Absperrbauwerk ist ein 140 m hoher Sand-Kies-Damm mit einer Betonoberflächendichtung. Das Dammbauwerk wurde auf Alluvionen gegründet, die mit einer bis zu 70 m tiefen Zweiphasenschlitzwand abgedichtet wurden (siehe Abbildung 1). Das Projekt dient der Wasserkraftgewinnung, Niedrigwasseraufhöhung, Bewässerung und auch dem Hochwasserschutz. Die installierte Leistung beträgt insgesamt 237 MW. Die jährliche Energieerzeugung beläuft sich auf ca. $A = 800$ GWh/a. Der Strom wird mit zwei Wasserkraftwerken erzeugt. Eines davon befindet sich mit einer installierten Leistung von ca. $P_{WKA} = 12$ MW direkt am Absperrdamm und nutzt das abzugebende Mindest-/Restwasser. Das größere Wasserkraftwerk liegt am Auslass eines ca. 13 km langen Druckausleitungsstollens und weist eine Leistung von $P_{WKA} = 225$ MW auf.

Der Sand-Kies-Damm mit Betonoberflächendichtung (englisch: concrete face sand-gravel fill dam, CFSGD) erhielt Sand-Kies-Schüttung als Stützkörper und eine Steinschüttung im Unterwasser (3G) sowie eine L-förmige Drainage-/Filterschicht (3H) zur zusätzlichen Ableitung von Sickerwasser. Die Drainageschicht wird von einem Suffusionsfilter (3H*) geschützt, da das Sand-Kies-Schüttmaterial (3E, 3F) grundsätzlich zur Suffusion neigt. Die Sieblinie der Schicht H3* wurde nach dem „feinsten Filter“ nach Kutzner (1996) ausgerichtet. Die landseitige Böschung wurde mit einem Steinwurf (englisch: riprapp, RR) abgedeckt (Abbildung 1; Pamuk, et al., 2014; Haselsteiner et al., 2014).

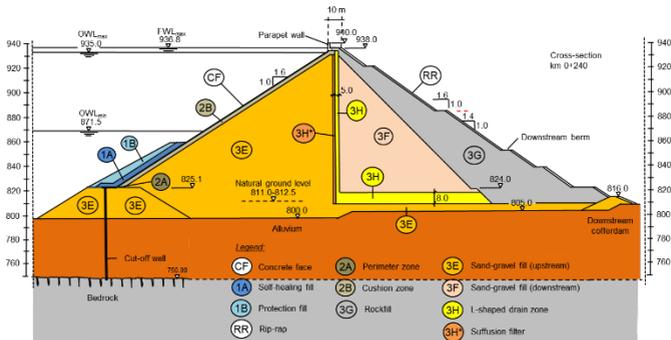


Abbildung 1: Regelquerschnitt des Absperrdammes mit einer Schlitzwand im Bereich des oberstromigen Dammfußes

Im unteren Drittel des Dammes ist eine Überschüttung der Betonoberflächendichtung angeordnet. Diese besteht aus einer „Selbstheilungsschicht“ (1A) aus erodierbarem Sandmaterial, welches bei Auftreten einer Sickerströmung in die Risse eingetragen werden und diese Risse verfüllen soll. Das Material 1A kann von den Materialien 2A und 2B zurückgehalten werden. Das Material 1B ist gröberes Material, das dazu diente, das relative feine Sandmaterial 1A u. a. vor Strömung und Erosion zu schützen.

2 Regelwerke und Randbedingungen beim Ersteinstau

Da es sich um ein internationales Projekt handelte, wurden beim Entwurf und der Bemessung der Stauanlage vor allem die einschlägigen ICOLD-Bulletins berücksichtigt (z. B. ICOLD, 2011, Bulletin 141). Da der Betreiber (EnerjiSA) zu der Zeit aus einem österreichischen (Verbund) und türkischen Unternehmen (Sabanci) wurde auch auf die österreichischen Regelwerke und deutschen Normen (DIN 19700-10 und 11) zurückgegriffen.

Ein entsprechend DIN 19700-10 und 11 vorgesehener Probestau konnte nicht durchgeführt werden, da mit Verschließen der Baustellenumleitung kein Ablassorgan mehr vorhanden war. D. h. man musste bis zum Überlaufschwelle der Hochwasserentlastung aufstauen. Da das Reservoirvolumen mit $V = 283 \text{ Mio. m}^3$ in Relation zum Mittelwasserabfluss $MQ = 57 \text{ m}^3/\text{s}$ (ermittelt aus der Zeitreihe 1969 bis 2005) gering ausfällt, musste man mit einem Wasserstandsanstieg von ca. 800 auf 920 m NN in nur 60 Tagen rechnen. Je nach saisonaler Schwankung konnte der Einstau auch in 20 bis 30

Tagen stattfinden, ohne dass die Möglichkeit bestand, das Reservoir wieder kontrolliert abzusenken, da zum Zeitpunkt des Einstaus sowohl Umleitungs- als auch der Versorgungstunnel verschlossen wurden und der Grundablass im Umleitungsstollen erst noch installiert werden musste.

Um die Reaktion des Absperrdammes auf den Ersteinstau besser beurteilen zu können, wurde im technischen Büro des Betreibers ein 2D-Strömungsmodell (siehe Haselsteiner et al., 2012) und ein 2D-Spannungs-Dehnungs-Modell (vgl. Haselsteiner et al., 2014) erstellt. Somit konnten die Prognosewerte mit Messungen während des Einstaus verglichen und bewertet werden.

3 Materialanforderungen und Laborversuche

Bei der Zusammensetzung des (Erd)Betons (englisch: plastic/earth concrete) für die Zweiphasenschlitzwand wurde versucht, das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des umgebenden Alluviums nachzubilden, um Spannungsspitzen und differenzielle Setzungen/Verformungen zu vermeiden und somit die Rissgefährdung besonders für den Lastfall „Ersteinstau“ so gering wie möglich zu halten.

Hierzu wurden in den technischen Spezifikationen folgende Zusammensetzung vorgesehen und später anscheinend auch bei der Herstellung des Betons für die Schlitzwand verwendet. Wie bereits an der Zusammensetzung zu erkennen ist, sind die verwendeten Bentonitmengen augenscheinlich zu klein, um das anvisierte Verformungsverhalten zu erhalten (Tabelle 1).

Natürlich wurden im Vorfeld und während der Ausführung Materialproben in Versuchslaboren getestet, welche jedoch zu höchst unterschiedlichen Ergebnissen führten.

Tabelle 1: Zusammensetzung des Schlitzwandmaterials/-betons

Bestandteil	Gewicht [g/cm ³]	Triantafyllidis (2025)				Arkun COW Zusammensetzung			
		Allgemein		Beispiel		TechSpez		Baustelle	
		Gewicht [kg]	Gewicht [kg]	Volumen [l]	Volumen [l]	Gewicht [kg]	Volumen [l]	Gewicht [kg]	Volumen [l]
Zement	3,10	170 - 300	220	71	220	71	248	80	
Bentonit	2,55	0 - 30	30	11,8	4,5	1,8	5,1	2,0	
Zuschlag Sand	2,60	600 - 950	900	346	950	366	1070	412	
Zuschlag Kies	2,65	300 - 500	300	113	238	90	268	101	
Tonmehl	2,60	0 - 160	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Steinmehl	2,65	0 - 200	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Wasser	1,00	350 - 500	460	460	360	360	406	406	
	Σ		1910	1002	1773	888	1997	1000	
	[g/cm ³]			1,91		2,00		2,00	

Während die Baufirma Ergebnisse vorlegte, die den technischen Spezifikationen der Bauausschreibung bzgl. Verformungsverhaltens und Druckfestigkeit ($q_u = 1,0$ bis $1,5$ MPa) entsprachen, ergaben unabhängige Laborversuche ein weitaus steiferes Verhalten und höhere Druckfestigkeiten ($q_{u,mittel,28d} > 2,9$ bis $4,0$ MPa). Der im Labor ermittelte Verformungsmodul war mit $E_{28d} > 2.000$ MPa demnach ein Vielfaches des spezifizierten Grenzwertes von $E = 400$ MPa (siehe Abbildung 2). Dies lag vornehmlich an der Tatsache, dass eine falsche Betonrezeptur Verwendung fand, die nur ein Zehntel der üblichen Bentonitmenge enthielt (siehe Tabelle 1).

Die Festigkeitsentwicklung des Dichtwandmaterials wurde an unterschiedlich lang gelagerten Proben untersucht. Auch bei der Festigkeitsentwicklung wurde nachgewiesen, dass der Zuwachs an Festigkeit und E-Modul der vorgelegten Ergebnisse unterschiedlicher Versuchslabore voneinander abwich. Es konnte aufgrund der Ergebnisse nicht ausgeschlossen werden, dass die E-Moduli Werte von $E > 5.000$ MPa erreichen konnten. Im Modell wurde $E = 1.800$ MPa berücksichtigt.

Am „Verwirrspiel“ der Laboruntersuchungen nahmen das Baustellenlabor des Bauunternehmers, ein staatlich anerkanntes, türkisches Prüflabor, eine renommierte türkische Universität und ein Prüflabor aus Österreich teil. Die türkische Universität (METU) und das österreichische Prüflabor (STRASS) kamen zu ähnlichen Ergebnissen.

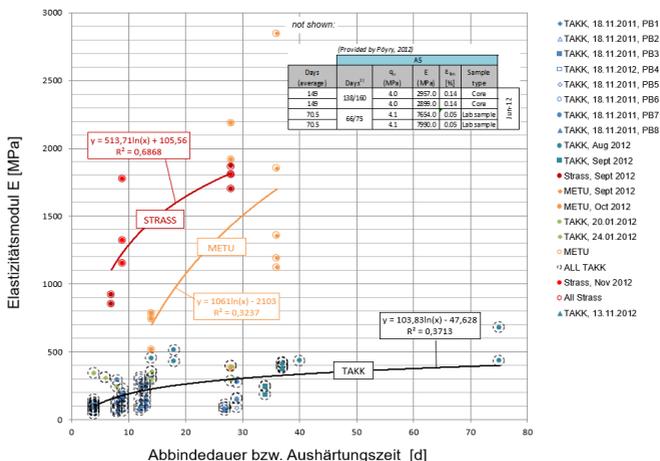


Abbildung 2: Zeitlicher Verlauf des im Labor ermittelten Elastizitätsmoduls unterschiedlicher Prüfanstalten und Versuchslabore

4 Modellierung

4.1 Modellerstellung

Da nun nicht ausgeschlossen werden konnte, dass die Dichtwand zu steif ist bzw. sein wird, wurde beschlossen, dass die Rissgefährdung der Schlitzwand beim Ersteinstau beurteilt werden soll. Hierfür wurde ein 2D-Spannungs-Dehnungs-Modell (σ - ε -Modell) mit der Software Sigma/W von Geoslope erstellt. Der Modellbereich wurde großzügig im Oberwasser und Unterwasser des Absperrdammes der Talsperre abgegrenzt (Abbildung 3).

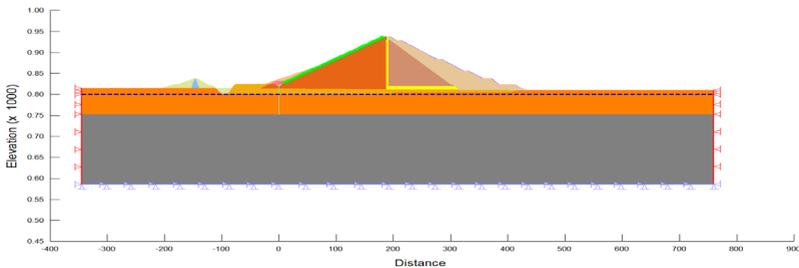


Abbildung 3: FE-Modell mit Randbedingungen und Materialbereichen

Für die Modellierung des Ersteinstaus konnte der Wasserstand an vorhandenen Geländeoberkanten direkt angesetzt werden. Im Untergrund, z. B. an der Dichtwand, musste die Wasserdrücke manuell in Form von Punktlasten angeordnet werden (vgl. Haselsteiner et al., 2014). Im Modell wurde der Ersteinstau bis zum maximalen Betriebswasserstand $OWL_{\max} = 935$ m NN angesetzt.

4.2 Materialparameter

Die verwendeten Materialparameter sind in Tabelle 2 angegeben. Zum Vergleich sind auch linear-elastische Kennwerte aus der Entwurfsplanung dargestellt. Für die Schlitzwand wurde der E-Modul von $E = 800$ bis 1.800 MPa erhöht und in die Modellschritte so integriert, so dass der Aushärtungsprozess des Dichtwandbetons und die Erstellung der Schüttlagen des Dammkörpers realen Verhältnissen nachempfunden werden konnten.

Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Schüttmaterialien wurde mit dem modifizierten Mohr-Coulomb Modell (linear-elastisch ideal-plastisch) abgebildet. Die zementgebundenen Bauteile, wie Betonbauteile und die Schlitzwand, sowie Fels wurden lediglich linear-elastisch betrachtet.

Tabelle 2: Verwendete Materialparameter

No.	Material	Linear-elastic (Entwurf)			Elastic-plastic (Mohr-Coulomb) + Linear-elastisch				
		E [MPa]	ν [-]	γ [kN/m ³]	E [MPa]	ν [-]	γ [kN/m ³]	ϕ' [°]	ψ [°]
1	1A	20	0,35	19	20	0,35	19	30	0
2	1B	80	0,33	21	80	0,33	21	35	4
3	2A	300	0,3	21	300	0,3	21	38	10
4	2B	250	0,3	21	250	0,3	21	40	10
5	3E	220	0,33	24	220	0,33	24	38	12
6	3F	220	0,33	24	220	0,33	24	38	12
7	3G	80	0,28	22	80	0,28	22	45	15
8	3H	100	0,3	19	100	0,3	19	38	4
9	3H*	100	0,3	19	100	0,3	19	38	4
10	Alluvium	150	0,33	19	150	0,33	19	35	8
11	Fels	20000	0,25	27	0,25	0,25	26	linear-elastisch	
12	Beton	20000	0,2	25	0,2	0,2	25	linear-elastisch	
13	Alluvium (Auffüllung)	200	0,33	24	200	0,33	24	38	10
14	RR	60	0,35	24	60	0,35	24	linear-elastisch	
15	Schlitzwand	800	0,27	23	800-1800	0,26	24	linear-elastisch	

4.3 Kalibrierung und Ergebnisse

Das Modell wurde schichtweise aufgebaut, um den Bauprozess und die hierbei entstehenden Spannungszustände hinreichend genau abbilden zu können. Die Kalibrierung erfolgte an Messdaten, die während des Baus erhoben wurden. Hierfür wurden 50 Modellschritte implementiert, wovon drei in Abbildung 4 dargestellt sind.

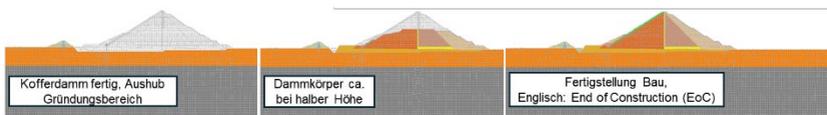


Abbildung 4: FE-Modell mit Netz zu drei verschiedenen Bauzuständen

Die Schüttung des Hauptdamms wurde in 34 Schritten modelliert, was bedeutet, dass für den 140 m hohen Damm alle drei Meter eine „Schüttlage“ ins Modell integriert wurde. Da das Modell mit dem Bau gleichzeitig fortgeschrieben wurde, konnte der tatsächliche Bauablauf nachgebildet werden. Die wasserseitige Schüttung lief aufgrund unterschiedlicher Ursachen der Schüttung der Landseite hinterher. Die Schüttlagenhöhe der grobkörnigen Materialien 3E, F und G, Sand-Kies und Felstrümmer (englisch: rockfill), überstieg bereichsweise 1,0 m (siehe Haselsteiner et al., 2012, 2014).

Der Dammkörper wurde mit zahlreichen Messinstrumenten wie z. B. Setzungspegel, Extensometer, Inklinometer, etc. zur Messungen von Verfor-

mungen ausgestattet. Die verlässlichsten Ergebnisse lieferten die Setzungspegel, da diese auch am einfachsten einzubauen und zu messen waren. Grundsätzlich konnten die Messwerte durch das Modell bis auf wenige Zentimeter abweichen nachgebildet werden (siehe Haselsteiner et al., 2014).

Die Verformung der Betonoberflächendichtung, welche i. d. R. Gegenstand des Interesses ist, da diese beim Ersteinstau keine Risse bekommen sollte, wird in Haselsteiner et al. (2014) erläutert.

Hinsichtlich der Schlitzwand zeigen die Modellergebnisse, dass die „steife“ Schlitzwand Spannungen „anzieht“ und die zulässigen Spannungen und Verformungen in einem hohen Maß überschritten wurden. Die Druckfestigkeit der hier modellierten Schlitzwand wurde mit $\sigma > 5 \text{ MPa}$ überschritten. Die labortechnisch ermittelte Bruchdehnung $\varepsilon_{CU} < 0,2$ bis $0,3 \%$ wurden auch um ein Vielfaches überschritten. Die absoluten Verschiebungen am Schlitzwandkopf beliefen sich horizontal auf 45 cm und vertikal auf 15 cm .

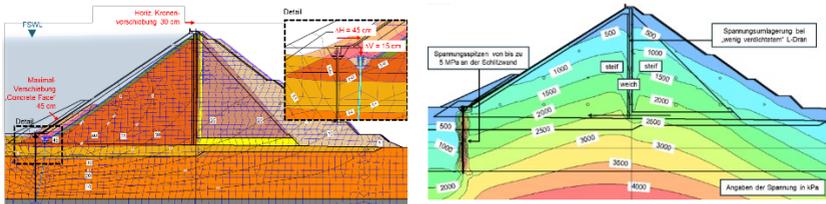


Abbildung 5: Verformung (links) und Spannungen (rechts) infolge des Ersteinstaus (Prognose, englisch: first impoundment, FI)

5 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse des 2D- σ - ε -Modells ergaben, dass die Schlitzwand spätestens beim Ersteinstau eine unverträgliche Verformung und hohen Spannungen unterliegt und somit mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit sich Risse in der Dichtwand bilden würden.

Anschließend wurden anhand eines 2D-Strömungsmodells die Auswirkungen des Auftretens der Risse in Form von die Erhöhung von Durchströmungsmengen und Veränderung der Porenwasserdruckverteilung ermittelt und bewertet. Auf Basis dieser Sachlage wurde entschieden, dass ein Neubau bzw. eine Sanierung der im Bau befindlichen bzw. fertiggestellten Schlitzwand letztendlich nicht durchgeführt werden muss.

6 Literatur

- DIN 19700-10 (2004): Stauanlagen. Teil 10: Allgemeine Festlegungen. Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin
- DIN 19700-11 (2004): Stauanlagen. Teil 11: Allgemeine Festlegungen. Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin
- Haselsteiner, R.; Ersoy, B. (2011): Seepage control of concrete faced dams with respect to the surface slab cracking. 6th International Conference on Dam Engineering, Lisbon, Portugal, February 15-17, 2011, Proceedings Pina, E.Portela, J.Gomes (ed.), pp. 611-628
- Haselsteiner, R.; Kaytan, E.; Pamuk, R.; Ceri, V. (2012): Seepage control design of the Arkun dam in Turkey. Hydropower and Dams (H&D), 1/2012, pp. 90-96
- Haselsteiner, R.; Pamuk, R.; Kaytan, E.; Ceri, V. (2014): Deformation prediction of a large CFSGD for first impoundment. Conference Proceedings, International Symposium on Dams in a global environmental challenge. ICOLD, 2014, Bali
- ICOLD (2011): Concrete Face Rockfill Dams: Concepts for design and construction. International Committee on Large Dams (ICOLD), Bulletin 141, Paris
- Kutzner (1996): Erd- und Steinschüttdämme für Stauanlagen. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart
- Pamuk, R.; Haselsteiner, R.; Kaytan, E.; Ceri, V. (2014): Design and Construction of the Dam Sealing Structures of Arkun CFSGD. Conference Proceedings, International Symposium on Dams in a global environmental challenge. ICOLD, 2014, Bali
- Trantafyllidis, T. (2025): Planung und Bauausführung in der Schlitzwand- und Dichtwandtechnik. Ernst & Sohn GmbH, Berlin

Autor:

Dr.-Ing. Ronald Haselsteiner

IBW – Ingenieurbüro für Wasserbau und Wasserwirtschaft GmbH
Casinostraße 38
56068 Koblenz

Tel.: +49 174 90 59 446

E-Mail: ronald.haselsteiner@ib-wasserbau.de

Innovatives Monitoring von Geschiebesperren! Wie wirken unsere Schutzbauwerke im Ereignisfall?

Rolf Rindler¹, Lisa Puschmann², Lukas Unger¹, Matthias Schitter¹,
Sabrina Schwarz¹, Dorian Shire-Peterlechner¹, Andrea Lammer¹,
Markus Moser²

Stichworte: Monitoring, Geschiebe, LiDAR, Fotogrammetrie

1 Einleitung

Die Effektivität von Schutzbauwerken, insbesondere von Geschiebesperren, ist von entscheidender Bedeutung für den Hochwasserschutz und die Steuerung des Sedimenttransports. Ein fundiertes Verständnis der Geschiebeprozesse von Wildbächen und deren Vorflutern ist essenziell, um die Effizienz bestehender Schutzmaßnahmen zu bewerten und gezielt zu optimieren. Hochwasserereignisse der Vergangenheit haben verdeutlicht, dass Sedimentbewegungen, insbesondere der Transport von Geschiebe und Schwebstoffen, maßgeblich die Flussdynamik beeinflussen und weitreichende Auswirkungen auf die umliegenden Gebiete haben können. Eine detaillierte Erfassung und Analyse dieser Prozesse ist daher notwendig, um bestehende Schutzbauwerke auf ihre Funktionalität hin zu überprüfen und deren Wirksamkeit im Ereignisfall zu verbessern. Ein zentrales Problem bei Hochwasserereignissen stellt die Mobilisierung und Ablagerung von Sedimenten dar. Große Mengen an Geschiebe können die Flusssohle destabilisieren, Uferbereiche unterspülen und dadurch Infrastrukturschäden verursachen. Ebenso können Schutzbauwerke durch unerwartete Sedimentmengen in ihrer Funktion beeinträchtigt werden. Ein präzises Monitoring des Geschiebetransports ist daher unerlässlich. Abgesehen von der Hochwassersicherheit spielt der Geschiebetransport eine zentrale Rolle im Feststoffmanagement. Sedimente stellen einen natürlichen Bestandteil von Flusssystemen dar und beeinflussen deren ökologische Dynamik. Ein nachhaltiges Schutz- und Managementkonzept muss daher nicht nur den Hochwasserschutz berücksichtigen, sondern auch die natürlichen Sedimentflüsse erhalten. Aufbauend auf den Er-

kenntnissen bestehender Feststoffmonitoringprojekte an Wildbächen (Urs-lau, Johnsbach, Suggadinbach und Strobler-Weißenbach) (Lammer et al., 2025; Moser et al., 2024) sowie Flüssen (Donau, Drau, Isel und Rofenache) (Habersack et al., 2017; Liedermann et al., 2018; Rindler et al., 2023) wird im Rahmen dieses Projekts ein innovatives Monitoringsystem für Geschiebesperren entwickelt. Ziel ist die detaillierte Erfassung der Wirksamkeit dieser Schutzbauwerke im Ereignisfall, um deren Funktionalität zu bewerten und gezielte Maßnahmen zur Optimierung des Hochwasserschutzes und des Feststoffmanagements abzuleiten.

2 Methodik

Das Projektgebiet dieser Arbeit befindet sich am Habach in Österreich im Bundesland Salzburg. Der Wildbach ist ein Zubringer der Salzach und weist eine Länge von 12,3 km auf und sein Einzugsgebiet umfasst eine Fläche von 46,5 km². Die Studie hat zum Ziel, den Geschiebetransport und die Retentionswirkung einer Geschiebesperre mithilfe eines umfassenden Instrumentierungsansatzes zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurde eine Vielzahl fortschrittlicher Messsysteme implementiert, darunter 14 Platten-Geophone, eine feste Geschiebefalle, ein mobiler Geschiebefänger, eine Drucksonde, ein Oberflächenradar, eine Schwebstoffsonde, drei LiDAR-Sensoren sowie sechs hochauflösende Kameras (siehe Abbildung 1).

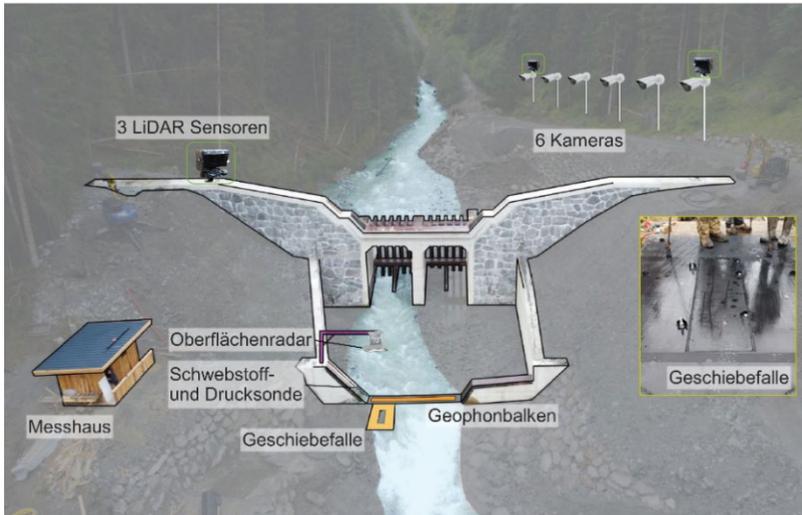


Abbildung 1: Instrumentierung der Geschieberückhaltesperre am Habach

Die Implementierung dieser Instrumentierung ermöglicht die Erfassung detaillierter Daten, die sowohl den Geschiebetransport als auch die Dynamik des Rückhalteraums charakterisieren. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Evaluierung zweier Methoden zur automatisierten Überwachung des Rückhalteraums: (1) die Vermaschung der Punktwolken, die von drei LiDAR-Sensoren erzeugt werden, und (2) die Ermittlung von Volumenänderungen mittels Fotogrammetrie und Punktwolkenvergleich, wobei alle 15 Minuten eine Volumenberechnung automatisiert durchgeführt wird. Im Rahmen der Untersuchung werden beide Ansätze hinsichtlich ihrer Eignung für die kontinuierliche Monitoring und Datenerfassung miteinander verglichen.

2.1 Instrumentierung der Geschiebesperre

Die **Geophonanlage** am Habach setzt sich aus 14 Platten-Geophonen zusammen, die an Stahlplatten montiert und in einem Stahlbalken verschraubt sind. Geschiebe, das über die Platten transportiert wird, erzeugt Vibrationen, die von den Geophonen in elektrische Signale umgewandelt und kontinuierlich aufgezeichnet werden. Die erfassten Parameter umfassen die Impulsan-

zahl, die maximale Amplitude und die Mittelwerte. Die Plattengeophone ermöglichen die Erfassung des Beginns des Geschiebetransports und der zeitlichen Variabilität, jedoch keine direkte Bestimmung von Geschiebemassen oder Korngrößen. Für diese ist eine Kalibrierung mittels direkter Messmethoden wie der Geschiebefalle erforderlich. Die Geophone erfassen Partikel mit einer Größe von mehr als 10 mm (Rickenmann et al., 2013).

Die **Geschiebefalle** am Habach, welche ein Volumen von 1,29 m³ aufweist, ist flussab des Geophonbalkens installiert und wird hydraulisch betätigt. Über einen Messschlitz wird das Geschiebe in einen Behälter geleitet, der auf Wägezellen gelagert ist, um die Massenzunahme und den Geschiebetrieb zu erfassen. Die Entnahme des Sammelbehälters erfolgt bei niedrigen Wasserständen, wobei das Geschiebe schichtweise in 10 cm Abfolgen analysiert und das Feinmaterial über eine Spüleleitung entfernt wird. Die Methode ermöglicht automatisierte, langfristige Messungen auch bei höheren Abflüssen und erfasst Geschiebetransport, Sedimenttextur sowie Transportbeginn und -variabilität. Allerdings ist die Position im Messprofil fix und die Wartung aufwändig.

Der Wasserstand wird mit einer **Drucksonde** und einem **Oberflächenradar** gemessen und der Abfluss mit einem Pegelschlüssel bestimmt. Die Schwebstoffkonzentration wird mithilfe optischer **Schwebstoffsonden** erfasst, die kontinuierlich die Trübung im Gewässer messen. Zur Kalibrierung der Sonden werden Flaschenproben händisch entnommen und im Labor gravimetrisch analysiert, wobei die Schwebstoffmasse durch Differenzwägung nach Filtration und Trocknung bestimmt wird. Die kontinuierlichen Sondaufzeichnungen werden mit den Kalibrierproben verknüpft, um den Schwebstofftransport und die Fracht über die Integration über den Durchfluss zu berechnen.

Für die **stationären Fotogrammetrie** wurden sechs hochauflösende IP-Kameras entlang der orographisch linken Seite des Sperrenraumes im Projektgebiet Habach installiert, die in regelmäßigen Zeitabständen Bilder aufnehmen. Die so entstehenden Bilddateien werden mittels des SMB-Protokolls automatisch an den Messrechner übertragen, dort mit einem Zeitstempel gespeichert und anschließend in der Software Agisoft Metashape für die photogrammetrische Auswertung weiterverarbeitet. Zur präzisen Verortung der Bildinformationen werden Passpunkte genutzt, die als Refe-

renz für die Berechnung einer Punktwolke dienen. Der Vergleich digitaler Geländemodelle (DGM) aus verschiedenen Zeitpunkten ermöglicht die Berechnung von Volumenänderungen im Sperrenraum und somit die Quantifizierung von Prozessen wie Erosion oder Sedimentation (der Workflow ist in Abbildung 2 dargestellt).

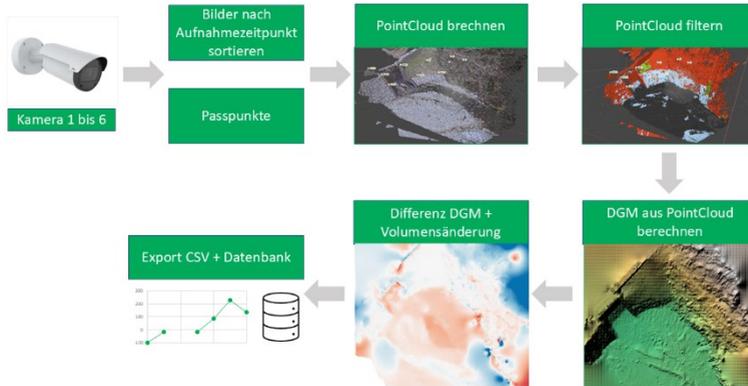


Abbildung 2: Schematischer Workflow der fotogrammetrischen Auswertung

Im Rahmen der stationären **LiDAR-Messung** im Sperrenraum erfolgte die Installation von drei Laserscannern des Typs „Cube 1 Outdoor“ der Firma Blickfeld auf Masten im Dreiecksverband, um eine optimale Überlappung der Punktwolken zu gewährleisten. Die Messung erfolgt durch kontinuierliche Erfassung der Umgebung mittels Laserimpulse. Die Software „percept“ berechnet das Volumen im Überschneidungsbereich der Punktwolken und bestimmt somit den Füllstand der Sperre in Kubikmetern. Zur differenzierten Analyse von Anlandungs- und Erosionsprozessen wurde der Sperrenraum in sieben Volumenzonen unterteilt. Für diese berechnet die Software sekundlich Volumenwerte und gibt sie in einer Textdatei mit Zeitstempel aus.

3 Ergebnisse

Die von den sechs Axis IP-Kameras aufgenommenen Bilder wurden mittels Python und dem Agisoft Metashape Python Module einer Auswertung unterzogen, um für jeden Zeitschritt ein digitales Geländemodell (DGM) zu erstellen.

len. In einem zweiten Schritt wurde für verschiedene Zeitpunkte ein Differenz-DGM (DDGM) berechnet, anhand dessen die Volumenänderungen in sieben definierten Zonen des Sperrenraums analysiert wurden. Die Ergebnisse zeigen zeitliche Fluktuationen des Sperrenvolumens, die auf Sedimenttransport, Erosion und Unsicherheiten in der Berechnung zurückzuführen sind.

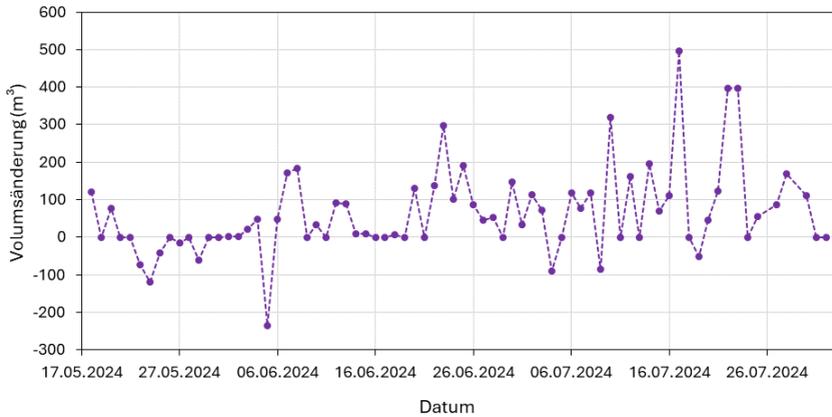


Abbildung 3: Ganglinie der Volumensänderung im Sperrenraum (17. Mai bis 01. August 2024)

In Abbildung 4 ist das höchste Ereignis seit der Inbetriebnahme des integrativen Messsystems am Habach dargestellt. Das Ereignis am 21. Juli 2024 offenbarte eine signifikante Volumenzunahme in der Sperre, die durch das LiDAR-System ermittelt wurde. Darauf folgte ein allmählicher Austrag des Geschiebes, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht wurde. Der maximale Geschiebetransport, der von den kalibrierten Platten-Geophonen detektiert wurde, betrug etwa 730 kg pro Minute um 17:45 Uhr, während der höchste Abfluss von 35 m³/s um 18:00 Uhr gemessen wurde. Das Volumen der Sperre erreichte seinen Maximalwert von 7.800 m³ um 17:40 Uhr, bevor sowohl das Volumen der Sperre als auch der Durchfluss nach ihrem jeweiligen Höhepunkt wieder abnahmen.

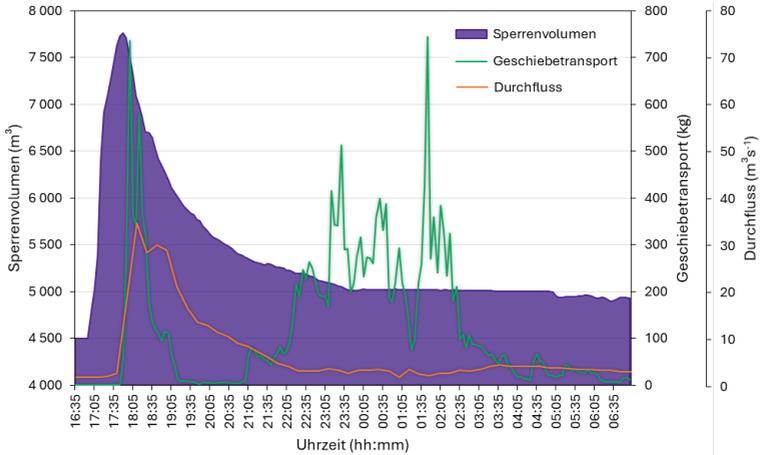


Abbildung 4: Ereignisanalyse 21.07.2024

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Jahr 2024 wurden erstmalig kontinuierliche Messungen am Habach durchgeführt. Das Hochwasserereignis am 21.07.2024 ermöglichte eine detaillierte Analyse der Geschiebesperre, insbesondere hinsichtlich ihres Rückhalts und der Selbstentleerung nach dem Ereignis. Die Daten aus den stationären LiDAR-Installationen weisen signifikante Schwankungen zu spezifischen Tageszeiten auf, die mutmaßlich durch Streulicht bedingt sind, das durch die Positionierung des Sensors in Bezug auf die Sonneneinstrahlung entsteht. Daher wurden im Rahmen der Auswertung ausschließlich die Werte der Nachtstunden berücksichtigt. Bei den fotogrammetrischen Auswertungen wurden vor allem Daten bei hochstehender Sonne herangezogen, um gute Lichtverhältnisse für die Bilder zu gewährleisten und möglichst geringe Schattenbildungen zu erhalten. Zukünftig wird ein Schwerpunkt auf die weitere Optimierung der Auswertungsverfahren sowie auf die Entwicklung von Filtern zur Erkennung und Eliminierung von Fehlmessungen gelegt werden. Beispielsweise durch Filterung von Wasser in der Punktwolke oder den Einsatz von Infrarotbildern.

Das erste Jahr des Geschiebemonitorings am Habach lieferte bereits erste Erkenntnisse bezüglich der Funktionsweise von modernen Geschiebesper-

ren. Die gewonnenen Erkenntnisse können folglich einen Beitrag zur Optimierung des Feststoffmanagements und der Hochwasserschutzmaßnahmen leisten.

Der Dank der Autoren gilt dem Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft sowie der Abteilung Wildbach- und Lawinenverbauung in Salzburg für die Bereitstellung der finanziellen Mittel und die gewährte Unterstützung im Rahmen der Durchführung dieser Studie.

Literatur

- Habersack, H., Kreisler, A., Rindler, R., Aigner, J., Seitz, H., Liedermann, M. und Laronne, J. B. (2017) Integrated automatic and continuous bedload monitoring in gravel bed rivers. *Geomorphology*, 291, 80-93.
- Lammer, A., Rindler, R., Tritthart, M., Liedermann, M., Moser, M., Shire-Peterlechner, D., Schwarz, S. und Habersack, H. (2025) Evaluating the performance of transport equations through long-term records of integrative measured bedload data. *International Journal of Sediment Research*, 40(1), 158-171.
- Liedermann, M., Gmeiner, P., Kreisler, A., Tritthart, M. und Habersack, H. (2018) Insights into bedload transport processes of a large regulated gravel-bed river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(2), 514-523.
- Moser, M., Lammer, A., Shire-Peterlechner, D., Holzapfel, P., Habersack, H., Hauer, C. und Rindler, R. (2024) Feststoffbewirtschaftung durch integratives Monitoring im alpinen Raum. *Wasserwirtschaft*, 114(9), 12-19.
- Rickenmann, D., Turowski, J. M., Fritschi, B., Wyss, C., Laronne, J., Barzilai, R., Reid, I., Kreisler, A., Aigner, J. und Seitz, H. (2013) Bedload transport measurements with impact plate geophones: comparison of sensor calibration in different gravel-bed streams. *Earth Surface Processes and Landforms*.
- Rindler, R., Schwarz, S., Liedermann, M., Shire-Peterlechner, D., Kreisler, A., Aigner, J., Tritthart, M. und Habersack, H. (2023) Effective transport width—A methodology to describe the spatial variability of bedload transport. *International Journal of Sediment Research*, 38(2), 294-301.

DI Rolf Rindler

¹Institut für Wasserbau, Hydraulik und Fließgewässerforschung

BOKU University

Am Brigittenuer Sporn 3

1200 Wien

E-Mail: rolf.rindler@boku.ac.at

DI Markus Moser

²Fachzentrum Wildbachprozesse

Wildbach- und Lawinenverbauung

Gebietsbauleitung Lungau

Johann Löcker Str. 3, 5580 Tamsweg

markus.moser@die-wildbach.at

Anschluss der zukünftigen Lausitzer Seenkette an die Schwarze Elster - Neubau des Ableiters Tagebaurestsee Sedlitz und Ausbau der Rainitza

Dipl.-Ing. Matthias Höhne
Dr. Ing. Holger Haufe

Stichworte: Lausitzer Seenland, Ableiter Sedlitzer See, Rainitza, Wehrbauwerk, Doppelschütz, Sielbauwerk, Staubaalenwehr, geosynthetische Tondichtungsbahn, Grundwasserhaltung, Kippenböden

1 Generationenprojekt – Wiederherstellung des Wasserhaushalts im Bereich der Lausitzer Seenkette

Infolge des nahezu hundertjährigen Braunkohleabbaus mit Betrieb bergbaulicher Entwässerungsanlagen wurde in der Lausitzer Region der Wasserhaushalt nachhaltig beeinflusst. Nach Stilllegung der Tagebaue in den 1990er Jahren begann die Bergbausanierung und Wiederherstellung des Wasserhaushaltes.

Im entstehenden Lausitzer Seenland wurden Tagebaurestseen (TRS) durch Überleiter verbunden, so dass ein Gesamteinzugsgebiet von ca. 200 km² entstand. Die darin enthaltenen TRS Sedlitz, Skado, Koschen und Meuro werden korrespondierende Betriebswasserstände zwischen 100,00 m NHN und 101,00 m NHN sowie ein maximales Stauziel von 101,25 m NHN haben. Mit der sich daraus ergebenden Bewirtschaftungs- (ca. 38 Mio. m³) und Hochwasserlamelle (ca. 9,5 Mio. m³) wird zukünftig ein Beitrag zum überregionalen Wassermanagement der Schwarzen Elster geleistet.

Die Tractebel Hydroprojekt GmbH (THP) begleitet seit 2014 den Anschluss der entstehenden Seenkette an die Vorflut der Schwarzen Elster nordöstlich von Senftenberg (Brandenburg). Die Planung beinhaltet neben dem neu

herzustellenden gedichteten Gerinne für Ableiter und Raintiza (Länge 2,8 km, Sohlbreite 7 m) u. a. eine durchschiffbare Wildbrücke, ein Sielbauwerk (2-feldriges Staubalkenwehr mit Hubschützen, Feldbreite 5 m) zum Schutz gegen Hochwasser der Schwarzen Elster und ein Wehrbauwerk (2-feldriges Wehr mit Doppelschützen, Feldbreite 5 m) am Auslauf des Sedlitzer Sees mit Pegelanlage zur kontinuierlichen Messung von Durchflüssen, Wasserständen und Wasserqualität. Die maximale Kapazität des Ableiters wird, begrenzt durch die Kapazität der Schwarzen Elster und das maximale Stauziel der Seenkette, ca. 8 m³/s betragen.

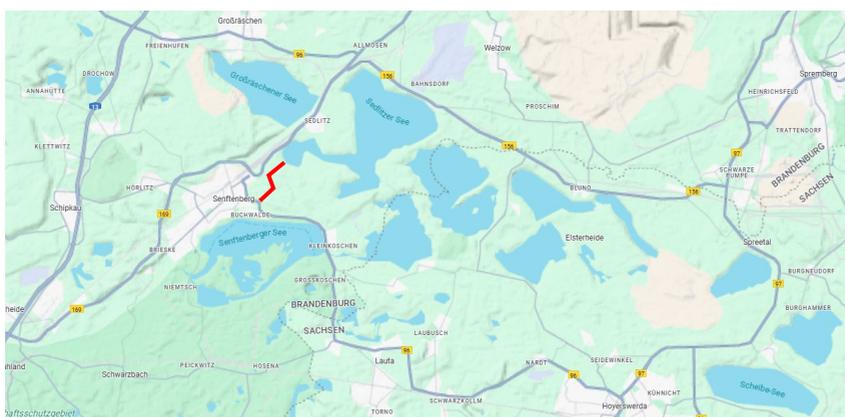


Abbildung 1: Lageplan Restlochkette und zukünftiges Lausitzer Seenland, Projektgebiet rot gekennzeichnet (Quelle: www.google.maps)

Durch die THP wurden die Objekt- und Tragwerksplanung inklusive des Stahlwasserbaus sowie die Planung der Technischen Ausrüstung und der naturschutzfachlichen Planung bearbeitet. Darüber hinaus wurden tangierende Leistungen für den Auftraggeber, die Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) erbracht.

2 Projekttrandbedingungen

Im Zuge der Sanierung des Lausitzer Reviers wurden und werden durch die LMBV eine Vielzahl von Maßnahmen durchgeführt, die in gegenseitigen Abhängigkeiten stehen. Auch das vorliegende Projekt ist in vor- und parallellaufende Maßnahmen eingebettet, so dass bei der Bearbeitung der komplexen

Aufgabenstellung auf Anpassungen im Projektverlauf eingegangen werden musste.

Als vorlaufende Maßnahmen wurden im Bereich der Baufelder u. a. umfangreiche Medienbestände und das Gewässer „Rainitza“ umverlegt, die historisch bedingt durch die unverdichtete Kippe verliefen. Das Gebiet der Stadt Senftenberg wird durch eine Horizontalfilterbrunnenanlage (HFBA) vor dem ansteigenden Grundwasserstand nach Stilllegung der umliegenden Tagebaue geschützt. Die zugehörige Sammelleitung war im Rahmen der Maßnahme zu schützen und erneut umzuverlegen. Die zu Projektbeginn noch zum Teil leeren TRS wurden parallel nach und nach geflutet, wodurch sich die Grundwasserverhältnisse im Projektverlauf änderten und Planungsanpassungen erforderlich wurden.

Eine besondere Herausforderung stellte die Bautrasse selbst dar, da sie überwiegend im Bereich ehemaliger tiefreichender Kippen liegt und die locker gelagerten Lausitzer Kippenböden bei Auftreten eines dynamischen Initials im gesättigten Zustand zur Verflüssigung neigen. Eine vorlaufende geotechnische Sicherung war daher zwingend erforderlich.

Durch die Bautrasse werden Kippen geschnitten, die aufgrund der historischen Entwicklung zu unterschiedlichen Zeitpunkten entstanden und mit unterschiedlichen Einbautechniken hergestellt worden sind. Die anstehenden Kippenböden konnten daher in wechselnden Tiefen, Lagen und Ausrichtungen bis hin zu rasch wechselnden Bodenarten auftreten. Dementsprechend kamen unterschiedliche Verdichtungsmaßnahmen (Fallgewichts-, Rüttelstopf- und Rütteldruckverdichtung) zum Einsatz, die wiederum die nachfolgende Planung der Bauwerke und vor allem des Gerinnes beeinflussten. So wurden u. a. zur Bemessung der Grundwasserhaltungen zusätzliche Pumpversuche durchgeführt, um die aufgrund der inhomogenen Lagerung schwierig abschätzbaren Grundwasserverhältnisse zu erkunden.

Die Einteilung der nachfolgend beschriebenen Bauabschnitte erfolgte letztlich in Abhängigkeit vom erwarteten Fertigstellungszeitraum der jeweils vorlaufenden Maßnahmen.

3 Bauabschnitte

3.1 Bauabschnitt 1 - Sielbauwerk

Das Sielbauwerk am Auslauf der Rainitzta in die Schwarze Elster dient ausschließlich dem Schutz der Rainitzta und der zukünftigen Lausitzer Seenkette vor dem Hochwasser der Schwarzen Elster, da der Hochwasserstand der Schwarzen Elster über dem zulässigen Wasserstand der Seen liegt.

Das Bauwerk liegt im Gewachsenen. Herausforderung war hier die Wasserhaltung direkt im und am Gewässer unter Gewährleistung des Hochwasserschutzes bis HQ100. Die Herstellung des 2-feldrigen Staubalkenwehres und die Einbindung in die bestehende Deichanlage der Schwarzen Elster erfolgte daher im Schutz eines Spundwandkastens mit innenliegender Grundwasserabsenkung.

Zusätzliche bauzeitliche Herausforderung war die Durchleitung der umverlegten Rainitzta (DN 1000). Aufgrund begrenzter Platzverhältnisse musste diese im laufenden Betrieb erneut umverlegt werden.

Die Fertigstellung der Anlage bis zur Vorortsteuerung erfolgte im Januar 2021. Seitdem wurde die Anlage bereits mehrfach zur Gewährleistung des Hochwasserschutzes der Anlieger und des angrenzenden Baufeldes in Betrieb genommen.



Abbildung 2: Sielbauwerk am Auslauf der Rainitzta in die Schwarze Elster
(Foto: TWB Boblitz)

3.2 Bauabschnitt 2 - Wehrbauwerk

Das Wehrbauwerk am Auslauf des Sedlitzer Sees in den Ableiter dient zukünftig der Steuerung des Seewasserstandes der angrenzenden vier korrespondierenden Seen bzw. der Steuerung im Niedrigwasser- und Hochwasserfall der Schwarzen Elster.

Am Wehrbauwerk wurden zur Überwachung neben der Messung des Seewasserstandes eine kontinuierliche Messung der Wasserqualität und eine redundante Wassermengenmessung vorgesehen. Die kontinuierliche Überwachung der ausgeleiteten Wasserqualität erfolgt über eine Bypassleitung am Wehr in einem direkt daneben angeordneten Wassergütemessschacht. Die redundante Messung der Wassermenge erfolgt zum einen über die Wehranlage sowie zum anderen über ein Messgerinne mit Laufzeitmessung und eigenem Pegel.

Das Wehrbauwerk liegt im Bereich der verdichteten Seeböschung des Sedlitzer Sees. Zum Zeitpunkt der Herstellung befand sich der Sedlitzer See bereits in Flutung und wurde entsprechend Flutungskonzept der LMBV auf einem niedrigen Seewasserstand gehalten. Zusätzliche Grundwasserabsenkungen waren daher nicht erforderlich.



Abbildung 3: Wehrbauwerk Sedlitzer See mit Blick in Richtung Ableiter
(Foto: TWB Boblitz)

Die Fertigstellung der Anlage bis zur Vorortsteuerung erfolgte im Dezember 2019. Mit fortschreitender Flutung staut das Wehrbauwerk den Sedlitzer See seit 2024.

3.3 Bauabschnitt 3 - gedichteter Gerinneausbau

Der Gerinneausbau zwischen den beiden vorgenannten Bauwerken erfolgt auf insgesamt ca. 2,5 km Länge, wobei mit den jeweiligen Bauwerken bereits Anschlussbereiche hergestellt worden sind.

Die Ausführung erfolgt gedichtet, um die Kosten für die HFBA der Stadt Senftenberg (sogenannte Ewigkeitskosten) zu minimieren. Nach Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Prüfung der regional verfügbaren bindigen Böden wurde die Herstellung mittels geosynthetischer Tondichtungsbahn (GTD) gewählt.



Abbildung 4: Einbau Horizontaldrainagen mit kombiniertem Fräsgerät als bauzeitliche Grundwasserabsenkung

Zur Minimierung der erforderlichen Trassenbreite bzw. der erforderlichen Arbeiten (Kosten, Zeiten und Platzbedarf für: Rodungsmaßnahmen, Verdichtungsmaßnahmen, Massenbewegungen, Dichtungsfläche und Herstellung) wurden die Böschungsneigungen des Gerinnes und der erforderlichen Bau gruben optimiert. Die Optimierung erfolgte gemeinsam mit Auftraggeber

und Hersteller. Im Ergebnis wurde eine GTD mit sandrauher Außenbeschichtung und damit höherer Scherfestigkeit in den Gleitflächen zu den angrenzenden Schichten gewählt.



Abbildung 5: Einbau GTD mit Schutzschicht und Auffüllung

Zur Minimierung der zu hebenden Wassermengen und Kosten waren ursprünglich im gesamten Abschnitt Horizontaldrainagen geplant. Diese konnten aufgrund der komplexen Untergrundverhältnisse nicht durchgängig eingesetzt werden. Es wurden daher unterschiedliche Grundwasserabsenkungsanlagen hergestellt (Station 2+600 bis 1+800 Absenkbrunnen, Station 1+800 bis 0+230 Horizontaldrainagen, Anschlussbereiche an BA1 und Rohrleitungsbau mit Absenkbrunnen). Nach Vorabtrag mit einem Sicherheitsflurabstand von 1,0 m erfolgte das Einbringen der Horizontaldrainagen in ca. 5,5 bis 6,0 m Tiefe mittels kombiniertem Fräsgerät, d. h. Aushub, Drainageeinbau, Filterkiesschüttung und Verfüllung erfolgten in einem Arbeitsgang.

Der Einbau der GTD konnte bei geringeren Grabenbreiten mit Langstielbaggern erfolgen. Bei größeren Breiten erfolgte der Einbau mittels Mobilkran.

3.4 Bauabschnitt 4 - Endausstattung Technische Ausrüstung

Aufgrund der zeitlich gestaffelten Herstellung der Bauwerke, erfolgte die Ausstattung der technischen Ausrüstung bisher nur für den Vorortbetrieb.

Die Vervollständigung der Technischen Ausrüstung (MSR) erfolgt derzeit mit Bauabschnitt 4.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit Fertigstellung Ableiters Sedlitz bzw. der Anbindung des Sedlitzer Sees an die Schwarze Elster ist ein weiterer Meilenstein zur Inbetriebnahme des Lausitzer Seenlandes und für ein koordiniertes Wassermanagement der ehemaligen Tagebaurestseen in Aussicht.

Die Bearbeitung des Projektes erfolgte in enger Abstimmung zwischen vielen Beteiligten unter der Obhut der LMBV. Für die konstruktive Zusammenarbeit des gesamten Projektteams über mehr als ein Jahrzehnt möchten wir uns hiermit nochmals bedanken.

Autoren:

Dipl.-Ing. Matthias Höhne

Dr.-Ing. Holger Haufe

Tractebel Hydroprojekt GmbH
Oltmannsstraße 3
79100 Freiburg i. Br.

Tractebel Hydroprojekt GmbH
Mendelssohnallee 8
01309 Dresden

Tel.: +49 761 60047922
E-Mail: matthias.hoehne@
tractebel.engie.com

Tel.: +49 351 211230
E-Mail: holger.haufe@
tractebel.engie.com

Daten- und risikobasierte Entwicklung innovativer Bauweisen für eine klimaadaptierte Verkehrsinfrastruktur: FuE-Vorhaben „Pave4Climate“

Ringo Rocha Reboucas
Alejandra Gabriela Orozco Nande
Josef Keller
Ulf Helbig
Anita Blasl
Jürgen Stamm
Alexander Zeißler

Stichworte: Klimaresilienz, Verkehrsinfrastruktur, Modellentwicklung

Der Klimawandel führt zunehmend zu wetterbedingten Extremverhältnissen wie Starkregen, Sturzfluten, Überschwemmungen, Dürren und Hitze. Insbesondere lokal begrenzte Starkregenereignisse und die damit verbundenen Hochwasserereignisse werden künftig häufiger und intensiver auftreten. Abhängig von der Topographie und Oberflächenbeschaffenheit kann dies zu starken Oberflächenabflüssen mit hohen hydraulischen Belastungen führen, die Überflutungen, Überströmungen, Unterspülungen und Kolkbildungen im Bereich der straßenbaulichen Verkehrsinfrastruktur verursachen.

Die Aufrechterhaltung der Funktionalität der Verkehrsinfrastruktur vor, während und nach einem Hochwasser- oder Starkregenereignis ist entscheidend für die gesamtgesellschaftliche Resilienz, insbesondere zur Sicherstellung von Versorgungs- und Evakuierungswegen. Resilienz bedeutet in diesem Kontext die Widerstandsfähigkeit der Verkehrsinfrastruktur gegenüber Extremereignissen sowie die Fähigkeit zur schnellen Anpassung und Regeneration.

Vor diesem Hintergrund zielt das FuE-Vorhaben „Pave4Climate“ darauf ab, Methoden und Maßnahmen zur klimaresilienten Gestaltung und Instandhaltung der Straßeninfrastruktur zu entwickeln. Der Fokus liegt auf risikobasierten Anpassungsmaßnahmen gegenüber klimawandelbedingten Extremwetterverhältnissen wie Hochwasser und Hitze. Durch die Identifikation von Ursache-Wirkungs-Ketten werden klimaangepasste Ertüchtigungsmaßnahmen abgeleitet und risikobasierte priorisierte Streckenabschnitte für Anpassungsmaßnahmen identifiziert.

Das Forschungsprojekt kombiniert Laborexperimente, numerische Simulationen und Methoden der Künstlichen Intelligenz, um die komplexen Mechanismen der Einwirkungen infolge Hochwasser, Starkregen und extremen Temperaturverhältnissen zu analysieren und zu bewerten.

Darüber hinaus werden innovative Optimierungsansätze für Straßenbaustoffe und Bauweisen entwickelt, um die Widerstandsfähigkeit gegenüber Starkregen, Hochwasser und extremen Temperaturen zu verbessern.

Ein zentrales Element des Vorhabens stellt der Notfallaktionsplan „Hochwasser-, Starkregen- und Temperaturereignis“ dar, der darauf abzielt, Schäden an der Straßeninfrastruktur während oder unmittelbar nach einem Extremwetterereignis systematisch zu erfassen, um wertvolle, meist nur kurzfristig verfügbare Informationen zu dokumentieren. Diese sind für die Forschung und ein besseres Prozessverständnis der Schadensmechanismen unerlässlich.

Aktuelle Versuchsreihen zeigen, dass insbesondere die hydrodynamischen Parameter ‚Fließgeschwindigkeit‘ und ‚Anströmungs-/Fließrichtung‘ eine entscheidende Rolle bei der Schadensausprägung infolge einer hydraulischen Belastung spielen.

Weitere Untersuchungen konzentrieren sich auf das Stabilitätsverhalten ungebundener Tragschichten (v. a. Frostschutz-/Schottertragschicht) sowie auf turbulente Strömungsverhältnisse infolge An- und Umströmung von Hinweis- und Leiteinrichtungen (z. B. Straßenschild, Leitplanken usw.).

Danksagung:

Die Autoren danken der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BAST) für die finanzielle Förderung des Forschungsvorhabens FE 88.0180/2023/IE01 sowie den Mitarbeitern des Hubert-Engels-Labors und Straßenbaulabors für die umfassende Unterstützung.

Autoren:

Ringo Rocha Reboucas, M. Sc.
Alejandra Gabriela O. Nande, M. Sc.
Dr.-Ing. Ulf Helbig
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm

Dipl.-Ing. Josef Keller
Dr.-Ing. Anita Blasl
Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Zeißler

Institut für Wasserbau und
Technische Hydromechanik
Technische Universität Dresden
August-Bebel-Straße 30
01219 Dresden

Institut für Stadtbauwesen und
Straßenbau
Technische Universität Dresden
Georg-Schumann-Straße 7
01187 Dresden

Tel.: +49 351 463-34397
E-Mail: ringo.reboucas@tu-dres-
den.de
gabriela.nande@tu-dres-
den.de
ulf.helbig@tu-dresden.de
juergen.stamm@tu-dres-
den.de

Tel.: +49 351 463-32817
E-Mail: josef.keller@tu-dresden.de
anita.blasl@tu-dresden.de
alexander.zeissler@tu-
dresden.de

RiverCloud – Autonome Über- und Unterwasservermessung für die HN-Modellierung von Bundeswasserstraßen mit einem USV/UAV-Tandemsystem

Siyu Chen
Ralf Becker
Kristiina Leismann
Thomas Gattung
Rebeka Kopmann
Jörg Blankenbach

Stichworte: USV/UAV-Tandemsystem, Sensorfusion, DGM-W, HN-Modellierung

1 Einführung

Technologische Fortschritte in der Nah- und Fernerkundung haben die Qualität hochauflösender Geodaten deutlich verbessert. An Wasserstraßen stoßen diese Systeme jedoch oft an ihre Grenzen, etwa durch getrübbte Wasserkörper oder Bewuchs am Gewässerrand. Dies erschwert eine genaue oder zeitlich konsistente Erfassung geometrischer Daten von Flachwasserbereichen, Uferstreifen, Buhngruppen oder Wasserbauwerken, die beispielsweise für eine verbesserte hydrodynamisch-numerische (HN)-Modellierung genutzt werden können.

2 USV/UAV-Tandemsystem

Im Rahmen des Projektes RiverCloud wurde ein Tandemsystem aus unbemanntem Wasser- (Unmanned Surface Vehicle, USV) und Luftfahrzeug (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) entwickelt, das mit Sensoren für Über- und Unterwasservermessungen ausgestattet ist, um auch flache Gewässerbereiche

zu erfassen, die für Messschiffe unzugänglich sind. Die Georeferenzierung erfolgt gewöhnlich mittels eines echtzeitkinematischen (engl. Real-time kinematic, RTK) globalen Satellitennavigationssystems (engl. Global Navigation Satellite System, GNSS), was jedoch unter Brücken oder in der Nähe dichter Ufervegetation oft keine ausreichend genauen Ergebnisse liefert. Daher kombiniert das Projekt verschiedene Sensorsysteme wie inertielle Navigationssysteme (INS), Stereokameras und visuelles UAV-Tracking durch Sensorfusion, um die Genauigkeit der Positionsbestimmung des USVs und der damit erfassten Gewässerdaten zu verbessern.

Abbildung 1 zeigt das im Projekt entwickelte USV mit installierten Sensoren. Zur Positionsbestimmung tragen das Zwei-Antennen-GNSS/INS und zwei monokulare Kameras bei. Visuelle Marker am USV dienen als Zielmarken für die Verfolgung durch eine Trackingkamera am UAV.



Abbildung 1: Übersicht der Sensorausstattung des USVs

Das eingesetzte UAV ist mit einem RTK-GNSS-Modul und einem INS-Sensor ausgestattet. Zusätzlich ist eine Trackingkamera installiert, die im Projekt zur Echtzeit-Positionsbestimmung des USVs eingesetzt wird.

Zur Datenerfassung für die Erstellung eines Digitalen Geländemodells der Gewässersohle (DGM-W) als Basis der HN-Modellierung können auf dem USV ein Multibeam Echolot, ein bathymetrischer Laserscanner und RGB-Bilder der Panoramakamera genutzt werden. Aus den Bilddaten der Panoramakamera können mittels Bildmatchingverfahren 3D-Punktwolken erzeugt werden, die zusammen mit den 3D-Punktwolken der übrigen Sensoren zu einem Über-/Unterwasser-DGM-W fusioniert werden.

3 Georeferenzierung durch Sensorfusion

Essentiell für die Nutzbarkeit der mit den Sensoren erfassten Umgebungsdaten ist deren Georeferenzierung in einem übergeordneten einheitlichen Koordinatenreferenzsystem. Die besten Ergebnisse verspricht das Verfahren der Sensorfusion, bei der alle verfügbaren Systeme mit statistischen Methoden zu einer optimalen Lösung fusioniert werden.

3.1 Sensorfusion mittels Extended Kalman Filter (EKF)

Für die Positions- und Orientierungsbestimmung (Pose-Bestimmung) des USVs lässt sich üblicherweise GNSS verwenden, das allerdings bei fehlender Himmelsfreiheit (z.B. unter Brücken oder Ufervegetation) nicht zur Verfügung steht, gestört oder lückenhaft ist. Um GNSS-Ausfälle zu kompensieren, wurde daher die Fusion mit weiteren Sensoren mittels eines EKF (*Jazwinski, 2007*), einer weit verbreiteten Methode zur Sensorfusion, implementiert.

Als weitere Sensoren wurden ein auf dem USV installiertes INS, zwei monokulare USV-Kameras und die Trackingkamera des UAVs verwendet. INS erfassen relative Bewegungsdaten, hier des USVs, mit hoher Frequenz. Die Messungen des INS sind allerdings unvermeidlich mit Sensordriften behaftet, was bei alleiniger Nutzung schnell zu großen Pose-Abweichungen führt. Aus den beiden monokularen Kameras am USV kann mittels Stereo V-SLAM (Visual Simultaneous Location and Mapping) eine zusätzliche Trajektorie des USVs geschätzt werden. Die V-SLAM-Technologie in der Oriented Brief (ORB)-SLAM3-Implementierung (*Campos et al. 2021*) sowie die Verfolgung der visuellen Marker am USV durch das UAV liefern zwei zusätzliche Trajektorien des USVs. Abbildung 2 zeigt schematisch den Aufbau des Multisensorsystems.

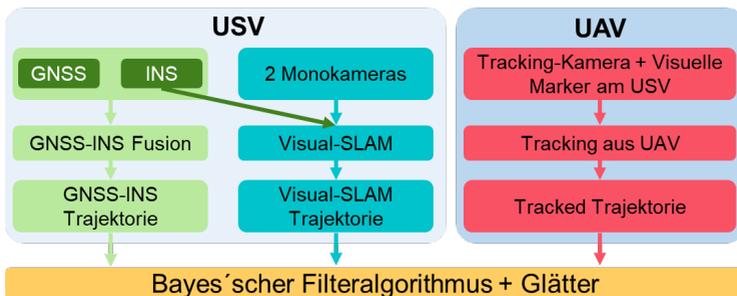


Abbildung 2: Schematischer Aufbau des Sensorfusionssystems

3.2 Evaluierung

Um die Leistung des entwickelten EKF zu testen, fand eine Messkampagne am Blausteinsee bei Aachen in verschiedenen Szenarien statt. Die Szenarien bilden verschiedene Verfügbarkeiten und Qualitäten der Positionierungsquellen GNSS/INS, V-SLAM und UAV-Tracking ab.

Bei freier Sicht zum Himmel erreicht die GNSS/INS-RTK-Lösung eine Genauigkeit von 0,02 bis 0,04 m. Die auf ORB-SLAM3 basierende V-SLAM-Technologie erzielt bei wenigen, weit entfernten Merkmalen, wie auf offenen Gewässern, nur eine Genauigkeit im Meterbereich. Das UAV-Tracking erreicht 0,1 bis 0,6 m Genauigkeit. Bei freier Himmelsicht bieten weder V-SLAM noch UAV-Tracking eine signifikante Verbesserung gegenüber GNSS.

Ohne freie Sicht zum Himmel kann das USV keine GNSS-Signale empfangen, was oft unter Brücken oder in dichter Vegetation der Fall ist. UAV-Einsätze sind unter solchen Bedingungen ebenfalls meistens nicht möglich. V-SLAM eignet sich hier sehr gut, da es durch nahe Objektmerkmale eine hohe Genauigkeit im Dezimeterbereich erzielt. Abbildung 3 illustriert, wie durch Nutzung von V-SLAM bei einem GNSS-Ausfall dennoch eine USV-Positionsbestimmung mit durchschnittlich 0,31 m Genauigkeit möglich ist und eine anschließende Glättung diese sogar auf 0,15 m verbessert.

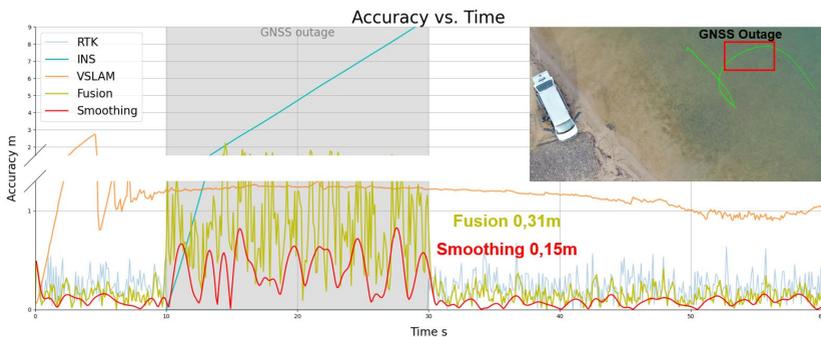


Abbildung 3: Genauigkeit der Sensorfusion und Glättung beim GNSS-Ausfall

Bei dichtem Pflanzenwuchs sind GNSS-Signale vielfach beeinträchtigt. Die Positionsgenauigkeit schwankt zwischen 1 und 10 m. Sowohl V-SLAM als auch UAV-Tracking sind in diesem Fall nutzbar. Unter diesen Bedingungen zeigt sich V-SLAM als robuster und erreicht eine Genauigkeit im Dezimeterbereich. Die Genauigkeit des UAV-Trackings schwankt je nach Umgebung

zwischen 0,1 und 0,4 m. Abbildung 4 verdeutlicht die verbesserte Genauigkeit durch Integration des UAV-Trackings. Die Genauigkeit der Trajektorie liegt dann bei 1,45 m und bei zusätzlicher Glättung bei 0,35 m.

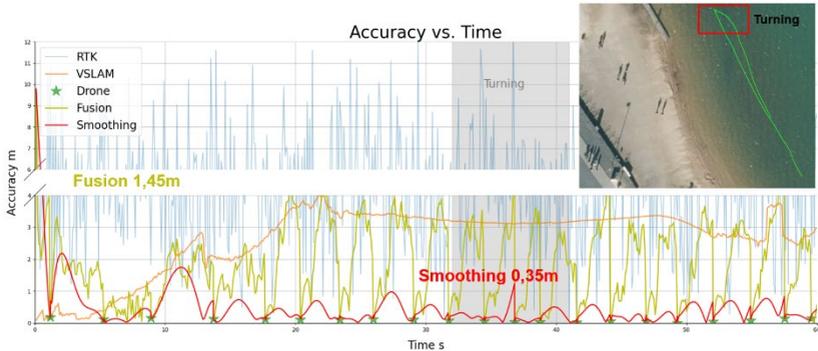


Abbildung 4: Genauigkeit der Sensorfusion und Glättung bei schlechter GNSS-Lösung

4 Anwendung zur verbesserten HN-Modellierung

Für die Erstellung eines HN-Modells werden Informationen zur Geometrie aller überströmten Bereiche benötigt. In der Regel liegen entlang der Bundeswasserstraßen die meisten Daten innerhalb der Fahrrinne bzw. des Fahrwassers vor, da diese regelmäßig von der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) durch Peilungen erfasst werden. Die Vorlandbereiche werden meist mittels Laserscanbefliegungen erfasst. Die größten Defizite bestehen im Bereich der Wasserwechselzone und den Flachwasserbereichen. Ein weiteres Defizit besteht bei der Erfassung der Ufer- und Vorlandvegetation. Im Fall der Durch- und Überströmung stellt die Vegetation einen Strömungswiderstand dar und kann einen erheblichen Einfluss auf die Strömung haben.

Am Beispiel des Untersuchungsgebietes Rheininsel Niederwerth zeigt sich der Mehrwert der RiverCloud-Daten für die HN-Modellierung. Dabei werden sowohl die Geometriedaten als auch Informationen zur Vegetation in das HN-Modell integriert. Grundlage bilden ein Digitales Geländemodell der Gewässersohle (DGM-W) und ein Canopy Height Model (CHM) für die Vegetation, die beide aus den mit verschiedenen Sensoren (Kameras, Echlot) über

und unter Wasser erfassten Punktwolken abgeleitet wurden (Becker et al. 2023). Im HN-Modell werden insgesamt zwei Aspekte betrachtet, zum einen die geometrische Aktualisierung, zum anderen eine Aktualisierung der Rauheitswirkung der in der Punktwolke vorhandenen Vegetationsinformation.

Das vorhandene 2D-HN-Modell deckt den Bereich von Rhein-km 580,0 bis Rhein-km 616,6 ab. Das Modell basiert auf einem DGM-W aus dem Jahr 2010, Querprofilpeilungen aus dem Jahr 2013 und Fächerecholotpeilungen aus dem Jahr 2015. Im Bereich des Untersuchungsgebietes wurden die Geometriedaten im 2D-HN-Modell mit den RiverCloud-Daten (DGM-W) aktualisiert. Für die Bereiche, die von Vegetation bedeckt sind, wurden anhand der RiverCloud-Daten zusätzliche Rauheitszonen definiert. Außerdem wurden die für das 2D-HN-Modell benötigten Vegetationsparameter, wie Höhe und Dichte, abgeleitet (Abbildung 5).



Abbildung 5: Rauheitsklassen des 2D-HN-Modells ohne RiverCloud-Daten (links) und mit RiverCloud-Daten (rechts)

Um den Einfluss der hochaufgelösten RiverCloud-Daten auf die Ergebnisse des 2D-HN-Modells zu bewerten, werden die resultierenden Fließgeschwindigkeiten beider Modelle miteinander verglichen. Die Differenzen der Geschwindigkeiten zwischen den HN-Modellen mit und ohne RiverCloud-Daten wurden für niedrigen und mittleren Abfluss sowie für zwei Hochwasserereignisse gerechnet. Abbildung 6 zeigt Ergebnisse für die Hochwassermarken (HWM) 1 und 2. Es zeigt sich, dass die absoluten Änderungen der Fließgeschwindigkeit mit zunehmendem Abfluss größer werden. Die größten Abweichungen sind im Bereich der Vegetation zu beobachten, wobei dieser erst

bei den Hochwasserereignissen merklich überströmt wird. Auch in der Fahrinne (westlich der Rheininsel Niederwerth), sind bei HWM 1 und 2 Auswirkungen auf die Fließgeschwindigkeiten zu beobachten.

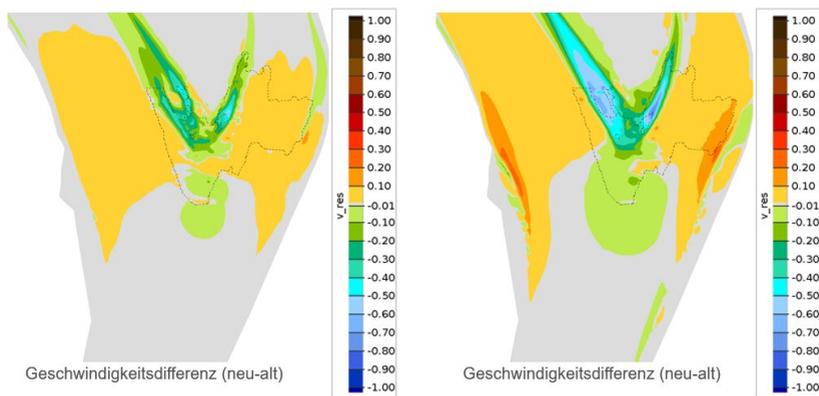


Abbildung 6: Differenz der Geschwindigkeiten bei HWM 1 (links) und HWM 2 (rechts) zwischen 2D-HN-Modell mit und ohne RiverCloud-Daten; Bereich der River-Cloud-Daten (gestrichelte Linie)

5 Ergebnisse und Fazit

Die entwickelten Methoden zur Georeferenzierung des USVs durch Sensorfusion von GNSS, inertialer Sensoren, USV-Kameras und UAV-Tracking wurden in Messkampagnen evaluiert. Das Verfahren konnte insbesondere bei gestörten GNSS-Signalen und GNSS-Ausfällen signifikante Verbesserungen in der Positionsgenauigkeit bewirken. Die RiverCloud-Daten ermöglichen somit eine relevante Verbesserung der Datengrundlage insbesondere im Bereich der Flachwasser- und Vegetationszonen an Fließgewässern, die einen signifikanten Einfluss auf die simulierten Fließgeschwindigkeiten in 2D-HN-Modellen haben können.

6 Danksagung

Unser Dank gilt dem Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) für die Förderung des Projektes RiverCloud aus dem Modernitätsfonds (mFUND) (Förderkennzeichen 19F2121A-G).

7 Literatur

- Becker, R., Eberhardt, B., Effkemann, C., Gattung, T., Hansen, I., Makiello, L., Neumann, E., Ramirez, J., Schwermann, R., Teege, J., Blankenbach, J. (2023): RiverCloud – A Multi-sensor UAV/USV Tandem System for High Resolution Data Acquisition of Water Bodies. In: FIG Working Week 2023 Proceedings, Orlando, Florida, USA, 28 May – 1 June 2023
- Campos, C., Elvira, R., Rodríguez, J. J. G., Montiel, J. M., & Tardós, J. D. (2021). Orb-slam3: An accurate open-source library for visual, visual-inertial, and multimap slam. *IEEE Transactions on Robotics*, 37(6), 1874-1890
- Jazwinski, A. H. (2007). *Stochastic processes and filtering theory*. Courier Corporation
- Särkkä, S., & Svensson, L. (2023). *Bayesian Filtering and Smoothing (Vol. 17)*. Cambridge University Press

Autoren:

Siyu Chen, M.Sc.

Dr.-Ing. Ralf Becker

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Blankenbach

Dipl.-Ing. Kristiina Leismann,

Dr.-Ing. Rebekka Kopmann

Geodätisches Institut und
Lehrstuhl für Bauinformatik &

Geoinformationssysteme

RWTH Aachen University

Mies-van-der-Rohe-Straße 1

52074 Aachen

Bundesanstalt für Wasserbau
Wasserbau im Binnenbereich
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

Tel.: +49 721 9726 4810

Fax: +49 721 9726 4540

E-Mail:

kristiina.leismann@baw.de

rebekka.kopmann@baw.de

Tel.: +49 241 8095 300

Fax: +49 351 8092 142

E-Mail:

siyu.chen@gia.rwth-aachen.de

ralf.becker@gia.rwth-aachen.de

blankenbach@gia.rwth-aachen.de

Thomas Gattung, M.Sc.

WSA Bingen

Vorstadt 74-76

55411 Bingen

Tel.: +49 6721 306 336

E-Mail:

thomas.gattung@wsv.bund.de

Einsatz von AR-Brillen und smart devices in der Wasserwirtschaft: Optimierung von Fahrtzeiten und Remote-Assistenz zur Fehlerbehebung

Ronny Herrmann

Stichworte: Prozessoptimierung, Arbeitsschutzberatung, Digitalisierung, IT-Sicherheit

B1-02

1 Herausforderungen in der Wasserwirtschaft

Die Herausforderungen der Wasserwirtschaft sind vielfältig, darunter der Klimawandel, demografische Veränderungen und eine alternde Infrastruktur [1]. Diese Faktoren führen zu erhöhtem Wartungsaufwand und steigenden Betriebskosten. Zudem erschwert der Flächenbetrieb für die Anlagen, Netze und Baustellen sowie der Fachkräftemangel die effiziente Fehlerbehebung und Wartung vor Ort [2].

2 Verfahrensbeschreibung

2.1 IST-Situation

Störungen auf Baustellen oder im Anlagen- wie Netzbetrieb werden in gewohnter Weise geklärt durch:

- Telefonischen Support durch die Vorgesetzten mit folgenden Nachteilen [3],
 - meist müssen mehrere Telefonate geführt werden, je nach Arbeitsfortschritt
 - die Führungskräfte erleben u. a. durch den Telefonsupport ständige Arbeitsunterbrechungen

- Führungskräfte müssen sich auf die Aussagen vor Ort verlassen und können sich dadurch selten ein genaues Bild von der Lage vor Ort machen
- Fahrten vor Ort mit den damit einhergehenden
 - „toten“ Arbeitszeiten während der Fahrt
 - unbearbeiteten Aufgaben im Büro

2.2 Möglichkeiten der Verbesserung

Der Einsatz von AR-Brillen bietet nur eine von unzähligen Optimierungsschritten neben:

- der zustandsbasierten Investitionsentscheidung – setzt an der Basis des Anlagen- und Netzmanagements an
- einem vollständigen und datenbasierten Instandhaltungsmanagement – setzt im Tagesgeschäft an
- einem Hinterfragen von Routinen – „Ich habe viel zu tun also bin ich unabdingbar“
- einer Strategie in den Unternehmen zur Prozesseffizienz – In der Umsetzung sind das in erster Linie meist keine Digitalisierungsprojekte

Der Einsatz von AR-Brillen soll in einer vereinfachten Gegenüberstellung für den Fall der qualifizierten Störungsbeseitigung aufgezeigt werden.

Tabelle 1: Businesscase Problembehebung

Kriterium	Klassisches Verfahren	Einsatz von AR-Brillen
Reisekosten pro Einsatz (ca. 2h zu 50 €) in €	100	0
Durchschnittliche Dauer (in h)	2	2
Interner Aufwand (Ingenieur ca. 2h zu 50 €/h Monteur ca. 2h zu 35 €/h, gesamt in €)	170	43
Schulungskosten in €	0	1.000
Investitionskosten in € (2 Brillen für 1.500 €)	0	3.000
Anzahl der Einsätze pro Jahr	40	40
Gesamtkosten pro Jahr in €	10.800	5.700

Das stark vereinfachte Beispiel dient dazu, den innerbetrieblichen Effekt (zeitlich und kostenseitig) zu verdeutlichen.

Speziell für den „Blick vor Ort“ um Problem zu beheben, Kontrollen durchzuführen o. ä. sind auch andere etablierte Systeme möglich wie:

- der Einsatz von Smartphones (mit Apps wie MS Teams, Jitsi usw.)
- die Kombination aus Backoffice mit Desktoparbeitsplatz und dem Smartphone vor Ort

Die zwei entscheidenden Vorteile des AR-Brilleneinsatzes gegenüber dem Smartphone oder anderen smart devices sind:

- Die Mitarbeitenden vor Ort haben beide Hände frei, um Anlagen zu bedienen und sich ordentlich zu sichern – Die Mitarbeitenden arbeiten also „hands free“.
- Eine nahezu ablenkungsfreie Durchführung der vorgesehenen Arbeiten und Kommunikation.

Wenn weitere Kriterien an den AR-Brilleneinsatz gebunden sind wie:

- transparente, nicht getönte Brillengläser
- ein freies und nicht eingeschränktes Blickfeld z. B. durch die Visualisierung relevanter Informationen direkt im Brillenglas und nicht durch bewegliche Monitore an der AR-Brille

lässt sich Arbeit der Mitarbeitenden vor Ort weiter sicher durchführen.

2.3 Anwendung der Technologie

Der Einsatz gestaltet sich ähnlich der Bedienung des Smartphones in folgenden Stufen:

1. **Einschalten und Verbinden:**

- Mit einem WLAN oder Hotspot des Smartphones mit dem Mobilfunknetz verbinden.
- Starten des Konferenztools (MS Teams, WebEx o. ä.)

2. **Live-Übertragung – remote assist:**

- Kamera der AR-Brille aktiviert die Live-Übertragung.
- Echtzeit-Video wird an einen oder mehrere Unterstützer an mehreren möglichen Standorten gesendet.

3. **Interaktive Unterstützung:**

- Zwei-Wege-Kommunikation ermöglicht direkte Fragen und Antworten.
- Der entfernte Experte kann Anmerkungen und Markierungen in das Sichtfeld des Technikers einfügen.

4. **Anzeigen von Anleitungen – möglich aber eher selten eingesetzt und erst wenige Anwendungen:**

- Schritt-für-Schritt-Anleitungen erscheinen direkt vor den Augen.
- Holografische Anweisungen und Markierungen werden im Sichtfeld eingeblendet.

5. **Dokumentation und Speicherung:**

- Alle durchgeführten Schritte und Anweisungen können aufgezeichnet werden.
- Daten können zur späteren Analyse und Dokumentation gespeichert werden.

3 Einsatzplanung von AR-Technologien

Der effiziente Einsatz von AR-Brillen hängt von mehreren Faktoren ab:

- **Technische Ausstattung und Kompatibilität:** Aktuell verfügbare AR-Brillen sind mit bestehenden IT-Systemen kompatibel. Vielmehr hängt die Funktion von der Netzabdeckung vor Ort ab. Aber auch das lässt sich unkompliziert wie auch mobil beheben. Insbesondere für Anlagen mit unterirdischer Betonbauweise.
- **Schulung und Training:** Mitarbeiter müssen geschult werden, um die AR-Brillen effektiv nutzen zu können. Dies umfasst hauptsächlich die technische Bedienung.
- **Anwendungsfälle und Nutzen:** Es ist wichtig für Ihren Bereich/ Ihr Unternehmen, klare Anwendungsfälle zu definieren, bei denen AR-Brillen einen echten Mehrwert bieten. Dies ist meist die Wartung mit Fernunterstützung aber auch Schulungen und Datenvisualisierung.

- **Benutzerfreundlichkeit und Ergonomie:** Die Brillen sollten leicht und komfortabel zu tragen sein, um Ermüdung und Unbehagen zu vermeiden. Wobei zu beachten ist, dass die Verwendungszeiten in der Regel 30 Minuten bis 1 Stunde nicht überschreiten. Nach kurzer Eingewöhnung sind die Benutzeroberflächen akzeptiert da handy-ähnlich.
- **Datenschutz und IT-Sicherheit:** Der Schutz sensibler Daten und die Einhaltung von Datenschutzrichtlinien sind essenziell. Dies umfasst auch die Sicherstellung, dass die Brillen gegen Manipulation und unbefugten Zugriff geschützt sind.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

AR-Brillen aber auch andere smart devices bieten zahlreiche Vorteile für die Wasserwirtschaft und können die Effizienz und die Sicherheit betrieblicher Routinen im Anlagen- und Netzbetrieb wesentlich verbessern. Ein Vergleich mit anderen Smart Devices zeigt die Stärken der AR-Brillen. Modelle wie die Vuzix Blade 2 und Vuzix M4000 sind in der Praxis nicht nur bei der ALPHAVIS (<https://www.alphavis.org/ar-brillen>) mehrfach erprobt.

Danksagung:

Das Projekt "GBU-SmarD – Gesunde Arbeit mit Smart Devices" der Arbeitsgruppe Wissen-Denken-Handeln der TU Dresden untersucht die Auswirkungen von Smart Devices auf die Arbeitssicherheit und Gesundheit der Beschäftigten. In diesem Rahmen steht die ALPHAVIS im kontinuierlichen Austausch mit der Arbeitsgruppe und beteiligt sich an dem Piloteinsatz. Beide Institutionen verfolgen ein gemeinsames Ziel: Die Unterstützung der Betriebe für eine nachhaltige Einführung und einen sicheren Betrieb von Geräten. Dafür werden u. a. Empfehlungen zur Auswahl und Implementierung der Geräte sowie Gefährdungsbeurteilung inkl. Maßnahmen für eine gesunde und altersgerechte Arbeit mit diesen Geräten entwickelt.

5 Literatur

- [1] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DVGW). "Roadmap 2030 – Handlungsagenda für die Zukunft der Wasserwirtschaft."
- [2] Umweltbundesamt. "Nationale Wasserstrategie."
- [3] De Gruyter. "Physische Belastungen und Beanspruchungen von Augmented-Reality-Brillen."

Autor:

Ronny Herrmann

ALPHAVIS Ronny Herrmann
Radeberger Str. 14
01099 Dresden

Tel.: +49 173 6585389

E-Mail: ronny.herrmann@alphavis.org

BIM-Implementierung im Wasserbau Ein Einblick in die Praxis und ein Ausblick auf die Chancen

Marvin Braun
Katjana Lorenz
Torsten Strampe
Prof. Dr. Gabriele Gönnert

1 Einleitung

Die Methodik des Building Information Modeling (BIM) etabliert sich zunehmend als unverzichtbarer Standard für den gesamten Lebenszyklus von Infrastrukturbauwerken – von der Planung über den Bau und Betrieb bis hin zur Erhaltung und zum Rückbau. Der Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer (LSBG) der Freien und Hansestadt Hamburg ist als Realisierungsträger in genau diesen Geschäftsfeldern tätig.

Die BIM-Methodik bietet durch ihre digitale Vernetzung und den strukturier-ten Informationsaustausch über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks hinweg signifikante Mehrwerte. Im Rahmen der Planung können sich die Kommunikation und Zusammenarbeit der Projektbeteiligten durch die Nutzung des BIM Collaboration Format (BCF) und einer gemeinsamen Datenumgebung (Common Data Environment, CDE) verbessern. Die dreidimensionale Modellierung erhöht die Qualität der Planung, da potenzielle Konflikte bereits frühzeitig identifiziert und gelöst werden können. Darüber hinaus minimieren Kollisionsprüfungen Planungsfehler, die bei herkömmlichen Methoden häufig erst während der Bauausführung erkannt würden. Durch die BIM-Methodik entwickeln sich zudem effiziente Schnittstellen zu AVA-Software (Ausschreibung, Vergabe, Abrechnung) oder zur Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten.

Auch im Wasserbau gewinnt die BIM-Methodik zunehmend an Bedeutung, steht jedoch aktuell hinter den Fortschritten des Einsatzes in anderen Bereichen zurück. Dieser Beitrag beleuchtet, wie BIM im Geschäftsbereich Gewässer und Hochwasserschutz des LSBG schrittweise und praxisorientiert angewandt wird und welche Schnittstellen die Methodik zukünftig beleben kann.

2 BIM wird im LSBG strategisch und kooperativ eingeführt

Seit dem Jahr 2020 existiert im LSBG eine zentrale Leitstelle, um einen übergeordneten BIM-Wissensaufbau und -transfer in den verschiedenen Geschäftsbereichen zu koordinieren. Im Rahmen eines eigenen 18-monatigen Qualifizierungsprogramms werden BIM-Fachexpert*innen ausgebildet, die als Multiplikator*innen in ihren jeweiligen Fachbereichen fungieren. Darüber hinaus fördern regelmäßige Termine den Erfahrungsaustausch zwischen den BIM-Projektbearbeitenden. Neben der Unterstützung operativer Projekte liegt ein weiterer Schwerpunkt der Leitstelle auf der Entwicklung und Standardisierung der BIM-Methodik. Strategisch werden Themen wie die Parametrisierung wiederkehrender Bauwerke oder die modellbasierte Zustandserfassung bewegt.

Als Teil des Expert*innennetzwerks BIM.Hamburg bringt der LSBG zudem die übergreifende Implementierung von BIM im öffentlichen Sektor voran. Unter Mitwirkung von Kolleg*innen des Geschäftsbereichs Gewässer und Hochwasserschutz erarbeitet BIM.Hamburg in einer Vorreiterrolle bundesweit anwendbare und geltende Standards, um die BIM-Methodik in der Praxis langfristig zu verankern und den praktischen Nutzen stetig zu steigern. Zu den Ergebnissen zählen unter anderem Anwendungsfallbeschreibungen, Objektkataloge, Vorlagen für Auftraggeber-Informationsanforderungen (AIA) und BIM-Abwicklungsplan (BAP), Checklisten für ein verbessertes Qualitätsmanagement sowie ein Praxisdokument zur Verknüpfung von BIM und Nachhaltigkeit (siehe www.bim.hamburg.de).

3 Der Geschäftsbereich Gewässer und Hochwasserschutz wendet die BIM-Methode aktiv in der Planung an

3.1 Vergabe von BIM-Leistungen

Wie bei vielen öffentlichen Realisierungsträgern wird die überwiegende Anzahl der Planungsleistungen im LSBG extern vergeben. In den BIM-Projekten übernimmt der LSBG dabei nicht nur die Rolle des Auftraggebers, sondern auch die Aufgaben des BIM-Managements. Im Zuge der Realisierung kommen die von BIM.Hamburg entwickelten standardisierten Dokumente zum Einsatz. Vor der Vergabe werden die AIA definiert, die während der Projektumsetzung konsequent eingefordert werden, um eine effiziente Projektbearbeitung mit BIM sicherzustellen. Die Aufgaben des BIM-Managements umfassen darüber hinaus die Qualitätssicherung und Freigabe der Modelle. Bedarfswise werden zusätzlich auch einzelne Aufgaben der BIM-Gesamtkoordination, wie die Verantwortung des BAP oder die Koordination der Fachmodelle, durch den LSBG eigenständig erbracht.

3.2 Durchführung in Eigenleistung

Der Geschäftsbereich Gewässer und Hochwasserschutz beschreitet neben der Vergabe einen weiteren Weg und führt die vollständige (BIM-) Planung sukzessive in Eigenleistung durch. Dies markiert einen grundsätzlichen Wandel in der Herangehensweise der öffentlichen Verwaltung – von der reinen Projektsteuerung hin zur eigenständigen Projektbearbeitung. Neben aufwändigen Vergabeverfahren können auch unvorhergesehene Nachträge, die aus unbekanntem Randbedingungen bei der Erstellung der Ausschreibung resultieren, vermieden werden. Gleichzeitig steigt die Unabhängigkeit von externen Ressourcen. Dieser Ansatz führt einerseits zu Zeit- und Kosteneinsparungen und andererseits auch zur Stärkung interner (BIM-) Kompetenzen, zur Förderung von Kreativität und Problemlösefähigkeit der Mitarbeitenden sowie zur Steigerung der Attraktivität des Aufgabenbereichs.

Der LSBG ist mit der Erneuerung der historischen Uferbefestigungen entlang eines innerstädtischen, kanalisierten und denkmalgeschützten Abschnitts der Alster beauftragt. Mehrere Projekte befinden sich derzeit in der Planung; in den kommenden Jahren werden voraussichtlich weitere Vorhaben dazu kommen. Der LSBG setzt die Projekte unter Anwendung der BIM-Methodik um. Neben den allgemeinen Vorteilen der Anwendung von BIM liegt die Begründung dafür insbesondere in der besseren Verständlichkeit der Planung.

Der betrachtete innerstädtische Gewässerabschnitt steht im Spannungsfeld zwischen Gewässerschutz und Denkmalschutz, was eine integrierte und ausgewogene Verbindung der verschiedenen Anforderungen erforderlich macht. Mithilfe der BIM-Methodik können die Auswirkungen der Planung auf das betroffene Umfeld leichter identifiziert und visualisiert sowie die Varianten auf einer umfangreicheren Grundlage bewertet werden. Durch die Entwicklung parametrischer Systemvarianten lassen sich zudem Lösungen für zukünftige Projekte des LSBG an weiteren Uferabschnitten der Alster adaptieren und effizient wiederverwenden. Die Wiederholbarkeit der Projekte liefert daher ein weiteres Argument für die Umsetzung der BIM-Methodik. Im Folgenden werden Beispiele einer praxisorientierten Anwendung der BIM-Methodik in Eigenleistung für die Phase der Grundlagenermittlung erläutert.

Zu Beginn steht die Frage der erforderlichen Informationsbedarfstiefe (Level Of Information Need, LOIN) im Mittelpunkt. Für verschiedene Anwendungsbereiche liegt seitens BIM.Hamburg bereits ein entsprechendes LOIN-Konzept vor. Für den Wasserbau fehlt dieses zurzeit; eine Übertragbarkeit aus anderen Bereichen ist nicht vollumfänglich möglich. Am Beispiel der modellhaften Darstellung von Kampfmittelauskünften konzentriert sich die Diskussion intensiv darauf, welche geometrische (Level of Geometry, LoG) und semantische (Level of Information, LoI) Genauigkeit ein Kampfmittelmodell für die Nutzung in Anwendungsfällen späterer Leistungsphasen aufweisen soll. In unserem Ergebnis resultiert die modellhafte Darstellung der Flächen mit und ohne Kampfmittelverdacht in Form von Quadern, deren Oberfläche mit der Geländeoberkante (GOK) verschnitten ist. Dadurch werden Kollisionen von Bauteilen oberhalb des Geländes mit dem Kampfmittelmodell vermieden. Unterhalb der GOK wird auf die Abbildung eines Bombenhorizonts verzichtet, um keine Scheingenauigkeit der Informationslage zu erzeugen. Die Unterkante aller Quader liegt daher bei - 15 m. Die vom Kampfmitteldienst übergebenen semantischen Informationen der Flächen sind in den Attributen der Objekte festgeschrieben (siehe Abbildung 1). Zusätzlich ist die Kampfmittelauskunft als PDF-Dokument (Documentation, DOC) auf der CDE abgelegt und am Nullpunktobjekt des Modells verlinkt.

Die gewonnenen Erkenntnisse sind mittlerweile als Feedback in die Entwicklung des Objektkatalogs Umgebung eingeflossen, der im Weiteren von BIM.Hamburg veröffentlicht wird (siehe www.bim.hamburg.de).

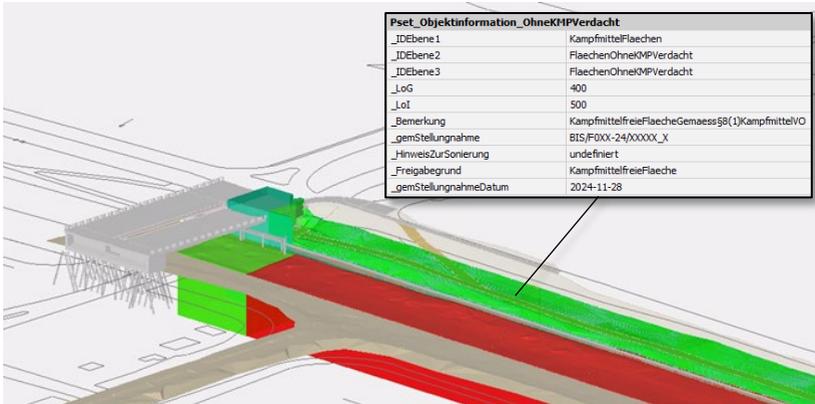


Abbildung 1: Modellhafte Darstellung von Flächen mit und ohne Kampfmittelverdacht in Form von Quadern, *LSBG 2025*

Eine Herausforderung stellt die Qualität der Bestandsunterlagen dar. Stromauf- und stromabwärts des vorliegenden Gewässerabschnitts befinden sich Brückenbauwerke, die im Kontext der Uferbefestigungen nicht von wesentlicher Relevanz sind, jedoch im Projektumfeld berücksichtigt werden sollen. Zur Überprüfung und Ergänzung fehlender Längenangaben aus den Bestandsunterlagen dienen eigens aufgenommene Laserscans. Hierbei kann auf gesammelte Vorerfahrungen aus der strategischen Arbeit der BIM-Leitstelle des LSBG zurückgegriffen werden. Viele Mobilgeräte verfügen über LiDAR-Sensoren (Light Detection and Ranging), die räumliche Punkte erfassen können. Mit entsprechender Software lassen sich die Punktwolken zusammen mit referenzierten Fotos zu dreidimensionalen Netzen verrechnen und so beispielsweise für strecken- oder flächenbezogene Abfragen nutzen. Die vervollständigten Bestandsunterlagen werden als Grundlage für die Modellierung genutzt (siehe Abbildung 2). Teilbereiche der Punktwolken können auch direkt in die Modellierungssoftware überführt werden, um einzelne Bauteile unmittelbar anhand der erfassten Punkte zu modellieren.

Die relative Genauigkeit der aufgenommenen Punkte liegt laut Softwarehersteller bei wenigen Zentimetern; die absolute Genauigkeit ist vom Ortungssignal abhängig. Zur Verbesserung der absoluten Genauigkeit wird ein RTK-Modul (Real-Time-Kinematic) mit externer GNSS-Antenne (Global Navigation Satellite System) verwendet, das unter optimalen Bedingungen eine absolute Genauigkeit der Punkte von einem Zentimeter ermöglicht. Aufgrund von Signalabschattungen an den Brückenbauwerken liegen die absoluten Werte

während der Aufnahme jedoch in einem Bereich von ca. 20 cm. Eine nachträgliche Korrektur der Punktlage durch eingemessene Passpunkte könnte die Zuverlässigkeit an solchen Stellen verbessern und befindet sich daher aktuell in der Erprobung. Für den vorliegenden Anwendungsfall ist eine hohe absolute Genauigkeit nicht erforderlich, weshalb dieser niederschwellige, kostengünstige und zeiteffiziente Vorgang zur Erfassung der Brückenbauwerke die gestellten Anforderungen vollumfänglich erfüllt.



Abbildung 2: Laserscan eines Brückenbauwerks mittels Tablet und RTK-Modul (links) zur Unterstützung der Bestandsmodellierung (rechts), LSBG 2025

Im Rahmen der Grundlagenermittlung werden weitere Aspekte bearbeitet, wie beispielsweise die Vervollständigung der Gewässerpeilung durch eigens durchgeführte Echolotaufnahmen, die Visualisierung der Bestandssituation oder die Ableitung von Planunterlagen.

4 Fazit und Ausblick

Der Beitrag zeigt auf, welche Vorteile der BIM-Methodik in den Wasserbauprojekten des LSBG bereits zum jetzigen Zeitpunkt der Planung sichtbar werden. Zu diesen zählen insbesondere eine höhere Planungsqualität, die auf einer detaillierten Bestandsmodellierung basiert, sowie eine verbesserte Nachvollziehbarkeit und Verständlichkeit von Ergebnissen und Entscheidungen. Dennoch stehen der Anwendung von BIM im Wasserbau aktuell noch Herausforderungen, wie die begrenzte Praxiserfahrung, einem weitergehenden Standardisierungsbedarf und der fehlenden durchgängigen Umsetzung über den gesamten Lebenszyklus hinweg, gegenüber.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, konzentriert sich der LSBG neben der Übertragung bestehender Praktiken auf den Wasserbau zunächst auf die Entwicklung eines LOIN-Konzepts für Wasserbauwerke sowie die Verknüpfung von BIM-Modellen und Leistungsverzeichnissen bzw. Standardleistungskatalogen in einer AVA-Software. Ein weiterer Fokus liegt auf der Übergabe von Informationen aus Voruntersuchungen und Planungen für die anschließende Betriebsphase.

Die Schnittstellen der BIM-Methodik im Wasserbau sind allerdings deutlich vielfältiger und müssen weitblickend und schrittweise entwickelt werden. Perspektivisch lässt sich beispielsweise *eine* zentrale Datenplattform etablieren, um sämtliche (wasserwirtschaftliche) Daten zusammenzuführen und zusammenhängende Analysen zu ermöglichen. Die Verknüpfung von BIM und hydrologischen oder hydraulischen Modellen der Wasserwirtschaft eröffnet zusätzliche Mehrwerte für detailreiche Ist-Analysen und zielgenaue Variantenuntersuchungen. Für die Projekte des LSBG an der Alster werden, in Zusammenarbeit mit dem Team Forschung und Modellierung des Geschäftsbereichs Gewässer und Hochwasserschutz, die hydraulischen Einwirkungen auf verschiedene Varianten der Uferbefestigung BIM-basiert untersucht. Aufbauend auf dem Praxisdokument von BIM.Hamburg widmet sich der LSBG zudem der Thematik BIM und Nachhaltigkeit im Wasserbau und berücksichtigt zusätzliche Aspekte wie Biodiversität. Die BIM-Methodik kann darüber hinaus auch die integrierte wasserwirtschaftliche Planung bekräftigen, indem verschiedene Nutzungsansprüche und Anforderungen modellhaft abgebildet und berücksichtigt werden. Der LSBG beschreitet mit der ganzheitlichen Betrachtung der Projekte an der Alster einen Pfad in diese Richtung.

Der dargelegte praxisorientierte Ein- und Ausblick soll Hemmschwellen für die Anwendung der BIM-Methodik – auch im Bereich der öffentlichen Verwaltung – abbauen und beispielhaft eine gewinnbringende Anwendung aufzeigen. Schrittweise müssen einzelne Anwendungsfälle zum Aufbau von BIM-Kompetenzen und Erfahrungen projektnah realisiert werden. Auf diese Weise kann auch im Bereich des Wasserbaus und der Wasserwirtschaft eine ganzheitlichere Vernetzung und eine zielgerichtetere Entwicklung geeigneter Maßnahmen über den gesamten Lebenszyklus hinweg gelingen.

Entscheidend ist, den Schritt von der Theorie in die Praxis zu vollziehen.

5 Verweise

Der Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer Hamburg plant, baut, erhält und betreibt einen Großteil der Hamburger Verkehrsinfrastruktur und verantwortet den gesamten Life-Cycle dieses städtischen Infrastrukturvermögens. www.lsbg.hamburg.de

BIM.Hamburg ist eine virtuelle Organisation aus einem Zusammenschluss von sechs BIM-Leitstellen mit Schwerpunktthemen, die für die übergreifende Implementierung von BIM im öffentlichen Sektor der Freien und Hansestadt Hamburg eingerichtet wurden. www.bim.hamburg.de

Autor*innen:

Freie und Hansestadt Hamburg
Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer
Geschäftsbereich Gewässer und Hochwasserschutz
Fachbereich Hydrologie und Wasserwirtschaft

Sachsenfeld 3-5
20097 Hamburg

Marvin Braun
Tel.: +49 40 428 26 - 2440
E-Mail: marvin.braun@lsbg.hamburg.de

Katjana Lorenz
Tel.: +49 40 428 26 - 2528
E-Mail: katjana.lorenz@lsbg.hamburg.de

Torsten Strampe
Tel.: +49 40 428 26 - 2611
E-Mail: torsten.strampe@lsbg.hamburg.de

Prof. Dr. Gabriele Gönnert
Tel.: +49 40 428 26 - 2510
E-Mail: gabriele.goennert@lsbg.hamburg.de

Erfahrungsbericht zur Organisation eines Multiprojekts im IFC-Datenformat

Udo Winterberg
Michael Puhe

Stichworte: BIM, Multiprojekt, Projektsteuerung, Projektstruktur

1 Projektbeschreibung

Der Wesel-Datteln-Kanal (WDK) ist einer der wichtigsten und verkehrsreichsten Schifffahrtskanäle in Deutschland und verbindet den Rhein mit dem Dortmund-Ems-Kanal. Auf einer Länge von 60 km werden in sechs Kanalstufen über 40 m Höhenunterschied überwunden. Derzeit ist der WDK für eine Abladetiefe von 2,80 m bei einer Wassertiefe von 4,00 m ausgelegt. An jedem der sechs Schleusenstandorte befindet sich eine Große Schleuse mit einer Nutzlänge von rd. 225 m und eine Kleine Schleuse mit einer Nutzlänge von 110 m.

Das Projekt Ausbau WDK bis Marl ist Teil des Bundesverkehrswegeplans (BVWP) 2030 - Projekt W23 und sieht den Ausbau des WDK von rd. 40 km Strecke vom Rhein bis zum Chemiepark Marl für bis zu 3,40 m abgeladene Großmotorgüterschiffe und Schubverbände bei einer Wassertiefe von 4,70 m vor. Je nach Gestaltung der Kanalstrecke sind entsprechend die Querungsbauwerke anzupassen sowie eine Durchfahrtshöhe der Brücken von 5,25 m herzustellen. In dem auszubauenden Kanalabschnitt befinden sich drei Schleusenstandorte. Der Ersatzneubau der Großen Schleusen sowie die Anpassung der Vorhäfen ist ebenfalls Bestandteil des BVWP 2030 und beinhaltet neben der Schleusenanlage auch Sparbecken und ein Pumpwerk. Für die BIM-spezifische Organisation des Gesamtprojektes waren in Summe über 100 eigenständige Objekte anzulegen.



Abbildung 1: Übersicht Bundeswasserstraßen

2 Ausgangslage

Das Wasserstraßen-Neubauamt Datteln führte bereits zwei BIM-Projekte durch. Anhand dieser konnten verschiedene Erkenntnisse gewonnen werden.

Unter anderem wurde festgestellt, dass – trotz des Ziels openBIM anzuwenden – die Einschränkungen der eingesetzten Autorensoftwareprodukte den anwendbaren Umfang des IFC-Datenschemas reduzierten. Für das Multiprojekt Ausbau des WDK bis Marl, bei dem verschiedenste Softwareprodukte zum Einsatz kommen würden, war es daher notwendig sich adäquat zu positionieren um, für die Gesichtspunkte Qualität, Kosten und Termine, openBIM umsetzen zu können.

In diesem Kontext wurden seitens des Wasserstraßen-Neubauamtes Datteln im 2. Halbjahr 2022 Prämissen für die BIM-spezifische Projektabwicklung formuliert. Im Rahmen dieser Betrachtung wird auf folgende Prämissen eingegangen:

- Wir arbeiten im IFC-Datenschema (openBIM)
- Die Projektstruktur der IFC-Datei enthält den Projektstrukturplan
- Wir arbeiten mit Typen
- Wir zeigen Lösungswege auf

Wir arbeiten im IFC-Datenschema

Um die erste Prämisse zu erfüllen und Lösungswege im IFC-Datenschema aufzuzeigen, war es erforderlich eine Software zu finden, welche das IFC-Datenschema nahezu vollständig unterstützt. In diesem Zusammenhang wurden wir bei Bonsai (ehemals BlenderBIM), einer Erweiterung für Blender, fündig. Dieses Thema lässt sich auch allgemein unter dem Schlagwort „native IFC“ zusammenfassen.

Die Projektstruktur der IFC-Datei enthält den Projektstrukturplan

In der WSV beschreiben mehrere aufeinander aufbauende Verwaltungsvorschriften die Strukturierung der eigenständigen Objekte. Diese Strukturierung findet ebenfalls in dem Dokumentenmanagementsystem (DVtU) sowie in der Wasserstraßen Datenbank (WADABA) ihre Anwendung.

Für die Arbeitsweise BIM haben wir uns auf die VV-WSV-1102 Objektkatalog sowie VV-WSV-2116 Baubestandswerk konzentriert. Um den Projektstrukturplan der WSV einzuhalten galt es diese Regularien, welche sich unter anderem in dem Schriftfeld wiederfinden, in der Strukturierung des Modells zu berücksichtigen.

Mit der Software Bonsai lässt sich die in Abbildung 2 definierte Projektstruktur sehr einfach, vergleichbar wie in einem Dateieexplorer eine Ordnerstruktur, generieren. In Abbildung 3 ist die Projektstruktur der Vorlagedatei Schleuse Friedrichsfeld in dem BIM-Checker desite md pro dargestellt.

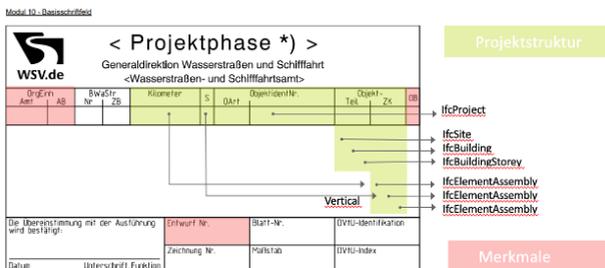


Abbildung 2: Zuordnung WSV-Schriftfeld / IFC-Klassen

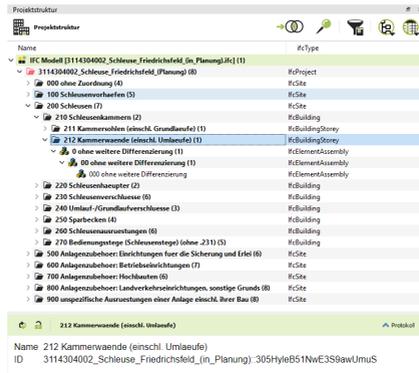


Abbildung 3: Darstellung der Struktur in einem BIM-Checker

Somit wurde es möglich erste IFC-Vorlagedateien mit Projektstrukturplänen inklusive GlobalIds zur Verfügung zu stellen und der BIM Gesamtkoordination einen Lösungsweg für die Generierung weiterer IFC-Vorlagedateien aufzuzeigen.

Wir arbeiten mit Typen

Gleichartige Kombinationen von Eigenschaften können durch Typisierung zusammengefasst werden, wobei die Kombination der Merkmale und deren Ausprägung, sowie optional Abmessungen, für jeden Typen einzigartig ist.

Eine solche Systematik wird ebenfalls bei der Ausschreibung von Bauleistungen angewendet, hierzu werden Positionen gebildet. Im Rahmen der Qualitätssicherung ist des Weiteren zu prüfen, ob die Objekte mit den richtigen Eigenschaften am vorgesehenen Ort platziert wurden. Für beide Anwendungen bilden die Eigenschaften der Objekte die wesentliche Grundlage.

Die zuvor erwähnte Typisierung von Eigenschaften findet im IFC-Datenschema eine praktische Anwendung. Als Vorlage für Instanzen ermöglichen Typen unter anderem die Verknüpfung von Merkmalsätzen (IfcPropertySets), Materialien sowie Kostenansätzen (IfcCostItem). Auf Basis des Projektstrukturplans lässt sich die Positionierung der instanziierten Typen im

Projekt überprüfen, wodurch eine klare Organisation und Nachvollziehbarkeit sichergestellt wird. Jedem Typ sind die hierfür notwendigen Angaben in einem entsprechenden Merkmalsatz anzufügen.

Ebenfalls können die Typen, vergleichbar mit Formatvorlagen in der Textverarbeitung, in verschiedenen Modellen genutzt werden. Dies ist insbesondere in einem Multiprojekt von Vorteil.

3 Aktueller Stand

Wie zu erwarten war, wird bei dem Projekt ein großer Umfang unterschiedlicher Softwareprodukte, kombiniert mit unterschiedlichen Arbeitsweisen, eingesetzt, sodass ca. 20 Softwareprodukte an ca. 30 unterschiedlichen Stellen eingesetzt werden.

Ein Partner exportiert aus seiner Autorensoftware IFC-Dateien ins Datenschema 2x3 welche dann in einem BIM-Checker umstrukturiert und mit Merkmalen versehen werden. Von dort werden sie in IFC-Dateien mit dem Datenschema 4 exportiert. Ein weiterer Partner generiert die physischen Objekte teilautomatisiert mit zwei Softwareprodukten und exportiert aus seiner Autorensoftware die, mit neuer Struktur sowie Merkmalen versehenen, IFC-Dateien. Ferner kommen Arbeitsweisen zur Anwendung, bei welcher die Partner ihre Modelle ausschließlich in ihrer Autorensoftware bearbeiten.

Aufgrund der vorgegebenen Projektstruktur mit verschachtelten IfcSite / IfcBuilding / IfcBuildingstory sowie IfcElementAssembly stellte bei allen Arbeitsweisen das Generieren der IFC-Dateien eine, nicht direkt zu lösende, Herausforderung dar.

Lösungsansatz Vorlagedateien



Abbildung 4: Screenshot GUI neue IFC-Vorlagedatei generieren

Die IFC-Vorlagedateien werden auf Basis der Blattnummer gemäß VV-WSV-1102 mit einem Pythoncode, unter Nutzung der offenen Softwarebibliothek IfcOpenShell, automatisiert generiert.

Lösungsansatz Struktur

In den meisten eingesetzten Softwareprodukten lässt sich die vorgegebene Struktur noch nicht umsetzen. Es besteht jedoch die Möglichkeit den physischen Objekten auf Basis des kleinsten gemeinsamen Nenners, mittels Merkmalen, ihre Zuordnung zum Projektstrukturplan anzufügen. Die physischen Objekte werden nach dem Export aus der Autorensoftware im IFC-Datenschema in die richtige Position „verschoben“. Dies kann händisch mit Bonsai oder automatisiert mit der Funktion `spatial.assign_container` der IfcOpenShell Softwarebibliothek erfolgen.

Lösungsansatz Typen

Die Typen werden in einer eigenständigen, von Bonsai automatisch erstellten, IFC-Datei koordiniert. Um die Qualitätssicherung gewährleisten zu können ist für jedes `IfcTypeObject` der Merkmalsatz `WDK_TypenZulaessig` zu pflegen.

die Terminplanung generiert. Diese MPP-Vorlagedateien sind gemäß dem Projektstrukturplan, einschließlich der GlobalIds, organisiert und können in MS Project in einem Masterprojekt zusammengeführt werden.

Da Modell und Objekt bekannt sind, sollen in MS-Project BCFs auf Basis der ausgewählten Zeilen scriptbasiert generiert werden.

Ergänzend sollen die Termine aus MPPXML-Dateien in das jeweilige 4D Modell geschrieben werden. Hierzu kann ein Mapping gemäß Abbildung 7 verwendet werden.

Inhalt	MPP XML	IFC
1 AOB - (Vorgänger)	Task/PredecessorLink/Predecessor	IfcRelSequence/RelatingProcess
2 AOB - (Nachfolger)		IfcRelSequence/RelatedProcess
3 AOB Zeitabstand	Task/PredecessorLink/LinkLag	IfcRelSequence/TimeLag
4 AOB Art	Task/PredecessorLink/Type	IfcRelSequence/SequenceType
5 Name logisches Element	Task/Name	Nach Erfordernis: IfcSpatialElement/Name IfcElementAssembly/Name
6 Name physisches Element	Task/Name	IfcTask/Name

Abbildung 7: Auszug aus dem Mapping MPP XML <-> IFC

5 Schlussfolgerungen

- Das IFC-Datenschema bietet umfassende Unterstützungen für das Projektmanagement.
- Der im IFC-Dateiformat vorgegebene Projektstrukturplan kann für alle Fachmodelle, inkl. 4D und 5D, angewendet werden. In vielen Softwareprodukten wird er übersichtlich dargestellt, wodurch eine intuitive und nahezu mühelose Anwendung möglich ist.
- Ergänzend werden Besprechungsmodelle zur Verfügung gestellt, anhand derer BCFs für Aufgaben definiert werden können, welche sich nicht direkt im Projektstrukturplan bzw. den anderen Fachmodellen verorten lassen.
- Die Steuerung der Anordnungsbeziehungen des Gesamtprojektes kann anhand eines 4D Gesamtmodells erfolgen.
- Umfang und Inhalt der Typen, folglich die Qualitäts- und Kostenansätze, können im IFC-Datenschema kommuniziert und koordiniert werden.
- Aufgaben aus dem gesamten Spektrum der Kosten, Termine und Qualität lassen sich mittels BCFs in einer CDE modellbasiert koordinieren und steuern.

Somit sind die maßgeblichen Grundlagen für die Organisation der Projektentwicklung gemäß AHO Heft 9 und 19 vorhanden.

Unser Dank gilt den Projektpartnern, welche kooperativ die Arbeitsmethode diskutieren, anwenden und weiterentwickeln sowie im Rahmen von Workshops ihre Arbeitsweisen offen kommunizieren.

Wir danken auch den Entwicklern und Unterstützern der offenen Softwarelösungen, mit welchen die Umsetzung grundlegender Aspekte der dargestellten Arbeitsweise erst ermöglicht wurden.

Bonsai (ehemals BlenderBIM) <https://bonsaibim.org/>

IfcOpenShell <https://ifcopenshell.org/>

Blender <https://www.blender.org/>

Autoren:

Udo Winterberg

Michael Puhe

Wasserstraßen-Neubauamt Datteln
Speeckstraße 1
45711 Datteln

Wasserstraßen-Neubauamt Datteln
Speeckstraße 1
45711 Datteln

Tel.: +49 2363 104 0

Tel.: +49 2363 104 0

E-Mail: udo.winterberg@wsv.bund.de

E-Mail: michael.puhe@wsv.bund.de

Stadthafen Rostock – Sanierung Kempowskiufer, Liegeplätze 86 - 91

Marec Philipp Durgut

Stichworte: Building Information Modeling, CO₂-Bilanzierung,
Terminplanung, Geodatenintegration

1 Einleitung

Die Anwendung der BIM basierten Planung hat im Planungsalltag der Wasserbauingenieure Einzug erhalten. Dies ermöglicht nicht nur eine umfassende und länderübergreifende Planungserstellung am Cloud-basierten Modell; es können auch digitale Abbilder eingebettet in der realen Umgebung erzeugt werden. Gerade der Bereich der VR-Anwendungen steckt in der Softwareanwendung noch in den „Kinderschuhen“ – wird aber zukünftig eine größere Rolle insbesondere in der Öffentlichkeitsdarstellung spielen.

Was können wir aktuell nutzen? Am Beispiel der Ufersanierung Kempowskiufer Rostock, welches im Jahr 2025 realisiert wird, beschreibt der Vortrag die Erarbeitung des digitalen Zwillings, die Einbettung in VR-Anwendungen und die bautechnische Umsetzung in der Realität.



Abbildung 1: Digitale Zwillinge des geplanten Neubaus eingebettet in ein Umgebungsmodell

2 Projektbearbeitung

2.1 BIM-Modell

In diesem Projekt stand ein detailliertes 3D-Building Information Modeling (BIM)-Modell im Vordergrund. Dieses wurde ab der Leistungsphase 2 erstellt und diente als zuverlässige Grundlage für Entscheidungsfindungen.

Zusätzlich haben wir beim Aufbau des Modells und der Attribuierung weitere Anwendungsfälle beachtet, sodass es eine zentrale Ressource für die Projektbearbeitung wurde. Das Modell wurde in der nativen Cloudumgebung aufgesetzt und bearbeitet, was uns die gleichzeitige Arbeit von verschiedenen Standorten aus ermöglichte.

2.2 Anwendungsfälle

In der Leistungsphase 2 haben wir bei der Variantenuntersuchung eine CO₂-Bilanzierung erstellt. Diese bezog sich auf die Hauptmengen von Stahl und Beton und berücksichtigte die Phasen Herstellung und Transport. Dabei ha-

ben wir keine Varianten Konstruktion erstellt, sondern konventionelle Materialien mit klimafreundlichen Alternativen verglichen. Es stellte sich heraus, dass die Stahlbauteile in diesem Falle der ausschlaggebende Faktor für die emittierte CO₂e waren.

Das BIM-Modell wurde in ein WebGIS integriert und mit unterschiedlichen Geodaten angereichert. Das ermöglichte uns nicht nur eine sehr realistische Darstellung des zukünftigen Bauwerks in der realen Umgebung, sondern auch die Verschneidung von planungsrelevanten Daten mit dem Bauwerk. Durch die Aufbereitung im WebGIS konnten Auftraggeber und weitere Projektbeteiligte jederzeit den aktuellen Stand des Modells und der Umgebungsdaten einsehen.

Weiterhin haben wir eine frühzeitige Attribuierung der Bauteile für den Bauablauf vorgenommen, was es uns ermöglichte, in den späteren Leistungsphasen das Modell mit dem Terminplan zu verknüpfen und daraus einen Bauablaufplan zu generieren. Mit dem modellbasierten Bauablauf konnten wir diesen auf zeitliche Kollisionen und potenzielle Konflikte prüfen

Der hohe Detaillierungsgrad der Modellierung von beispielsweise Kai-Ausrüstung und Bewehrung hatte einen deutlichen Vorteil in der Planableitung. Da hier weniger Nacharbeit für die gewünschte Darstellung notwendig war.

3 Schlussfolgerungen und Ausblick

Wir haben in der digitalen Planung in den letzten Jahren einen deutlichen Umbruch in den Softwareanwendungen im Wasserbau erlebt und befinden uns noch immer in erheblichen Weiterentwicklungen. Ein digitales Planungsmodell kann verschiedenste Aufgaben erfüllen: So lassen sich Terminpläne mit Bauzuständen verknüpfen, Massen modellbasiert ableiten oder auch Bewehrungsanweisungen mit Videounterstützung am Modell erstellen.

Gerade die Massenmodellierung wird in einer CO₂-Bilanzierung zukünftig eine wichtige Rolle in der Beurteilung der Nachhaltigkeit von Vorhaben spielen. Darüber hinaus können Beteiligungen der Öffentlichkeit durch realitätsnahe VR-Integration durchgeführt werden.

Alle diese Aspekte werden am Beispiel der Planung Kempowskieufer dargestellt und gleichzeitig 2025 in den Bau überführt.

Autor:

Marec Philipp Durgut

Konstruktiver Wasserbau
Inros Lackner SE
Rosa-Luxemburg-Straße 16
18055 Rostock

Tel.: +49 381 4567 748

Fax: +49 381 4567 559

E-Mail: marecphilipp.durgut@inros-lackner.de

Der klimaangepasste Umgang mit Wasser - eine Herausforderung!

Uwe Müller

Stichworte: Klimaanpassung, Wassermanagement, Trockenheit,
Hochwasser, Wasserdarangebote, Wassernutzung

1 Einleitung

Im Beitrag wird ein kurzer Überblick über das Wasservorkommen der Erde und die Wassernutzungen in Deutschland gegeben. Durch den Klimawandel verändern sich einerseits die Wasserdarangebote und andererseits steigen die Nutzungsansprüche. Sowohl Trockenheit als auch Hochwasser und Starkregen treten häufiger auf. Diese Umstände erfordern ein klimaangepasstes nachhaltiges Wassermanagement um die Ressource Wasser weiterhin in ausreichender Qualität nutzen zu können.

2 Wasservorkommen und Wassernutzung

Die Erde ist zu ca. 71 % mit Wasser und zu 29 % mit Land bedeckt. Von dem daraus resultierenden Wasservolumen von ca. 1,4 Milliarden km³ befinden sich 97,25 % als Salzwasser in den Ozeanen und nur 2,75 % sind als Süßwasser im Binnenland verfügbar. Zurzeit sind vom weltweiten Süßwasser ungefähr 70% in Form von Gletschern und Eis gebunden und die verbleibenden 30% sind flüssiges Süßwasser. Von der flüssigen Komponente wiederum sind ca. 98,5% Grundwasser und nur 1,5% Oberflächenwasser. Daraus ergibt sich, dass das Grundwasser rund 0,7% und das Oberflächenwasser nur 0,01% des Wasservorkommens der Erde ausmachen. Dies macht einerseits deutlich wie wichtig der Schutz des Grund- und Oberflächenwassers ist und das andererseits die Wasserdarbotsfrage eine Grundwasserfrage ist.

Bei der Wassernutzung sind der direkte und indirekte Wasserverbrauch von Bedeutung. Die Summe beider Komponenten beschreibt den Wasserfußabdruck. Der blaue Wasserverbrauch [UBA (2022)] kennzeichnet den Verbrauch aus Oberflächenwasser und Grundwasser. Der graue Wasserverbrauch [UBA (2022)] ist die Menge Süßwasser, die erforderlich ist um die Verunreinigung, die mit der Herstellung von Produkten in Verbindung gebracht wird, aufzunehmen bzw. so weit zu verdünnen, dass die Wasserqualität mit vereinbarten Wasserqualitätsnormen übereinstimmt. Der grüne Wasserverbrauch [UBA (2022)] ist der Anteil des Niederschlages über Landflächen, welcher in der Erde gespeichert wird oder temporär auf der Erdoberfläche oder Vegetation verbleibt. Dadurch evaporiert oder transpiert dieser Anteil des Niederschlages über Landflächen durch Pflanzen und kommt damit nicht zum Abfluss oder zur Grundwasseranreicherung.

In Deutschland haben wir einen konsuminduzierten Wasserverbrauch von ca. 219 Mrd. m³ pro Jahr, was in etwa einem täglichen Pro-Kopf- Verbrauch von 7,2 m³ entspricht. Dieses Wasser kommt nur zu 14% aus Deutschland, die anderen 86% des Wasserverbrauches kommen aus dem Ausland. Der blaue Wasserverbrauch innerhalb Deutschlands beträgt 4% und weitere 11% kommen aus dem Ausland. Die Regionen mit den höchsten Beiträgen zum blauen Wasserverbrauch in Deutschland sind Asien, Pazifik und Mittlerer Osten [UBA (2022)].

Diese Fakten belegen, dass die eigene Wasserbenutzung globale Auswirkungen haben kann. Wenn der Wasserverbrauch die Belastbarkeitsgrenzen der Benutzung übersteigt entstehen sogenannte Wasserknappheits-Hotspots. Diese gibt es u.a. in Nord- und Südamerika, Afrika, Asien, Australien und auch in Europa [UBA (2022)]. Um nicht zum Wasserknappheits-Hotspots zu werden ist ein nachhaltiges klimaangepasstes Wassermanagement essentiell.

3 Klimaveränderung – regionale Niederschlagsdefizite

Die real existierende Klimaveränderung führt u.a. zu höheren Temperaturen. Die Messungen belegen am Beispiel des Freistaates Sachsen, dass sich die Lufttemperatur im Zeitraum von November 2017 bis Dezember 2024 im Vergleich zum klimatologischen Referenzzeitraum (1961 – 1990) um 2,1 K und gegenüber dem hydrologischen Referenzzeitraum (1991 – 2020) um 1,1

K erhöht hat. In den letzten Jahren sind ständig neue Rekorde gemessen worden. Aus damaliger Sicht (2018) war das Jahr 2018 für Sachsen das wärmste, sonnenreichste und zweittrockenste Jahr. Dieses Temperaturniveau hat sich über die letzten Jahre nicht geändert. Der Juli 2023 gilt als heißester Juli seit Aufzeichnungsbeginn 1881 und das Jahr 2024 inzwischen als das wärmste Jahr seit Aufzeichnungsbeginn für ganz Deutschland. Sachsen war der Hot-spot mit z.B. 26 Tagen von $\geq 30^{\circ}\text{C}$ in der Oberlausitz.

Für Deutschland war aus damaliger Sicht 2018 das seit Messbeginn (1881) wärmste, sonnenreichste und vierttrockenste Jahr und 2023 war wie bereits erwähnt der heißeste Juli. Der Sommer des inzwischen wärmsten Jahres 2024 war laut Deutschem Wetterdienst (DWD) der 28. warme Sommer in Folge und lag 2,2K über dem Mittelwert des klimatologischen Referenzzeitraums.

Die Klimaveränderung führt in Deutschland zu einer Niederschlagsumverteilung von weniger Niederschlag im Sommerhalbjahr zu mehr Niederschlag im Winterhalbjahr. Neben ausgeprägten Trockenperioden wurden in den letzten Jahren häufiger Hochwasser und Starkregenereignisse im Sommerhalbjahr registriert. Die Niederschlagsverteilung in Deutschland ist aufgrund der topographischen Lage und der Klimazonen unterschiedlich, so dass die klimabedingte Niederschlagsveränderung sich unterschiedlich ausprägt.

Die in Abbildung 1 dargestellten Beobachtungen in Sachsen haben ergeben, dass sich von 2018 bis 2024 ein Niederschlagsdefizit von 68% eines mittleren Jahresniederschlages kumuliert hat. Bezogen auf die Hydrologischen Jahre ergab sich bisher folgende Entwicklung des kumulierten Defizites in Prozent zum Mittelwert des hydrologischen Vergleichszeitraumes: 2018 – 34%; 2019 – 52%; 2020 – 54%; 2021 – 57%; 2022 – 76%; 2023 – 82%; 2024 – 68%.

Durch die Temperaturerhöhungen steigt auch die Verdunstung, was sich wiederum auf die klimatische Wasserbilanz auswirkt (siehe auch Abbildung 1). Von November 2017 bis Dezember 2024 hat sich bei der klimatischen Wasserbilanz für Sachsen gegenüber dem klimatologischen Vergleichszeitraum ein Defizit von 903 mm (ca. 16,6 Mrd. m^3) bzw. gegenüber dem hydrologischen Vergleichszeitraum ein Defizit von 735 mm (ca. 13,5 Mrd. m^3) eingestellt. Damit fehlt in Sachsen das Wasser von ca. einem Jahresniederschlag.

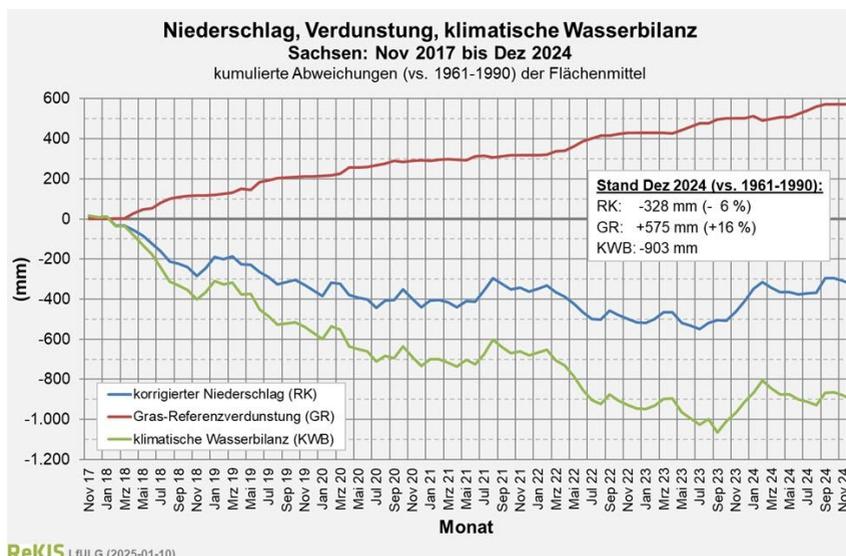


Abbildung 1: Niederschlag, Verdunstung, klimatische Wasserbilanz in Sachsen von November 2017 bis Dezember 2024

4 Niederschlagsdefizit - Niedrigwasser

Die im Kapitel 3 beschriebenen Niederschlagsveränderungen führen zu veränderten Durchflüssen in den Fließgewässern. Das für Sachsen festgestellte Niederschlagsdefizit führt zu langanhaltenden und wiederkehrenden Niedrigwassersituationen. Die Abbildung 2 zeigt, dass sich seit November 2019 im Sommerhalbjahr permanent Pegel im Niedrigwasserbereich befinden. Die negative klimatische Wasserbilanz führt inzwischen trotz einzelner nasser Jahre zu jährlichen Niedrigwasserperioden.

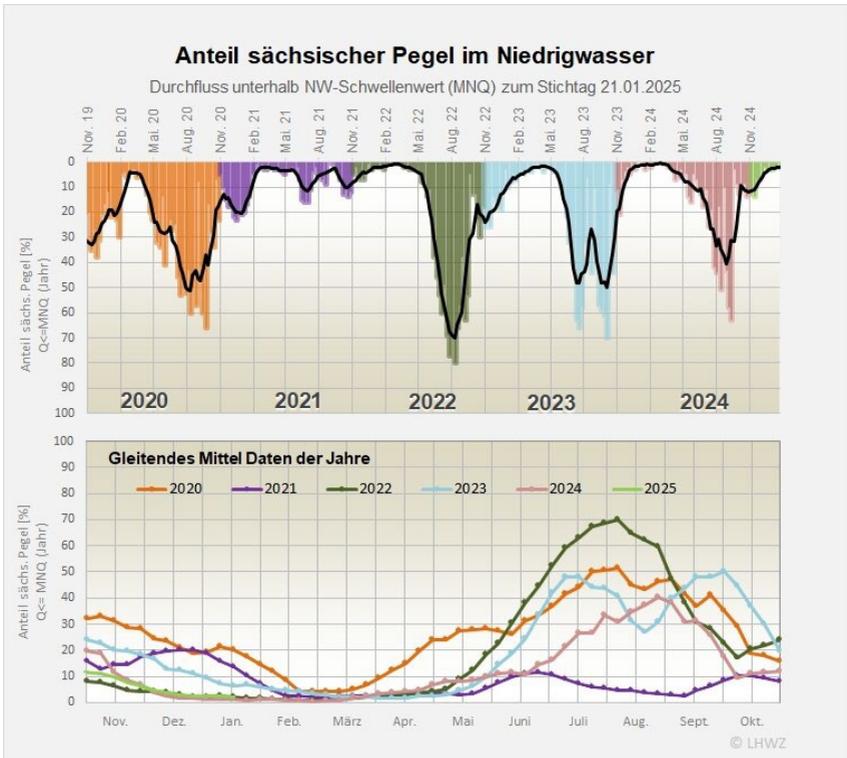


Abbildung 2: Anteil sächsischer Pegel im Niedrigwasser von November 2019 bis Januar 2025

Die folgenden Angaben zum mittleren Durchfluss MQ sollen dies untermauern. In den Abflussjahren ergaben sich für Sachsen folgende Durchflusswerte vom MQ: 2018 – 60% bis 80%; 2019 – 55% bis 85%; 2020 – 40% bis 65%; 2023 – 60% bis 115%. Die Jahre 2018 bis 2020 zeigen, dass alle Durchflüsse unter MQ lagen. Die folgenden Werte zeigen, dass es deshalb auch lange Perioden mit Niedrigwasser gab. Anteil der Pegel im Niedrigwasserbereich: 2018 – 76% für 8 Wochen; 2019 – 70% für 3 Wochen; Januar 2021 – 17%. Am 26.04.2020 ist im Bereich der sächsischen Elbe der zweitniedrigste Apriltagessmittelwert seit Aufzeichnungsbeginn gemessen worden. Dieser Wert war bisher nur 1865 niedriger. Mit der Inbetriebnahme der Moldaukaskade im Jahr 1964 hat sich das Abflussverhalten der Elbe geändert. Der seither niedrigste Maitagesmittewert wurde am 22.05.2020 registriert.

Die Niedrigwassersituationen an der Elbe legten auch sogenannte Hungersteine frei in denen Gravuren von historischen Niedrigwasserperioden existieren. Das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) hat gemeinsam mit Partnern in einem Projekt mehr als 60 Wiederentdeckungen mit Gravuren von mehreren Jahrhunderten Alter kartiert und dokumentiert (<https://luis.sachsen.de/wasser/hungersteine-untiefen.html>).

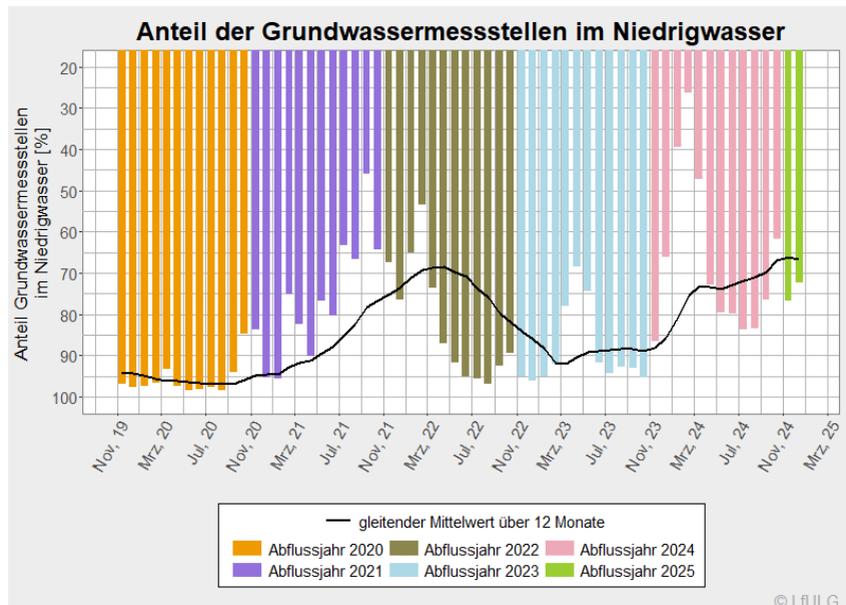


Abbildung 3: Anteil sächsischer Grundwassermessstellen im Niedrigwasser von November 2019 bis Januar 2025

In den Niedrigwasserperioden sind Talsperren zur Niedrigwasseraufhöhung und zur Rohwasserbereitstellung u.a. auch zur Trinkwasserversorgung besonders wichtig. 2018 sind in Sachsen aus den landeseigenen Talsperren ca. 69 Mio. m³ und im Jahr 2019 ca. 53 Mio. m³ zur Niedrigwasseraufhöhung verwendet worden. Da in Sachsen ca. 40% der Bevölkerung ihr Trinkwasser aus Talsperrenrohwasser beziehen, ist hier eine gute Bewirtschaftung erforderlich. Die Herausforderungen zur Bewirtschaftung steigen, wenn man beachtet, dass in den letzten Jahren während ausgeprägter Niedrigwasserperioden Hochwasser oder Starkregenereignisse aufgetreten sind.

Die Niederschlagsveränderung und die steigende Verdunstung führen zu Veränderungen in der Grundwasserneubildung und im Grundwasserdargebot. Das ist in Deutschland regional ebenfalls unterschiedlich ausgeprägt. In Sachsen werden seit 2013 überwiegend fallende Grundwasserstände gemessen. Die bisher im Trockenjahr 1993 registrierten Tiefststände sind beginnend ab 2018 alle unterschritten worden. Die Abbildung 3 zeigt, dass sich seit November 2019 permanent Grundwassermessstellen im Niedrigwasserbereich befinden. Am 20.01.2025 unterschritten ca. 67% der ausgewerteten 281 Messstellen den monatstypischen Grundwasserstand um durchschnittlich 23 cm (Medianwert), das bedeutet für Sachsen ein Grundwasserdefizit von ca. 2,8 Mrd. m³.

5 Trockenheit – Hochwasser und Starkregen

5.1 Trockenheit

Die bisher aufgezeigten Entwicklungen verdeutlichen, dass eine intensivere Befassung mit den Wasserdargebotsentwicklungen und den Wassernutzungen für eine nachhaltige Bewirtschaftung dieser Ressource insbesondere in Trockenperioden aber auch während der anderen Extreme Hochwasser und Starkregen wichtig ist.

Bezüglich der Trinkwasserversorgung, die in Deutschland Vorrang vor allen anderen Nutzungen hat, haben die für Sachsen geschilderten Veränderungen bezüglich des Wasserhaushaltes noch zu keinen oder nur zu geringen Auswirkungen geführt. Die zentralen Versorgungssysteme konnten auch aufgrund der einzugsgebietsübergreifenden Verbundsysteme auf der Roh- und Reinwasserseite eine hohe Versorgungssicherheit gewährleisten. Während der Trockenperioden sind bei Einzelwasserversorgungen (0,7%) Versorgungsengpässe durch Alternativversorgungen, wie z.B. Tankwagen, sichergestellt worden. Verfügungen zu Nutzungsverböten für z.B. Wasserentnahmen oder Bewässerungen während Trockenperioden dienen zur Schonung der Dargebote. Die Wasserversorger sind gehalten über Grundsatzkonzeptionen unter Berücksichtigung der prognostizierten Dargebote sich zukunftsicher aufzustellen. Dazu wurde z.B. für Sachsen durch das *LfULG* (2025) ein Wasserhaushaltsportal entwickelt, welches unter Berücksichtigung der Klimaprognosen die Entwicklung der Wasserhaushaltsgrößen bis 2100 darstellt.

Lange Niedrigwasserperioden bewirken u.a. Veränderungen der Gewässergüte. An der Elbe musste durch das LfULG wegen Unterschreitung der Grenzwasserstände am 16.07.2018 und am 24.07.2023 das Niedrigwassermessprogramm für die Elbe ausgelöst werden. Laut diesem Programm werden 11 Sondermessstellen der deutschen Elbe alle 2 Wochen beprobt. Andere Messstellen in kleineren Gewässern waren teilweise komplett trocken gefallen und konnten keine Daten liefern. Auch für die Ökologie bewirken Trockenperioden enorme Veränderungen oder sogar den Totalverlust aquatischer Organismen.

Der Braunkohlebergbau bzw. die Bergbaufolgelandschaften stellen besondere Bewirtschaftungsherausforderungen dar. Durch den Bergbau ist z.B. im Lausitzer Revier die Spree mit erhöhten Eisen- und Sulfatfrachten belastet. Um Unterliegern auch in Trockenperioden noch eine sinnvolle Wassernutzung zu ermöglichen, ist die Spree mit Wasser aus Tagebaurestseen und sächsischen Talsperren bezuschusst worden. So sind z.B. 2018 über 25 Mio. m³ Wasser aus sächsischen Talsperren zusätzlich in die Spree abgegeben worden.

Trockenperioden haben natürlich auch Einfluss auf die Bodenfeuchte, die aufgrund der Veränderungen im Wasserhaushalt öfter in den trockenen bis sehr trockenen Bereich fallen. Eine ausführliche Darstellung zur Trockenperiode 2014 bis 2020 in Sachsen mit der Beschreibung vieler Auswirkungen kann man in der umfassenden Ereignisanalyse des *LfULG* (2024) finden.

5.2 Hochwasser und Starkregen

Neben Trockenperioden stellen Hochwasser- und Starkregenereignisse ebenfalls immer stärkere Anforderungen an das klimaangepasste Wassermanagement. Neu und herausfordernd ist, dass aus Niedrigwassersituationen schnell Hochwassersituationen entstehen können, die dann wieder in einer Niedrigwassersituation enden.

Für Sachsen war das extreme Hochwasser 2002 ein einschneidendes Ereignis. Die 2006, 2010, 2013, 2021, 2023 und 2024 folgenden Hochwasser- sowie zahlreiche Starkregenereignisse zeigten, dass die permanente Auseinandersetzung mit dem Thema Hochwasser sowie verbesserte Anpassungs- und Warnstrategien sehr wichtig sind.

Die Klimaveränderung führt zur weiteren Zunahme von Starkregen- und Hochwasserereignissen. Die Ereignisse im Sommer 2021 forderten in

Deutschland über 180 Todesopfer und führten zu Schäden von über 30 Mrd. €. Das sind 9% der 2017 weltweit aufgetretenen Schäden durch Naturkatastrophen, von denen etwa 47% auf Hochwasser und Sturzfluten zurückzuführen sind.

In Umsetzung der EG-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (EG-HWRM-RL) werden auch in Deutschland eine vorläufige Bewertung des Hochwasserrisikos, die Erstellung von Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikokarten sowie der Hochwasserrisikomanagementpläne umgesetzt. Sachsen hat aufgrund seiner Erfahrungen bereits viel in den Hochwasserschutz und ein ganzheitliches Hochwasserrisikomanagement investiert, dessen Methodik, Projekte und Ergebnisse an anderer Stelle bereits ausführlich beschrieben worden sind [Müller (2010); Müller, Rieth (2023)].

Hervorzuheben ist die Etablierung einer zielführenden Hochwasservorhersage und eines verlässlichen Hochwassernachrichtendienstes. Die Starkregenereignisse der jüngeren Vergangenheit haben auch den Bedarf an darüberhinausgehende Frühwarnsysteme aufgezeigt. Aus den Erfahrungen des Hochwassers 2002 wurde der Hochwassernachrichtendienst in Sachsen grundlegend überarbeitet, zentralisiert und das Landeshochwasserzentrum (LHWZ) errichtet. Alle Hochwassermeldungen in Sachsen werden seit 2004 nach dem Single-Voice-Prinzip zentral vom LHWZ versandt. Zeichnet sich infolge bereits gefallener oder vorhergesagter Niederschläge eine Hochwassergefährdung ab, werden direkt alle sächsischen Kommunen, Katastrophenschutzbehörden, Leitstellen u.a. informiert. Das dahinterstehende Hochwasserinformations- und Managementsystem (HWIMS) realisiert eine weitgehend automatisierte Prozessunterstützung des LHWZ. Den Schwerpunkt bilden dabei die drei Leistungsprozesse: Datensammlung, Datenaufbereitung und Datenveröffentlichung.

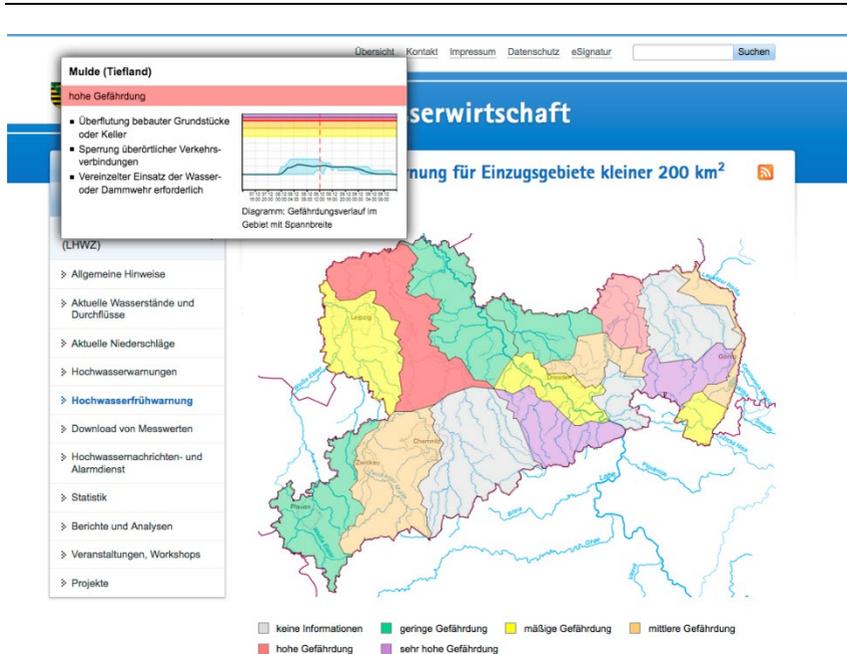


Abbildung 4: Frühwarnsystem Sachsen für Einzugsgebiete kleiner 200 km²

Das LHWZ bietet seit 2018 auch eine Frühwarnung an. Durch die kombinierte Bewertung von Gebietseigenschaften, hydrologischen Vorbedingungen, Niederschlagsdaten sowie meteorologischen Vorhersagen wird stündlich die Hochwassergefährdung in kleinen Einzugsgebieten bis 200 km² für die kommenden 24 Stunden dargestellt (s. Abbildung 4). Es handelt sich dabei um die Abschätzung einer regionalen Hochwassergefährdung, die mittels einer fünfteiligen Skala in „geringe“ bis „sehr hohe“ Gefährdung unterteilt wird. In den Projekten HoWa-innovativ (Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete mit innovativen Methoden der Niederschlagsmessung und -vorhersage) und HoWa Pro ist eine räumlich präzisere Vorhersage von Hochwasser unter Nutzung innovativer Niederschlagsmess- und Vorhersageverfahren erarbeitet worden. Durch die neuartige Kombination von Radardaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) mit Niederschlagsinformationen von kommerziellen Richtfunkstrecken wird die Genauigkeit der Niederschlagsmessung erhöht. Es werden zuverlässigere Warnungen für die Katastrophenabwehr speziell in kleinen Einzugsgebieten ermöglicht und das bestehende Frühwarnsystem in Sachsen ausgebaut.

6 Zusammenfassung

Bezogen auf das Gesamtwasservorkommen der Erde sind nur ca. 0,7% als Grundwasser und 0,01% als Oberflächenwasser verfügbar. Deshalb muss diese Ressource besonders nachhaltig bewirtschaftet werden. Ein klimaangepasstes Wassermanagement ist essenziell um bei zunehmenden Extremen wie Trockenheit und Hochwasser auf die sich ändernden Wasserdarangebote und die zunehmenden Nutzungen nachhaltig reagieren zu können. Moderne datengestützte Prognose-, Vorhersage-, Bewirtschaftungs- und Warnprodukte bzw. Modelle werden immer wichtiger für ein klimaangepasstes nachhaltiges Wassermanagement.

7 Literatur

UBA (2022), Umweltbundesamt: Konzeptionelle Weiterentwicklung des Wasserfußabdrucks; Texte 44/2022; Dessau 2022

LfULG (2024), Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie: Ereignisanalyse Trockenheit in Sachsen 2014 – 2020; Dresden 2024

LfULG (2025), Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie: Wasserhaushaltsportal; <https://whh-kliwes.de/>; Abruf 23.01.2025; Dresden 2025

Müller, U. (2010): Hochwasserrisikomanagement – Theorie und Praxis, Vieweg+Teubner Verlag, 440 Seiten, Wiesbaden 2010

Müller, U. ; Rieth, K. (2023): Vorbereitet auf die Flut; der gemeinderat 66 (2023); Heft 3, Seite 56 – 61, Schwäbisch Hall, 2023

Dr.- Ing. habil. Uwe Müller
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Abteilung Wasser, Boden, Kreislaufwirtschaft
Pillnitzer Platz 3
01326 Dresden

Tel.: +49 351 8928 4000
Fax: +49 351 8928 4099
E-Mail: Uwe.Mueller@smul.sachsen.de

Berücksichtigung der Folgen des Klimawandels in Planungsprozessen der WSV

Benno Wachler
Dörthe Eichler
Janka Schneider
Simon Bruns

Stichworte: Verkehrsinfrastruktur, Klimaanpassung, Planungsprozesse, Bundeswasserstraßen

1 Einführung

Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), als nachgeordnete Behörde des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV), ist für den Betrieb, den Erhalt sowie den Aus- und Neubau der Bundeswasserstraßen in Deutschland verantwortlich. Mit Blick auf die langen Nutzungsdauern der Verkehrsinfrastruktur von bis zu 100 Jahren und den aufgrund des Alters der Infrastruktur zeitnah anstehenden Investitionsentscheidungen sind schon heute die Folgen von Klimaänderungen in die Planungsprozesse im Rahmen der gesetzlichen Vorgaben und Strategien der Bundesregierung einzubeziehen.

Mit dem Beschluss der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) im Jahr 2008 hat die Bundesregierung einen politischen Handlungsrahmen für die Anpassung an die Folgen des Klimawandels in Deutschland geschaffen. Mit der neuen DAS von 2024 wurde eine vorsorgende ressortweite und verpflichtende Klimaanpassungsstrategie erarbeitet.

Während die DAS den politischen Handlungsrahmen für die Klimaanpassung der WSV darstellt, wurde mit dem am 01.07.2024 in Kraft getretenen Bundes-Klimaanpassungsgesetz (KANg) – hier § 8 (Berücksichtigungsgebot) Absatz 1 KANg – eine dezidierte Rechtsgrundlage für die Berücksichtigung der Folgen des Klimawandels bei allen Planungen und Entscheidungen der Träger öff-

fentlicher Aufgaben geschaffen. Die WSV hat daher im Rahmen ihrer Aufgaben zu prüfen, ob sich durch die projizierten Folgen des Klimawandels Beeinträchtigungen für das Vorhaben ergeben und Anpassungsmaßnahmen vorzusehen sind.

Die WSV hat eine Klimaanpassungsstrategie entwickelt, die die fachlichen Grundlagen und Standards (s. Kap. 2) sowie einen Verfahrensablauf zur Berücksichtigung der Folgen des Klimawandels in Planungsprozessen (Workflow WSV-Klimaanpassung, s. Kap. 3) definiert und konsistent zu den aktuell geltenden Normen des DIN¹ und den Technischen Leitlinien für die Sicherung der Klimaverträglichkeit von Infrastrukturen der Europäischen Kommission (EU, 2021) ist.

2 Fachliche Grundlagen und Standards der Klimaanpassungsstrategie der WSV

Im Rahmen der Klimaanpassung legt die WSV Standards fest, die sich insbesondere auf die Zugrundelegung von Klima- bzw. Emissionsszenarien, die Datengrundlage, den Umgang mit Unsicherheiten (Bandbreiten) von Klimaprojektionen, Bewertungskriterien für Anpassungsmaßnahmen (inkl. Ansätze zur Vermeidung von Fehlinvestitionen, geeigneter Zeitpunkt der Umsetzung einer Anpassung) und die Dokumentation von Datengrundlagen und Anpassungsentscheidungen beziehen.

2.1 Klima- bzw. Emissionsszenarien und Modellgeneration

Die Festlegung eines Emissionsszenarios als Grundlage für die Klimaanpassung sollte einen Kompromiss zwischen Wahrscheinlichkeit und Risikominimierung darstellen. Dabei lässt sich die Wahrscheinlichkeit des Eintretens bestimmter Emissionsszenarien aufgrund der unsicheren zukünftigen politischen Entscheidungen (zum Klimaschutz) und wirtschaftlichen Entwicklungen (v.a. auf globaler Ebene) kaum bewerten. Bei der Klimaanpassung von Infrastruktur an den Bundeswasserstraßen kommt der Risikominimierung hingegen eine besondere Bedeutung zu, da es sich um kritische Infrastruktur

¹ DIN, 2020; DIN, 2021

mit langen Planungs- und Bauzeiten handelt, bei der i.d.R. ein hohes Schutzniveau angestrebt wird bzw. die Risikobereitschaft bzgl. Einschränkung oder Ausfall der Funktionsweise oder sogar Versagen sehr gering ist. Daher wird bei der Klimaanpassung der WSV ein Klimaertriebsszenario zugrunde gelegt, das dem Vorsorgeprinzip der DAS am nächsten kommt (Hochemissionsszenario).

Da die Projektionen globaler Klimamodelle nicht unmittelbar für die Ableitung von Anpassungsmaßnahmen (auf regionaler bzw. lokaler Ebene) geeignet sind, werden der Klimaanpassung der WSV die aktuellsten Regionalisierungen für Mitteleuropa zugrunde gelegt, für die ein ausreichend großes Modellensemble zur Verfügung steht (aktuell RCP²-Szenarien der CMIP5³-Generation).

2.2 Datengrundlagen

Entscheidende Voraussetzung für die systematische Berücksichtigung der Folgen des Klimawandels in Planungsprozessen ist eine aktuelle und flächendeckende Datengrundlage von Klimaprojektionen der erforderlichen Bemessungsgrößen, die eine quantitative und lokale Bewertung der Betroffenheit ermöglicht. Diese Datengrundlage wird durch den DAS-Basisdienst „Klima und Wasser“ (kurz DAS-Basisdienst) bereitgestellt, ein seit Ende 2020 bestehender Klimadaten- und -beratungsdienst der Bundesoberbehörden im Ressort des BMDV.

2.3 Umgang mit Bandbreiten von Klimaprojektionen

Die Projektionen sind mit erheblichen Unsicherheiten verbunden, welche sich in den großen Bandbreiten auch innerhalb eines Klimaertriebsszenarios widerspiegeln. Für Planungs- und Entscheidungsprozesse ist durch den Planer eine Auswahl konkreter Werte (sog. Perzentile) aus dieser Bandbreite zu treffen. Die WSV arbeitet insbesondere mit dem 15. Perzentil, 50. Perzentil (Median) und 85. Perzentil (Abb. 1).

² Representative Concentration Pathway (Repräsentativer Konzentrationspfad)

³ Coupled Model Intercomparison Project 5

Das 15. Perzentil beschreibt dabei die Untergrenze und das 85. Perzentil die Obergrenze der zentralen Bandbreite einer Klimaänderung. Mit dieser zentralen Bandbreite werden einerseits extreme Projektionen ausgeschlossen und andererseits 70 % (und damit ein Großteil) aller Projektionen abgedeckt. Der Ausschluss extremer Projektionen als Grundlage für die Klimaanpassung ist auch insofern gerechtfertigt, da gerade die Ränder bzw. extremen Bereiche von Bandbreiten von Klimamodellgeneration zu Klimamodellgeneration stark variieren.

Gemäß dem Vorsorgeprinzip der DAS sollte bei der Klimaanpassung ein jeweils ungünstiges Perzentil aus der Bandbreite zugrunde gelegt werden. Für niedrig- und mittelwasserbezogene Kennwerte ist hier z.B. das 15. Perzentil relevant, bspw. bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit/ Transportfähigkeit der Schifffahrt oder der aquatischen und auenökologischen Auswirkungen. Für hochwasserbezogene Kennwerte ist hier z.B. das 85. Perzentil relevant, bspw. zur Beurteilung von Hochwasserneutralität und Überschreitungswahrscheinlichkeiten.

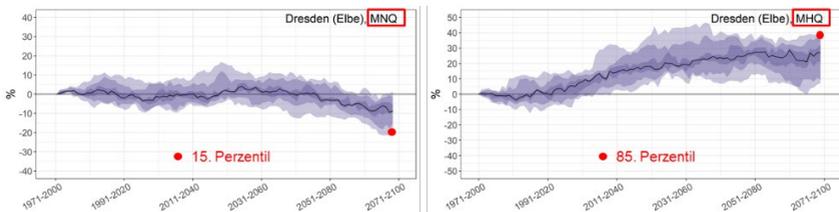


Abbildung 1: Änderungen der 30-jährigen Mittelwerte (Zeitraum gekennzeichnet durch x-Achse) des MNQ (links) sowie MHQ (rechts) am Pegel Dresden (Elbe), projiziert mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME auf Basis von 16 Klimaprojektionen unter Annahme des Szenarios RCP8.5. Unsicherheitsbereiche (von außen nach innen): 15/85 %, 25/75 %, 40/60 %, 50 % (schwarze Linie). Daten/Grafik: BfG-M2 (DAS-Basisdienst).

2.4 Bewertungskriterien für Anpassungsoptionen und Vermeidung von Fehlinvestitionen

Um den verbleibenden Unsicherheiten Rechnung zu tragen und das Risiko einer möglichen Fehlinvestition durch Überanpassung zu minimieren, werden Anpassungsmaßnahmen entwickelt, die flexibel und robust sind, auch ohne Eintreten der projizierten Klimaänderungen einen Nutzen haben (No-Regret-Ansatz) und einen Mehrwert für weitere Nutzungen aufweisen

(Win-Win-Ansatz). Klimarobuste Anpassungsmaßnahmen tolerieren Bandbreiten, sodass die Funktionsweise einer baulichen Anlage bei sehr unterschiedlichen tatsächlich eintretenden Klimaänderungen gegeben ist. Flexible Anpassungsmaßnahmen weisen eine modulare und nachsteuerbare Bauweise auf, d.h. je nachdem wie sich Klimaprojektionen zukünftig ändern oder zu welchem Grad die Folgen des Klimawandels eintreten, ist eine kostengünstige, robuste und effiziente Anpassung möglich. Vorausschauend werden dabei vergleichsweise geringe Investitionen getätigt, um die Resilienz der Systeme zu erhöhen (Low-Regret-Ansatz).

In Abhängigkeit von der potentiellen Schadenshöhe (bspw. Kosten für Neubau oder Instandsetzung bei Versagen des Bauwerkes infolge einer Klimawirkung) und dem für die Umsetzung der Anpassung erforderlichen Zeitbedarf (unter Berücksichtigung von Planungs-, Genehmigungs- und Bauzeiten) kann entschieden werden, ob eine Anpassung unmittelbar erfolgen muss bzw. wann der geeignete Zeitpunkt für die Umsetzung einer Anpassungsmaßnahme ist (Tab. 1). In manchen Fällen lassen sich Kosten durch eine frühzeitige Anpassung einsparen. In anderen Fällen wiederum können durch eine spätere Anpassung (insb. bei kurzfristiger Umsetzbarkeit) womöglich Fehlinvestitionen vermieden werden. In diesem Fall ist ein Monitoring der Klimafolgen bzw. eine regelmäßige Überprüfung aktueller Klimaprojektionen erforderlich, um den Anpassungsbedarf und -zeitpunkt ggf. neu einzuschätzen.

Tabelle 1: Bewertung des Zeitpunktes der Umsetzung einer Anpassungsmaßnahme in Abhängigkeit vom Zeitbedarf für die Umsetzung und potentielltem Schaden (in Anlehnung BMVI, 2020).

Potentieller Schaden \ Zeitbedarf für Umsetzung	gering	hoch
		Folgen irrelevant
kurz	ad hoc Maßnahmen	Fortlaufend untersuchen
lang	Risiken hinnehmen	frühzeitig präventiv handeln

Kriterien, die unabhängig vom Klimawandel eine Rolle spielen, sind Wirksamkeit, Umsetzbarkeit, Akzeptanz, Finanz-, Planungs- und Personalbedarf, Ausgaben für Betrieb und Unterhaltung sowie die Verfügbarkeit, Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit des Betriebs. Während Maßnahmen zu bevorzugen sind, die positive Nebeneffekte (Synergien) aufweisen, sollten zugleich negative Nebeneffekte (z.B. auf Schutzgüter) und Zielkonflikte mit anderen Nutzungen, Stakeholdern bzw. Akteuren ausgeschlossen werden.

3 Verfahren zur Klimaanpassung im Rahmen von Planungsprozessen der WSV

Im Rahmen von Planungsprozessen der WSV sind die Folgen des Klimawandels und seine Auswirkungen auf die Bauwerke bis zum Ende der planmäßigen Lebensdauer darzustellen und geeignete Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln. Für diese anlassbezogene Klimaprüfung und -anpassung hat die WSV einen Verfahrensablauf eingeführt. Wesentliche Schritte der WSV-Klimaanpassung sind die Festlegung der Planungsgrundlagen (insbesondere der Datengrundlage), die Klimawirkungsanalyse und – sofern eine Betroffenheit festgestellt wird – die Planung, Umsetzung und Dokumentation von Anpassungsmaßnahmen sowie ggf. die Aufstellung eines Monitoringkonzepts.

3.1 Festlegung der Planungsgrundlagen

Zunächst sind die Klimawirkungen, die auf die Funktion der Wasserstraße bzw. des Objekts wirken, (und die davon betroffenen Bemessungswerte des Objekts) zu identifizieren, um das potentielle Handlungserfordernis aufzuzeigen. Anschließend sind die Datengrundlagen zu ermitteln.

In einem ersten Schritt ist zu prüfen, ob für einzelne Wasserstraßen, Wasserstraßenabschnitte oder Bauwerke (Objekte) bereits klimaangepasste Bemessungswerte (bezogen auf spezifische Klimawirkungen) vorliegen. Die WSV hat bspw. für den zu berücksichtigenden Meeresspiegelanstieg für jede Dekade bis 2150 konkrete Werte (nach IPCC 2021) festgelegt.

Liegen keine Festlegungen zu Bemessungswerten vor, sind aktuelle Daten zu Klimaprojektionen und Klimafolgen beim DAS-Basisdienst (s. Kap. 2.2) abzufragen. Für die hydrologischen Klimawirkungen/ Kennwerte werden vom DAS-Basisdienst vorkonfigurierte Objekttyp-spezifische Standardberichte

angeboten, die eine für den Objekttyp (Wehr, Schleuse, Fischaufstiegsanlage, etc.) relevante Auswahl von Kennwerten enthalten und für eine Vielzahl von Pegeln/ Flussabschnitten kurzfristig ausgegeben werden.

Liegen keine ausreichenden, detailgenauen Daten vor, gibt der DAS-Basisdienst eine Zusammenfassung des aktuellen Kenntnisstandes zu den generellen Folgen des Klimawandels in dem angefragten Kontext/ Region heraus. Auf dieser Basis können ggf. begründete Annahmen getroffen werden.

3.2 Klimawirkungsanalyse

Bei der Klimawirkungsanalyse auf Strecken- oder Objektebene werden die lokalen Ausprägungen der klimatischen Einwirkungen (Exposition), die strecken- oder bauwerksspezifischen Eigenschaften, die die Anfälligkeit gegenüber klimatischen Einwirkungen bestimmen (Sensitivität), und die unterschiedliche Bedeutung von Strecken bzw. Objekten (Kritikalität) gemeinsam berücksichtigt.

In der Expositionsanalyse wird geprüft, ob ein eindeutiges bzw. tendenzielles Klimaänderungssignal für die betrachtete Strecke oder das betrachtete Objekt vorliegt.

In der Sensitivitätsanalyse wird geprüft, ob und in welchem Maß die relevanten Klimaänderungen die Funktionsfähigkeit des Objektes bzw. der Strecke während seiner/ ihrer Nutzungsdauer beeinflussen. Dabei ist die Sensitivität von den Eigenschaften und Anforderungen des Objekts bzw. der Strecke sowie von den Eigenschaften der Umgebung (Einzugsgebiet) abhängig.

In der Kritikalitätsanalyse wird die Bedeutung der Funktion, einer Funktionseinschränkung oder eines Funktionsausfalls des (durch den Klimawandel) beeinträchtigten Objekts oder der beeinträchtigten Strecke abgeschätzt (z.B. über das durchschnittliche Verkehrsaufkommen, transportierte Gütermengen, Alternativlosigkeit einer Strecke, bestehende Schutzgebiete).

Die Planung von Anpassungsmaßnahmen ist erforderlich, wenn das Ergebnis der Klimawirkungsanalyse zeigt, dass

- ein eindeutiges/ tendenzielles Klimaänderungssignal vorliegt,
- sich die relevanten Klimaänderungen auf die Funktionsfähigkeit der Strecke oder des Objekts auswirken (also der Wasserstraßenabschnitt oder das Objekt sensitiv gegenüber der Klimaänderung ist), und

- die Funktion, eine Funktionseinschränkung oder ein Funktionsausfall der Strecke oder des Objekts bedeutsam ist.

3.3 Planung von Anpassungsmaßnahmen

Hat die Klimawirkungsanalyse eine Betroffenheit des zu planenden Bauwerks ergeben, wird geprüft, ob infolge des Klimawandels die Notwendigkeit besteht, die Bemessungswerte anzupassen. Dafür ist zunächst das ungünstigste Perzentil aus der zentralen Bandbreite zu prüfen (15. Perzentil bei niedrig- und mittelwasserbezogenen Kennwerten, 85. Perzentil bei hochwasserbezogenen Kennwerten, s. Kap. 2.3). Ist keine Anpassung an das 15. bzw. 85. Perzentil möglich oder wirtschaftlich sinnvoll, können fallweise begründet auch weniger ungünstige Perzentile in Betracht gezogen werden. Die Bandbreite der Projektionen kann zu unterschiedlichen Lösungen führen, die gegeneinander abgewogen und bewertet werden müssen.

Die zweckmäßigste Anpassungsmaßnahme ist anhand verschiedener Bewertungskriterien (s. Kap. 2.4) zu ermitteln.

Monitoringkonzepte sind in die Planung aufzunehmen, wenn die Anpassung erst später – ab dem Erreichen bestimmter Grenzwerte – erfolgen soll (s. Kap. 2.4) oder wenn die Beobachtung der Wirkung umgesetzter Anpassungsmaßnahmen (Erfolgskontrolle) die Entwicklung weiterer bzw. verbesserter Anpassungsmaßnahmen (auch an anderer Stelle) unterstützen soll.

4 Fazit

Die WSV hat ein Verfahren etabliert, mit dem systematisch die Folgen des Klimawandels im Rahmen von Planungsprozessen berücksichtigt und Anpassungsoptionen entwickelt werden, die auf die lokalen Ausprägungen des Klimawandels am Objekt und die spezifischen Anforderungen und Funktionsweisen des Objekts zugeschnitten sind. Die entwickelten Standards sind Voraussetzung für ein einheitliches, nachvollziehbares und zielorientiertes Vorgehen bei der Klimaanpassung, unterstützt durch den DAS-Basisdienst.

5 Literatur

- BMVI (2020): Norpoth M, Patzwahl R, Seiffert R, Bergmann L, Forbriger M, Hänsel S, Hatz M, Herrmann C, Hillebrand G, Lifschiz E, Lohrengel A-F, Nilson E, Ork J, Schade N, Schulz D, Stachel H und Wachler B (2020) Konzeptionelle Beiträge zur Auseinandersetzung mit der Anpassung des Bundesverkehrswegesystems an den Klimawandel - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Anpassungsoptionen (SP-107) im Themenfeld 1 des BMVI-ExpertenNetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNNM2020.2020.08
- BR (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen
- BR (2024): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, vom Bundeskabinett am 11. Dezember 2024 beschlossen
- BR (2023): Bundes-Klimaanpassungsgesetz (KANg), ausgefertigt am 20.12.2023, veröffentlicht am 22.12.2023 im BGBl. I Nr. 393.
- DIN (2020): Anpassung an die Folgen des Klimawandels – Grundsätze, Anforderungen und Leitlinien (ISO 14090:2019); Deutsche Fassung EN ISO 14090:2019, Februar 2020
- DIN (2021): Anpassung an den Klimawandel – Vulnerabilität, Auswirkungen und Risikobewertung (ISO 14091:2021); Deutsche Fassung EN ISO 14091:2021, Juli 2021
- EU (2021): Notices from European Union Institutions, Bodies, Offices and Agencies, European Commission, Commission Notice, Technical guidance on the climate proofing of infrastructure in the period 2021-2027 (2021/C 373/01)
- IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)].

Autoren:

Benno Wachler
Dörthe Eichler
Janka Schneider
Simon Bruns

Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt
Am Waterlooplatz 5
30169 Hannover

Tel.: +49 228 7090 6161
E-Mail: benno.wachler@wsv.bund.de
E-Mail: doerthe.eichler@wsv.bund.de
E-Mail: janka.schneider@wsv.bund.de
E-Mail: simon.bruns@wsv.bund.de

Hochauflösende Simulationen urbaner Sturzfluten auf unterschiedlichen räumlichen Skalen in Berlin

Franziska Tügel,
Yangwei Zhang,
Lennart Steffen,
Katrin Nissen,
Uwe Ulbrich
Reinhard Hinkelmann

Stichworte: urbane Sturzfluten, hochauflösende Simulationen,
robustes 2D Flachwassermodell, räumliche Skalen,
hms⁺⁺

1 Einführung

Die Intensität und Häufigkeit von Starkregenereignissen, die Sturzfluten auslösen können, hat in den letzten Jahren an vielen Orten der Welt zugenommen, was z.T. zu verheerenden Folgen für die Bevölkerung, die Infrastruktur (siehe z.B. Abb. 1) und die Umwelt geführt hat. Der Klimawandel und zunehmende Urbanisierung werden diese Problematik noch verschärfen. Zu weitergehenden Informationen zu Starkregen und entsprechenden Modellierungen wird auf *Tügel (2022)* verwiesen. Maßnahmen zur Anpassung und Verstärkung der Resilienz können im Vorfeld durch hochauflösende numerische Simulationen untersucht werden, wobei auf unterschiedlichen räumlichen Skalen unterschiedliche Effekte abgebildet und unterschiedliche Maßnahmen abgeleitet werden können.

Solche hochauflösenden Simulationen wurden mit dem 2D Flachwassermodell hms⁺⁺ auf drei unterschiedlichen räumlichen Skalen in Berlin durchgeführt: Stadtskala ~1000 km² mit Zelllängen $\Delta x = 15 - 6$ m, Bezirksskala ~100 km² mit $\Delta x = 10 - 5$ m und Quartierskala ~10 km² mit $\Delta x = 5 - 2$ m.



Abbildung 1: Gleimtunnel in Berlin nach Starkregen

2 Methoden und Daten

2.1 Starkregenereignisse

Wir haben unterschiedliche Starkregenereignisse untersucht: reale Ereignisse aus der Vergangenheit, Ereignisse mit statistischen Wiederkehrzeiten aus der Ingenieurpraxis (z.B. 100 Jahre nach KOSTRA-DWD-2020), Ensemble-Simulationen sowie zukünftige Extremereignisse des Klimamodells MIROC5 dynamisch regionalisiert mit COSMO-CLM. Die räumlichen Verteilungen des Niederschlags sind konstant oder variabel entsprechend der räumlichen Auflösung des Regionalmodells, während die zeitlichen Auflösungen auf Beobachtungen, Klimasimulationen oder etablierten Modellniederschlägen (z.B. Euler Typ 2) basieren.

2.2 Flachwassermodell

Die numerischen Simulationen wurden mit dem 2D Flachwassermodell hms⁺⁺ durchgeführt, das seit mehreren Jahren am Fachgebiet Wasserwirtschaft und Hydrosystemmodellierung der TU Berlin entwickelt wird. hms steht für Hydroinformatics Modelling System und ⁺⁺ kennzeichnet, dass es sich um die Weiterentwicklung des Vorgängermodells hms in C++ handelt.

Das Modell berechnet Wasserstände, Überflutungsflächen, Fließgeschwindigkeiten und Abflüsse. Neben der Bodenreibung nach Manning können

raum- und zeitvariable Niederschläge und Infiltration berücksichtigt werden. Des Weiteren können andere Modelle wie das Kanalnetzmodell SWMM durch ein Plugin angebunden werden.

Das Modell basiert auf einer zellzentrierten Finite-Volumen Methode im Raum und einer expliziten Zeitdiskretisierung (Euler-vorwärts). Die Robustheit des Modells wird sichergestellt durch: Harten-Lax-van-Leer (HLLC) Riemann Löser, verschiedene Rekonstruktionsschemata (u.a. TVD Schema mit zweiter Ordnung Genauigkeit im Raum), Sicherstellung der ‚Well-balanced‘ bzw. C-Eigenschaft und einer punkt-impliziten Behandlung des Reibungsterms.

Das Modell ist u.a. durch Parallelisierungs- und Vektorisierungstechniken Laufzeit optimiert und auf Hochleistungsrechnern einsetzbar, was für diesen Beitrag erforderlich war, da die hochauflösenden Simulationen auf Gitternetzen mit bis zu einigen zehn Millionen Zellen durchgeführt wurden.

Zu weitergehenden Informationen zum Open Source Modell wird auf *Steffen et al. (2024)* und Gitlab (<https://git.tu-berlin.de/wahyd/hmspp/hms>) verwiesen.

2.3 Modellaufbau

Für die Simulationen werden weiter ein Digitales Geländemodell (DGM), ein digitales Landnutzungsmodell (DLM), ein Stadtmodell mit Informationen zu Gebäuden, Bodenkennwerte und Versiegelungsgrade sowie weitere Informationen zu urbaner Infrastruktur (z.B. Brücken) benötigt, die dem Geportal Berlin (/ATKIS@DGM, /ALKIS Nutzung Flächen, /ALKIS Gebäude), dem Umweltatlas Berlin (/Bodenkundliche Kennwerte 2015, /Versiegelung 2021) und Open-StreetMap entnommen werden können. Aus der Landnutzung kann auf die Reibungsbeiwerte nach Manning und aus den Bodenkennwerten in Verbindung mit den Versiegelungsgraden kann auf die Infiltrationsraten geschlossen werden.

3 Simulationsergebnisse

3.1 Stadtskala

In der Bachelorarbeit von Frau *Pia Gronau (2023)* wurden erstmalig Berlinweite hochauflösende 2D Simulationen zu starkregeninduzierten Überflu-

tungen durchgeführt, wobei verschiedene Vereinfachungen (u.a. keine Infiltration, kein Kanalnetz) zugrunde gelegt wurden. Das Modellgebiet umfasst ca. 900 km², und es wurden verschiedene quadratische Gitternetzauflösungen mit Zelllängen zwischen 15 und 6 m untersucht. Als Starkniederschlag wurde ein 100jähriges Ereignis nach KOSTRA-DWD-2020 angesetzt mit 60 Minuten Dauer, einer Niederschlagssumme von 49.3 mm, räumlich konstant, mit einer zeitlichen Verteilung nach Euler Typ 2.

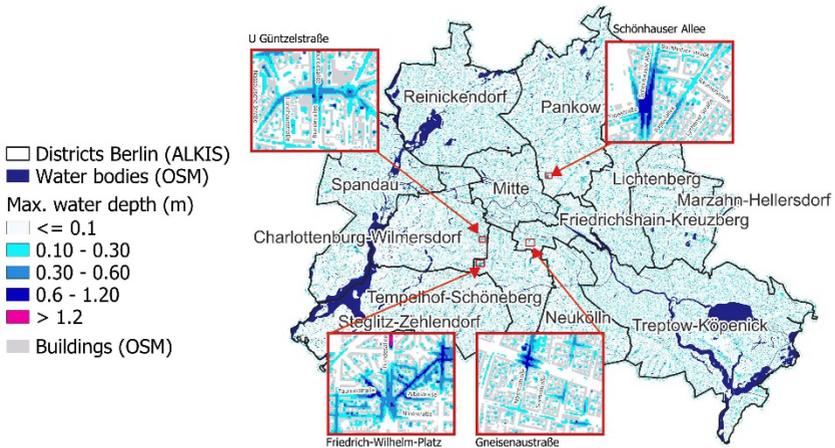


Abbildung 2: Verteilung der maximalen Wasserstände nach einem 100-jährigen Niederschlagsereignis in Gesamt-Berlin und an kritischen Bereichen

Abbildung 2 weist die maximalen Wasserstände aus, die in weiten Bereichen einige Dezimeter betragen und nur in kritischen Bereichen größer als 1 Meter sind. Je höher die räumliche Auflösung je genauer und plausibler können die auftretenden Strömungsprozesse abgebildet werden, was natürlich auch mit höherem Rechenaufwand verbunden ist. Auf 96 CPUs des HLRN (siehe Danksagung) wurden bei einer Zelllänge von 15 m ca. 4 Millionen Zellen und knapp 6 Stunden Rechenzeit benötigt, während bei einer Zelllänge von 6 m ca. 26 Millionen Zellen und ca. 76 Stunden Rechenzeit erforderlich waren.

3.2 Bezirksskala

Es wurde ein größeres Teilgebiet von Berlin ausgewählt, das mehrere Bezirke umfasst und in dem in einem früheren Projekt (SENSARE) mehrere kritische

Punkte und kritische Infrastrukturen identifiziert wurden. Das Modellgebiet umfasst 360 km² und 3.6 Millionen Zellen bei einer Zelllänge von 10 m; die Infiltration und das Kanalnetz wurden nicht berücksichtigt. Es war hier von besonderem Interesse, wie sich eine räumlich variable Niederschlagsverteilung auf die Simulationsergebnisse auswirkt. Dazu wurde ein Ensemble von 9 Niederschlagsverteilungen mit dem konvektionsauflösenden regionalen Klimamodel COSMO-CLM erzeugt, wobei die räumliche Auflösung 2.7 km und die zeitliche Auflösung 5 min betragen. Das Ensemble wurde durch einen Gebietsverschiebungsansatz ermittelt, d.h. die Ausgangsgitter des Klimamodells wurden jeweils etwas verschoben. Um sicherzustellen, dass der simulierte Niederschlag auf das gewählte Teilgebiet trifft, wurde gegebenenfalls noch eine Verschiebung der Simulationsergebnisse um wenige Kilometer vorgenommen. Es wurde eine Wettersituation nachsimuliert, die am 1. 6. 2018 zu einem 60-minütigen Starkregenereignis geführt hat. Als Antriebsdaten wurden Reanalysen (ERA5) verwendet. Die 9 Verteilungen haben alle die gleiche Auftrittswahrscheinlichkeit. Zu Vergleichszwecken wurden auch Radarmessungen von RADOLAN und ein 100jähriger Niederschlag nach KOSTRA-DWD-2020 (siehe Kap. 3.1) herangezogen.

Abbildung 3 zeigt die 9 unterschiedlichen Starkregenverteilungen. Die maximalen kumulierten Niederschläge je Zelle variieren zwischen 73.5 und 51.1 mm, die Mittelwerte zwischen 29.2 und 17.5 mm. In Abbildung 4 links sind die Radarergebnisse dargestellt, wobei der Maximalwert bei 48.5 mm und der Mittelwert bei 11.6 mm liegen; die Radardaten fallen also deutlich kleiner aus als die des Ensembles. In Abbildung 4 rechts sind die zeitlichen Entwicklungen des Wasserstandes an einem kritischen Ort, dem Friedrich-Wilhelm-Platz (Lage siehe rotes Rechteck in Abb. 3 rechts oben), dargestellt. Die zeitlichen Entwicklungen der 9 Ensemblesimulationen sind sehr unterschiedlich und die maximalen Wasserstände liegen zwischen ca. 0.8 und 1.6 m. Die Radardaten führen zu den deutlich kleinsten Wasserständen (max. ca. 0.2 m). Die KOSTRA Daten führen zu einem maximalen Wasserstand von ca. 1.4 m und werden nur von einer Ensemblesimulation übertroffen. An anderen kritischen Punkten haben die meisten maximalen Wasserstände aller Simulationen wesentlich dichter beieinander gelegen.

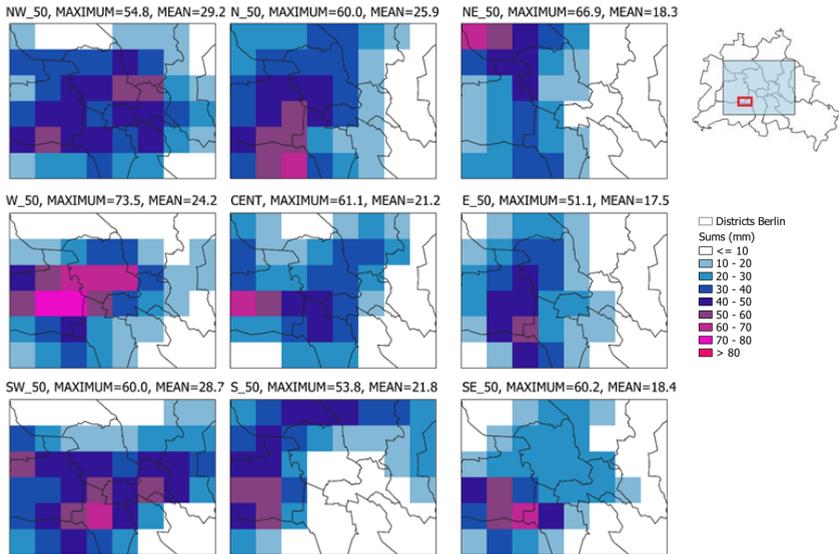


Abbildung 3: Ensemble von 9 Starkregenverteilungen (alle Angaben in mm; Rechteck in Berlin-Karte oben rechts zeigt Lage des Untersuchungsgebietes)

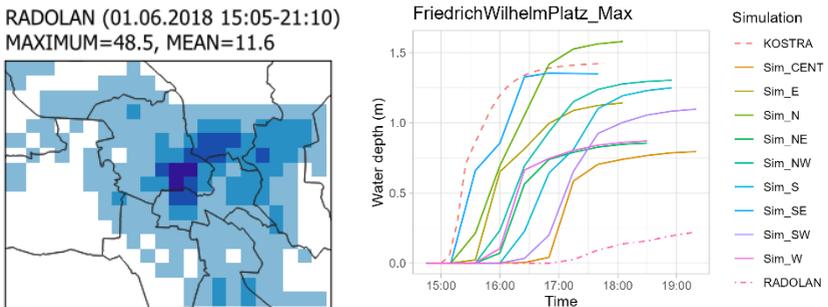


Abbildung 4: Starkregenverteilung nach RADOLAN (links, Angaben in mm) und zeitliche Entwicklung der Wasserstände am Friedrich-Wilhelm-Platz für unterschiedliche Starkregenverteilungen (rechts)

3.3 Quartiersskala

Es wurde ein Modellgebiet zwischen den Bezirken Mitte und Pankow (siehe Abb. 2, 5) ausgewählt, zu dem von den Berliner Wasserbetrieben (BWB) die

erforderlichen Daten für das Kanalnetz bereitgestellt wurden. Das Gebiet umfasst ca. 13 km² und 540.000 Zellen mit einer Länge von 5 m. Das darunter befindliche Kanalnetz ist 24 km lang und hat 2317 Rohrleitungen und 1927 Kanalschächte. Es wurden drei Starkregenereignisse über 60 min mit einer zeitlichen Verteilung nach Euler Typ 2 untersucht: ein 100jähriges Ereignis ermittelt aus *historischen* Daten von 1971 - 2000 mit 48.5 mm (Historical in Abb. 5, 6), ein 100jähriges zukünftiges Ereignis ermittelt aus einer Klimavorhersageberechnung mit COSMO-CLM für den Zeitraum 2031 - 2060 mit 69.8 mm (Future in Abb. 6) und das *extremste* Ereignis aus Klimavorhersageberechnungen mit COSMO-CLM für die Zeiträume 2031 - 2060 und 2071 - 2100 mit 106.7mm (Strongest in Abb. 5, 6).

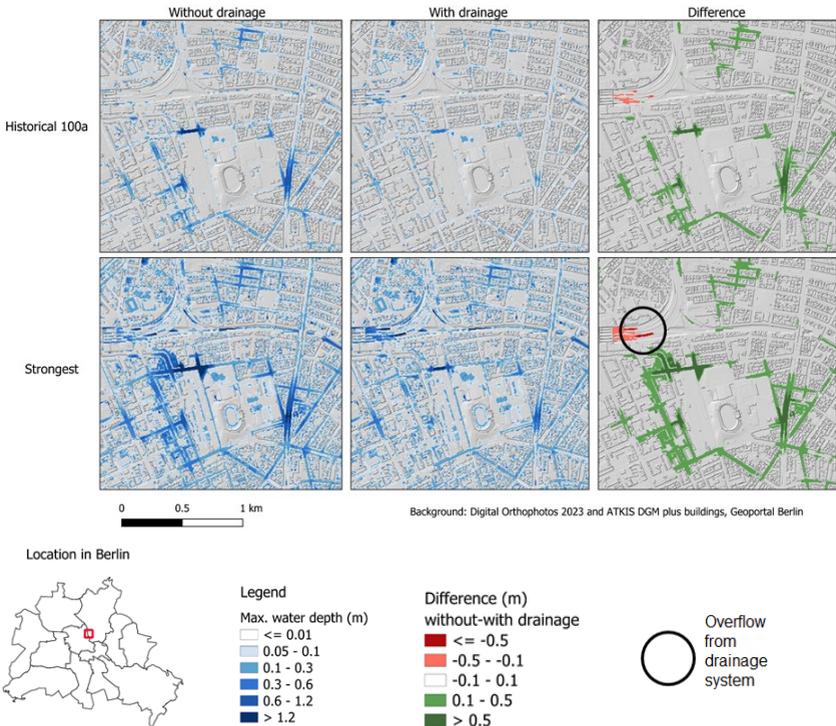


Abbildung 5: Wasserstandsverteilungen ohne und mit Kanalnetzsystem für unterschiedliche Starkregenereignisse

Abbildung 5 zeigt die Wasserstandsverteilungen für das historische und das extremste Ereignis ohne und mit Berücksichtigung des Kanalnetzes. Das Kanalnetz kann hier in beiden Fällen recht viel Regenwasser aufnehmen, was durch deutlich weniger blau beim Vergleich ohne (Abb. 5 links) und mit Kanalnetz (Abb. 5 Mitte) zu sehen ist, und an einer Stelle läuft das Kanalnetz über. Wie erwartet sind die Wasserstände beim extremsten Ereignis höher als beim Historischen. In Abbildung 6 sind die zeitlichen Entwicklungen der Wasserstände im Gleimtunnel mit und ohne Kanalnetz und für die drei Starkregenereignisse dargestellt. Entsprechend der kumulativen Niederschläge führt das extremste Ereignis zu den höchsten Wasserständen, gefolgt von dem zukünftigen und historischen Ereignis. Ein Vergleich unterschiedlicher Effekte und Maßnahmen hat ergeben, dass die Berücksichtigung des Kanalnetzes die maximalen Wasserstände im Gleimtunnel um bis zu 170 % reduziert hat, während die Berücksichtigung der Infiltration nur bei 33 % lag. Anpassungsmaßnahmen wie Gündächer führten zu 22 % und ein Speicherraum unter einem Park zu 16 %.

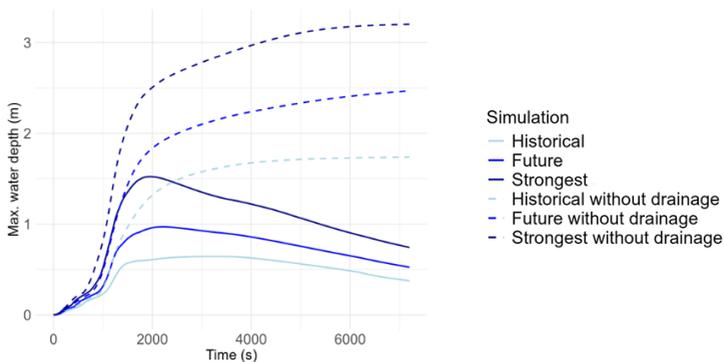


Abbildung 6: Zeitlichen Entwicklungen der Wasserstände im Gleimtunnel mit und ohne Kanalnetz und für unterschiedliche Starkregenereignisse

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit hochauflösenden 2D Simulationen zu Starkregenereignissen in Berlin konnten unterschiedliche Effekte und Anpassungsmaßnahmen auf unterschiedlichen räumlichen Skalen abgebildet werden. Die Berechnungen auf der Stadtskala liefern einen großräumigen Überblick und weisen kritische

Bereiche aus, die genauer untersucht werden sollten. Die Ensembleberechnungen auf der Bezirksskala können zu sehr unterschiedlichen maximalen Wasserständen und Auftrittszeiten führen; auf der Bezirksskala sollte die räumliche Variabilität des Niederschlages berücksichtigt werden. Im hier untersuchten Fall auf der Quartierskala hat die Berücksichtigung des Kanalnetzes einen sehr großen Einfluss auf die Reduktion der Wasserstände gezeigt, während die Auswirkungen von Infiltration, Gründächern und einem unterirdischen Speicherraum deutlich kleiner ausfielen. In zukünftigen Arbeiten werden weitere Kombinationen von grauen und blau-grünen Maßnahmen untersucht und Machine Learning (ML) Verfahren für schnelle Vorhersagen von starkregeninduzierten Überschwemmungen entwickelt.

Danksagungen

Die Arbeiten wurden durch die Einstein Research Unit *Climate and Water under Change (CliWaC)* unterstützt. Die Autor*innen bedanken sich für die Bereitstellung von Rechenzeiten auf Hochleistungsrechnern des NHR-Verbundes (Nationales Hochleistungsrechnen). Die Daten für die Kanalnetz-berechnungen wurden von den Berliner Wasserbetrieben (BWB) zur Verfügung gestellt.

5 Literatur

- Gronau, P. (2023). Hydrodynamische Niederschlags-Abfluss-Simulationen für Gesamt-Berlin und Untersuchungen zur geeigneten Gitterauflösung. Bachelorarbeit Bauingenieurwesen, TU Berlin
- Steffen, L., Zhang, Y., Birke, L. & Hinkelmann, R. (2024). Decoupling Performance and Flexibility Within hms⁺⁺: A User-Friendly Shallow Water Equations Solver with Advanced CPU Optimisations and an Extensible Design. In P. Gourbesville & G. Caignaert (Eds.), *Advances in Hydroinformatics—SimHydro 2023 Volume 2*, pp. 139–161, Springer Nature Singapore, https://doi.org/10.1007/978-981-97-4076-5_10
- Tügel, F. (2022): Flash flood modeling with a specific focus on arid regions and infiltration. Dissertation, Fakultät VI – Planen Bauen Umwelt, TU Berlin, <https://doi.org/10.14279/depositonce-17161>

Autorinnen und Autoren:

Dr. Franziska Tügel
Department of Civil Engineering and Management & Department of Water Resources
University of Twente
Drienerlolaan 5
7522 NB Enschede, The Netherlands
Tel.: +31 53 489 5830
E-Mail: franziska.tuegel@utwente.nl

Yangwei Zhang, M. Sc.
Lennart Steffen, M. Sc.
Prof. Reinhard Hinkelmann
Fachgebiet Wasserwirtschaft
und Hydrosystemmodellierung
Technische Universität Berlin
Gustav-Meyer-Allee 25
13355 Berlin
Tel.: +49 30 314 72308
E-Mail: (yangwei.zhang,
lennart.steffen,
reinhard.hinkelmann)
@wahyd.tu-berlin.de

Dr. Katrin Nissen
Prof. Uwe Ulbrich
Institut für Meteorologie
Freie Universität Berlin
Carl-Heinrich-Becker-Weg 6-10
12165 Berlin
Tel.: +49 30 838 60087/71186
E-Mail: (katrin.nissen, ulbrich)
@met.fu-berlin.de

Einfluss der räumlichen Variabilität von Bodeneigenschaften auf die Bestimmung von Versagensstellen von Küstenschutzbarrieren bei extremen Sturmfluten

Saber Abdelaal
Matthias Fritz

Stichworte: Küstenschutzbarrieren, Durchbrechen von Küstenbarrieren, Bodeneigenschaften, XBeach

1 Einleitung

Natürliche Küstenschutzbarrieren (Natural Coastal Barriers, NCB), wie beispielsweise Barriereinseln und Dünen, sind essenzielle Strukturen zum Schutz vor Sturmfluten und Küstenüberflutungen. Der Klimawandel führt zu einer Zunahme der Häufigkeit und Intensität schwerer Stürme, was eine erhebliche Erosion der NCB und ein erhöhtes Versagensrisiko zur Folge haben könnte. Bestehende numerische Modelle zur Vorhersage des Versagens von NCB bieten jedoch nur begrenzt genaue Vorhersagen zu möglichen Bruchstellen und deren Ausmaß. Diese Beobachtungen verdeutlichen den Bedarf an einem tiefergehenden Verständnis der Faktoren, die das Verhalten von NCB unter Einfluss von Sturmfluten entlang der Küste bestimmen, um Schwachstellen gezielter identifizieren zu können. Diese Studie zeigt, dass räumlich unterschiedliche Bodenpermeabilität von natürlichen Barrieren die Bodenresistenz gegen Erosion beeinflussen kann. Das Verständnis dieser Vorgänge erlaubt eine bessere Vorhersage potenzieller Bruchstellen.

2 Methodik

Die Methodik dieser Studie basiert auf der Erweiterung und Anwendung des XBeach-Modells unter Einbeziehung räumlich variabler Bodeneigenschaften.

3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Modellierung der Erosion und des Versagens von NCB sensibel auf Permeabilitätswerte reagiert und deshalb zur Reduktion von Modellunsicherheiten erforderlich ist. Unter Berücksichtigung der variierenden Permeabilität in Kombination mit unterschiedlichen Belastungen und Topo-Bathymetrie können mögliche Bruchstellen bestimmt werden.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Trotz des vorläufigen Charakters der Ergebnisse lassen sich bereits praktische Implikationen ableiten. Dazu zählt die Verringerung der Durchlässigkeit (z. B. durch Bentonit-Zusätze) und/oder die Reduktion der Porosität (z. B. durch Verdichtung) entlang natürlicher oder künstlicher Küstenschutzstrukturen (z.B. Deiche) als effektive, naturnahe Maßnahmen gegen verstärkte Küstenerosion, mögliche Bruchstellen und anschließende Überflutungen.

5 Literatur

- Abdelaal, S, Oumeraci, H., Goseberg, N. (2024): Effects of soil properties on erosion and breaching of natural coastal barriers under extreme storm surges. *Shore & Beach* 92 (4) 39-64.
- Mohr, H., S. Draper, D.J. White, and L. Cheng. 2021. The Effect of Permeability on the Erosion Threshold of Fine-Grained Sediments. *Coastal Engineering* 163 (November 1): 103813.
- van Rhee, C. 2010. Sediment Entrainment at High Flow Velocity. *Journal of Hydraulic Engineering* 136, no. 9: 572-582.

Autoren:

Dr.-Ing. Saber Abdelaal

Dipl.-Ing. Matthias Fritz

CES Consulting Engineers Salzgitter GmbH
Nordstraße 23,
D-38106 Braunschweig

CES Consulting Engineers Salzgitter GmbH
Nordstraße 23
D-38106 Braunschweig

Tel.: +49 531 31704-241

Tel.: +49 531 31704-243

Fax: +49 531 31704-199

Fax: +49 531 31704-199

E-Mail: abd@ces.de

E-Mail: frt@ces.de

Der Einfluss von klimabedingten Feucht-Trocken-Wechseln auf mineralische Oberflächendichtungen von Deichen

Lorenz Spillecke
Antje Bornschein
Alexander Knut
Ralf Thiele

Stichworte: Deichdurchströmung, Durchlässigkeitsbeiwert, dry-wetting cycle, hydraulic conductivity

1 Kurzfassung

Gegenstand dieses Beitrags ist die Analyse etwaiger Schwachstellen einer Bemessung der Oberflächendichtung eines 3-Zonen-Deich auf der Grundlage einer konstanten hydraulischen Durchlässigkeit (k_f) als Grenzkriterium. Als Folge des Klimawandels wird neben einer Erderwärmung eine Zunahme von länger anhaltenden Extremwettersituationen prognostiziert. In Folge dessen könnte es an Oberflächendichtungen von Deichen trotz Schutzschicht zu wiederholten feucht-trocken Wechseln kommen, wodurch sich die hydraulische Leitfähigkeit des Dichtungsmaterials verändern würde.

Im vorliegenden Beitrag werden für drei typische Dichtungsmaterialien die hydraulische Durchlässigkeit nach wiederholten feucht-trocken Wechseln nach DIN EN ISO 17892-11 in der Triaxialzelle ermittelt. Die Proben wurden jeweils bei 97 % und 90 % der Proctordichte aufbereitet und 5 feucht-trocken Zyklen, durch wiederholte kapillare Sättigung und anschließender schonender Ofentrocknung über die komplette Sättigungsspannweite ausgesetzt. Zusätzlich wurde an weiteren Probekörpern die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit für jeden Trocknungszyklus ermittelt.

Die hydraulische Durchlässigkeit der initial lockeren Proben ist für alle untersuchten Materialien wie erwartet höher als die der verdichteten Proben. Die

Versuche zeigen eine Erhöhung der Durchlässigkeit um bis zu 2 Zehnerpotenzen nach den feucht-trocken Wechseln. Anhand der erreichten Sättigungen je feucht-trocken Wechsel wird die Vermutung abgeleitet, dass aufgrund der feucht-trocken Wechsel die Proben auflockern und die Dichte abnimmt.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass eine Bemessung allein nach einem k_r -Wert und einer Einbaudichte möglicherweise nicht ausreichend ist, um über die gesamte Lebensdauer eines Deiches dessen Dichtheit zu gewährleisten. Eine verbesserte Materialcharakterisierung, welche dynamische Effekte mit einbezieht, könnte die Dauerhaftigkeit eines Deiches weiter verbessern. Darüber hinaus sollte der Zusammenhang zwischen Dichte und hydraulischer Leitfähigkeit noch genauer untersucht werden.

2 Einleitung

Zyklische feucht-trocken Wechsel tragen erheblich zur Veränderung der Bodeneigenschaften bei, indem sie sowohl die mechanischen Eigenschaften als auch die hydraulische Leitfähigkeit beeinflussen *Zhao et al. (2021)*, *Cuisinier et al. (2020)*.

Zahlreiche Studien haben die Auswirkungen von feucht-trocken Zyklen auf die hydraulische Leitfähigkeit untersucht. *Malusis et al. (2011)* zeigten, dass die hydraulische Leitfähigkeit nach zyklischem Trocknen und Sättigen eines Boden-Bentonit Gemisches um bis zu 4 Zehnerpotenzen ansteigt. Ähnliche Ergebnisse wurden von *Rao et al. (2000)*; *Lu et al. (2015)*; *Louati & Trabelsi et al. (2018)* und *Camillis et al. (2019)* beobachtet, die signifikante Veränderungen in den hydraulischen Eigenschaften von tonigen Böden feststellten. Im Gegensatz dazu kamen Studien wie die von *Boardman und Daniel (1996)* zum Ergebnis, dass feucht-trocken Wechsel keinen Einfluss auf die initial bestimmte hydraulische Leitfähigkeit haben. Bei hochplastischen Tönen verringert sich die hydraulische Leitfähigkeit im Laufe der Zeit aufgrund der Selbstheilung *Rayhani et al. (2008)*. Der Einfluss des ersten Zyklus ist besonders ausgeprägt, während nachfolgende Zyklen zu einer elastischen Reaktion in der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit führen *Abbas et al. (2023)*.

Besonders expansive Böden zeigen sich empfindlich gegenüber zyklischem Trocknen und Befeuchten *Bashir et al. (2015)*; *Al-Mahbashi et al. (2023)*. Der Feinkornanteil spielt ebenfalls eine wichtige Rolle *Puneet et al. (2020)*. Auch

die Plastizität und die Quelleigenschaften von Tonen sind entscheidend, da diese die Rissbildung und die Selbstheilung beeinflussen *Rayhani et al. (2008)*.

Der Grund für die Veränderung der Bodenparameter durch zyklische Befeuchtungs- und Trocknungsbelastungen ist noch nicht vollständig beschrieben. *Han et al. (2022)* und *Zhao et al. (2021)* berichteten, dass wiederholte feucht-trocken Wechsel dazu führen, dass sich Makroporen schließen und Mikroporen öffnen.

Die hydraulische Leitfähigkeit von Böden nimmt generell mit der Reduktion der verbundenen Poren während der Trocknungszyklen ab. Bei den Befeuchtungskreisläufen kann die hydraulische Leitfähigkeit jedoch teilweise wiederhergestellt werden, indem die Porenverbindung wieder aufgebaut werden *Wen et al. (2022)*. Hingegen berichten *Louati & Trabelsi et al. (2018)*, dass die Veränderung der hydraulischen Leitfähigkeit stark vom anfänglichen Verdichtungszustand des Bodens abhängt. Während der feucht-trocken Wechsel wurden lockere Proben generell dichter, was die hydraulische Leitfähigkeit verringerte, während dichte Böden lockerer wurden, was zu einer Steigerung der Leitfähigkeit führte.

Bei der Auswahl eines geeigneten Bodens für mineralische Oberflächendichtungsschichten in Deichen werden in der aktuelle Entwurfspraxis (*DWA-M 512-1 2012*) oft zwei Kriterien genannt: die hydraulischen Leitfähigkeit (k_f , kleiner als 10^{-7} m/s) und die vorgegebene Verdichtung (in der Regel 97 % der Proctordichte). In dieser Untersuchung wird erarbeitet, wieso diese statischen Grenzwerte nicht ausreichend sind, um das verwendete Bodenmaterial gegenüber klimabedingten zyklischen Effekten zu bemessen.

3 Methoden

Die folgende Untersuchung konzentriert sich auf Ansätze zur Untersuchung von Änderungen in der hydraulischen Leitfähigkeit. Dafür wurden Messungen der Wasserretentionskurve mit einem Hyprop-2-Gerät durchgeführt um die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit nach der erweiterten vereinfachten Evaporationsmethode gemäß *Peters & Durner (2008)* zu bestimmen. Die gesättigte hydraulischen Leitfähigkeit wurde in einer Triaxialzelle gemessen. Durch den Vergleich von ungesättigten und gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten wird auf Plausibilität geprüft und eine Redundanz geboten.

Drei verschiedene Böden wurden für die Untersuchungen verwendet. Alle drei Böden sind als hydraulische Oberflächendichtungen für "Drei-Zonen-Deiche" geeignet. Tabelle 1 zeigt die Bodenkategorien, die gemäß *DIN EN ISO 17892 2012* untersucht wurden.

Tabelle 1: Bodenkenngößen

	Boden A	Boden B	Boden C
Bodenart	TL / U, t, s*	TL / S, u, t, fg'	fS, ms, u, t'
Fließgrenze [Masse %]	26.50 %	29.00 %	23.70 %
Ausrollgrenze [Masse %]	12.70 %	12.60 %	18.30 %
Sand [Masse %]	56.40 %	58.00 %	62.00 %
Schluff [Masse %]	23.10 %	26.00 %	25.00 %
Ton [Masse %]	20.50 %	16.00 %	13.00 %
Proctor Dichte [g/cm ³]	1.973	2.043	1.859
Optimaler Wassergehalt	11.10 %	9.30 %	13.70 %

Vor Beginn einer Messung wurden die Proben in 250 ml großen Zylindern bei optimalem Wassergehalt hergestellt. Eine mehrschichtige Verdichtung wurde angewendet, um 97 % der Proctor-Dichte zu erreichen und damit die realen Einbaubedingungen so genau wie möglich nachzubilden. Eine zweite Probe jedes Bodens wurde mit einer geringeren Dichte von 90 % der Proctor-Dichte vorbereitet.

Die Proben wurden kapillar in einem Wasserbad gesättigt (vgl. Abbildung 1), wobei das Quellen durch Ballastieren verhindert wurde. Nach Abschluss der Sättigung wurde die Sättigungszahl berechnet.

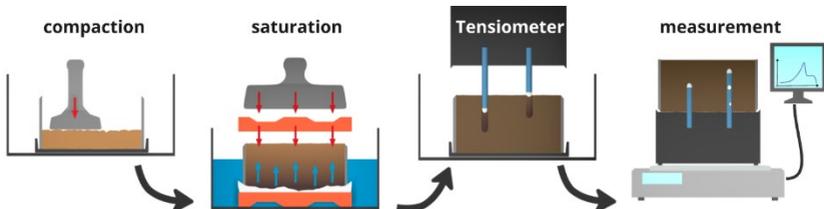


Abbildung 1: Probenvorbereitung Messung der Wasserretentionskurve

Nach jedem Trocknungszyklus bzw. jeder Messung wurde die Probe wie beschrieben erneut gesättigt. Die Methode hatte zum Ziel, den Prozess zerstörungsfrei durchzuführen. Das Verfahren wurde für insgesamt 5 Zyklen wiederholt.

Für die Ermittlung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit wurden die Bodenproben in den gleichen 250 ml großen Zylindern hergestellt, die für die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit verwendet wurden, um vergleichbare Bedingungen zu gewährleisten. Für eine Messung wurde die Probe in eine Triaxialzelle eingebaut. Die Messung wurde reproduzierbar gemäß der Norm *DIN EN ISO 17892-11 2021* durchgeführt. Für die Ermittlung der Durchlässigkeit nach Einbau und nach 5 feucht-trocken Wechseln wurde jeweils eine separate Probe hergestellt, da eine Messung die Probenstruktur stört.

4 Ergebnisse und Diskussion

Die Entwicklung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit ist in Abbildung 2 für zwei unterschiedlich dichte Proben dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl dichte als auch locker hergestellte Bodenproben nach wiederholten Befeuchtungs-Trocknungs-Zyklen signifikante Änderungen der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit aufweisen. Die anfängliche ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit der dichten Probe wird mit $7,5 \cdot 10^{-11}$ m/s gemessen und steigt nach fünf Zyklen auf $1,9 \cdot 10^{-9}$ m/s. Dieser Effekt ist bei lockeren Proben weniger ausgeprägt.

Dichte Proben erreichten im Allgemeinen initial höhere Sättigungen von etwa 97 % im Vergleich zu lockeren Proben mit 76 % und deuten daher auf eine Abhängigkeit zwischen der erreichten Sättigung durch die kapillare Sättigungsmethode und der Bodendichte hin.

Für einen besseren Vergleich sind die Maximalwerte der Sättigung und der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten in Abbildung 3 gesondert dargestellt. Durch die Beobachtung einer Reduzierung der maximalen-Sättigungsgrade nach jedem Zyklus ist eine Reduzierung der Dichte durch aufeinanderfolgende feucht-trocken Wechsel wahrscheinlich. Die Annahme, dass der Boden aufgrund wiederholter feucht-trocken Zyklen eine Verringerung der Dichte erfährt, deutet darauf hin, dass die Probe mit höherer Anfangsverdichtung nach fünf Zyklen eine ähnliche Dichte erreicht hat, wie die Probe mit niedrigerer Anfangsverdichtung vor dem ersten Zyklus.

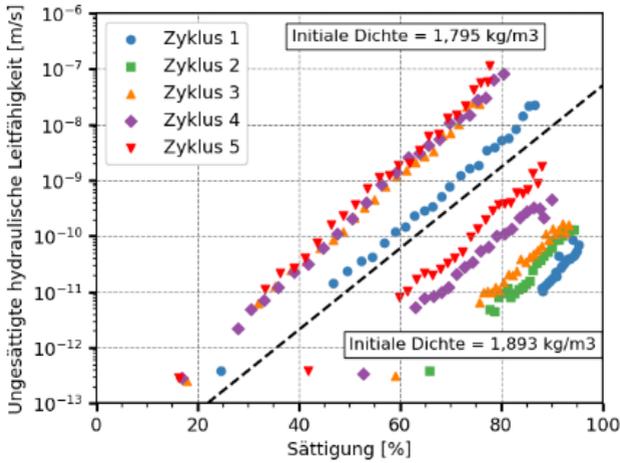


Abbildung 2: Ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit von zwei Proben mit unterschiedlicher Verdichtung. Zyklus 2 für die Probe mit geringerer initialer Dichte konnte aufgrund von Messfehlern nicht dargestellt werden.

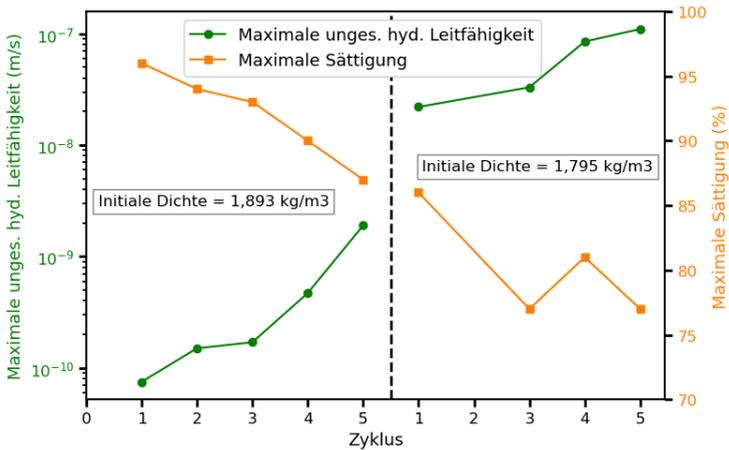


Abbildung 3: Maximale Sättigung und maximale ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit, extrahiert aus den Daten in Abbildung 2.

Abbildung 4 zeigt die gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten nach Aufbereitung einer Probe und nach wiederholten feucht-trocken Wechseln. Boden A zeigt die größte Veränderung, mit einer Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeit um etwa 2 Zehnerpotenzen nach 5 Zyklen im Vergleich zu keiner zyklischen Belastung. Boden C zeigte eine Zunahme um etwa ein-ein halb Zehnerpotenzen.

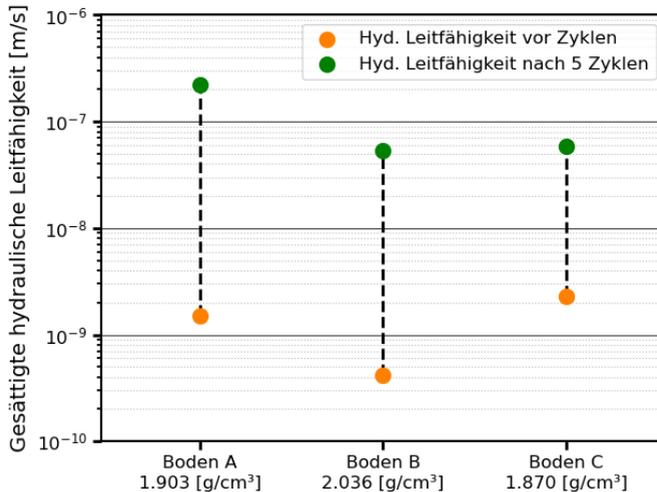


Abbildung 4: Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit gemäß DIN EN ISO 17892-11 2021 Werte für Boden A, B und C vor und nach 5 feucht-trocken Zyklen.

In dieser Studie fielen sowohl die hydraulische Leitfähigkeit als auch die Dichte aufgrund der Befeuchtungs-Trocknungs-Zyklen unter die erforderlichen Schwellenwerte nach *DWA-M 512-1 2012*. Die Integration zusätzlicher Kriterien, wie Änderungen der Porenstruktur oder Schrumpf-Quellverhalten, könnte eine umfassendere Bewertung der Bodeneignung ermöglichen.

5 Zusammenfassung

Die Studie untersuchte die Auswirkungen von feucht-trocken Wechseln auf die hydraulische Leitfähigkeit von Böden, die in Dichtungen von Deichen verwendet werden. Die Ergebnisse zeigen mehrere Erkenntnisse:

- Sowohl die ungesättigte als auch die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit steigt nach fünf feucht-trocken Zyklen um bis zu dem 150-fachen an.
- Die Beziehung zwischen Sättigung und Dichte, wie in den Ergebnissen und der entsprechenden Abbildung 3 angegeben, liefert einen starken Hinweis auf strukturelle Veränderungen innerhalb des Bodens.
- Einfachere Methoden müssen untersucht werden, um das bodenspezifische, zyklische Verhalten vorherzusagen. Diese Bemühungen würden dazu beitragen, das Design, die Dauerhaftigkeit und die Lebensdauer von Deichen unter variablen Umweltbedingungen zu verbessern,
- um Dichteänderungen quantitativ zu bestimmen, sind präzise volumetrische Messungen erforderlich. Optische Methoden, zum Beispiel nicht-invasive 3D-Volumenscans, wie von *Sharanya et al. (2021)* vorgeschlagen, werden empfohlen, um Dichteveränderungen genau zu erfassen.

6 Referenzen

- Al-Mahbashi AM, Elkady T, Al-Shamrani M (2023) The Role of Stress States on the Hysteric Behavior of Expansive Soil under Multiple Drying-Wetting Cycles. *Buildings* 13:1619.
- Abbas MF, Shaker AA, Al-Shamrani MA (2023) Hydraulic and volume change behaviors of compacted highly expansive soil under cyclic wetting and drying. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 15:486–499.
- Bashir Rashid, Sharma Jitendra, Stefaniak Natasja Halina (2015) Effect of Hysteresis of Soil-Water Characteristic Curves on Infiltration under Different Climatic Conditions.
- Boardman B. Tom, Daniel David E. (1996) Hydraulic Conductivity of Desiccated Geosynthetic Clay Liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol 122, No. 3.
- Camillis M de, Di Emidio G, Bezuijen A, Verastegui-Flores RD (2019) Hydraulic Conductivity of Modified Bentonites After Wet and Dry Cycles. In: Zhan L, Chen Y, Bouazza A (eds) *Proceedings of the 8th International Congress on Environmental Geotechnics Volume 2*. Springer Singapore, Singapore, pp 470–480.
- Cuisinier O, Masrouri F, Mehenni A (2020) Alteration of the Hydromechanical Performances of a Stabilized Compacted Soil Exposed to Successive Wetting–Drying Cycles. *J. Mater. Civ. Eng.* 32.
- DWA-M 512-1 (2012) *Dichtungssysteme im Wasserbau*
- Han Z, Zhao G, Lin J, Fan K, Zou W (2022) Influences of temperature and moisture histories on the hydrostructural characteristics of a clay during desiccation. *Engineering Geology* 297:106533.
- Malusis MA, Yeom S, Evans JC (2011) Hydraulic conductivity of model soil-bentonite backfills subjected to wet–dry cycling. *Can. Geotech. J.* 48:1198–1211.

- Louati F. & Trabelsi H., Mehrez J., Taibi S. (2018) Wet- dry cycles effect on the saturated hydraulic conductivity
- Lu H, Liu J, Li Y, Dong Y (2015) Heat Transport and Water Permeability during Cracking of the Landfill Compacted Clay Cover. *Journal of Chemistry* 2015:1–6.
- Peters A, Durner W (2008) Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties. *Journal of Hydrology* 356:147–162.
- Puneet B, Burak Boluk, Leila M, Aritra B, and Anand J. P (2020) Effect of Fines on Hysteretic Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soil.
- Rao S.M., Reddy B.V.V., Muttharam M. (2000) The impact of cyclic wetting and drying on the swelling behaviour of stabilized expansive soils.
- Rayhani M, Yanful EK, Fakher A (2008) Physical modeling of desiccation cracking in plastic soils. *Engineering Geology* 97:25–31.
- Sharanya AG, Mudavath H, Thyagaraj T (2021) Review of methods for predicting soil volume change induced by shrinkage. *Innov. Infra-struct. Solut.* 6.
- Wen T, Chen X, Shao L (2022) Effect of multiple wetting and drying cycles on the macropore structure of granite residual soil. *Journal of Hydrology* 614.
- Zhao G, Han Z, Zou W, Wang X (2021) Evolution of mechanical behaviours of an expansive soil during drying-wetting, freeze-thaw, and drying-wetting-freeze-thaw cycles. *Bull Eng Geol Environ* 80:8109–8121.

Autoren:

M.Sc. Lorenz Spillecke

Institut für Geotechnik Leipzig
Hochschule für Technik, Wirtschaft
und Kultur Leipzig
Eilenburger Straße 15
04317 Leipzig

Tel.: +49 341 3076 6636
E-Mail: lorenz.spillecke@htwk-
leipzig.de

Prof. Dr.-Ing. Antje Bornschein

Hochschule für Technik, Wirtschaft
und Kultur Leipzig
Eichendorfstraße 12
04277 Leipzig

Tel.: +49 341 3076 6227
E-Mail: antje.bornschein@htwk-
leipzig.de

Dr.-Ing. Alexander Knut

Institut für Geotechnik Leipzig
Hochschule für Technik, Wirtschaft
und Kultur Leipzig
Eilenburger Straße 15
04317 Leipzig

Tel.: +49 341 3076 6254
E-Mail: alexander.knut@htwk-
leipzig.de

Prof. Dr.-Ing. Ralf Thiele

Institut für Geotechnik Leipzig
Hochschule für Technik, Wirtschaft
und Kultur Leipzig
Karl-Liebknecht-Straße 143
04277 Leipzig

Tel.: +49 341 3076 6950
E-Mail: ralf.thiele@htwk-
leipzig.de

BIBOB - Grenzüberschreitendes Biberdamm-Management im Kontext des Klimawandels

Torsten Heyer
Aleš Vorel
Tomáš Dostál
Cordula Jost
Lukáš Poledník

Stichworte: Biber, Dämme, Management, Klimawandel

1 Motivation

Widerstandsfähigkeit von Landschaften und Ökosystemen gegenüber dem Klimawandel hängt wesentlich davon ab, wie sie auf ein extrem schwankendes Wasserdargebot reagieren. Die Grenzregion Sachsen-Tschechien ist besonders von Umweltrisiken durch Überschwemmungen und Trockenheit betroffen (häufige Hochwasser, Waldsterben, Waldbrände). Durch Biberaktivität kann eine Vergleichmäßigung des Wasserhaushalts, eine Erhöhung der Biodiversität und somit eine Steigerung der regionalen Klimaresilienz erreicht werden. Neben den positiven Effekten (z. B. Gewässerrenaturierung, Retentionserhöhung) sind jedoch auch negative (z. B. Untergrabungen, ungewollte Überflutungen) zu beachten, die dazu führen, dass die Wiederansiedlung und Populationszunahme der Biber, die in vielen Regionen Europas am Ende des 19. Jahrhunderts nahezu ausgestorben waren, zunehmend kritisch gesehen wird.

Besonderes Merkmal des Bibers ist sein Bestreben, seinen Lebensraum durch den Bau von Dämmen in Fließgewässern günstig zu gestalten. Dadurch werden die hydraulischen, hydrologischen und ökologischen Bedingungen sowohl ober- als auch unterhalb der Dämme signifikant verändert. Ob und unter welchen Bedingungen diese Veränderungen für die regionalen

Oberflächen- und Grundwasserverhältnisse erheblich sind, ist bislang nicht hinlänglich geklärt. Dadurch fehlt sowohl den Kommunen als auch den Wasser- und Umweltbehörden eine fundierte Entscheidungs- und Argumentationsgrundlage darüber, ob Biberdämme im Gewässer zu belassen oder ob Anpassungsmaßnahmen notwendig sind.



Abbildung 1: Biberdamm in der Sebnitz (Sachsen) und im Liščí potok („Fuchsbach“, Tschechische Republik); Fotos: Heyer

2 Projektbeschreibung

Im Rahmen des deutsch-tschechischen Projekts „BIBOB - Grenzüberschreitendes Biberdamm-Management im Kontext des Klimawandels“, das im Rahmen des Programms Interreg Sachsen-Tschechien 2021-2027 von der EU gefördert wird, soll aufgezeigt werden, in welchem Ausmaß Biberdämme positive Beiträge zur Minderung und Bewältigung von klimawandelverursachten Umweltrisiken in der Grenzregion leisten können.

Zu diesem Zweck kooperieren die Technische Universität Prag, die Universität für Agrarwissenschaften Prag, der Landschaftspflegeverband Sächsische Schweiz/Osterzgebirge sowie die gemeinnützige Organisation Alka Wildlife o.p.s. aus Peč unter der Leitung des Instituts für Wasserbau und Technische Hydromechanik der Technischen Universität Dresden über den Projektzeitraum 01/2025-12/2027. Als unmittelbar praxisrelevantes Ziel wird angestrebt, eine Richtlinie zum Biberdamm-Management zu entwickeln, die in der sächsisch-tschechischen Grenzregion (und evtl. darüber hinaus) angewendet werden kann. Darin sind neben hydraulischen und technischen Aspekten insbesondere auch die jeweiligen rechtlichen Rahmenbedingungen zu be-

leuchten, unter welchen besonderen Umständen z. B. Ausnahmegenehmigungen für Eingriffe in bestehende Biberdämme erteilt werden können. Themenbezogene Grundlagen für die zu entwickelnde Richtlinie sind in beiden Ländern bereits vorhanden (z. B. DWA-M 608-2, 2023 und Vorel et al., 2016), wobei die Thematik der Biberdämme dort zwar adressiert wird, jedoch nicht explizit im Fokus steht.

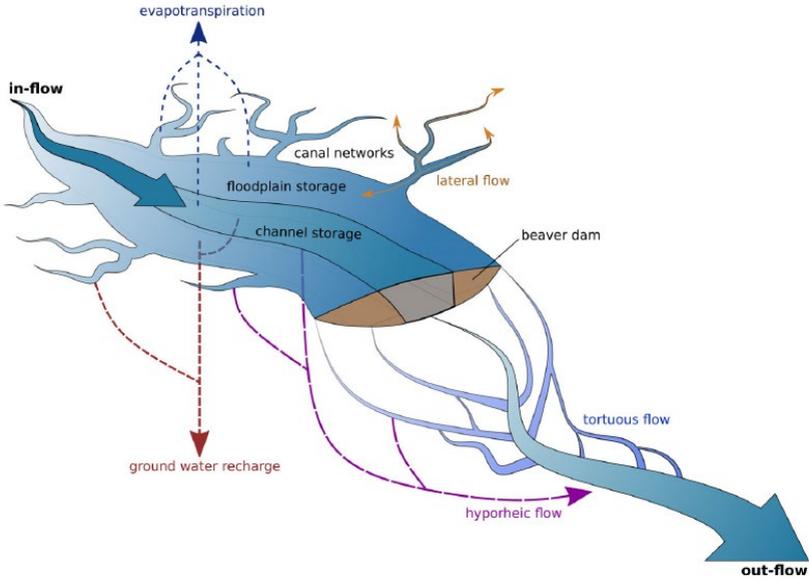


Abbildung 2: Konzeptionelles Modell zur Beschreibung der hydrologisch-hydraulischen Veränderungen und Wechselwirkungen infolge eines Biberdamms in einem Fließgewässer (Quelle: Graham et al., 2022)

Aus wissenschaftlicher Sicht wurde sich u. a. zum Ziel gesetzt, sowohl hydrologische Bilanzierungen in den Untersuchungsgebieten durchzuführen als auch die hydraulischen Interaktionen zwischen dem Oberflächen- und dem Grundwasser mittels Feldmessungen und hydronumerischer Modelle zu analysieren und zu simulieren. Weitere Fragestellungen, die im Laufe des Projekts ebenfalls beleuchtet werden sollen, sind z. B. die Stabilität von Biberdämmen im Hochwasserfall, die eng verknüpft ist mit den hydraulischen Einwirkungen aus der Über- und Unterströmung sowie der Um- und Durchströmung dieser (teildurchlässigen) natürlichen Dammbauwerke.

3 Projekt- und Untersuchungsgebiet

Die in Sachsen primär vorkommende Biberart wird als „Elbebiber“ (*Castor fiber albicus*) bezeichnet. Da der Elbebiber eher langsam fließende und stehende Gewässer bevorzugt, die mit Weichholzbeständen als Nahrungsquelle gesäumt sind, befindet sich sein Hauptverbreitungsgebiet in Sachsen im nördlichen Bereich im Mittellauf von Elbe und Mulde. Zunehmend breitet sich der Biber jedoch auch im Osten Sachsens an Neiße und Oder sowie in den südlich gelegenen Mittelgebirgsvorländern aus (NABU, 2025; Abbildung 3). In der tschechischen Republik konzentrieren sich die Bibervorkommen im Ostteil des Landes, jedoch sind auch entlang der Grenze zu Bayern (westlich) und zu Sachsen (nördlich) größere Biberpopulationen zu beobachten.

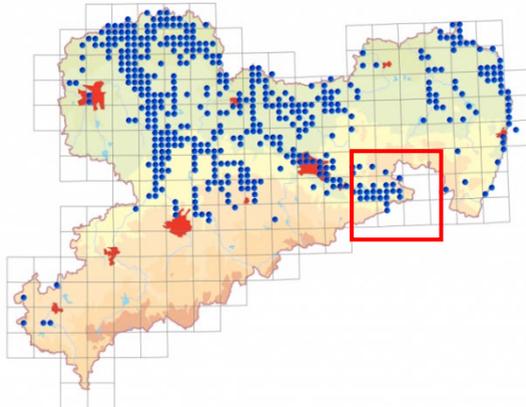


Abbildung 3: Verbreitungskarte der Bibervorkommen in Sachsen (Arbeitsstand: 02.05.2019; Grafik: Zentrale Artdatenbank des LfULG Sachsen; Quelle: NABU, 2025; modifiziert)

Unter Berücksichtigung der Programmregion für Interreg Sachsen-Tschechien 2021-2027 werden die Untersuchungen im Rahmen des BIBOB-Projekts primär in den Landkreisen Sächsische Schweiz-Osterzgebirge (Sachsen) und Děčín (Tschechische Republik) durchgeführt. Dabei stehen speziell die Dammbauwerke in den Flüssen Bahre und Sebnitz/Vilémovský potok sowie in weiteren, kleineren Fließgewässern im sogenannten „Schluckenauer Zipfel“ (auch: „Böhmisches Niederland“; siehe rotes Rechteck in Abbildung 3) im Fokus des Projekts.

4 Methodik & Ziele

4.1 Analyse des Status Quo

Mit dem Ziel, die aktuellen Verfahrensweisen im Umgang mit Biberdämmen sowie die bestehenden Herausforderungen in Tschechien und Sachsen zu beschreiben, erfolgt zunächst eine Recherche zu bestehenden

- Rechtsgrundlagen & Regelungen,
- Verantwortlichkeiten,
- technischen und nicht-technischen Möglichkeiten sowie
- Schwierigkeiten und Bedarfen

im Biberdamm-Management. Neben technischen Fragestellungen, wie z. B. der zweckmäßigen Dimensionierung und konstruktiven Ausbildung von Dammdränagen („Biber-Täuscher“), soll vor allem beleuchtet werden, unter welchen besonderen Bedingungen Ausnahmeregelungen zum Eingriff in Biberdämme evtl. vertretbar sind. Zu diesem Zweck ist ein enger Austausch mit den Erfahrungsträgern und Behörden beiderseits der deutsch-tschechischen Grenze vorgesehen.

4.2 Monitoring & numerische Simulationen

Um die Aufstau- und Retentionswirkung von Biberdämmen in Fließgewässern quantifizieren zu können, sollen ab Frühjahr 2025 Wasserstands- und Abflussmessungen an mindestens 3 ausgewählten Biberdamm-Standorten erfolgen. Diese Messkampagnen sollen weiterhin durch die drohnenbasierte Erfassung des Geländes sowie der sich ergebenden Wasserflächen und Fließwege begleitet werden, wofür u. a. auch Wärmebild- und Multispektralkameras zum Einsatz kommen sollen. Weitere Umwelt- und Wetterdaten, die von anderen Institutionen in unmittelbarer Nähe der Monitoring-Gebiete erfasst werden, sollen ebenfalls in die hydrologischen Bilanzierungen mit einfließen.

Auf Basis der verfügbaren und der im Rahmen des Monitorings zu erhebenden Daten sollen zweidimensionale, hydro-numerische Modelle für diese Gebiete erstellt werden, wobei die Modelle sowohl die Verhältnisse an der Geländeoberfläche (Höhen, Beschaffenheit) als auch im Untergrund (z. B. Bodenart, Flurabstände Grundwasser) in zweckmäßiger Näherung abbilden sollen. In verschiedenen Abflusszenarien (von Niedrig- bis Hochwasser) soll damit die Interaktion von Oberflächen- und Grundwasser für Modellvarianten mit und ohne Biberdamm simuliert werden, um quantitative Aussagen

über Fließ- und Speichervorgänge speziell auch im Untergrund treffen zu können. Auf diese Weise wird erhofft, die dammverursachten Beiträge zur Erhöhung der Klimaresilienz (z. B. Grundwasseranreicherung) oder auch zu auftretenden Konflikten (Vernässung von z. B. Landwirtschaftsflächen) fundierter benennen zu können. Im Ergebnis der geplanten Tätigkeiten werden somit Hilfsmittel (Richtlinien, Modellierungsansätze) bereitgestellt, die ein datenbasiertes Management von Biberdämmen erlauben. Darüber hinaus ist die Umweltbildung für Bürgerinnen und Bürger in der Grenzregion als auch der Wissensaustausch zwischen den deutschen und tschechischen Partnern und Universitäten ein weiteres erklärtes Ziel dieser Kooperation, was durch mehrere gemeinsame Exkursionen und Workshops im Projektzeitraum erfolgen soll.

5 Danksagung

Unser Dank gilt der Europäischen Union, die das Projekt im Rahmen des Programms Interreg Sachsen-Tschechien 2021-2027 über den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung fördert. Weiterhin danken wir allen assoziierten Partnern für die Unterstützung während der Projektbeantragung und der nun folgenden Projektumsetzung.



6 Quellen

- DWA-M 608-2 (2023): Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.; Merkblatt DWA-M 608-2 „Bisam, Biber, Nutria – Teil 2: Technische Gestaltung und Sicherung von Ufern, Deichen und Dämmen“, 113 Seiten, ISBN 978-3-96862-542-3. Hefen. 2023
- Graham et al. (2022): Graham, H. A., Puttock, A. K., Elliott, M., Anderson, K., & Brazier, R. E.: Exploring the dynamics of flow attenuation at a beaver dam sequence. *Hydrological Processes*, 36(11), e14735. <https://doi.org/10.1002/hyp.14735>. 2022
- NABU (2025): NABU-Naturschutzstation Biberhof Torgau: <https://naturschutzstation-biberhof.nabu-sachsen.de/service/rund-um-den-elbebiber/> (Zugriff am 14.01.2025)
- Vorel et al. (2016): Vorel, A.; Dostál, T.; Uhlíková, J.; Korbelová, J.; Koudelka, P.: *Handbook for Coexisting with Beavers*. Czech University of Life Sciences Prague. Prag. 2016

Autoren:

Dr.-Ing. Torsten Heyer
Institut für Wasserbau und THM
Technische Universität Dresden
01062 Dresden
Tel.: +49 351 463 33874
E-Mail: torsten.heyer@tu-dresden.de

Aleš Vorel, Ph.D.
Department of Ecology
Czech University of Life Sciences (CZU)
16500 Prag-Suchdol
Tel.: +420 605 281 401
E-Mail: vorel@fzp.czu.cz

Prof. Dr.-Ing. Tomáš Dostál
Department of Landscape Water
Conservation
Czech Technical University (CTU)
16000 Prag-Dejvice
Tel.: +420 22435 4577
E-Mail: dostal@fsv.cvut.cz

Cordula Jost
Landschaftspflegeverband Sächsische
Schweiz-Osterzgebirge
01744 Dippoldiswalde
Tel.: +49 3504 629666
E-Mail: jost@lpv-osterzgebirge.de

Lukáš Poledník, Ph.D.
ALKA Wildlife o.p.s.
38001 Peč
Tel.: +420 603 598 903
E-Mail: lukas.polednik@alkawildlife.eu

Naturbasierte Lösungen zum Schutz von Fischpopulationen – Erfahrungen zur Um- setzung und innovatives Monitoring

Barbara Grüner
Walter Reckendorfer

Stichworte: Naturbasierte Lösungen, Renaturierung, PIT-Tag Monitoring

1 Naturbasierte Lösungen für unsere Flüsse

Für einen nachhaltigen Gewässerschutz und die Erreichung der Ziele der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) benötigt es ganzheitliche Konzepte.

Naturbasierte Lösungen (nature-based solutions) sind von der Natur abgeleitete, prozessbasierte Maßnahmen, durch deren Umsetzung auch andere Bereiche durch Synergieeffekte profitieren. Sie können dazu dienen, unterschiedliche Anforderungen diverser Stakeholder in Einklang zu bringen, sowie nachhaltige Verbesserungen für die Ökologie zu erreichen.

Diese Art von Renaturierung ist auch im Wasserbau zunehmend von Interesse, da es dadurch möglich wird, unterschiedliche Anforderungen, die sich aus Hochwasserschutz, Ökologie und Sozioökonomie ergeben, zu harmonisieren (Reckendorfer, Häckl, et al., 2023).

Als Nutzer der Oberflächengewässer sieht sich VERBUND als Wasserkraftbetreiber mitverantwortlich für den Erhalt einer nachhaltigen Gewässerlandschaft und damit verbunden die Umsetzung von Maßnahmen zur Erreichung der Schutzziele der Wasserrahmenrichtlinie.

In den letzten Jahren hat VERBUND an der österreichischen Donau und am Inn in Bayern und Österreich zahlreiche großräumige Renaturierungsmaßnahmen umgesetzt, um funktionale Schlüsselhabitate für die geschützten Zielarten zu schaffen bzw. wiederherzustellen (VERBUND Hydro Power GmbH, 2022). Diese sind in Abbildung 1 dargestellt.

Am Beispiel der Fischpopulationen wurden die Auswirkungen der Maßnahmen auf die Verfügbarkeit und die Vernetzung von Schlüsselhabitaten untersucht.

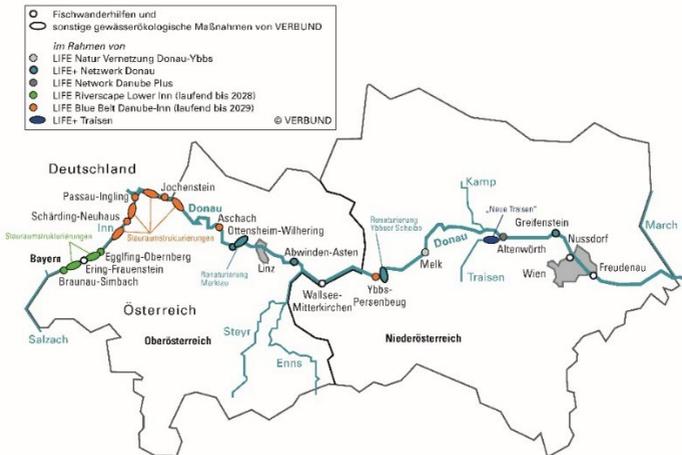


Abbildung 1 Überblick über die bereits abgeschlossenen und laufenden LIFE-Maßnahmen des VERBUND entlang der österreichischen Donau und dem Inn

2 Methodik

2.1 Umsetzung von naturbasierten Lösungen

In den letzten Jahren wurden sowohl großzügig dimensionierte naturnahe Umgehungsgewässer mit mehreren Kilometern Länge als auch Insel-Nebenarm-Strukturen in den Stauwurzeln umgesetzt. Ziel dieser naturbasierten Lösungen war neben der Herstellung der Durchgängigkeit durch die Fischwanderhilfen die Erhöhung der Habitatvielfalt, vor allem die Schaffung von geeigneten Laich- und Jungfischhabitaten (VERBUND Hydro Power GmbH, 2022).

Naturnahes Umgehungsgewässer Ottensheim-Wilhering

Die Fischwanderhilfe am Donaukraftwerk Ottensheim-Wilhering in Oberösterreich ist mit 14 Kilometern Länge die längste Fischwanderhilfe Europas. In die Fischwanderhilfe wurden die Zubringer Innbach und Aschach integriert.

Dadurch entstanden neben der Möglichkeit zur Wanderung flussauf und flussab auch großzügige donautypische Lebensräume, die durch die starke Verbauung im Hauptfluss und fehlende laterale Konnektivität selten geworden sind.

Naturnahes Umgehungsgewässer Altenwörth

Die Fischwanderhilfe Altenwörth ist ein naturnahes Umgehungsgewässer mit einer Länge von 12 Kilometern an der niederösterreichischen Donau.

Für die Fischwanderhilfe wurde ein Teil des sogenannten Krems-Kamp-Gerinnes renaturiert und die Durchgängigkeit in den linksufrigen Zubringer Kamp verbessert bzw. wiederhergestellt.

Insel-Nebenarmsystem Ering-Frauenstein

Das Insel-Nebenarmsystem Ering-Frauenstein wurde flussab des Innkraftwerks Ering-Frauenstein umgesetzt. Durch die Aufweitung entstanden strömungsberuhigte Bereiche mit geringen Wassertiefen, die wertvolles Habitat zum Laichen und für Jungfische bieten. In Kombination mit der naturnahen Fischwanderhilfe am Kraftwerk Ering-Frauenstein wurde die Strukturvielfalt im entsprechenden Inn-Abschnitt maximiert.

2.2 Monitoring

Neben wiederholten Elektrobefischungen kamen beim Monitoring der Fischwanderhilfe sogenannte PIT Tags (Passive Integrated Transponders) zum Einsatz.

Um die Wirkung des Insel-Nebenarmsystems in Ering-Frauenstein zu untersuchen, wurde eine Populationsmodellierung durch das IGB Berlin (Farò & Wolter, 2024b, 2024a) durchgeführt.

PIT-Tag Monitoring

PIT-Tags (Passive Integrated Transponders) sind kleine Sender, die mit einer individuellen Codierung ausgestattet sind. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit einer kontinuierlichen und individuenscharfen Beobachtung über die gesamte Lebensdauer des Fisches, sowie die Aufnahme zusätzlicher Parameter wie Größe und Gewicht bei Wiederfängen.

Die Methode erlaubt nicht nur die Prüfung der Funktionsfähigkeit von Fischwanderhilfen, darüber hinaus können Aussagen zur Wanderrichtung und Wandergeschwindigkeit, sowie der saisonalen Habitatnutzung getroffen werden.

Die Ausstattung an mehreren Fischwanderhilfen ermöglicht darüber hinaus die Analyse der Wandermuster in einem größeren Gebiet.

Die Antennen wurden nicht nur an Ein- und Ausstieg der Fischwanderhilfen installiert, sondern auch an den Mündungen der Zubringer Innbach und Aschach, um nicht nur die Wanderrichtung in der Fischwanderhilfe, sondern auch die Wanderung zwischen Zubringern und Fischwanderhilfe zu erfassen.

2.3 Populationsmodellierung

Eine quantitative Abschätzung des Potenzials der durchgeführten Renaturierungsmaßnahmen für die Leitfischarten Äsche, Nase, Barbe und Aitel wurde von Farò & Wolter, (2024b, 2024a) mittels eines integrierten Modellierungsansatzes durchgeführt. Dabei wurde die Verfügbarkeit und die funktionale Vernetzung der Lebensräume analysiert und mit einer Prognose zur Entwicklung der Leitfischarten im Gebiet mittels Populationsdynamikmodell kombiniert.

3 Ergebnisse

3.1 Wanderverhalten in naturnahen Umgebungsgewässern

Anhand der untersuchten Nasen an der Fischwanderhilfe Ottensheim-Wilhering lässt sich feststellen, dass mehr als 70 % der im Unterwasser markierten Nasen aus dem Unterwasser in die Fischwanderhilfe einwandert. Aus dem Oberwasser wandern etwa 60 % der im Oberwasser markierten Nasen in die Fischwanderhilfe ein (Reckendorfer, Häckl, et al., 2023; Reckendorfer, Schabuss, et al., 2023).

Darüber hinaus lassen sich artspezifische und saisonale Wandermuster gut erkennen. **Abbildung 3** zeigt eine Analyse des Wandermusters der Barbe an der Fischwanderhilfe Ottensheim-Wilhering. Jede Zeile entspricht einem Individuum, jeder Punkt einer Detektion. Die Farben zeigen, an welcher Antenne die jeweilige Detektion erfasst wurde.

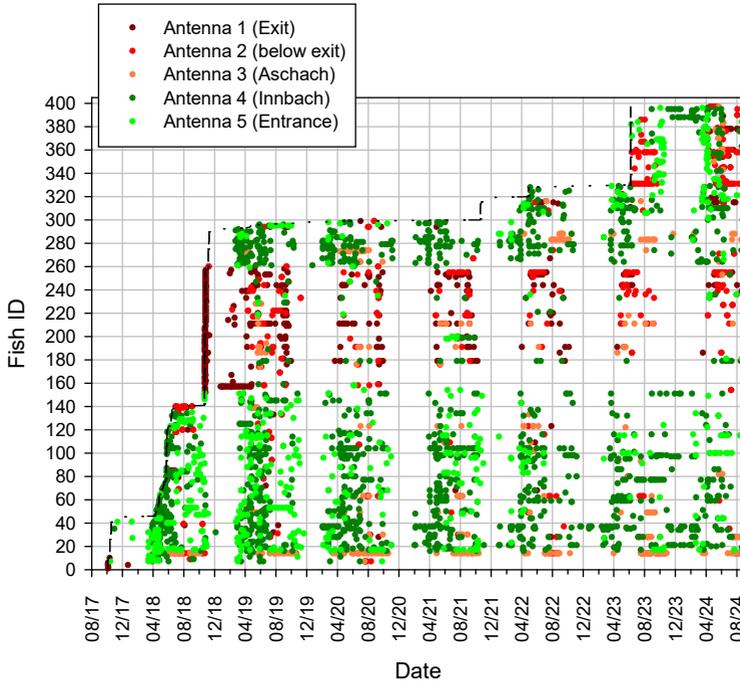


Abbildung 2 Wandermuster der Barbe (*Barbus barbus*) an der Fischwanderhilfe Ottensheim-Wilhering

Gut zu sehen ist eine saisonale Wanderaktivität. Die Detektionen starten im Frühjahr, zur Laichzeit wandern die Barbe in die Fischwanderhilfe ein. Die Detektionen treten vermehrt auf bis zum Herbst, woraus sich schließen lässt, dass die Fischwanderhilfe nicht nur zum Laichen, sondern auch als Nahrungs- und Aufwuchshabitat genutzt wird. Im Winter sind kaum bis keine Detektionen zu sehen, da sich die Barben in die tiefen Wintereinstände in der Donau zurückziehen.

Die Detektionen an den unterschiedlichen Antennen lassen darauf schließen, dass es mutmaßlich zwei Barbenpopulationen gibt, wobei eine bevorzugt aus dem Unterwasser ins Umgebungsgewässer einwandert und dieses im Herbst auch wieder Richtung Unterwasser verlässt (vorwiegend grüne Punkte) und die andere vom Oberwasser einwandert und das Umgebungsgewässer auch wieder Richtung Oberwasser verlässt (rote Punkte).

Fischbiomasse und Altersstruktur

Quantitative Elektrofischungen der Kampfmündung, welche durch den Bau der Fischwanderhilfe Altenwörth 2021 wieder an die Donau angebunden wurde, zeigten eine Erhöhung der Biomasse von etwa 50 kg/ha 2011 auf mehr als 300 kg/ha im Jahr 2022. Dadurch wurde der gute fischökologische Zustand erreicht (Grüner & Reckendorfer, 2025; Reckendorfer, Häckl, et al., 2023).

3.2 Insel-Nebenarmsysteme im Hauptstrom

Ering-Frauenstein

Die Untersuchung der Verfügbarkeit der Laich- und Aufwuchshabitate und deren funktionaler Habitatkonnektivität, sowie des Jungfischmonitorings 2023 zeigten, dass sich durch das System aus Umgehungsgewässer und Insel-Nebenarmsystem die Verfügbarkeit von Aufwuchshabitaten für die Zielarten um etwa 11 % erhöhte. Laichhabitate waren vor der Renaturierung keine vorhanden.

Eine Populationsmodellierung zeigte, dass sich durch die neu geschaffenen Habitatstrukturen die Populationen von Aitel, Nase, Barbe und Äsche selbst-erhaltend reproduzieren könnten und das System in der Lage wäre, eine Fischpopulation zu erhalten, welche das Biomasseziel für den guten fischökologischen Zustand gemäß österreichischer Bewertungsmethode erreichen würde (Farò & Wolter, 2024b, 2024a).

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Naturbasierte Lösungen eignen sich, um funktionale Schlüsselhabitate wiederherzustellen. Innovative Monitoringmethoden ermöglichen es, vertiefte Erkenntnisse über die Funktionsfähigkeit von Maßnahmen zu erhalten und auf Basis fundierter Ergebnisse effiziente und zielgerichtete Maßnahmenkombinationen zur Zielerreichung der WRRL und der Naturschutzrichtlinien zu identifizieren.

Erfolgreiche Maßnahmen zeichnen sich durch die Wiederherstellung von Schlüsselhabitaten, sowie die funktionale Konnektivität dieser Habitate aus.

VERBUND setzt weiterhin auf naturbasierte Lösungen, mit den LIFE Projekten LIFE Riverscape Lower Inn und Blue Belt Danube Inn sollen neben großräumigen Renaturierungsmaßnahmen an Ufern, Altwässern und Zubringern auch die verbliebenen Fischwanderhilfen an Donau und Grenzzinn umgesetzt werden, um die Durchgängigkeit zu erreichen. Im Projekt LIFE WeNatureEnns wird die Enns auf einer Länge von etwa 20 km durch Aufweitungen und Initialstrukturen renaturiert.

Die Fischwanderhilfen Ottensheim-Wilhering (LIFE+ Netzwerk Donau) und Altenwörth (LIFE Network Danube Plus) wurden bzw. werden durch das LIFE-Programm der Europäischen Union kofinanziert.

5 Literatur

- Farò, D., & Wolter, C. (2024a). Integrating Habitat Suitability and Larval Drift Modeling for Spawning-To-Nursery Functional Habitat Connectivity Analysis in Rivers. *Water Resources Research*, 60(9), e2023WR036827. <https://doi.org/10.1029/2023WR036827>
- Farò, D., & Wolter, C. (2024b). Linking functional habitat and fish population dynamics modeling to improve river rehabilitation planning and assessment. *Journal of Environmental Management*, 370, 122331. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122331>
- Grüner, B., & Reckendorfer, W. (2025). Naturbasierte Lösungen zum Schutz von Fischpopulationen. *WASSERWIRTSCHAFT*, 115(1), 36–39. <https://doi.org/10.1007/s35147-024-2443-4>
- Reckendorfer, W., Häckl, C., Schütz, C., & Schabuss, M. (2023). Naturbasierte Lösungen und Wasserkraft: Herausforderungen und Beispiele. *Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 16(10).
- Reckendorfer, W., Schabuss, M., & Petz-Glechner, R. (2023). Abwärtswanderung durch eine Fischaufstiegsanlage—Neue Erkenntnisse durch Untersuchungen mittels PIT-Tags. *WASSERWIRTSCHAFT*, 2–3, 31–34.
- VERBUND Hydro Power GmbH. (2022). *LIFE & The Danube, Renaturierungsprojekte an der Donau* (1. Aufl.).

Autoren:

Dipl.-Ing. Barbara Grüner, MSc
VERBUND Hydro Power GmbH
Europaplatz 2
1050 Wien
E-Mail: barbara.gruener@verbund.com

Dr. Walter Reckendorfer
VERBUND Hydro Power GmbH
Europaplatz 2
1050 Wien
E-Mail: walter.reckendorfer@verbund.com

Mikrobiell induzierte Korrosion (MIC) in neuem Gewand – Untersuchungen der Korrosionserscheinungen an der Schleuse Niegripp

Kristine Eberhardt
Sven-Erik Wulf
Jan Küver

Stichworte: MIC, Spundwände, Quagga-Muschel, Nachweismöglichkeiten, Süßwasser

1 Einführung

1.1 Einführung mikrobiell beeinflusste Korrosion

In vielen Fällen werden auch heute noch Mikroorganismen nicht als Ursache der Schädigung von Metallen erkannt, obwohl die schädliche Wirkung bestimmter Mikroorganismen auf z. B. Eisen lange bekannt ist. So wurde schon in den 1930er Jahren die Korrosion von Stahlteilen durch Sulfat-reduzierende Bakterien (SRB) von niederländischen Mikrobiologen erkannt (*von Wolzogen Kühr und van der Vlugt, 1934*). Grundsätzlich wird dieser Prozess, der als „MIC (microbially influenced corrosion)“ bezeichnet wird, im Bereich der Erdgas- und Ölförderung bzw. des Transports aufgrund des möglichen Schadenspotentials, sowohl ökonomisch, als auch für die Umwelt, traditionell deutlich ernster genommen als in vielen anderen Bereichen, was sich in der Menge der hier vorliegenden Beschreibungen in der Fachliteratur niederschlägt. Neuere Erkenntnisse belegen zudem eindrucksvoll, dass Mikroorganismen insgesamt eine viel stärkere Rolle in der Schadenursache bzw. beim Fortschritt von Korrosionsprozessen spielen, als bislang angenommen wurde.

Die Korrosion von Metallen wird generell durch die vorliegenden Materialeigenschaften und die Einsatz- bzw. einwirkenden Umgebungsbedingungen

maßgeblich bestimmt. Diese beeinflussen zudem die Entwicklung von Biofilmen und Mikroorganismen an Metalloberflächen, welche je nach Art durch verschiedene Mechanismen korrosionsfördernd auf das Metall einwirken können. So kann die Korrosion unter dem Einfluss von SRB an verschiedenen Metallen sehr unterschiedlich verlaufen (*Jarved, 2017*). Zudem sind auch die Umgebungsbedingungen von entscheidender Bedeutung für das Wachstum von Mikroorganismen bzw. Biofilmen. So verhindern alkalische pH-Werte sowohl die chemische Korrosion von bspw. Stählen, als auch, bei stark alkalischen Bedingungen, das Wachstum von Mikroorganismen. Ist Sauerstoff verfügbar, können bestimmte Stahlsorten chemisch korrodieren, andere bilden mit dem Sauerstoff korrosionshemmende Deckschichten, im Falle von nichtrostenden Stählen sogar vor Korrosion schützende, selbstheilende Passivschichten. Unter sauerstofffreien (anoxischen) Bedingungen ist diese Möglichkeit nicht gegeben und Biofilme, Schwefelwasserstoff oder Ablagerungen (Stoffwechselprodukte von Mikroorganismen) können vorhandene Schutzschichten unter Umständen zerstören. Die mikrobiell beeinflusste Korrosion unter anoxischen Bedingungen ist daher einer der wichtigsten Schadenverursacher im Bereich Stahlkorrosion. Hieran sind vor allem SRB beteiligt. Untersuchungen konnten zeigen, dass dabei zwischen einer direkten Aufnahme von Elektronen aus dem Eisen (EMIC) und einer indirekten Wirkung (Freisetzung von Wasserstoff über kathodische Depolarisierung mit Schwefelwasserstoff, CMIC) unterschieden werden muss (*Enning und Garrelfs, 2014*). Die Schädigung durch SRB ist besonders häufig für marine und Brackwasserstandorte beschrieben, da bei diesen der Sulfatgehalt deutlich höher ist als bspw. an Süßwasserstandorten und bei Anwendungen in der Industrie (Kühlwasserkreisläufe). Neuere Erkenntnisse belegen jedoch, dass auch diese Milieus betroffen sein können (*Fiskal et al., 2023; Wulf, 2024*), wobei neben den schon genannten SRB, auch methanbildende Mikroorganismen und Nitratreduzierende Bakterien an Süßwasserstandorten an Korrosionsschäden beteiligt sind (*Enning und Garrelfs, 2014; Fiskal et al., 2023*) und teilweise unerwartet hohe Korrosionsraten verursachen können. Daher ist davon auszugehen, dass die oben angesprochenen Prozesse bei vielen technischen Systemen (wie z. B. Biogasanlagen, Stahlwasserbauten, landwirtschaftliche Bauten, Haus- und Kühlwassersysteme, etc.) potentiell eine Rolle spielen können und daher als mögliche Schadensquelle mit berücksichtigt werden sollten.

1.2 Fallbeispiel: Spundwände Schleusenanlage Niegripp

Die Schleuse Niegripp (Baujahr 1938) befindet sich im Bereich des Wasserstraßenkreuzes Magdeburg und ermöglicht die Einfahrt von Schiffen von der Elbe in den Elbe-Havel-Kanal (EHK) und umgekehrt. An den noch aus der Bauzeit stammenden, ursprünglich beschichteten Spundwänden der Einfahrts-trichter, wurden schon in 2012 in einem Bericht der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) starke



Abbildung 1: Im Jahr 2012 dokumentierte Korrosionsschäden an Spundwänden des äußeren Vorhafens der Schleusenanlage Niegripp nach Reinigung und Vorbereitung für US-Messungen (aus BAW (2012)).

Abrostungserscheinungen (Abb. 1) vor allem im Wasserwechselbereich (Schwankung im Außenhafen resultiert aus jahreszeitlicher Schwankung des Elbpegels) festgestellt, welche mittelfristig eine Sanierung bzw. einen Neubau notwendig machen. Das Wasserstraßen-Neubauamt Magdeburg (WNA) plant nunmehr im Auftrag des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt (WSA) Elbe die Sanierung der Spundwände in den Einfahrtsbereichen der Schleuse Niegripp. Die im Planungsprozess durch das WSA geäußerte Vermutungen über das Vorliegen von mikrobiell beeinflusster Korrosion (MIC) konnten 2019 durch eine Untersuchung der Amtlichen Materialprüfungsanstalt der Freien Hansestadt Bremen (MPA Bremen) von hinter den Spundwänden gewonnen Bodenproben nicht bestätigt werden. Die Beprobung auf der Landseite (Hinterfüllung) erfolgte seinerzeit auf Grund der Annahme, dass sich hier erfahrungsgemäß eher ein sauerstoffarmes/-freies Milieu bildet, welches eine Korrosion durch Mikroorganismen begünstigt. Die im Rahmen einer erneuten Bauwerksuntersuchung im Jahr 2023 durch das WSA Elbe durchgeführten olfaktorischen Tests auf Sulfide (als Indiz für MIC) und die stark voranschreitenden Korrosionserscheinungen an den Spundwänden veranlassten das WNA Magdeburg dazu, 2024 erneut das MPA Bremen zu beauftragen, mikrobiologische Untersuchungen auf das Vorhandensein von

korrosionsfördernden Mikroorganismen – vor allem auf SRB bzw. Schwefeloxidierenden Bakterien (SOB) – durchzuführen. Die Untersuchungen fanden in Zusammenarbeit mit der BAW (Referat Stahlbau und Korrosionsschutz) statt. Ziel der Untersuchungen an MPA und BAW war, das Korrosionsrisiko durch Mikroorganismen für die Spundwände erneut abzuschätzen und bei positivem Ergebnis in Zusammenarbeit mit dem WNA Lösungsstrategien beim Neubau der Spundwände festzulegen.

2 Probenahme und Laboruntersuchungen

2.1 Probenahme an der Schleuse Niegripp

Im Gegensatz zu den Untersuchungen aus 2019 wurden 2024 nicht die hinter den Spundwänden anstehenden Böden, sondern durch einen Taucher unter Verwendung eines Meißels, wasserseitig Korrosionsprodukte ca. 1 m unterhalb des Wasserspiegels (im Außenhafen ca. auf Stand des Mittelwassers) als Proben gewonnen. Auffällig war der starke Muschelbewuchs an den Spundwänden zum Zeitpunkt der Probenahme (Mai 2024). Die verschiedenen über die Schleusenanlage verteilten Entnahmeorte können Abb. 2 entnommen werden. Die Proben für die mikrobiologischen Untersuchungen wurden vor Ort in geeignete Kunststoffdosen abgefüllt, kühl gelagert und durch Mitarbeiter der MPA Bremen abtransportiert. 14 Korrosionsproduktproben wurden für weitere chemische Untersuchungen an das Chemielabor der BAW gesandt.

2.2 Mikrobiologische Untersuchungen an der MPA Bremen

Von den gewonnenen Proben wurde an der MPA Bremen DNA extrahiert und über 16S rRNA Gen-basiertes Next-Generation-Sequencing die Gesamtpopulation an Mikroorganismen molekularbiologisch bestimmt. Durch diese Analyse sollten die auf der Spundwand vorhandenen Mikroorganismen erfasst und das dadurch potentiell vorhandene Korrosionsrisiko für die Spundwände abgeschätzt werden. Zum Vergleich wurde die gleiche Analyse an einer Sediment- und einer Wasserprobe durchgeführt.



Abbildung 2: Lage der Probeentnahmeorte an Spundwänden der Schleusenanlage Niegripp: Binnenhafen BH 1-5, Schleusenkammer 6-9, Außenhafen AH (Elbe) 10-14. Die Probeentnahmestellen für mikrobiologische Untersuchungen an der MPA Bremen sind gelb, die für chemische Untersuchungen an der BAW rot dargestellt.

2.3 Physikochemische Untersuchungen an der BAW

Im Chemielabor der BAW wurden die Korrosionsproduktproben verschiedenen quantitativen, wie auch qualitativen Untersuchungen unterzogen. Ziel war es die Proben hinsichtlich des Auftretens bestimmter „Marker“ zu untersuchen, welche auf eine Beteiligung von Mikroorganismen – besonders von Sulfat-reduzierenden und Schwefel-oxidierenden Bakterien – hinweisen. Hierzu zählen der qualitative Nachweis von (Eisen)Sulfiden durch Ansäuern des Probenmaterials (Nachweis des freigesetzten H_2S über Indikatorpapier), der Nachweis von sich unter anaeroben Bedingungen bildender Eisenminerale in den Korrosionsprodukten mittels Infrarotspektroskopie (ATR-FTIR), der Bestimmung des Gesamtschwefel- und Kohlenstoffgehaltes durch Kohlenstoff/Schwefel-Analyse (G4 ICARUS Series 2, Fa. Bruker) und einem qualitativen Test auf elementaren Schwefel durch eluieren in 4-Benzylpyridin und anschließendem Erwärmen. Besonders die Untersuchungen hinsichtlich der Schwefelverbindungen geben einen wichtigen Hinweis auf die Beeinflussung des Korrosionsgeschehens durch SRB/SOB, da deren Stoffwechselprodukte

mit dem sich auflösenden Eisen im Korrosionsprozess Verbindungen eingehen und sich im Laufe der Zeit in den Korrosionsprodukten akkumulieren und nachweisbar werden.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen

Insgesamt waren in den Proben sehr viele unterschiedliche Bakterien und Archaeen nachweisbar (Anzahl an Sequenzen von 20.303 bis 56.275), daher wurden für die weitere Bewertung nur Gattungen (oder andere Taxa) berücksichtigt, die mindestens 1% von der Gesamtpopulation ausmachten. Von diesen werden im Folgenden nur die dominantesten und für die Korrosion wichtigen Populationen genannt.

Mikroorganismen, die für eine mikrobielle beeinflusste Korrosion bekanntermaßen verantwortlich sein können, sind einer der folgenden Gruppen zuzurechnen:

- Strikt anaerobe methanogene Archaeen (z. B. *Methanobacterium*),
- Strikt anaerobe Sulfat-reduzierende Bakterien (z. B. *Desulfovibrio* sp., *Desulfopila corrodens*),
- Strikt anaerobe gärende und homoacetogene Bakterien (z. B. *Clostridien*, *Sporomusa* etc.),
- Strikt anaerobe und fakultativ anaerobe Fe(III)-reduzierende Bakterien (z. B. *Geobacter*, *Geothrix*),
- Aerobe oder Nitrat-reduzierende Eisen oder Fe(II)-oxidierende Bakterien (z. B. *Sideroxydans*),
- Aerobe acidophile und neutrophile Eisen- und Schwefel-oxidierende Bakterien (z. B. *Acidithiobacillus*; indirekte Schwefelsäurefreisetzung).

Grundsätzlich sind hierbei fast ausschließlich anaerobe Prozesse für die mikrobielle Stahlkorrosion von Bedeutung. An den untersuchten Entnahmestellen an der Schleuse Niegripp konnten keine acidophilen Mikroorganismen oder typische Schwefelsäure-bildenden Bakterien, wie sie bisher häufig in Pocken und Ausbuchtungen an Spundwänden an marinen Standorten gefunden wurden, nachgewiesen werden. Für die meisten der untersuchten Bereiche ergaben sich anhand der nachweisbaren Mikroorganismen eindeu-

tige Hinweise auf mikrobiologisch verursachte Korrosion, lediglich die Probeorte 2 und 13 entsprechen nicht diesem Bild. Die übrigen Bereiche lassen sich anhand der Mikroorganismen in einen überwiegend oxidierten Bereich (1, 6 und 14; siehe Abb. 2) und einen Bereich der wesentlich stärker chemisch reduziert ist (7, 8, 9 und 12; s. Abb. 2) unterteilen. In den oxidierten Bereichen spielt der Eintrag von Sauerstoff durch Algen eine große Rolle und führt zur Bildung von Fe(III)-Verbindungen, die zum Teil durch andere Mikroorganismen wieder reduziert werden. In den zumindest teilweise sauerstofffreien anderen Entnahmestellen sind komplett anderen Mechanismen durch SRB und methanogene Archaeen als direkte Korrosionsverursacher für die Auflösung der Spundwand verantwortlich und verstärken das Korrosionsgeschehen signifikant. Tabelle 1 gibt nach Entnahmeort gruppiert die nachgewiesenen, korrosionsfördernden Gattungen von Mikroorganismen wieder.

3.2 Ergebnisse der physikochemischen Untersuchungen

Die Ergebnisse der an der BAW durchgeführten physiko-chemischen Laboruntersuchungen bestätigen ebenfalls deutlich die Annahme, dass die auffälligen Korrosionsschäden durch starke Beeinflussung des Korrosionsgeschehen durch Mikroorganismen zurückzuführen sind. So konnten in allen Proben zum einen, meist deutlich, Sulfide nachgewiesen werden, zum anderen waren die gemessenen Gesamtschwefelgehalte (S_{gesamt}) in allen Proben mit $> 0,4$ M.% deutlich erhöht (MW: $1,121$ M.% $\pm 0,466$). Zudem konnte in allen Proben elementarer Schwefel ($S_{\text{elem.}}$) mittels BAW-Farbreaktion nachgewiesen werden. Weniger eindeutig war hingegen die Analyse mittels ATR-FTIR, wo nur an einzelnen Proben, neben den stets auftretenden Rotrostphasen Goethit und Lepidokrokit, Siderit (FeCO_3) als Marker für anaerobe Bedingungen nachgewiesen werden konnte. In Tabelle 1 sind einige der gewonnenen Ergebnisse denen der mikrobiologischen Untersuchungen gegenübergestellt.

3.3 Diskussion

Der an den Spundwänden der Schleuse Niegripp beobachtete massenweise Bewuchs mit Quagga-Muscheln ist mitverantwortlich für das Auftreten mikrobiologisch verursachter Korrosion, wie durch die MPA Bremen und die BAW nachgewiesen konnte. Durch den Bewuchs und den darunterliegenden Biofilm aus Mikroorganismen werden lokal immer wieder Zonen entstehen, in denen Sauerstoff komplett verbraucht wird und sich ein günstiges Milieu

für mikrobielle Korrosion verursachende anaerobe Bakterien (Sulfat-reduzierende Bakterien und methanogene Archaeen) einstellt. Die Fachliteratur legt zudem nahe, dass nach Etablierung erster voluminöser Korrosionsprodukte dieses Milieu auch dauerhaft erhalten bleibt und vom umgebenden Gewässer unabhängig ist (Fiskal et. al, 2023).

Tabelle 1: Vereinfachte Gegenüberstellung der Laborergebnisse der an Probematerial an der Schleuse Niegripp durchgeführten Untersuchungen gruppiert nach der Lokalisation der Entnahme (siehe Abb. 2).

Entnameort	Nachgewiesene korrosionsfördernde Mikroorganismen (nur an 1, 2, 6-9, 12-14)	Sulfid (qual.)	S _{gesamt} in M.%	S _{elem.} (qual.)
Binnenhafen (1-5)	Geothrix (1), (Nitrospira)	positiv (dtl.)	1,241 ± 0,586	dtl. positiv
Kammer (6-9)	Geothrix (6), Desulfovibrio, Desulfoporosinus (7,8,9), Methanobacterium (7), Gallionellaceae (6), (Nitrospira)	positiv (leicht)	1,196 ± 0,412	dtl. positiv
Außenhafen (10-14)	Desulfovibrio, Methanobacterium, Desulfoporosinus, Clostridien (alle 12), Paracoccus (13), Geothrix, Gallionellaceae, (Nitrospira) (alle 14)	positiv (dtl.)	0,934 ± 0,321	(dtl.) positiv

Durch die hohe Dichte an Muscheln in Kombination mit dem Algenbewuchs sind daher die Bedingungen für eine Korrosion durch Mikroorganismen im Bereich der Schleuse Niegripp besonders günstig. Während sowohl der Bericht der BAW von 2012, als auch alte Bauwerksinspektionen noch keine Hinweise auf ein massenhaftes Auftreten von Muscheln liefern, bestätigen die aktuellen Befunde die Beobachtungen einer zunehmenden Ausbreitung der invasiven Zebra- und Quaggamuschel an anderen Wasserstraßen der WSV. Inwieweit hier die in den letzten Jahren verbesserte Wasserqualität der Elbe ursächlich ist, wurde bisher nicht untersucht. Ob in Zukunft Veränderungen der Wassertemperatur an den Wasserstraßen als Folge des Klimawandels

eine weitere Ausbreitung der Quagga-Muschel begünstigen wird, ist ebenfalls nicht bekannt.

4 Lösungsansätze und Ausblick

Aufgrund der festgestellten vergleichsweise hohen historischen Abrostungsraten von $> 0,08$ mm/a in der Hauptkorrosionszone (BAW, 2012) sowie der nun nachgewiesenen, starken Beteiligung von MIC am Korrosionsgeschehen, empfiehlt die BAW, die geplanten neuen Spundwände an der Schleuse Niegripp wasserseitig mit einem Korrosionsschutzsystem 3/4 gemäß BAW-Zulassung (BAW, 2022) bis zu einer Einbindetiefe von mindestens einem Meter zu beschichten. Aufgrund der im Vergleich zur Vergangenheit deutlich geringeren Toxizität aktuell zugelassener Stahlwasserbaubeschichtungen ist davon auszugehen, dass es auf den neuen, beschichteten Spundwänden zu einer Ansiedelung von Muscheln kommen wird. Bei intakter Korrosionsschutzbeschichtung bleibt jedoch ein funktionierender Korrosionsschutz bestehen, da ein Muschelbewuchs durch Quaggamuscheln die Beschichtung nicht schädigen sollte (Haftung über Byssusfäden). Ein regelmäßiges Entfernen des Muschelbewuchses kann unter Umständen zukünftig notwendig werden, um die Bewertung des Zustandes des Korrosionsschutzes bei BWIs und das Erkennen sowie Ausbessern von Schadstellen zu ermöglichen.

Im Rahmen der Untersuchung von Korrosionserscheinungen an Wasserbauwerken der WSV sollte aus Sicht des WNA Magdeburgs zukünftig gerade im Hinblick auf Neubau- und Ersatzbaumaßnahmen das Auftreten der Quaggamuschel (und anderer Muschelarten) mitbetrachtet werden, um so eine mögliche Ursache für MIC frühzeitig erkennen zu können.

Insgesamt hat sich aus Sicht der Autorin und der Autoren eine Kombination aus mikrobiologischen und physiko-chemischen Untersuchungen an Korrosionsprodukten als zielführend erwiesen, da beide Untersuchungswege sich wechselseitig bestätigten und ergänzen können. Im vorliegenden Fall bestätigen sie zudem Beobachtungen der letzten Jahre, dass auch Süßwasserstandorte von wasserseitiger MIC betroffen sein können, hier in Zusammenhang mit stark auftretendem biologischem Bewuchs. Diese neuen Erkenntnisse sollten bei Untersuchungen im Vorfeld von geplanten Projekten mitberücksichtigt werden.

5 Literatur

- BAW (2012): Bericht über Wanddickenmessung an Spundwänden der Schleusenanlage Niegripp NVK km 0,68, A395 501 10348. Hamburg: BAW
- BAW (2022): Liste der zugelassenen* Systeme II, 34. Ausgabe, BAW, 2022
- Enning, D. & Garrelfs, J. (2014): Corrosion of Iron by Sulfate-Reducing Bacteria: New Views of an Old Problem. *Appl. Environ. Microbiol.* 80: 1226–1236
- Fiskal, A. et al. (2023): Microbially influenced corrosion and rust tubercle formation on sheet piles in freshwater systems. *Environ. Microbiol.* 25(10): 1796-1815
- Jarved, N. et al. (2017): Effect of sulphate-reducing bacteria on the microbiologically influenced corrosion of ten different metals using constant test conditions. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 125: 73–85
- von Wolzogen Kühr, C.A.H. & van der Vlugt, L.S. (1934) The graphitization of cast iron as an electrobiochemical process in anaerobic soil. *Water* 18:147–165.
- Wulf ,S.-E. (2024): Mikrobiell induzierte Korrosion - Ermittlung von Ursachen, Nachweismöglichkeiten und Vorhersage, *ForschungsXPress*, 33/2024, BAW

Autoren:

Dipl.-Ing. Kristine Eberhardt
WNA Magdeburg (SB5)
Kleiner Werder 5c
39114 Magdeburg

Dr. rer. nat. Jan Küver
Leibnitz-IWT – MPA Abt. Mikrobiologie
Paul-Feller Straße 1
28199 Bremen

Tel.: +49 351 01234 5
E-Mail: kristine.eberhardt@wsv.bund.de

Tel.: +49 421 5370870
E-Mail: kuever@mpa-bremen.de

Dipl.-Ing. Sven-Erik Wulf
Bundesanstalt f. Wasserbau (BAW)
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

Tel.: +49 721 9726-2280
E-Mail: sven-erik.wulf@baw.de

Rückbau Wehranlage Walkmühlenwehr an der Spree in Bautzen

Simon Seemüller
Andre Jurides
Nancy Ullrich

Stichworte: Wehrrückbau, naturnah, Wasserbau, Ufersicherung,
Sohlsicherung, Schneckenbuhnen

1 Veranlassung

Die Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen (LTV) erhielt den DWA-Gewässerentwicklungspreis 2019 für den Umbau der Spree zur naturnahen Flusslandschaft im innerstädtischen Raum. Eine Fortführung dieses Projektes war der Rückbau des Walkmühlenwehres an der Spree in Bautzen. Dieser Artikel geht maßgeblich auf die Bauausführung sowie in Teilen auch auf die Planung ein.

Das Walkmühlenwehr (ehem. Lindenbergwehr) befindet sich im Flusslauf der Spree bei Fluss-km 331+693 in Bautzen. Hauptaufgabe der Wehranlage war der Aufstau zur Wasserkraftgewinnung.

Die Wehranlage wurde 1834 erbaut und befand sich bis zum Rückbau in dem baulichen Zustand, dass die Funktionen des Rückstaus, der Fließgeschwindigkeitsreduzierung und dadurch die Uferstabilisierung noch gewährleistet wurden. Durch die verminderte Fließgeschwindigkeit mit Rückstauwirkung des Walkmühlenwehres und des Wehres an der alten Wasserkunst und die hohe Sedimentfracht der Spree, kam es oberhalb wie auch unterhalb der Wehranlage wiederholt zu Verlandungen. Diese mussten im Zuge von Unterhaltungsmaßnahmen immer wieder beseitigt werden.

Gemäß dem Durchgängigkeitsprogramm des Freistaates Sachsen war eine Aufwertung des Flussabschnittes mit natürlichem Fließverhalten der Spree

durch den Rückbau des Wehres geplant. Auf Grund der unmittelbaren Anlieger war eine natürliche Flussdynamik der Spree im ehemaligen Bereich des Wehres eher unerwünscht. Um die Standsicherheit der Böschungen zu gewährleisten, wurde eine Befestigung mit begrünten Steinsatz sowie übererdeten und begrünten Steinschüttungen geplant.

Durch den Rückbau wird im Bereich des ehemaligen Wehres zusätzlich eine neue Vorlandfläche geschaffen, welche am Randbereich an die Bestandsuferkante angeglichen wird. Diese wurde nach Fertigstellung der Wasserbauarbeiten, unter Berücksichtigung wasserwirtschaftlicher Belange, der Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

2 Bestehende Verhältnisse

Das Vorhaben befindet sich im Landkreis Bautzen in der Stadt Bautzen. Der Gewässerabschnitt liegt zwischen Fluss-km 331+587,0 und Fluss-km 332+274,5. Die Gewässersohle liegt zwischen 182,21 m NHN und 183,79 m NHN (DHHN2016).

Das Wehr wurde als festes Schusswehr 1834 gebaut und diente der Speisung des Mühlgrabens. Die Breite der festen Wehrkrone betrug 59 m. Rechtsseitig befand sich ein ca. 2,50 m breiter Freifluter, der als Kiesschleuse bzw. Grundablass diente. Das Wehr befand sich mehr als 20 Jahre im Eigentum des Freistaates Sachsen und hatte zum Zeitpunkt des Rückbaus keine Funktion mehr. Der Wehrkörper und die oberstromigen Ufermauern waren in einem sehr schlechten Zustand.

2.1 Hydraulik

Zur Abschätzung der Abflussverhältnisse konnte der Pegel Bautzen 1 verwendet werden. Die Daten stammen aus der hydraulischen Berechnung von *Basler und Hofmann Deutschland GmbH (2021)*.

2.2 Schutzgebiete

Der Flusslauf der Spree ist als Biotop „naturnaher Fluss“ ausgewiesen. Das Vorhaben befindet sich innerhalb des festgesetzten Überschwemmungsgebietes „Spree – Kreisgrenze Löbau-Zittau bis Talsperre Bautzen“ (§100, Abs. 3 SächsWG).

2.3 Kampfmittel

Eine große Herausforderung bei der Planung und Bauausführung war die Kampfmittelbelastung im Planungsgebiet. Eine baubegleitende Kampfmittel-sondierung war bei allen Tiefbauarbeiten notwendig.

Tabelle 1: Statistische Hauptwerte und stat. Hochwasserbemessungsabflüsse

Pegel	Durchfluss Q [m ³ /s]
MNQ	0,85
MQ	2,56
MHQ	36,90
HQ5	53,30
HQ20	84,80
HQ100	166,00

3 Planung

3.1 Gesamtgebiet

Im folgenden Kapitel werden kurz die geplanten Maßnahmen aufgezeigt, die durchaus Abweichungen von der baulichen Umsetzung haben. Hierauf wird in Kapitel 4 eingegangen. Der gesamte Planungsabschnitt umfasst circa 690 m. In dem gesamten Gebiet wurden folgende Strukturen und Maßnahmen geplant:

- 5 Sohlriegel zur Regulierung des Längsgefälles nach Abbruch der Wehranlage,
- 3 Schneckenbuhnen, 7 inklinante Buhnen sowie zahlreiche Störsteingruppen,
- Ufersicherung mittels Totfaschinen im Abschnitt zwischen Fluss-km 331+915,0 und Fluss-km 332+015,0,
- Böschungsbefestigung im Planungsgebiet entweder mittels begrüntem Steinsatz (Prallhang) oder mittels begrünter Steinschüttung (Gleithang),
- Anlage zweier Gewässerniederfahrten,
- Sicherung von Einleitstellen,
- Sicherung eines Bestandsgebäudes mittels Spritzbetonschale.

3.2 Schneckenbuhnen

Erstmals wurden diese Buhnen in der Steiermark (Österreich) durch den Wasserbaumeister Otmar Grober auf Grundlage von Beobachtungen des österreichischen Forschers Viktor Schaubberger eingebaut. Eine Schneckenbuhne ist eine besondere Form der Lenkbuhne (Abbildung 1).

Die Schneckenbuhnen in Bautzen sind dauerhaft überströmt, außer bei Niedrigwasser. Sie weisen ein Gefälle entlang der Schneckenform in Richtung Flussmitte hin auf, sodass bei steigendem Wasserstand immer mehr des Buhnenkörpers überströmt wird. Weiterhin trägt dies zur Entlastung des Prallufers bei. Die Buhnen besitzen eine Länge zwischen 22 und 24 Metern, mit einem Längsgefälle bis zu 1%. Bei steigendem Wasserspiegel werden die Buhnen immer mehr überströmt und durch die Geometrie wird die Strömung vom Ufer weggelenkt. Beidseitig der zu 2/3 der Höhe in die Gewässersohle eingebundenen Einzelsteine der Klasse HMB 300/1000 wurde ein Kolk-schutz aus Wasserbausteinen LMB 10/60 mit einer Neigung von 1:2 eingebaut. Die Schneckenbuhnen werden in die Böschung integriert und mit einem Gegenbogen gestützt. Zwischen der Buhne und dem Ufer wurde eine Niedrigwasserrinne angeordnet.



Abbildung 1 Drohnenvideo, Schneckenbuhnen im Bau an der Spree in Bautzen *BauCom* (2024)

4 Bauausführung

Die Bauausführung erfolgte von September 2022 bis Juli 2023. Es wurden zwei Bauabschnitte gebildet (Abbildung 2).



Abbildung 2 Bauabschnitte Rückbau Walkmühlenwehr IWB (2022)

Im Planungsgebiet wurden insgesamt 6 Sohlriegel aus Wasserbausteinen der Klasse HMB 300/1000 mit jeweils 5,00 m Nachbettsicherung aus Wasserbausteinen der Klasse LMB 10/60 und Tieferlegung der mittleren Steine als Niedrigwasserrinne gebaut. Der Einbau eines zusätzlichen Sohlriegels wurde bauseits entschieden, um ein Trockenfallen der Brückenfundamente bei Niedrigwasser ausschließen zu können. Oberhalb des Bahnviaduktes wurden Ufermauern zurückgebaut und eine naturnahe, flach abfallende Gewässerböschung mit einer sich anschließenden Auenlandschaft angelegt.

Im südlichen Abschnitt wurden in Absprache mit der ökologischen Baubegleitung insgesamt 7 inklinante Buhnen eingebaut sowie zahlreiche Störsteingruppen, um eine Strömungsvarianz in diesem Bereich zu schaffen (Abbildung 3).



Abbildung 3 südlicher Bauabschnitt, Endzustand *IWB* (2024)

Die bauzeitliche Gewässerniederfahrt wurde im Abschluss als dauerhafte Gewässerniederfahrt mit Schotterrasen ausgebaut.

Im nördlichen Abschnitt wurden die Böschungen als Steinsatz aus HMB 300/1000 im Prallhangbereich beziehungsweise als Steinschüttung aus LMB 10/60 im Gleithangbereich mit jeweils einer Fußssicherung aus HMB 300/1000 gebaut. Die Schneckenbuhnen wurden wie geplant eingebaut (Kapitel 3.2). Im Bereich des ehemaligen Wehres wurde die Spree durch Baustraßen in Dammlage geteilt und bauzeitlich umgeleitet (Abbildung 4).

Mit Fertigstellung des nördlichen Bauabschnittes wurde auch hier eine dauerhafte Gewässerniederfahrt angelegt.

Abschließend wurden alle Baumpflanzungen auf den neu entstandenen Flächen vorgenommen. Hierbei wurden insgesamt 37 Bäume gepflanzt, unter anderem Silberweiden (*salix albia*), Eschen (*fraxinus excelsior*), Stieleichen (*quercus robur*) und Bergahorn (*acer pseudoplatanus*).



Abbildung 4 Schneckenbuhnen und Baustraße innerhalb der Spree, Spreeumleitung bauzeitlich *BauCom* (2024)

5 Schlussfolgerungen und Fazit

Die Baumaßnahme wurde erfolgreich umgesetzt. Die endgültigen Baukosten belaufen sich auf 1,4 Mio. € brutto. Das übergeordnete Ziel, die Wiederherstellung der Durchgängigkeit mit Umsetzung der Ziele der Wasserrahmenrichtlinie, wurde erfüllt. Die Ingenieurbüro für Wasser und Boden GmbH hatte den Auftrag für die Leistungsphasen 5-9 inklusive örtlicher Bauüberwachung. Auftraggeber war die Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen, Bauausführung erfolgte durch die BauCom Bautzen GmbH.

6 Literatur

Basler & Hofmann Deutschland GmbH (2021): Hydraulische Modellierung und Szenarienberechnung, Spree, Fluss-km 329+000 bis 334+500, Bautzen.

Eta AG engineering (2021): Gewässer Spree, Ortslage Bautzen Rückbau Wehranlage Walkmühlenwehr (ehem. Lindenbergrwehr), Leistungsphase 3-4, Bautzen.

IWB (2022): Spree Ortslage Bautzen, Rückbau Wehranlage Walkmühlenwehr, Planung Leistungsphasen 5-7, Dresden.

IWB (2024): Spree Ortslage Bautzen, Rückbau Wehranlage Walkmühlenwehr, Bauoberleitung und örtliche Bauüberwachung, Leistungsphase 8, Dresden.

BauCom Bautzen GmbH (2024): Abschlussdokumentation.

Autoren:

Ansprechpartner AG:

Dipl.-Ing. Simon Seemüller
Dipl.-Ing. Andre Jurides
M.Sc. Nancy Ullrich

Birgit Holfeld

Ingenieurbüro für Wasser und
Boden GmbH
Geschäftsstelle Dresden
Wasastraße 15
01219 Dresden

Landestalsperrenverwaltung des Frei-
staates Sachsen
Betrieb Spree/ Neiße
Am Staudamm 1
02625 Bautzen

Tel.: +49 351 476942 17
+49 351 476942 16
+49 351 476942 18

Tel.: +49 3591 6711 128

E-Mail: simon.seemueller@iwb.eu
andre.jurides@iwb.eu
nancy.ullrich@iwb.eu

E-Mail: birgit.holfeld@ltv.sachsen.de

Hochwassersicherheit und Naturschutz vereint: Neue Schutzlinie und Retentions- fläche in Boizenburg

Jens Hucklenbroch
Marieke Röders
Jürgen Scheuermann

Stichworte: Hochwasserschutz, Deichrückverlegung, Sperrwerk,
Retentionsfläche, naturschutzfachliche Kompensa-
tion

1 Einführung

Ausgelöst durch diverse Hochwasserereignisse der Elbe seit 2002 haben sich die Elbeanliegerländer 2009 auf neue Bemessungshochwasserabflüsse und neue Bemessungshochwasserstände verständigt. Für den Pegel Boizenburg entspricht dies einem BHW von +11,37 m NHN.

Auf Grundlage einer durch das Staatliche Amt für Landwirtschaft und Umwelt WM (StALU WM) durchgeführten Defizitanalyse ergab sich für die etwa 5,1 km lange Hochwasserschutzlinie (HWS-Linie) zwischen Boizenburg und der Landesgrenze zu Niedersachsen ein Freiborddefizit von bis zu 0,97 m. Dieser Abschnitt wurde durch das StALU mit der höchsten Sanierungspriorität für eine Deichsanierung eingestuft.

2 Projektbeschreibung

2.1 Herangehensweise

Zur Ertüchtigung des Hochwasserschutzes in Boizenburg wurden drei verschiedene Trassierungsvarianten der HWS-Linie identifiziert und im Rahmen einer Nutzwertanalyse untersucht. Die drei betrachteten Varianten unter-

scheiden sich im Wesentlichen durch den jeweiligen Standort des neuen Suedsperrwerks. Dieser Standort beeinflusst wiederum die Linienführung und die konstruktive Gestaltung der HWS-Linie (siehe Abbildung 1).

Während die Trassierungsvariante 0 eine Erhöhung der Deichanlage innerhalb der vorhandenen Trassen sowie eine Sanierung des bestehenden Suedabschlussbauwerkes vorsieht, sind bei den Varianten 1 und 2 Deichrückverlegungen und der Neubau eines Sperrwerks in unterschiedlicher Größenordnung bzw. Lage geplant.

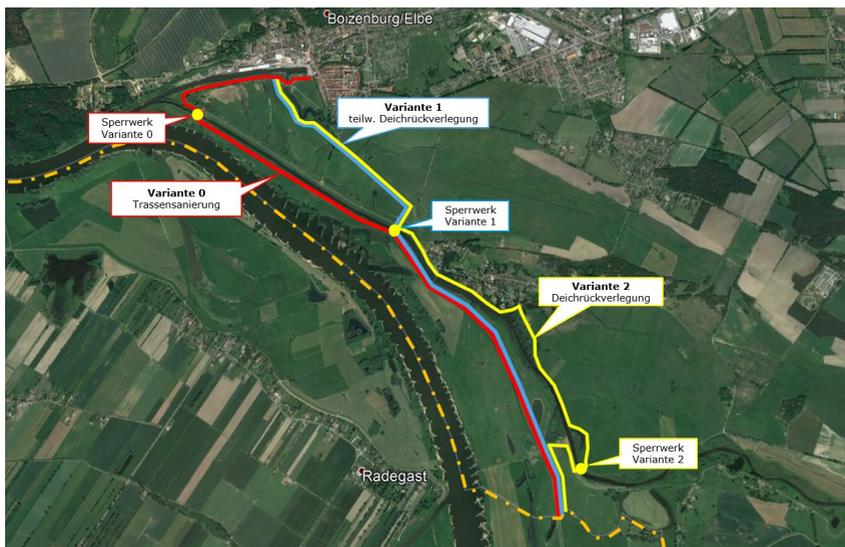


Abbildung 1: Trassierungsvarianten der Hochwasserschutzmaßnahmen im Bereich Boizenburg (Quelle: www.google.de; bearbeitet)

Um eine möglichst ganzheitliche Bewertung der Trassierungsvarianten zu ermöglichen, wurde eine Bewertungsmatrix entwickelt, die insgesamt fünf Hauptkriterien mit 13 Unterkriterien berücksichtigt (Wirtschaftlichkeit, Hochwasserschutz, Umweltverträglichkeit, öffentliche Akzeptanz und bauliche Aspekte).

Im Ergebnis wurde die Trassierungsvariante 1 als bevorzugte Trassierungsvariante empfohlen. Diese weist zwar nicht die geringsten Herstellkosten auf, zeigt aber unter Berücksichtigung der nicht monetären Kriterien (vor allem der Umweltverträglichkeit) deutliche Vorteile gegenüber den beiden anderen Varianten. Insgesamt schneidet die Variante 1 zudem bei keinem der

Unterkriterien als schlechteste Variante ab. Die zweitplatzierte Variante 2 hätte zudem erhebliche bauliche Eingriffe im Bereich der Ortschaft Gothmann erfordert, die voraussichtlich zu größeren Widerständen in der Genehmigungsphase geführt hätten.

2.2 Planungsergebnis

Im Rahmen der Vorzugsvariante ist der Neubau eines ca. 1.900 m langen Deiches (Boizenburger Altstadtdeich) zwischen dem Schöpfwerk Boizenburg und der Ortslage Gothmann geplant. Die rückverlegte Hochwasserschutzlinie schließt bei Gothmann an den rechten Elbedeich an. Zur vollständigen Kehrung des BHW wird im Bereich der Sudequerung ein neues Hochwassersperrwerk errichtet. Der etwa 2,3 km lange Elbedeich bis zur niedersächsischen Landesgrenze wird aufgrund beengter Platzverhältnisse zwischen Elbe und Sude innerhalb der bestehenden Trasse erhöht.

Durch die Deichrückverlegung wird ein rd. 100 ha großer Retentionsraum geschaffen, der zukünftig als zusätzliche Überschwemmungsgebietsfläche der Elbe zur Verfügung steht. Um die hydraulische Wirkung der Fläche nutzen zu können, wird eine Öffnung der vorgelagerten Deiche vorgesehen. Mit der Wiederanbindung der Retentionsfläche sind vor allem für Zug- und Rastvögel Aufwertungen der Habitats zu erwarten. Im Ergebnis der quantifizierenden Bewertung ergibt sich durch das Projekt eine positive Eingriffs-Ausgleichs-Bilanz von etwa 1,20 Mio. m² Kompensationsflächenequivalent (KFÄ). Das Ergebnis kann als Kompensationsüberschuss angerechnet werden.

Das Verbundprojekt „Hochwasserschutz Boizenburg“ umfasst somit insgesamt rund 5,1 km HWS-Linie, die erhöht oder zum Teil neu gebaut werden muss. Inhaltlich lässt sich das Gesamtvorhaben in die folgenden vier wasserbaulichen Vorhaben gliedern:

- Rückdeichung Hafendeich Boizenburg,
- Neubau Sude Hochwassersperrwerk,
- Erhöhung Elbedeiche Boizenburg und Mahnkenwerder,
- Öffnung der Retentionsfläche Boizenburg.

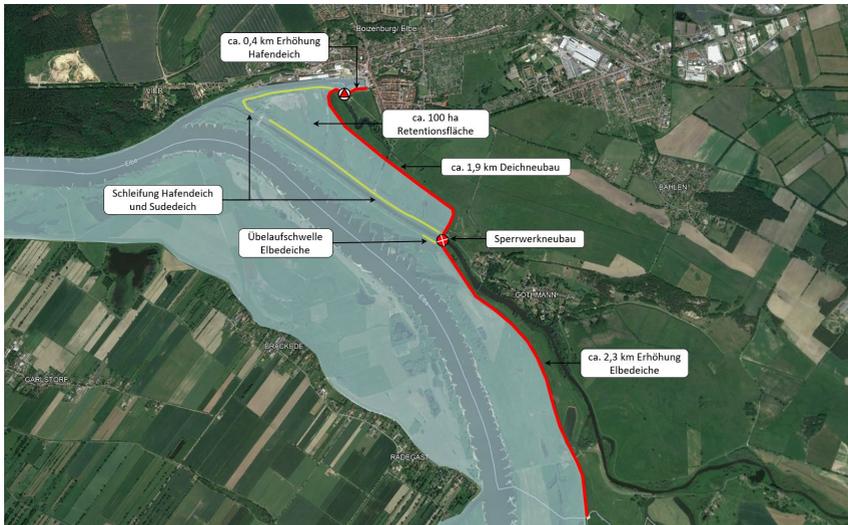


Abbildung 2: Vorzugsvariante aus der Nutzwertanalyse (Quelle: www.google.de; bearbeitet)

3 Herausforderungen

Das Projektgebiet liegt in verschiedenen Schutzgebieten (UNESCO Biosphärenreservat, FFH Gebiet, SPA-Gebiet), wodurch die Umweltverträglichkeit der geplanten Maßnahmen einen hohen Stellenwert innerhalb der Planung eingenommen hat.

Eine der wesentlichen ökologischen Herausforderungen lag darin, die erheblichen Beeinträchtigungen der geplanten Deichrückverlegung auf vorhandene Rastvogelflächen zu kompensieren. Durch die neue Deichtrasse ist eine Zerschneidungswirkung in Verbindung mit einer deutlichen Verkleinerung tradierter Rastflächen festzustellen. Als Schadensbegrenzungsmaßnahmen wurden daher der Rückbau des vorgelagerten rechten Sudedeiches sowie der parallel dazu verlaufenden Wegeverbindung auf eine Länge von ca. 2,0 km festgelegt. Eine erhebliche Beeinträchtigung der Rastvogelarten kann dadurch ausgeschlossen und der Beeinträchtigungsgrad als noch tolerierbar bewertet werden.

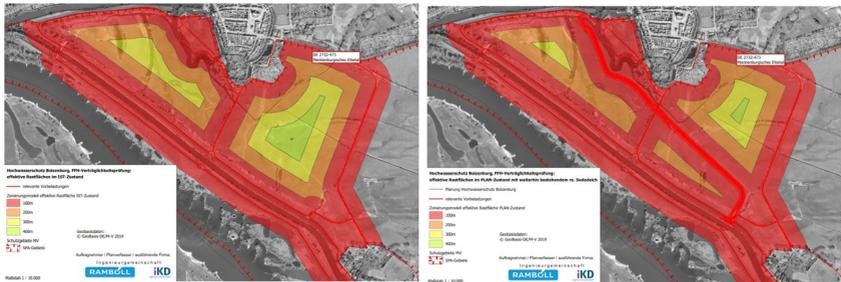


Abbildung 3: Zerschneidungswirkung des Altstadtdeiches auf die effektiven Rastflächen (links: Ist-Zustand, rechts: Plan-Zustand vor Kompensation durch Deichabtrag)

Bedingt durch die Lage des Projektgebietes in hochwertigen Schutzgebieten sind hinsichtlich des Bauablaufes mehrere naturschutzfachliche Restriktionszeiträume zu berücksichtigen. Insbesondere die Berücksichtigung von Brut- und Rastvogelzeiten sorgte z.B. dafür, dass die erforderlichen Deichbauarbeiten nur zwischen April bis Oktober durchgeführt werden können und der Gesamtbauablauf in mehrere Kampagnen gegliedert werden musste.

Als technische Herausforderung im Projekt „HWS Boizenburg“ sind unter anderem die erheblichen Bodenbewegungen (ca. 400.000 m³) zu benennen, für die ein umfangreiches Bodenmanagementkonzept erforderlich wurde.

Um erhebliche Kosten und Umweltauswirkungen durch ein Abfahren und Entsorgen des teils belasteten Altdeichmaterials zu vermeiden, soll das Bodenmaterial beim Deichneubau wiederverwendet werden. Hierfür wurde vorab die Eignung des Materials bodenmechanisch bewertet.

Die Wiederverwendung von Altdeichmaterial und die damit verbundene Öffnung der vorhandenen Hochwasserschutzlinie sorgen für einen besonderen Fokus auf den bauzeitlichen Hochwasserschutz. Da Hochwässer an der Elbe statistisch nicht auf bestimmte Zeiträume im Jahr eingeschränkt werden können, sind großräumige Schwächungen der Hochwasserschutzlinie als kritisch zu bewerten. Im Zuge des Deichneubaus wird deshalb vor der Öffnung der vorgelagerten Deichlinie zunächst ein reduzierter Querschnitt zur Kehrung bauzeitlicher Hochwasser hergestellt.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Trotz der Komplexität des Projektes und umfangreicher Umweltverträglichkeitsprüfungen wurde das Planfeststellungsverfahren ohne größere Widerstände durchgeführt und die Genehmigung des Projektes Ende 2023 erteilt.

Die Bauarbeiten für die Ertüchtigung des Hochwasserschutzes in Boizenburg sollen im Rahmen einer Vorabmaßnahme im Herbst 2025 beginnen. Ab Frühjahr 2026 werden der Deichneubau sowie der Bau des neuen Sude-sperrwerkes weitestgehend parallel durchgeführt. Nachdem diese beiden Maßnahmen voraussichtlich Ende 2027 abgeschlossen sein werden, können 2028 und 2029 schließlich die Arbeiten zur Erhöhung der Elbedeiche erfolgen.

Autoren:

Jens Hucklenbroch, M.Sc.
Marieke Röders, M.Sc.

Dipl.-Ing. Jürgen Scheuermann

Ramboll Deutschland GmbH
Marine & Civil Engineering

iKD Ingenieur-Consult GmbH

Jürgen-Töpfer-Str. 48
22763 Hamburg

Zur Wetterwarte 50, Haus 337/G
01109 Dresden

Tel.: +49 40 32818 190

Tel.: +49 351 88441 39

E-Mail: jens.hucklenbroch@ramboll.com

E-Mail: juergen.scheuermann@ikd-consult.de

Bisher erschienene Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

- | | | |
|-------------------------------|------|--|
| Heft 1
(vergriffen) | 1989 | Klaus Römisch
Empfehlung zur Bemessung von Hafeneinfahrten
Eberhard Lattermann
Bemessungsgrundlagen für Dichtungen und
Deckwerke im Wasserbau |
| Heft 2
(vergriffen) | 1990 | Frank Krüger
Schubspannungsverteilungen in offenen, geradlinigen
Trapez- und Rechteckgerinnen
Helmut Martin, Reinhard Pohl
Überflutungssicherheit von Talsperren |
| Heft 3
(vergriffen) | 1990 | Reinhard Pohl
Die Entwicklung der wasserbaulichen Lehre und
Forschung an der Technischen Universität Dresden
Reinhard Pohl
Die Berechnung der auf- und überlaufvermindernden
Wirkungen von Wellenumlenkern im Staudammbau |
| Heft 4
(vergriffen) | 1991 | Ellen Haufe
Hydromechanische Untersuchungen von Mischungs-,
Flockungs- und Sedimentationsprozessen in der Trink-
wasseraufbereitung |
| Heft 5 | 1994 | Wasserbaukolloquium 1993
Die Elbe – Wasserstraße und Auen |
| Heft 6
(vergriffen) | 1995 | Wasserbaukolloquium 1994
Wasserkraft und Umwelt
ISBN 3-86005-154-7 |

- Heft 7** 1995 **Wasserbaukolloquium 1995**
Hydromechanische Beiträge zum Betrieb von
Kanalnetzen
ISBN 3-86005-155-5
- Heft 8** 1996 **Detlef Aigner**
Hydrodynamik in Anlagen zur Wasserbehandlung
ISBN 3-86005-164-4
- Heft 9** 1996 **Wasserbaukolloquium 1996**
(vergriffen) Wellen: Prognosen - Wirkungen – Befestigungen
ISBN 3-86005-165-2
- Heft 10** 1997 **Wasserbaukolloquium 1997**
Sanierung und Modernisierung von
Wasserbauwerken, aktuelle Beispiele aus Deutschland,
Polen, der Slowakei und Tschechien
ISBN 3-86005-185-7
- Heft 11** 1997 **Reinhard Pohl**
(vergriffen) Überflutungssicherheit von Talsperren
ISBN 3-86005-186-5
- Heft 12** 1998 **Reinhard Pohl**
(vergriffen) Die Geschichte des Institutes für Wasserbau an der
Technischen Universität Dresden
ISBN 3-86005-187-3
- Heft 13** 1998 **Wasserbaukolloquium 1998**
Hydraulische und numerische Modelle im Wasserbau,
Entwicklung – Perspektiven
ISBN 3-86005-201-2
- Heft 14** 1998 **Uwe Müller**
Deformationsverhalten und Belastungsgrenzen des
Asphaltbetons unter den Bedingungen von
Staudammkerndichtungen
ISBN 3-86005-213-6

- Heft 15** 1999 **Wasserbaukolloquium 1999**
Betrieb, Instandsetzung und Modernisierung von
Wasserbauwerken
ISBN 3-86005-223-3
- Heft 16** 1999 **Dirk Carstensen**
Beanspruchungsgrößen in Fließgewässern mit
geschwungener Linienführung
ISBN 3-86005-236-5
- Heft 17** 1999 **Ehrenkolloquium Prof. Martin**
(vergriffen) anlässlich des 60. Geburtstages von
Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Martin
ISBN 3-86005-237-3
- Heft 18** 2000 **Wasserbaukolloquium 2000**
Belastung, Stabilisierung und Befestigung von Sohlen
und Böschungen wasserbaulicher Anlagen
ISBN 3-86005-243-8
- Heft 19** 2001 **Seleshi B. Awulachew**
Investigation of Water Resources Aimed at Multi-
Objective Development with Respect to Limited Data
Situation: The Case of Abaya-Chamo Basin, Ethiopia
ISBN 3-86005-277-2
- Heft 20** 2001 **Stefan Dornack**
Überströmbare Dämme Beitrag zur Bemessung von
Deckwerken aus Bruchsteinen
ISBN 3-86005-283-7
- Heft 21** 2002 **Wasserbaukolloquium 2002**
Innovationen in der Abwasserableitung und
Abwassersteuerung
ISBN 3-86005-297-7

- Heft 22** 2002 **Zelalem Hailu G. Chirstos**
Optimisation of Small Hydropower Sites for Rural
Electrification
ISBN 3-86005-304-3
- Heft 23** 2002 **Ehrenkolloquium Prof. Wagner**
Zur Emeritierung von
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Harold Wagner
ISBN 3-86005-307-8
- Heft 24** 2003 **Wasserbaukolloquium 2003**
Gewässer in der Stadt.
ISBN 3-86005-358-2
- Heft 25** 2003 **Toufik Tetah**
Numerische Simulation des dynamischen Verhaltens
von Caisson-Wellenbrecher-Gründungen unter
Einwirkung brechender Wellen
ISBN 3-86005-363-9
- Heft 26** 2003 **Ehrenkolloquium Prof. Horlacher**
Zum 60. Geburtstag von
Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-B. Horlacher
ISBN 3-86005-376-0
- Heft 27** 2004 **Wasserbaukolloquium 2004**
(vergriffen) Risiken bei der Bemessung und Bewirtschaftung von
Fließgewässern und Stauanlagen
ISBN 3-86005-414-7
- Heft 28** 2004 **Reinhard Pohl**
Historische Hochwasser aus dem Erzgebirge
ISBN 3-86005-428-7
- Heft 29** 2005 **Wasserbaukolloquium 2005**
(vergriffen) Stauanlagen am Beginn des 21. Jahrhunderts
ISBN 3-86005-461-9

- Heft 30** 2005 **Nigussie Teklie Girma**
Investigation on Sediment Transport Characteristics and Impacts of Human Activities on Morphological Processes of Ethiopian Rivers: Case Study of Kulfo River, Southern Ethiopia
ISBN 3-86005-483-X
- Heft 31** 2006 **Matthias Standfuß**
Druckwellenausbreitung in erdverlegten Rohrleitungen aus PE-HD
ISBN 3-86005-495 - 3
- Heft 32** 2006 **Wasserbaukolloquium 2006**
Strömungssimulation im Wasserbau
ISBN 3-86005-473-2
- Heft 33** 2006 **Antje Bornschein**
Die Ausbreitung von Schwallwellen auf trockener Sohle unter besonderer Berücksichtigung der Wellenfront
ISBN 3-86005-523-2
- Heft 34** 2007 **Torsten Frank**
Hochwassersicherheit in sielbeeinflussten Gewässersystemen am Beispiel des Bongsieler Kanals
ISBN 978-3-86780-019-8
- Heft 35** 2007 **Wasserbaukolloquium 2007**
Fünf Jahre nach der Flut
ISBN 987-3-86005-571-7
- Heft 36** 2008 **Aktuelle Forschungen 1993 – 2008**
Zum 65. Geburtstag von Herrn Prof. Horlacher
ISBN 978-3-86780-083-9
- Heft 37** 2009 **Dirk Carstensen**
Eis im Wasserbau – Theorie, Erscheinungen, Bemessungsgrößen
ISBN 978-3-86780-099-0

- Heft 38** 2009 **Reinhard Pohl, Antje Bornschein,
Robert Dittmann, Stefano Gilli**
(vergriffen) Mehrzieloptimierung der Steuerung von Talsperren
zur Minimierung von Hochwasserschäden
im Unterwasser
ISBN 978-3-86780-100-3
- Heft 39** 2009 **Wasserbaukolloquium 2009**
(vergriffen) Wasserkraftnutzung im Zeichen des Klimawandels,
angepasste Strategien – neue Technologien
ISBN 978-3-86780-101-0
- Heft 40** 2010 **Wasserbaukolloquium 2010**
(vergriffen) Wasserbau und Umwelt – Anforderungen, Methoden,
Lösungen
ISBN 978-3-86780-101-0
- Heft 41** 2010 **Ralf Tackmann**
Erosion 2008 – Ein numerisches Modell zur Prognose
des Bodenaustrages von kohäsiven Böden unter
Berücksichtigung der Rillenerosion
ISBN 978-3-86780-158-4
- Heft 42** 2010 **Ulf Helbig**
Tragverhalten und Berechnung von mehrschichtigen
Verbundrohren
ISBN 978-3-86780-159-1
- Heft 43** 2010 **Stefano Gilli**
Die Wirkung von Flussaufweitungen auf
Hochwasserwellen – Parameterstudie einer
Deichrückverlegung im Flussmittellauf
ISBN 978-3-86780-160-7
- Heft 44** 2010 **Negede Abate Kassa**
Probabilistic Safety Analysis of Dam – Methods and
Applications
ISBN 978-3-86780-161-4

- Heft 45** 2011 **Wasserbaukolloquium 2011**
(vergriffen) Wasserkraft –
Mehr Wirkungsgrad + Mehr Ökologie = Mehr Zukunft
ISBN 978-3-86780-198-0
- Heft 46** 2011 **Torsten Heyer**
Zuverlässigkeitsbewertung von Flussdeichen nach dem
Verfahren der logistischen Regression
ISBN 978-3-86780-197-3
- Heft 47** 2011 **Wasserbaukolloquium 2012**
Staubauwerke - Planen, Bauen, Betreiben
ISBN 978-3-86780-261-1
- Heft 48** 2013 **Wasserbaukolloquium 2013**
Technischer und organisatorischer Hochwasserschutz
–Bauwerke, Anforderungen, Modelle
ISBN 978-3-86780-318-2
- Heft 49** 2013 **Vinzent Sturm**
Simulation der Fluid-Struktur-Interaktion mit freier
Oberfläche am Beispiel des Schlauchwehres unter
Anwendung von Ansys/CFX
ISBN 978-3-86780-348-9
- Heft 50** 2014 **Wasserbaukolloquium 2014**
Simulationsverfahren und Modelle für Wasserbau und
Wasserwirtschaft
ISBN 978-3-86780-349-6
- Heft 51** 2014 **Holger Haufe**
Zwischenauslässe an Talsperren
- Beispiele, Bemessung, Konstruktion, Nachrüstung
ISBN 978-3-86780-393-9
- Heft 52** 2014 **Pohl/Bornschein u.a.**
Effect of very oblique waves on wave run-up and wave
overtopping
ISBN 978-3-86780-392-2

- Heft 53** 2015 **Wasserbaukolloquium 2015**
Messen und Überwachen im Wasserbau und am
Gewässer
ISBN 978-3-86780-420-2
- Heft 54** 2015 **Mohammed Abdallah**
Developing a Multi-purpose Reservoir operating Model
with Uncertain Conditions: a Case of Eastern Nile
Reservoirs – Sudan
ISBN 978-3-86780-431-8
- Heft 55** 2015 **Paolo Dapoz**
Reinigung von Abwasserkanälen mittels
Niederdruckspülverfahren
ISBN 978-3-86780-432-5
- Heft 56** 2015 **JuWi-Treffen**
17. JuWi-Treffen: Fachbeiträge zur Tagung vom
26.-28. August 2015
ISBN 978-3-86780-448-6
- Heft 57** 2016 **Wasserbaukolloquium 2016**
Gewässerentwicklung &
Hochwasserrisikomanagement
ISBN 978-3-86780-475-2
- Heft 58** 2017 **Wasserbaukolloquium 2017**
Bemessung im Wasserbau – Klimaanpassung,
Untersuchung, Regeln, Planung, Ausführung
ISBN 978-3-86780-509-4
- Heft 59** 2017 **Roberto Tatis Muvdi**
A contribution to the hydro morphological assessment
of running waters based on habitat dynamics.
ISBN 978-3-86780-512-4

- Heft 60** 2018 **Wasserbaukolloquium 2018**
Wasserbauwerke im Bestand – Sanierung, Umbau,
Ersatzneubau und Rückbau
ISBN 978-3-86780-556-8
- Heft 61** 2018 **Lydia Schulze**
Development of an Application-Oriented Approach for
Two-Phase Modelling in Hydraulic Engineering
ISBN 978-3-86780-571-1
- Heft 62** 2019 **Wasserbaukolloquium 2019**
Komplexe Planungsaufgaben im Wasserbau und ihre
Lösungen
ISBN 978-3-86780-577-3
- Heft 63** 2020 **Wasserbaukolloquium 2020**
Interdisziplinärer Wasserbau im digitalen Wandel
ISBN 978-3-86780-627-5
- Heft 64** 2020 **Rocco Zimmermann**
Einbindung von turbulenten Zustandsgrößen der
Propulsionsbelastung des Bugstrahlruders in die Be-
messung von Schüttsteindeckwerken an Binnenschiff-
fahrtsstraßen
ISBN 978-3-86780-649-7
- Heft 65** 2021 **Wasserbaukolloquium 2021**
Wasserbau zwischen Hochwasser und Wassermange
ISBN 978-3-86780-662-6
- Heft 66** 2021 **Bashar Ismael**
Fluid- u. Feststofftransport in Rohrsystemen und
Pumpstationen
ISBN 978-3-86780-660-2
- Heft 67** 2021 **Hellen Hammoudi**
Numerische Strömungsmodellierung der Durchmi-
schung in Rohrkreuzen
ISBN 978-3-86780-668-8

- Heft 68** 2022 **Wasserbaukolloquium 2022**
Nachhaltigkeit im Wasserbau – Umwelt, Transport,
Energie
ISBN 978-3-86780-710-4
- Heft 69** 2023 **Wasserbaukolloquium 2023**
Wasserbau und Wasserwirtschaft im 'Stresstest' (Hyd-
raulic Engineering and Water Management under
'Stress Test')
ISBN 978-3-86780-731-9
- Heft 70** 2023 **Muhammad Adnan Khan**
Sustainable Reservoir Management Approaches under
Impacts of Climate Change - A Case Study of Mangla
Reservoir, Pakistan
ISBN 978-3-86780-750-0
- Heft 71** 2023 **Niklas Schwiersch**
Ein risikobasierter Planungsansatz für homogene
Flussdeichquerschnitte
ISBN 978-3-86780-751-7
- Heft 72** 2024 **Wasserbaukolloquium 2024**
Von der Technischen Hydromechanik zu Environmen-
tal Fluid Dynamics
ISBN 978-3-86780-766-1
- Heft 73** 2024 **Sengdavanh Thepphachanh**
Transient River Habitat Modeling for Macrozooben-
thos in Hydrologically Dynamic Running Waters
ISBN 978-3-86780-765-4

Die Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen können bezogen werden über:

Technische Universität Dresden
Bereich Bau und Umwelt
Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik
01062 Dresden

Telefon: +49 (0)351 463 34397
E-Mail: wasserbau@tu-dresden.de

Ein großer Teil unserer Hefte ist digitalisiert und über das Fachrepositorium HENRY der Bundesanstalt für Wasserbau einzusehen.

<https://henry.baw.de/handle/20.500.11970/99399>

Bisher erschienene Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

- | | | |
|-------------------------------|------|--|
| Heft 1
(vergriffen) | 1989 | Klaus Römisch
Empfehlung zur Bemessung von Hafeneinfahrten
Eberhard Lattermann
Bemessungsgrundlagen für Dichtungen und
Deckwerke im Wasserbau |
| Heft 2
(vergriffen) | 1990 | Frank Krüger
Schubspannungsverteilungen in offenen, geradlinigen
Trapez- und Rechteckgerinnen
Helmut Martin, Reinhard Pohl
Überflutungssicherheit von Talsperren |
| Heft 3
(vergriffen) | 1990 | Reinhard Pohl
Die Entwicklung der wasserbaulichen Lehre und
Forschung an der Technischen Universität Dresden
Reinhard Pohl
Die Berechnung der auf- und überlaufvermindernden
Wirkungen von Wellenumlenkern im Staudammbau |
| Heft 4
(vergriffen) | 1991 | Ellen Haufe
Hydromechanische Untersuchungen von Mischungs-,
Flockungs- und Sedimentationsprozessen in der Trink-
wasseraufbereitung |
| Heft 5 | 1994 | Wasserbaukolloquium 1993
Die Elbe – Wasserstraße und Auen |
| Heft 6
(vergriffen) | 1995 | Wasserbaukolloquium 1994
Wasserkraft und Umwelt
ISBN 3-86005-154-7 |

- Heft 7** 1995 **Wasserbaukolloquium 1995**
Hydromechanische Beiträge zum Betrieb von
Kanalnetzen
ISBN 3-86005-155-5
- Heft 8** 1996 **Detlef Aigner**
Hydrodynamik in Anlagen zur Wasserbehandlung
ISBN 3-86005-164-4
- Heft 9** 1996 **Wasserbaukolloquium 1996**
(vergriffen) Wellen: Prognosen - Wirkungen – Befestigungen
ISBN 3-86005-165-2
- Heft 10** 1997 **Wasserbaukolloquium 1997**
Sanierung und Modernisierung von
Wasserbauwerken, aktuelle Beispiele aus Deutschland,
Polen, der Slowakei und Tschechien
ISBN 3-86005-185-7
- Heft 11** 1997 **Reinhard Pohl**
(vergriffen) Überflutungssicherheit von Talsperren
ISBN 3-86005-186-5
- Heft 12** 1998 **Reinhard Pohl**
(vergriffen) Die Geschichte des Institutes für Wasserbau an der
Technischen Universität Dresden
ISBN 3-86005-187-3
- Heft 13** 1998 **Wasserbaukolloquium 1998**
Hydraulische und numerische Modelle im Wasserbau,
Entwicklung – Perspektiven
ISBN 3-86005-201-2
- Heft 14** 1998 **Uwe Müller**
Deformationsverhalten und Belastungsgrenzen des
Asphaltbetons unter den Bedingungen von
Staudammkerndichtungen
ISBN 3-86005-213-6

- Heft 15** 1999 **Wasserbaukolloquium 1999**
Betrieb, Instandsetzung und Modernisierung von
Wasserbauwerken
ISBN 3-86005-223-3
- Heft 16** 1999 **Dirk Carstensen**
Beanspruchungsgrößen in Fließgewässern mit
geschwungener Linienführung
ISBN 3-86005-236-5
- Heft 17** 1999 **Ehrenkolloquium Prof. Martin**
(vergriffen) anlässlich des 60. Geburtstages von
Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Martin
ISBN 3-86005-237-3
- Heft 18** 2000 **Wasserbaukolloquium 2000**
Belastung, Stabilisierung und Befestigung von Sohlen
und Böschungen wasserbaulicher Anlagen
ISBN 3-86005-243-8
- Heft 19** 2001 **Seleshi B. Awulachew**
Investigation of Water Resources Aimed at Multi-
Objective Development with Respect to Limited Data
Situation: The Case of Abaya-Chamo Basin, Ethiopia
ISBN 3-86005-277-2
- Heft 20** 2001 **Stefan Dornack**
Überströmbare Dämme Beitrag zur Bemessung von
Deckwerken aus Bruchsteinen
ISBN 3-86005-283-7
- Heft 21** 2002 **Wasserbaukolloquium 2002**
Innovationen in der Abwasserableitung und
Abwassersteuerung
ISBN 3-86005-297-7

- Heft 22** 2002 **Zelalem Hailu G. Chirstos**
Optimisation of Small Hydropower Sites for Rural
Electrification
ISBN 3-86005-304-3
- Heft 23** 2002 **Ehrenkolloquium Prof. Wagner**
Zur Emeritierung von
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Harold Wagner
ISBN 3-86005-307-8
- Heft 24** 2003 **Wasserbaukolloquium 2003**
Gewässer in der Stadt.
ISBN 3-86005-358-2
- Heft 25** 2003 **Toufik Tetah**
Numerische Simulation des dynamischen Verhaltens
von Caisson-Wellenbrecher-Gründungen unter
Einwirkung brechender Wellen
ISBN 3-86005-363-9
- Heft 26** 2003 **Ehrenkolloquium Prof. Horlacher**
Zum 60. Geburtstag von
Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-B. Horlacher
ISBN 3-86005-376-0
- Heft 27** 2004 **Wasserbaukolloquium 2004**
(vergriffen) Risiken bei der Bemessung und Bewirtschaftung von
Fließgewässern und Stauanlagen
ISBN 3-86005-414-7
- Heft 28** 2004 **Reinhard Pohl**
Historische Hochwasser aus dem Erzgebirge
ISBN 3-86005-428-7
- Heft 29** 2005 **Wasserbaukolloquium 2005**
(vergriffen) Stauanlagen am Beginn des 21. Jahrhunderts
ISBN 3-86005-461-9

- Heft 30** 2005 **Nigussie Teklie Girma**
Investigation on Sediment Transport Characteristics and Impacts of Human Activities on Morphological Processes of Ethiopian Rivers: Case Study of Kulfo River, Southern Ethiopia
ISBN 3-86005-483-X
- Heft 31** 2006 **Matthias Standfuß**
Druckwellenausbreitung in erdverlegten Rohrleitungen aus PE-HD
ISBN 3-86005-495 - 3
- Heft 32** 2006 **Wasserbaukolloquium 2006**
Strömungssimulation im Wasserbau
ISBN 3-86005-473-2
- Heft 33** 2006 **Antje Bornschein**
Die Ausbreitung von Schwallwellen auf trockener Sohle unter besonderer Berücksichtigung der Wellenfront
ISBN 3-86005-523-2
- Heft 34** 2007 **Torsten Frank**
Hochwassersicherheit in sielbeeinflussten Gewässersystemen am Beispiel des Bongsieler Kanals
ISBN 978-3-86780-019-8
- Heft 35** 2007 **Wasserbaukolloquium 2007**
Fünf Jahre nach der Flut
ISBN 987-3-86005-571-7
- Heft 36** 2008 **Aktuelle Forschungen 1993 – 2008**
Zum 65. Geburtstag von Herrn Prof. Horlacher
ISBN 978-3-86780-083-9
- Heft 37** 2009 **Dirk Carstensen**
Eis im Wasserbau – Theorie, Erscheinungen, Bemessungsgrößen
ISBN 978-3-86780-099-0

- Heft 38** 2009 **Reinhard Pohl, Antje Bornschein,
Robert Dittmann, Stefano Gilli**
(vergriffen) Mehrzieloptimierung der Steuerung von Talsperren
zur Minimierung von Hochwasserschäden
im Unterwasser
ISBN 978-3-86780-100-3
- Heft 39** 2009 **Wasserbaukolloquium 2009**
(vergriffen) Wasserkraftnutzung im Zeichen des Klimawandels,
angepasste Strategien – neue Technologien
ISBN 978-3-86780-101-0
- Heft 40** 2010 **Wasserbaukolloquium 2010**
(vergriffen) Wasserbau und Umwelt – Anforderungen, Methoden,
Lösungen
ISBN 978-3-86780-101-0
- Heft 41** 2010 **Ralf Tackmann**
Erosion 2008 – Ein numerisches Modell zur Prognose
des Bodenaustrages von kohäsiven Böden unter
Berücksichtigung der Rillenerosion
ISBN 978-3-86780-158-4
- Heft 42** 2010 **Ulf Helbig**
Tragverhalten und Berechnung von mehrschichtigen
Verbundrohren
ISBN 978-3-86780-159-1
- Heft 43** 2010 **Stefano Gilli**
Die Wirkung von Flussaufweitungen auf
Hochwasserwellen – Parameterstudie einer
Deichrückverlegung im Flussmittellauf
ISBN 978-3-86780-160-7
- Heft 44** 2010 **Negede Abate Kassa**
Probabilistic Safety Analysis of Dam – Methods and
Applications
ISBN 978-3-86780-161-4

- Heft 45** 2011 **Wasserbaukolloquium 2011**
(vergriffen) Wasserkraft –
Mehr Wirkungsgrad + Mehr Ökologie = Mehr Zukunft
ISBN 978-3-86780-198-0
- Heft 46** 2011 **Torsten Heyer**
Zuverlässigkeitsbewertung von Flussdeichen nach dem
Verfahren der logistischen Regression
ISBN 978-3-86780-197-3
- Heft 47** 2011 **Wasserbaukolloquium 2012**
Staubauwerke - Planen, Bauen, Betreiben
ISBN 978-3-86780-261-1
- Heft 48** 2013 **Wasserbaukolloquium 2013**
Technischer und organisatorischer Hochwasserschutz
–Bauwerke, Anforderungen, Modelle
ISBN 978-3-86780-318-2
- Heft 49** 2013 **Vinzent Sturm**
Simulation der Fluid-Struktur-Interaktion mit freier
Oberfläche am Beispiel des Schlauchwehres unter
Anwendung von Ansys/CFX
ISBN 978-3-86780-348-9
- Heft 50** 2014 **Wasserbaukolloquium 2014**
Simulationsverfahren und Modelle für Wasserbau und
Wasserwirtschaft
ISBN 978-3-86780-349-6
- Heft 51** 2014 **Holger Haufe**
Zwischenauslässe an Talsperren
- Beispiele, Bemessung, Konstruktion, Nachrüstung
ISBN 978-3-86780-393-9
- Heft 52** 2014 **Pohl/Bornschein u.a.**
Effect of very oblique waves on wave run-up and wave
overtopping
ISBN 978-3-86780-392-2

- Heft 53** 2015 **Wasserbaukolloquium 2015**
Messen und Überwachen im Wasserbau und am
Gewässer
ISBN 978-3-86780-420-2
- Heft 54** 2015 **Mohammed Abdallah**
Developing a Multi-purpose Reservoir operating Model
with Uncertain Conditions: a Case of Eastern Nile
Reservoirs – Sudan
ISBN 978-3-86780-431-8
- Heft 55** 2015 **Paolo Dapoz**
Reinigung von Abwasserkanälen mittels
Niederdruckspülverfahren
ISBN 978-3-86780-432-5
- Heft 56** 2015 **JuWi-Treffen**
17. JuWi-Treffen: Fachbeiträge zur Tagung vom
26.-28. August 2015
ISBN 978-3-86780-448-6
- Heft 57** 2016 **Wasserbaukolloquium 2016**
Gewässerentwicklung &
Hochwasserrisikomanagement
ISBN 978-3-86780-475-2
- Heft 58** 2017 **Wasserbaukolloquium 2017**
Bemessung im Wasserbau – Klimaanpassung,
Untersuchung, Regeln, Planung, Ausführung
ISBN 978-3-86780-509-4
- Heft 59** 2017 **Roberto Tatis Muvdi**
A contribution to the hydro morphological assessment
of running waters based on habitat dynamics.
ISBN 978-3-86780-512-4

- Heft 60** 2018 **Wasserbaukolloquium 2018**
Wasserbauwerke im Bestand – Sanierung, Umbau,
Ersatzneubau und Rückbau
ISBN 978-3-86780-556-8
- Heft 61** 2018 **Lydia Schulze**
Development of an Application-Oriented Approach for
Two-Phase Modelling in Hydraulic Engineering
ISBN 978-3-86780-571-1
- Heft 62** 2019 **Wasserbaukolloquium 2019**
Komplexe Planungsaufgaben im Wasserbau und ihre
Lösungen
ISBN 978-3-86780-577-3
- Heft 63** 2020 **Wasserbaukolloquium 2020**
Interdisziplinärer Wasserbau im digitalen Wandel
ISBN 978-3-86780-627-5
- Heft 64** 2020 **Rocco Zimmermann**
Einbindung von turbulenten Zustandsgrößen der
Propulsionsbelastung des Bugstrahlruders in die Be-
messung von Schüttsteindeckwerken an Binnenschiff-
fahrtsstraßen
ISBN 978-3-86780-649-7
- Heft 65** 2021 **Wasserbaukolloquium 2021**
Wasserbau zwischen Hochwasser und Wassermange
ISBN 978-3-86780-662-6
- Heft 66** 2021 **Bashar Ismael**
Fluid- u. Feststofftransport in Rohrsystemen und
Pumpstationen
ISBN 978-3-86780-660-2
- Heft 67** 2021 **Hellen Hammoudi**
Numerische Strömungsmodellierung der Durchmi-
schung in Rohrkreuzen
ISBN 978-3-86780-668-8

- Heft 68** 2022 **Wasserbaukolloquium 2022**
Nachhaltigkeit im Wasserbau – Umwelt, Transport,
Energie
ISBN 978-3-86780-710-4
- Heft 69** 2023 **Wasserbaukolloquium 2023**
Wasserbau und Wasserwirtschaft im 'Stresstest' (Hyd-
raulic Engineering and Water Management under
'Stress Test')
ISBN 978-3-86780-731-9
- Heft 70** 2023 **Muhammad Adnan Khan**
Sustainable Reservoir Management Approaches under
Impacts of Climate Change - A Case Study of Mangla
Reservoir, Pakistan
ISBN 978-3-86780-750-0
- Heft 71** 2023 **Niklas Schwiersch**
Ein risikobasierter Planungsansatz für homogene
Flussdeichquerschnitte
ISBN 978-3-86780-751-7
- Heft 72** 2024 **Wasserbaukolloquium 2024**
Von der Technischen Hydromechanik zu Environmen-
tal Fluid Dynamics
ISBN 978-3-86780-766-1
- Heft 73** 2024 **Sengdavanh Thepphachanh**
Transient River Habitat Modeling for Macrozooben-
thos in Hydrologically Dynamic Running Waters
ISBN 978-3-86780-765-4

Die Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen können bezogen werden über:

Technische Universität Dresden
Bereich Bau und Umwelt
Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik
01062 Dresden

Telefon: +49 (0)351 463 34397
E-Mail: wasserbau@tu-dresden.de

Ein großer Teil unserer Hefte ist digitalisiert und über das Fachrepositorium HENRY der Bundesanstalt für Wasserbau einzusehen.

<https://henry.baw.de/handle/20.500.11970/99399>