

# BAWKolloquium



## Erhaltung gestalten

19. und 20. November 2024

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

# Impressum

Herausgeber (im Eigenverlag):  
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)  
Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe  
Telefon: +49 (0) 721 9726-0  
E-Mail: [info@baw.de](mailto:info@baw.de)  
[www.baw.de](http://www.baw.de)



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

Soweit nicht anders gekennzeichnet, stehen die Inhalte dieser Beiträge unter der Creative Commons Lizenz BY 4.0 (Namensnennung 4.0 International). Bei anderweitiger Kennzeichnung unterliegen die entsprechenden Inhalte dem urheberrechtlichen Schutz und dürfen nicht weiterverwendet werden.

BAWKolloquium: ISSN 2698-6841

Veranstaltungen der BAW verfügbar unter:  
<https://henry.baw.de/handle/20.500.11970/99403>

Karlsruhe · Dezember 2024

## Programm

### Dienstag, 19. November 2024

- 13:00 Uhr**     **Begrüßung und Einführung in „Erhaltung gestalten“**  
*Dipl.-Ing. Claus Kunz (BAW)*  
Die Erhaltung von Bauwerken stellt bekanntlich den größten Hebel dar, um Treibhausgase und Abfallmengen zu begrenzen. Mit Erhaltung kann im Bauwesen das Klima wirkungsvoll geschützt werden. Die Beiträge des Kolloquiums sollen hierzu umsetzbare Vorgehensweisen aufzeigen.
- 13:30 Uhr**     **„Erhaltung gestalten“ – moderne strategische Ansätze bei der Planung und Umsetzung von Erhaltungs- und Baumaßnahmen in der WSV**  
*Dipl.-Ing. Thomas Rosenstein (GDWS)*  
Stand- und Betriebssicherheit der Bauwerke sowie die sichere Befahrbarkeit der Strecken ist Grundlage für die Verlässlichkeit und Attraktivität des Verkehrsträgers Wasserstraße. Zunehmendes Alter und Zustand der Bauwerke sowie klimabedingte Veränderungen bedingen einen hohen Bedarf an Erhaltungsmaßnahmen. Ein strategischer Veränderungsprozess auf sämtlichen Ebenen von Vorplanung bis zur Fertigstellung baulicher Maßnahmen soll den Anforderungen gerecht werden.
- 14:00 Uhr**     **Pause**
- 14:30 Uhr**     **Instandsetzung massiver Verkehrswasserbauwerke - Dauerhaftigkeit, Instandsetzungen und (Regelwerks-)Entwicklungen im Überblick**  
*Dipl.-Ing. Andreas Westendarp (BAW)*  
Der Beitrag gibt einen Überblick über bei Verkehrswasserbauwerken typischen Dauerhaftigkeitsproblemen und den im Regelfall verfolgten Instandsetzungsprinzipien und -verfahren und geht auf aktuelle Entwicklungen ein.
- 15:00 Uhr**     **Bauwerke im und über dem Wasser erhalten mit der neuartigen UHPC-Technologie**  
*Prof. em. Dr. Dipl. Ing. ETH / SIA / IABSE Eugen Brühwiler (EPFL – ETH Lausanne und BridgIng Consultant)*  
Wasserbauwerke aus Stahlbeton zeigen oft Schäden infolge Hydro-Abrasion und AKR. Eine effiziente Instandsetzung dieser Schäden gelingt mit der neuartigen UHPC-Technologie zur dauerhaften Behebung. In der Schweiz wird die UHPC-Technologie seit 20 Jahren für die Erhaltung von Brücken und Hochbauten eingesetzt. Erste Anwendungen für die Instandsetzung von Wasserbauwerken wurden vielversprechend ausgeführt.
- 15:30 Uhr**     **Pause**
- 16:00 Uhr**     **Welchen Beitrag können moderne Berechnungsmethoden zur realitätsnahen Untersuchung und Erhaltung bestehender Brücken- und Wasserbauwerke leisten?**  
*Dr.-Ing. Roger Schlegel (Dynamics Engineering)*  
*Dipl.-Ing. Claus Kunz (BAW)*  
Die Erhaltung bestehender Brücken- und Wasserbauwerke ist gegenüber einem vergleichbaren Neubau in der Regel nachhaltiger. Ein wichtiger Baustein dabei ist

eine realitätsnahe Untersuchung und Einschätzung der vorhandenen Bausubstanz hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit. Beispiele zeigen auf, wie moderne Berechnungsmethoden die realitätsnahe Nachrechnung von Gewölbebrücken unter Eigen-/Verkehrslast und Schiffsanprall verbessern können.

**16:30 Uhr    Die Schiffstoßsicherung der Alten Mainbrücke Zellingen**

*Dipl.-Ing. Martina Goldstein, Dipl.-Ing. Stephan Sonnabend (Büchting + Streit AG)*

Für die im Jahre 1884 geschaffene Mainquerung ‚Alte Mainbrücke Zellingen‘ wurde im Zuge des fortschreitenden Main-Ausbaus eine zeitgemäße Sicherung des Bauwerkes gegen Schiffstoß erforderlich. Diese erfolgte 2015 im Rahmen der Instandsetzungsmaßnahmen zum Erhalt des historischen, identitätsstiftenden Wahrzeichens der Marktgemeinde Zellingen. Zur Sicherung der Pfeiler wurden abgerückte Sicherungsbauwerke ausgeführt.

**17:00 Uhr    Verabschiedung von Claus Kunz**

*Leitung (BAW)*

*Prof. Dr. Hans Moser (BMDV, WS 12)*

**18:00 Uhr    Abendessen**

## Mittwoch, 20. November 2024

- 08:30 Uhr**     **Zusammenarbeit BAW-WNA Heidelberg: Ein Mehrwert für den Neckar?!**  
*Dipl.-Ing. Klaus Michels (WNA Heidelberg)*  
Seit Gründung des heutigen Wasserstraßen-Neubauamts Heidelberg (WNA Heidelberg) im Jahr 2008 begleitet die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) fast alle Bauprojekte des WNA. Hierbei sind hydraulische, geotechnische wie auch bautechnische Fragenstellungen zu klären. Anhand von Beispielen zur Bauwerkserhaltung wird aufgezeigt, ob und inwieweit diese Zusammenarbeit einen Mehrwert für die Bundeswasserstraße Neckar generiert.
- 09:00 Uhr**     **Zwischen Bestandserhaltung und Sicherheitsanforderungen – Herausforderungen bei der Tragfähigkeitsbewertung bestehender Wasserbauwerke**  
*Dr.-Ing. Christoph Stephan (BAW), Dr.-Ing. Engin Kotan (BAW)*  
Die Bedeutung möglichst langer Nutzungsdauern von Wasserbauwerken für einen nachhaltigen Umgang mit Ressourcen ist unumstritten. Allerdings darf dieser Beitrag zur Nachhaltigkeit nicht auf Kosten sicherheitsrelevanter Aspekte beruhen. Dieser Beitrag zeigt die Herausforderungen und Möglichkeiten bei der statischen Bewertung bestehender massiver Wasserbauwerke auf.
- 09:30 Uhr**     **Maintenance, durability, sustainability and resilience of hydraulic structures**  
*Prof. Dr. Philippe Rigo (University of Liège, ANAST)*  
Six PIANC INCOM Working Group Reports, which contribute to the dissemination of knowledge in the field of maintenance, durability, sustainability and resilience of inland waterway hydraulic structures are reviewed. Health Monitoring (SHM), Asset Management, Maintenance and Renovation, Corrosion Protection to Mechanical components, and Management of accidents are discussed.
- 10:00 Uhr**     **Pause**
- 10:30 Uhr**     **Loch an Loch und hält doch – Detektion und Wachstum von Ermüdungsrissen in genieteten Altstahltragwerken**  
*Dr.-Ing. Lars Sieber (HTW Dresden)*  
Bei der Bewertung bestehender Stahltragwerke unter zyklischer Beanspruchung ist der Nachweis der Ermüdungssicherheit entscheidend. Kann auf Basis des Wöhlerkonzepts keine ausreichende Restnutzungsdauer nachgewiesen werden, wird auf Basis einer bruchmechanischen Risswachstumsanalyse bewertet. Methoden zur Detektion möglicher Ermüdungsrisse sowie die Besonderheiten des Risswachstums in genieteten Stahltragwerken aus alten Flussstählen werden vorgestellt.
- 11:00 Uhr**     **Smarte Instandhaltung des Massivbaus und Stahlwasserbaus im WSA Donau MDK**  
*Dipl.-Ing. Anita Ella-Mvogo, Dipl.-Ing. Manfred Espert (WSA Donau MDK)*  
Zur Unterhaltung seiner Schleusen, Wehre und weiteren Massivbauten hat das WSA Donau MDK den zweiten mehrjährigen Instandsetzungsvertrag für die Beseitigung von Betonschäden mit Erfolg geschlossen. Der Schadensfortschritt kann so deutlich reduziert werden. Im Stahlwasserbau erfolgt die Instandsetzung

kleinerer Schäden ebenfalls im Anfangsstadium mittels verschiedener Formen von „Smart-Repair“ vorwiegend im Zuge der Bauwerksprüfungen.

**11:40 Uhr    **Wartung von massiven Wasserbauwerken****

*Dipl.-Ing. Nancy Freitag (BAW)*

Wartung kann auch bei massiven Verkehrswasserbauwerken einen Beitrag zur Erreichung oder Verlängerung der planmäßigen Nutzungsdauer leisten, sofern entsprechende Maßnahmen über regelmäßige Abläufe sichergestellt sind. Es werden wartungsgerechte Schäden und Möglichkeiten der Wartung vorgestellt sowie Beispiele für individuell gestaltbare Wartungspläne für massive Verkehrswasserbauwerke, wie Schleusen oder Wehre gegeben.

**12:00 Uhr    **Schlussworte****

*Dipl.-Ing. Claus Kunz (BAW)*

**12:15 Uhr    **Ende der Veranstaltung****

## Liste der Vortragenden

Brühwiler, Prof. Dr. Eugen	EPFL – ETH Lausanne und Bridging Consultant eugen.bruehwiler@epfl.ch
Ella-Mvogo, Anita	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Donau MDK Anita.Ella-Mvogo@wsv.bund.de
Espert, Manfred	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Donau MDK manfred.espert@wsv.bund.de
Freitag, Nancy	Bundesanstalt für Wasserbau nancy.freitag@baw.de
Goldstein, Martina	Büchting + Streit AG martina.goldstein@buechting-streit.de
Kayser, Dr. Jan	Bundesanstalt für Wasserbau jan.kayser@baw.de
Kotan, Dr. Engin	Bundesanstalt für Wasserbau engin.kotan@baw.de
Kunz, Claus	Bundesanstalt für Wasserbau claus.kunz@baw.de
Michels, Klaus	Wasserstraßen-Neubauamt Heidelberg klaus.michels@wsv.bund.de
Moser, Prof. Dr. Hans	BMDV, WS 12 Hans.Moser@bmdv.bund.de
Rigo, Prof. Dr. Philippe	UNIVERSITY of LIEGE, ANAST ph.rigo@uliege.be
Rosenstein, Thomas	Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt Thomas.Rosenstein@wsv.bund.de
Schlegel, Dr. Roger	Geodynardo GmbH roger.schlegel@geodynardo.com
Sieber, Dr. Lars	Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden Fakultät Bauingenieurwesen lars.sieber@htw-dresden.de
Sonnabend, Stephan	Büchting + Streit AG stephan.sonnabend@buechting-streit.de

Stephan, Dr. Christoph

Bundesanstalt für Wasserbau  
christoph.stephan@baw.de

Westendarp, Andreas

Bundesanstalt für Wasserbau  
andreas.westendarp@baw.de

## Inhaltsverzeichnis

<b>Erhaltung gestalten – eine Einführung</b>	<b>3</b>
LBDiR Dipl.-Ing. Claus Kunz, Bundesanstalt für Wasserbau	
<b>„Erhaltung gestalten“- strategische Ansätze bei der Planung und Umsetzung von Erhaltungs- und Baumaßnahmen in der WSV</b>	<b>9</b>
Dipl.-Ing. Thomas Rosenstein, Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS)	
<b>Instandsetzung massiver Verkehrswasserbauwerke – Dauerhaftigkeit, Instandsetzungen und (Regelwerks-)Entwicklungen im Überblick</b>	<b>15</b>
Andreas Westendarp, Bundesanstalt für Wasserbau	
<b>Bauwerke im und über dem Wasser erhalten mit der neuartigen UHFB-Technologie</b>	<b>21</b>
Prof. em. Dr. Dipl.-Ing. ETH Eugen Brühwiler, ETH Lausanne (EPFL) und BridgIng Consultant Ltd., Lausanne, Schweiz	
<b>Welchen Beitrag können moderne Berechnungsmethoden zur realitätsnahen Untersuchung und Erhaltung bestehender Brücken- und Wasserbauwerke leisten?</b>	<b>27</b>
Dr.-Ing. Roger Schlegel, Geodynardo GmbH Dipl.-Ing. Claus Kunz, Abteilungsleitung Bautechnik, Bundesanstalt für Wasserbau	
<b>Die Schiffstoßsicherung der Alten Mainbrücke Zellingen</b>	<b>33</b>
Dipl.-Ing. Martina Goldstein, Dipl.-Ing. Stephan Sonnabend, Büchting + Streit AG	
<b>Zusammenarbeit BAW-WNA Heidelberg: Ein Mehrwert für den Neckar?!</b>	<b>41</b>
Dipl.-Ing. Klaus Michels, Wasserstraßen-Neubauamt Heidelberg	
<b>Zwischen Bestandserhaltung und Sicherheitsanforderungen – Herausforderungen bei der Tragfähigkeitsbewertung bestehender Wasserbauwerke</b>	<b>52</b>
Dr.-Ing. Christoph Stephan, Dr.-Ing. Engin Kotan, Bundesanstalt für Wasserbau	
<b>Maintenance, durability, sustainability and resilience in the fields of hydraulic structures</b>	<b>59</b>
Prof. Philippe RIGO, PIANC InCom Chair, University of Liege , Belgium, ph.rigo@uliege.be	
<b>Loch an Loch und hält doch – Detektion und Wachstum von Ermüdungsrissen in genieteten Altstahltragwerken</b>	<b>76</b>
Dr.-Ing. Lars Sieber, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden Dr.-Ing. Thomas Riedel, DB InfraGO AG	
<b>Smarte Instandhaltung des Massivbaus und Stahlwasserbaus im WSA Donau MDK</b>	<b>82</b>
Anita Ella-Mvogo, Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Donau MDK, Nürnberg Manfred Espert, Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Donau MDK, Nürnberg	

**Wartung von massiven Verkehrswasserbauwerken**  
Nancy Freitag, Bundesanstalt für Wasserbau

**91**

## Erhaltung gestalten – eine Einführung

LBDiDipl.-Ing. Claus Kunz, Bundesanstalt für Wasserbau

### Einleitung

Vor 5 Jahren hatten wir zu einem Kolloquium „Erhaltung von Wehranlagen“ hier in Karlsruhe eingeladen. Vor 2 Jahren gingen wir unter dem Motto „Erhaltung – to go“ auf die verschiedenen Arten von Wasserbauwerken ein und heute sind wir wieder auf die Erhaltung ausgerichtet, mit dem Verb-Zusatz „gestalten“. Ein Verb ist ein Tätigkeitswort, oder wie man junge Grundschüler lehrt, ein „Tuwort“. Also das Tun soll möglichst im Vordergrund stehen.

Wenn wir uns den Begriff Erhaltung ansehen, dann steckt da ja auch wirklich das Tun drin: Erhal**TUN**g. Die Erhaltung fordert also geradezu zum Tun auf.

Der Beitrag enthält auch die Ergebnisse der während des Vortrags mit dem Publikum veranstalteten Slido-Abfragen.

### Problemstellung

Warum aber Erhaltung? Ihre zahlreiche Teilnahme zeigt das Interesse, das Sie an dem Thema „Erhaltung“ haben. Ein Thema, das die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung, aber auch viele andere in den nächsten Jahren beschäftigen wird und große Anstrengungen erfordert. Historisch gesehen haben wir uns in der Abteilung Bautechnik seit jeher mit bestehenden Bauwerken, deren Bewertung, Instandsetzung und Erhaltung beschäftigt und einen großen Erfahrungsschatz aufgebaut. Dabei war es Ziel, für den Betrieb bzw. Weiterbetrieb des Bauwerks eine Wirtschaftlichkeit zu erreichen.

Erhaltung bzw. Instandhaltung bedeutet bekanntlich Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung, was eine einschlägige Norm auch beschreibt [DIN 31051, 2019], Abbildung 1. Sachgerechte Inspektion und Wartung und ggf. kleine Instandsetzungen sind für die Erhaltung und das Erreichen der planmäßigen Nutzungsdauer, wenn nicht sogar für eine weitere Nutzung über diesen Zeitpunkt hinaus, in hohem Maße wirtschaftlich. Erhaltung von Bauwerken und insbesondere die Verlängerung ihrer Restnutzungsdauer, verringert Verkehrseinschränkungen und schafft „Freiräume“ als Planungszeiträume für Instandsetzung und ggf. Ersatzmaßnahmen.

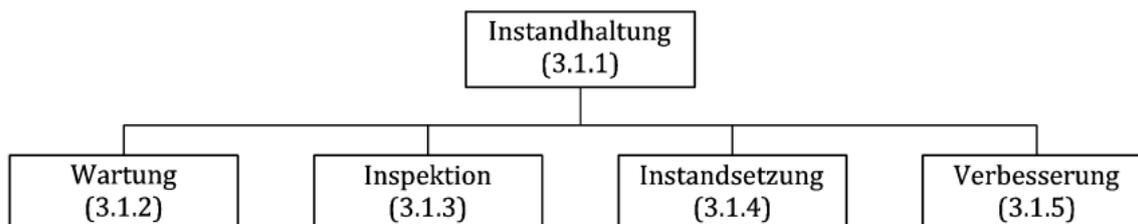


Abbildung 1: DIN 31051 (2019) - Grundlagen der Instandhaltung

## Erhaltung gestalten

Auf die Frage: „Was bedeutet für Sie Erhaltung von Wasserbauwerken/Brücken?“ gibt Abbildung 2 die Meinung der Teilnehmenden des Kolloquiums wieder. Danach steht einschließlich von Synonymen die Nachhaltigkeit an deutlich vorderster Stelle, gefolgt von Sicherheit, Nutzungsdauer und Dauerhaftigkeit. Unter den weiteren Nennungen befinden sich aber auch bedenkenswerte Hinweise.



Abbildung 2: Slido-Abfrage „Was bedeutet für Sie Erhaltung von Wasserbauwerken/Brücken?“ im Auditorium des Kolloquiums

Früher war die Erhaltung von reiner Wirtschaftlichkeit geprägt und zum Beispiel bei Infrastrukturen abhängig von einem Instandsetzungskonzept, einer zugehörigen Kostenermittlung und einer Nutzen-Kosten-Analyse unter Einbeziehung einer Variante für den Ersatz-Neubau.



Abbildung 3: Klimawandel als neue Herausforderung

Mittlerweile gesellt sich als neue Herausforderung der Klimawandel hinzu, zum einen als Klimaschutz und zum anderen als Anpassung an den Klimawandel, Abbildung 3.

Die Erhaltung von Bauwerken stellt bekanntlich den größten Hebel dar, um Treibhausgase und Abfallmengen zu begrenzen [u.a. in Kunz C., 2024]. Mit Erhaltung kann im Bauwesen das Klima geschützt und der Klimawandel positiv beeinflusst werden.

Die umgekehrte Net-Zero-Design-Pyramide der „Institution of Structural Engineers“, einer weltweiten Vereinigung von ca. 40.000 Bauingenieuren, zeigt die Möglichkeiten auf, zu einem Netto-Null im Bauwesen zu kommen, Abbildung 4.

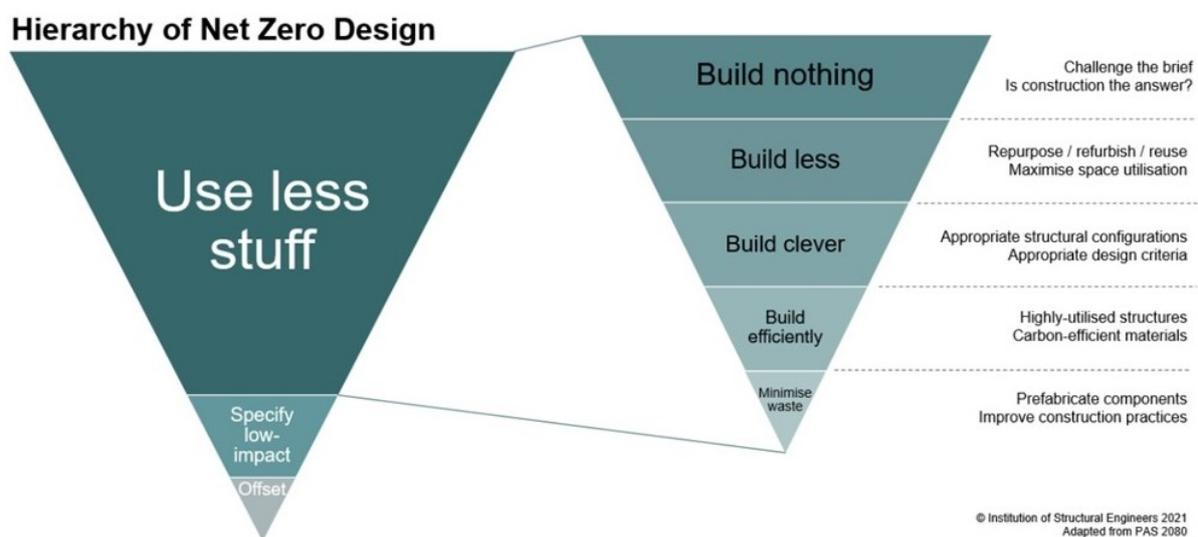


Abbildung 4: Hierarchie der Netto-Null-Planung [Quelle: Institution of Structural Engineers, 2021]

Die Pyramide zeigt den Einfluss verschiedener Bau-Aktivitäten, um den CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Bauwesen unter dem Ziel „Geringerer Materialverbrauch (Use less stuff)“ zu verringern. Zunächst ist das Hinterfragen, ob überhaupt gebaut werden muss, was dann keine Bau-Aktivität nach sich zieht (Build nothing). An zweiter Stelle folgt die Erhaltung des Bauwerks, nämlich mit Wiederverwendung, Ertüchtigung und Renovierung (Build less). Erhaltung hat ein Einsparpotential von ca. 55% des CO<sub>2</sub>-Ausstosses gegenüber einem Neubau und damit den größten Hebel. Erst dann folgen optimierte Konstruktionen (Build clever), hoch ausgelastete Strukturen und CO<sub>2</sub>-effiziente Materialien (Build efficiently) und schließlich durch Vorfertigungen und verbesserten Bauablauf eine Reduzierung des Abfalls (Minimise waste).

Keine Angst: Nicht Neu-Bauen und dafür im Bestand Bauen, also Erhalten, ist mit mindestens genauso viel Ingenieur-Expertise, Phantasie, Entwicklungen, Bautätigkeit und vielem Weiteren verbunden. Nach dem Wuppertaler Institut für Klima und Energie werden wir den Klimawandel nur meistern, wenn wir ihm mit „Zukunftskunst“ begegnen [VDI, 2108]

Es gibt vieles zu tun. Wenn möglich sollte man das eine tun ohne das andere zu lassen. Der Indikator für die Veränderung, hier die CO<sub>2</sub>-Ausstoß-Verminderung, legt aber eine Priorisierung nahe.

ErHALTung steckt aber auch zum Teil in der NachHALTigkeit, wie die Abfrage im Auditorium des Kolloquiums auch feststellte, siehe Abbildung 2.

Die Erhaltung bedeutet zum Beispiel auch die Verlängerung der Nutzungsdauer eines Bauwerks, weshalb es dauerhafter Bauwerke bedarf. Lange Nutzungsdauern bedeuten Klimaschutz, was den Klimawandel positiv begünstigt. Ohne günstige Beeinflussung verursacht dieser Klimawandel mehr und mehr Schäden, wie Abbildung 5 aufzeigt.

Die Nachhaltigkeit [Brundtland-Kommission, 1987], und damit die Möglichkeiten für künftige Generationen, ihre eigenen Bedürfnisse so wie die vorige und die derzeitige Generation sie befriedigt, ist gefährdet.

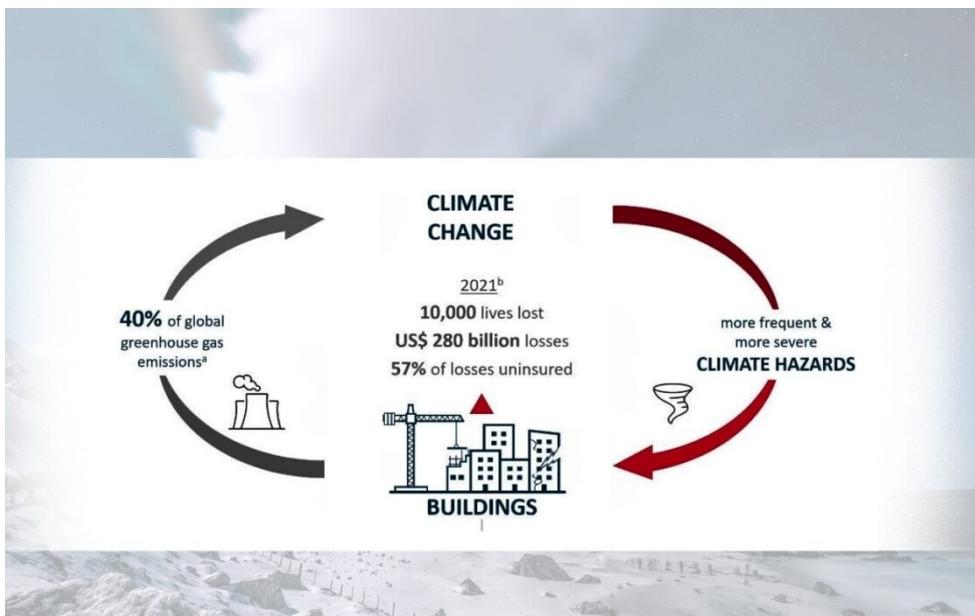


Abbildung 5: Auswirkungen des Klimawandels 2021 [Quelle: São Paulo School of Advanced Science on Structural Safety, 2024]

Nach einer Studie an der Universität Rio de Janeiro [Quelle: São Paulo School of Advanced Science on Structural Safety, 2024] haben häufigere und schwerere Klima-Katastrophen in 2021 rund 10.000 Menschenleben gefordert und Schäden von 280 Mrd. USD, entsprechend etwa 260 Mrd. Euro, verursacht. Für Deutschland wird für das Jahr 2021 eine anteilige Schadenssumme von ca. 80 Mrd. Euro geschätzt.

Wenn man nun auch die Umwelt-Auswirkungen in Form von Schadenskosten und die Kosten für Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel betrachtet, kommen gegenüber früher noch zusätzliche Kosten hinzu. Klimaschäden, aber auch Anpassungsmaßnahmen lassen sich in externe Kosten fassen und ergänzen die früher „normale“ Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.

Als bautechnisch-konstruktiv orientierte Erhaltungs-Strategie bietet sich an, zunächst das Erhaltung-Potential der Infrastruktur auszuschöpfen und dann erst ggf. Ersatz-Neubauten anzudenken.

Sind wir im Wasserbau und Verkehrswasserbau auf dem richtigen Weg? Warum hinkt die Erhaltung hinter der Notwendigkeit her?

Auf die Frage: „Welche Probleme sehen Sie bei der Erhaltung von Wasserbauwerken/Brücken?“ gibt Abbildung 6 die Meinung der Teilnehmenden des Kolloquiums wieder.

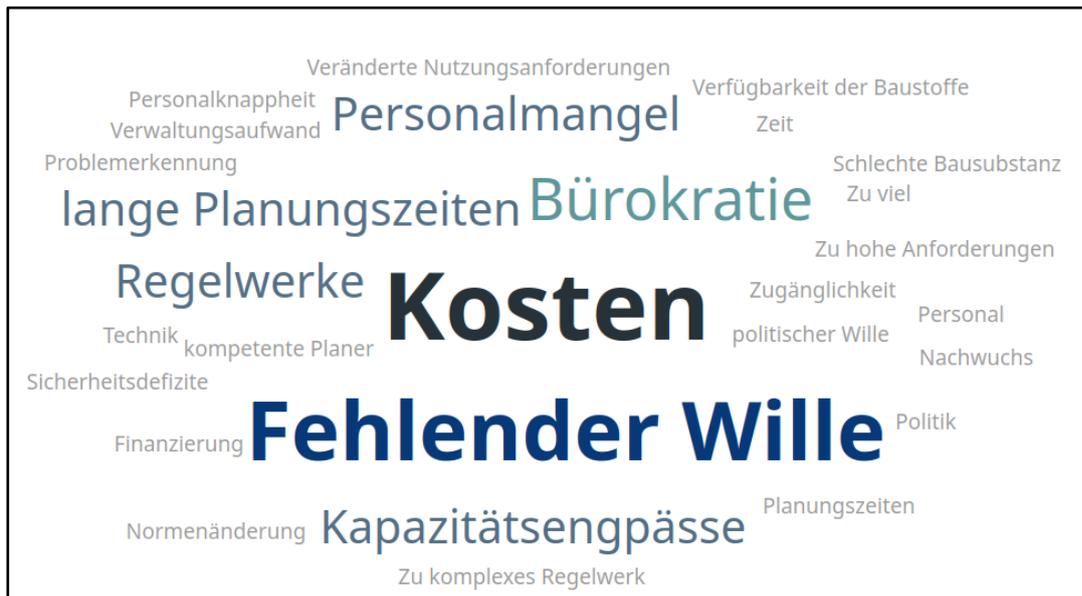


Abbildung 6: Slido-Abfrage „Welche Probleme sehen Sie bei der Erhaltung von Wasserbauwerken/Brücken?“ im Auditorium des Kolloquiums

Danach steht einschließlich von Synonymen die „Kosten“ an vorderster Stelle, gefolgt von „Fehlendem Willen“, was zu denken geben sollte. „Bürokratie“, „Regelwerke“, „Personalmangel/Kapazitätsengpässe“ und „lange Planungszeiten“ sind weitere stärker adressierte Problempunkte. Auch hier finden sich unter den weiteren Nennungen überlegenswerte Hinweise.

## Ausblick

Die Beiträge dieses BAW-Kolloquiums sollen einige Gestaltungsmöglichkeiten für die Erhaltung nahebringen, vielleicht solche, die kurzfristig für vergleichbare Problemstellungen umgesetzt werden können. Mit Sicherheit ließen sich mehrere Kolloquien-Tage mit derartigen Beiträgen bestreiten. Und danach könnte man Sammlungen, also Datenbanken mit best-practice-Beispielen und -Ideen erstellen. Aber: wir brauchen nicht nur Datenbanken, sondern vielmehr **TATEN**banken! Und damit sind wir wieder beim Tun, bei Erhaltung und Nachhaltigkeit.

Sind Sie mit mir nun gespannt auf die folgenden Beiträge und Diskussionen zur Erhaltung von Wasserbauwerken und Brücken.

## Literatur

Brundtland-Kommission (1987): Our Common Future. Weltkommission für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen, 1987.

DIN 31051 (2019): Grundlagen der Instandhaltung. Beuth-Verlag, Berlin.

Institution of Structural Engineers (2021): Blog Will Arnold: \_The hierarchy of net zero design.  
<https://www.istructe.org/resources/blog/the-hierarchy-of-net-zero-design/>, abgerufen  
2024-11-05.

Kunz, C. (2024): Haltung zur Erhaltung. In: Bautechnik 101 (2024), Heft 4. Verlag Ernst & Sohn.  
S. 268 – 274.

São Paulo School of Advanced Science on Structural Safety (2024): <https://spschoolstructural-safety.eesc.usp.br/>, abgerufen: 2024-10-18, University of São Paulo, 2024.

VDI (2018): Mehr Mut zum Experimentieren. VDI-Nachrichten 14. September 2018, Nr. 37.

## **„Erhaltung gestalten“- strategische Ansätze bei der Planung und Umsetzung von Erhaltungs- und Baumaßnahmen in der WSV**

Dipl.-Ing. Thomas Rosenstein, Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS)

### **Einleitung**

Die Bundeswasserstraßen sind unverzichtbarer Bestandteil der Verkehrsinfrastruktur für den Wirtschaftsstandort Deutschland. Jedoch werden die Bundeswasserstraßen nicht mehr eindimensional als reine Verkehrswege betrachtet, da sie in der Bevölkerung auch als eminenter Bestandteil der Natur wahrgenommen werden. Gewässer und Wasserstraßen dienen sowohl verkehrlichen als auch ökologischen und wasserwirtschaftlichen Zielen, was sich besonders in der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie widerspiegelt. Der Ausgleich zwischen ökonomischen und ökologischen Interessen wird aktiv von der WSV gestaltet.

Die Gewährleistung der Stand- und Betriebssicherheit der Bauwerke sowie die sichere Befahrbarkeit der Strecken ist Grundlage für die Verlässlichkeit und Attraktivität dieses Verkehrsträgers. Allerdings sind die verkehrswasserbaulichen Anlagen teilweise altersbedingt in einem schlechten Zustand. Dadurch können betriebliche Störungen und mit nicht unerheblicher Wahrscheinlichkeit auch Ausfälle entstehen, die zu einer zeitweise schlechten oder gar fehlenden Verfügbarkeit einzelner Wasserstraßenabschnitte führen können. Wirtschaftliche Einbußen und Zeitverzögerungen in den Lieferketten sowie ein Vertrauensverlust in den Verkehrsträger Wasserstraße wären die Folge. Der Zustand der Bauwerke sowie klimabedingte Veränderungen der Abflussverhältnisse bedingen einen hohen Bedarf an Erhaltungs- und Modernisierungsmaßnahmen. Darüber hinaus werden mit dem Wasserstraßenausbaugesetz und den neuen Aufgaben des wasserwirtschaftlichen Ausbaus weitere Erwartungen an die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) gestellt. Die Planung und Umsetzung der großen Erhaltungs- und Ausbaumaßnahmen gestaltet sich durch zahlreiche Vorgaben aus verschiedenen Richtungen zunehmend komplex.

Mit knapp 1,7 Mrd. Euro im Jahr 2024 hat die WSV Investitionen zum Erhalt und Ausbau der Bundeswasserstraßen in Rekordhöhe vorgenommen. Gegenüber dem Jahr 2017 entspricht dies fast einer Verdopplung der Leistungen. In Hinblick auf die durch Corona und der Ukraine-Krise (Lieferengpässe) geprägten Jahre, stellte das eine große Kraftanstrengung für die WSV dar.

### **Herausforderung**

Die WSV muss zahlreiche Programme umsetzen, um der Erwartungshaltung gerecht zu werden. So stehen Maßnahmen wie z.B. das Ersatzprogramm Stahlwasserbau, die /der Instandsetzung/Ersatz systemkritischer Wehre und Schleusen (u.a. Neckar, Main, Donau, Weser), der Aktionsplan Westdeutsches Kanalnetz, das Maßnahmenprogramm Nord-Ostsee-Kanal, die Abladeoptimierung Mittelrhein und Niederrhein, die Anpassung der Seehafenzufahrten, der Brückenersatz, die Ökologische Durchgängigkeit, der wasserwirtschaftliche Ausbau, um nur einen Teil der Programme zu nennen, den verfügbaren Ressourcen gegenüber. In der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) werden mehr als 1 000 Maßnahmen im Investitionsbereich zeitgleich geplant bzw. umgesetzt. Gemäß dem im Bundesverkehrswegeplan 2030 (BVWP) für alle

Verkehrsträger festgelegten Grundsatz, konzentrieren sich die Maßnahmen in der WSV auf Erhaltungs- und Ersatzinvestitionen.

Nach den verfügbaren 1,7 Mrd. Euro in 2024 wird die verfügbare Finanzlinie in den Folgejahren für alle anstehenden Maßnahmen nicht ausreichen. Die Inflation des letzten Jahres macht sich auch bei der Abwicklung von Baumaßnahmen bemerkbar. Bei den aktuellen Ausschreibungen sind in nahezu allen Bereichen enorme Preissteigerungen erkennbar. Wie sich das Preisgefüge in der kommenden Zeit entwickeln wird, kann nicht sicher vorhergesagt werden.

Die weitaus größte Herausforderung stellt jedoch die Bereitstellung der erforderlichen Personalressourcen dar. Der Fachkräftemangel (nicht nur für die WSV bzw. den Wasserbau) ist eine Tatsache, der man sich stellen muss. Es ist daher unabdingbar, Lösungen zu suchen, die deutlich weniger Ressourcen benötigen.

Um der Entwicklung Rechnung zu tragen wurde ein Veränderungsprozess angestoßen, der sich auf sämtliche Ebenen von der Vorplanung baulicher Maßnahmen bis zu deren Fertigstellung auswirken soll. Das übergeordnete Ziel ist die Wasserstraßen verlässlich und sicher betreiben zu können.

Da Ersatz- und Neubaumaßnahmen erhebliche Ressourcen- und Zeitaufwände benötigen, muss wieder stärker in die Unterhaltung der Bauwerke investiert werden (Handlungsrahmen Instandsetzung). Zudem ist absehbar, dass ein Großteil der Ausbauprojekte nicht mehr realisierbar ist.

### **Handlungsrahmen Instandsetzung**

Aufgrund des natürlichen Verschleißes der Stahlwasserverschlusskörper an Schleusen- und Wehranlagen (insbesondere deren Anfälligkeit für Korrosion) stellt die Instandsetzung der Verschlusskörper innerhalb der WSV eine Daueraufgabe dar. Auf Basis von Erfahrungswerten der Verschlusslebensdauer lassen sich die Instandsetzungsbedarfe bereits in die Zukunft prognostizieren und abbilden.

Das BMDV hatte die GDWS in der Steuerungsgruppe Erhaltungsmanagement der WSV damit beauftragt, das geplante Vorgehen zur Erhaltung und Sicherstellung der Betriebsfähigkeit von Wehranlagen der WSV darzustellen. In einer ersten Untersuchung wurden 38 Wehranlagen als systemkritisch eingestuft. Eine grundhafte Erneuerung ist bis 2030 angestrebt, kann aber nicht bei allen Wehren erreicht werden. Da bei solchen Maßnahmen lange Projektlaufzeiten eingeplant werden müssen, ist eine parallele und schnellere Programmatik erforderlich.

Es wurde ein Handlungsrahmen Instandsetzung entwickelt, um bis 2030 einen stabilen Zustand an allen staugeregelten Wasserstraßen zu erreichen und den anschließenden Regelbetrieb zu gewährleisten. Die im Handlungsrahmen beschriebenen Bausteine der Szenariodarstellung für den Instandsetzungsbedarf sollen als Steuerungsinstrument der GDWS – auch für die WSÄ zur Erstellung der kurz- und mittelfristigen Technischen Programmplanung – genutzt und fortlaufend aktualisiert werden. Mit Hilfe der ermittelten Informationen aus Kennzahlen sowie bautechnischen und bauaufsichtlichen Vorgaben, soll ein Handlungsrahmen für das Erhaltungsmanagement der

Ämter etabliert werden. Der langfristige Planungshorizont soll es ermöglichen, frühzeitig Engpässe und kritische Entwicklungen auf Ebene des Gesamtsystems Wasserstraße zu erkennen, um rechtzeitig Gegenmaßnahmen ergreifen zu können.

## **Veränderungsprozess**

Neben der notwendigen Priorisierung von Maßnahmen sind aber auch neue Ansätze in der Umsetzung von Bauprojekten erforderlich, um in eine ressourcenschonende, beschleunigte Abwicklung zu kommen. Insbesondere sind Lösungsansätze zu finden, damit wichtige Ressourcen nicht in Konflikten zwischen Bauherrn und Auftragnehmer gebunden sind. Dafür sind Strukturen zu schaffen, die das Klima auf der Baustelle verbessern und die partnerschaftliche Zusammenarbeit fördern. Dafür werden eine auf gemeinsame Ziele ausgerichtete Projektkultur benötigt sowie Vergabestrategien, die auf die Bauanforderungen und Bauabläufe ausgerichtet sind.

Größtenteils sind die Vorgehensweisen in Planungs- und Bauprozessen gesetzlich vorgegeben und können daher durch die Verwaltung nur sehr bedingt beeinflusst werden. Um eine Beschleunigung im Planungs- und Bauprozess zu erreichen, müssen vor allem die Zusammenarbeit und die Entscheidungsprozesse innerhalb der Verwaltung und zwischen den am Projekt Beteiligten verbessert werden. Die WSV nutzt im Interesse der Beschleunigung von infrastrukturellen Maßnahmen innovative Möglichkeiten zur Optimierung von Planungsprozessen in vertrauensvoller Zusammenarbeit mit den beteiligten Partnern. Zu diesen Strategien gehören:

- Revierbezogene Programme (Steuern über Programm und nicht über die Einzelmaßnahme)
- Projektorientierte Abstimmungsprozesse
- Risiko- und Projektmanagement
- Mehr Verantwortung auf die Baustelle
- Integrierte Projektabwicklung
- Dialogbasierte Vergabemodelle
- Übergreifende Ressourcensteuerung (Multiprojektmanagement)
- Kommunikationskonzept

## **Revierbezogene Bauprogramme**

Durch die Aufstellung von revierbezogenen Bauprogrammen sollen ein über alle Ebenen abgestimmtes, realistisches und priorisiertes Maßnahmenprogramm entwickelt werden. Ziel ist eine Planungssicherheit für die Ämter, optimale Außendarstellung und Reduzierung von Einzelfalldiskussionen. Über das Informationssystem Multiprojektmanagement kann ein regelmäßiger Abgleich und Nachsteuern des Programms erfolgen, welches in jährlichen Revierbesprechungen erörtert wird. Gemeinsam mit einem projektorientierten Abstimmungsprozess können somit Reibungsverluste reduziert und damit Ressourcen geschont werden.

## **Informationssystem Multiprojektmanagement**

Um zu einem digitalen, WSV-weit vernetzten Infrastrukturmanagement zu kommen, baut die GDWS sukzessive ein datengestütztes Informationssystem in definierten Multiprojekt-Management-Gebieten (MPM-Gebieten) auf. Für einen aktuellen, transparenten und umfassenden Überblick werden die projektrelevanten Informationen vor Ort standardisiert eingegeben und vierteljährlich aktualisiert.

Aus dem System können, je nach Fragestellung, flexible Auswertungen der für das Management erforderlichen Kennzahlen und Reports erstellt werden. Dabei liefert das System über alle Regionen Informationen im stets gleichen Format, so dass sie vergleichbar sind. Liegen die Projektinformationen im Überblick vor, lassen sich daraus Abhängigkeiten zwischen den Projekten verschiedener Dienststellen erkennen. Einzelprojekte können besser aufeinander abgestimmt, finanzielle und personelle Ressourcen transparent und nachvollziehbar dargelegt werden. Die Erfahrungen aus den Einzelprojekten stehen für alle Folgeprojekte zur effizienteren Abwicklung zur Verfügung.

Das Informationssystem Multiprojektmanagement wurde prototypisch für das MPM-Gebiet Neckar entwickelt. Nach erfolgreichem Testbetrieb wurde das System auf die MPM-Gebiete Westdeutsche Kanäle, Main-Donau-Wasserstraße und den ostdeutschen Wasserstraßen erweitert und zurzeit für weitere Gebiete (NOK, Weser/MLK und Rhein) aufgebaut.

Darauf aufbauend wird ein WSV-weit einheitliches Projekt- und Risikomanagement eingeführt, um Projekte hinsichtlich Kosten- und Zeitentwicklung transparenter und sicherer zu gestalten.

## **Dialogorientiertes Bauen – Charta für die Zusammenarbeit**

Bauprojekte an Bundeswasserstraßen sind technisch und organisatorisch komplexe Bauprozesse, deren vorausschauende Bewältigung eine Herausforderung für alle Beteiligten darstellt. Die WSV und der Hauptverband der Bauindustrie waren sich einig, dass für Baumaßnahmen aller Art die Zusammenarbeit und die Entscheidungsprozesse verbessert werden müssen, um die Effektivität der Bauprojekte und die Effizienz bei deren Umsetzung zu steigern. Hierfür haben Vertreter der Bauindustrie und des Bauherrn partnerschaftliche Verhaltensregeln erarbeitet, die letztlich in einer Charta für die Zusammenarbeit auf Baustellen an Bundeswasserstraßen festgeschrieben wurden. Die erfolgreiche Fertigstellung des Bauwerks wird zum Maßstab für das Handeln. In 14 Statements wurden einfache und klare Umgangsformen für das Miteinander vereinbart. Bei der Charta handelt es sich um eine Vereinbarung einer besseren Projektkultur, deren Regelungen jedoch keine vertraglichen Verbindlichkeiten haben. Sie wird von allen Beteiligten gleichermaßen getragen.

Vor dem Hintergrund der fortlaufenden Kritik aus dem politischen Raum, dass öffentliche Bauprojekte weder kosten- noch termintreu umgesetzt werden, stellt die Charta einen Beitrag zur Konfliktvermeidung dar. Sie soll dazu führen, dass Entscheidungen frühzeitig und auf der Baustelle getroffen und damit aufwändige gerichtliche Auseinandersetzungen minimiert werden.



Abbildung 1: Charta für die Zusammenarbeit auf Baustellen an Bundeswasserstraßen

## Dialogfördernde Vergabestrategien

Die bisherige Vergabep Praxis trägt nicht dazu bei, das Konfliktpotential zwischen Auftragnehmer und Auftraggeber bei Großprojekten zu reduzieren. Das strikte vorgegebene Leistungsverzeichnis lässt dem Auftraggeber wenig Gestaltungsfreiraum. Bauaufträge werden oft ausschließlich auf Basis des Angebotspreises vergeben. Angebote seitens des Auftragnehmers werden daher oft nicht kostendeckend abgegeben, sondern zielen auf Nachträge zur Erzielung einer späteren Auftragsrendite. Hierbei bildet die Schnittstelle zwischen Planung und Ausführung eine wesentliche Rolle.

Vertreter aus Wirtschaft, Politik und Verwaltung sind sich einig, dass zwischen allen Vertragsparteien eine Kooperationskultur herrschen sollte. Hierfür bieten sich vor allem bei komplexen Baumaßnahmen dialogfördernde Vergabestrategien an, die in der WSV pilotiert werden:

- Qualitätsbasierte Vergaben, bei denen die qualitativen Vergabekriterien gegenüber dem Preis eine höhere Bedeutung haben.
- Zweistufige Auswahlverfahren, bei denen durch einen vorgeschalteten Teilnahmewettbewerb die geeigneten Teilnehmer leistungs- und qualitätsbasiert ausgewählt werden. Die Zuschlagserteilung erfolgt dann nach dem Preis.
- Vergabeverfahren mit funktionalen Bestandteilen, bei denen über die Umsetzungsmöglichkeiten in einem Verhandlungsverfahren betrachtet werden (Planen-und-Bauen-Modell).
- „Zwei-Phasen-Modell“ bei denen zu einem frühen Zeitpunkt die bauausführende Firma in die Planung mit eingebunden wird, um diese Kompetenz bei der Planung mit berücksichtigen zu können.
- Integrierte Projektabwicklung (Mehrparteienprinzip)

Diese Optionen bei der Auswahl der Vergabestrategie schafft auch die erforderliche Transparenz, so dass sich der Unternehmer zum Bauprojekt bekennt und deutlich sein Interesse vermittelt, zu bauen, anstatt beispielsweise über Nachträge zu lähmen.

### **Integrierte Projektabwicklung**

Ein Beispiel für die Umsetzung eines Großprojektes als Pilotierung eines Mehrparteienvertrages (MPV) ist der Ersatz der Schleuse Herbrum. Hierbei wird eine Form des MPV, die Integrierte Projektabwicklung (IPA) angewendet. Die IPA beinhaltet die frühe Einbindung der Planungsbüros und der ausführenden Bauunternehmen. Diese (mindestens) drei Partner binden sich vertraglich, um die Planung und die Ausführung der Bauleistung gemeinsam als Team durchzuführen. Die technische Konzeption, der Bauablaufplan und der Kostenrahmen einer neuen Schleusenkammer in Herbrum werden also bei der IPA durch das gebildete Planungsteam (aus Ingenieuren des Auftraggebers (AG) WSV, des Planungsbüros, der bauausführenden Firmen) erarbeitet und gemeinsam verantwortet. Hierdurch werden die Ressourcen aller Beteiligten und insbesondere die des AG geschont und ein gemeinsames Ziel verfolgt. Verzögerungen, Fehler bei der Planung oder der Bauausführung müssen von allen Partnern gemeinsam getragen werden. Dies lässt eine hohe Motivation zur Einhaltung von Terminen und des Kostenrahmens erwarten.

## **Instandsetzung massiver Verkehrswasserbauwerke – Dauerhaftigkeit, Instandsetzungen und (Regelwerks-)Entwicklungen im Überblick**

Andreas Westendarp, Bundesanstalt für Wasserbau

### **Einleitung**

Im Mittelpunkt des vorliegenden Beitrags stehen Instandsetzungsmaßnahmen an massiven Verkehrswasserbauwerken zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Beton und Bewehrung als wesentliche Voraussetzung für die Aufrechterhaltung der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit für eine bestimmte Nutzungsdauer.

### **Dauerhaftigkeitsprobleme, Instandsetzungsbedarf**

Bei massiven Verkehrswasserbauwerken im Binnenbereich sind die bestehenden Dauerhaftigkeitsprobleme insbesondere auf Betonkorrosion und hier namentlich auf Frost in Verbindung mit hohen Wassersättigungsgraden sowie einer hohen Anzahl von Frost-Tau-Wechseln, aber auch auf Einwirkungen infolge Hydroabrasion zurückzuführen. Hinzu kommen Risse infolge Zwang sowie gerissene Arbeits- und Betonierfugen. Betroffen sind insbesondere ältere Bauteile und Bauwerke ohne oder mit geringen Bewehrungsgehalten. Carbonatisierungsinduzierte Bewehrungskorrosion ist aufgrund der hohen Sättigungsgrade und der damit einhergehenden geringen Carbonatisierungstiefen, anders als in anderen Baubereichen, an Verkehrswasserbauwerken im Binnenbereich nur von nachgeordneter Bedeutung.

Im Meerwasserbereich kommt ergänzend zu den vorgenannten Dauerhaftigkeitsproblemen chloridinduzierte Bewehrungskorrosion in ungerissenen und insbesondere in gerissenen Bauteilbereichen hinzu. Hiervon sind Bauwerke aller Altersstufen und sowohl massige wie auch schlanke Bauteile betroffen.

### **Instandsetzungskonzepte, Instandsetzungsverfahren**

Bei der Entwicklung von Instandsetzungskonzepten und Instandsetzungsverfahren für massive Verkehrswasserbauwerke sind generell die Prinzipien und Verfahren gemäß [TR-IH] zur Instandsetzung bei Beton- bzw. bei Bewehrungskorrosion zugrunde zu legen. Hierbei sind aber ergänzend die besonderen wasserbauspezifischen Randbedingungen zu berücksichtigen. Neben den bereits als Schadensursache genannten Einwirkungen wie besonders intensiver Frostangriff und Hydroabrasion, aber auch Schiffsanfahrt ist hier insbesondere der innere Wasserdruck in Betonbauteilen gemäß DIN 19702 als Riss- und Porenwasserdruck zu berücksichtigen, welcher bemesungsrelevant im Hinblick auf die Verankerung und die Bewehrung zementgebundener Vorsatzschalen wirkt. Daneben sind Aspekte wie das mögliche Auftreten erhöhter Sättigungsgrade hinter weniger durchlässigen Instandsetzungssystemen als der Altbeton gerade bei dünn-schichtigen Instandsetzungsmaßnahmen sowie fallweise nicht vorwiegend ruhende Belastung gemäß DIN 19702 ( $n > 2 \times 10^4$ ) beispielsweise bei Schleusen-kammerwänden zu betrachten.

Grundsätzlich sind bei der Planung von Instandsetzungsmaßnahmen immer nachfolgende Aspekte zu berücksichtigen, welche auch Eingang in die [TR-IH] gefunden haben:

- Sicherstellung der Dauerhaftigkeit des Instandsetzungssystems für die vorgesehene Nutzungsdauer unter den gegebenen Einwirkungen von außen und aus dem Untergrund
- Sicherstellung der Dauerhaftigkeit des Verbundes von Instandsetzungssystem und Betonuntergrund über Adhäsion und/oder Verankerung während der vorgesehenen Nutzungsdauer
- Erreichen der Instandsetzungsziele

Mit Blick auf das Erreichen bestimmter Instandsetzungsziele fehlen national wie international praxistaugliche Bemessungsansätze im Hinblick auf Betonkorrosion. Für eine Bemessung hinsichtlich der Sicherstellung des Korrosionsschutzes der Bewehrung steht hingegen mit BAW-MDCC ein Werkzeug zur Verfügung, welches auch in anderen Baubereichen mangels Alternativen auf nationaler Ebene Anwendung findet.

### **Gelbdruck ZTV-W LB 219 (2025) – Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken**

Grundlage für die Instandsetzung dauerhaftigkeitsrelevanter Instandsetzungsmaßnahmen an massiven Verkehrswasserbauwerken ist die ZTV-W LB 219 (2017). Diese ZTV befindet sich derzeit in der Überarbeitung, ein öffentliches Gelbdruckverfahren für die Neufassung ist ab Dezember 2024 vorgesehen. Mit einer Einführung der neuen ZTV-W LB 219 (2025) und der zugehörigen Bezugsdokumente ist unter Berücksichtigung vorgegebener Fristen für Sommer/Herbst 2025 zu rechnen.

Eine Überarbeitung der aktuellen ZTV-W LB 219 (2017) ist insbesondere aus folgenden Gründen erforderlich:

- Berücksichtigung von DIN 1045 (2023) und ZTV-W LB 215 (2025)
- Berücksichtigung technischer Entwicklungen und baupraktischer Anforderungen
- Ergänzung des Qualitätssicherungskonzepts für Instandsetzungssysteme gemäß ZTV-W LB 219 (2017), Abschnitt 5 bis 8 (Spritzmörtel, Handmörtel, Oberflächenschutzsysteme und Rissfüllstoffe).

Die im Gelbdruck zur künftigen ZTV-W LB 219 (2025) geregelten Instandsetzungssysteme sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Anwendungsbereich der Instandsetzungssysteme [Gelbdruck ZTV-W LB 219 (2025)]

1	2	3	4	5	6	7
Alt- beton- klasse	Beton (Abschnitt 3)	Spritzbeton (Abschnitt 4)	Spritzmörtel / Spritzbeton (Abschnitt 5)	Betonersatz im Handauftrag (Abschnitt 6)	Oberflächen- schutz- systeme (Abschnitt 7)	Füllen von Rissen und lokalen Hohl- räumen <sup>5)</sup> (Abschnitt 8)
	$d \geq 90 \text{ mm}^1)$	$d \geq 90 \text{ mm}^1)$	$20 \leq d \leq 60$ mm	$10 \leq d \leq 60$ mm		
	verankert, bewehrt <sup>4)</sup>		unverankert, unbewehrt			
A1	X	X	---	---	---	--- <sup>6)</sup>
A2	X	X	X	---	---	X
A3	X	X	X	---	X <sup>3)</sup>	X
A4	X	X	X	X <sup>2)</sup>	X	X
A5	X	X	X	X <sup>2)</sup>	X	X
<p>1) Für Vorsatzschalen für Schleusen-kammerwände und vergleichbare Bauteile siehe Abschnitte 3.3.2 bzw. 4.3.2.                  2) Nicht bei flächigem Auftrag über Kopf oder an vertikalen Flächen.                  3) Nur für Betonuntergründe, bei denen der Mittelwert der Abreißfestigkeit mindestens 1,3 N/mm<sup>2</sup> beträgt.                  4) Gilt für Beton nur bei flächigem Auftrag.                  5) Hinsichtlich der Injektion mit hydraulischen Bindemitteln in Wasserbauwerken aus Massenbeton zur Reduzierung von Wasserwegigkeiten siehe DWA-Merkblatt 506.                  6) Anwendbarkeit muss im Einzelfall bewertet werden.</p>						

### Ausgewählte Regelungen aus Gelbdruck ZTV-W LB 219 (2025) zu Beton (Abschnitte 0 und 3)

Für Instandsetzungsmaßnahmen an massiven Verkehrswasserbauwerken wie Schleusen und Wehranlagen sind insbesondere verankerte und bewehrte Beton- und Spritzbetonvorsatzschalen von Bedeutung. Nachfolgend stichwortartig ausgewählte Regelungen aus Gelbdruck ZTV-W LB 219 (2025), Abschnitte 0 und 3:

- Planungsklasse PK-S, Betonklasse BK-S, Ausführungsklasse AK-S → Betonbauqualitätsklasse BBQ-S.  
Grundsatz: Niveau „E“ gemäß DIN 1045 (2023) ist mindestens einzuhalten.
- Instandsetzungsplan → AG: vorläufiges Betonbaukonzept gemäß DIN 1045-1000 → AN: Betonbaukonzept gemäß DIN 1045-1000
- Ansatz des maximal möglichen inneren Wasserdrucks (Riss- und Porenwasserdruck) gemäß DIN 19702 zwischen Betonuntergrund und Instandsetzungssystem bei Bauteilen, bei denen sich hinter dem Instandsetzungssystem ein Wasserdruck einstellen kann
- Gemäß DIN EN 1992-1-1 kein Adhäsionsverbund zwischen Altbeton und Instandsetzungssystem bei flächigen Bauteilen mit nicht vorwiegend ruhender Belastung gemäß DIN 19702
- Bei Vorsatzschalen muss die Bewehrung grundsätzlich beidseitig angeordnet werden
- Deutliche Ausweitung der im Verkehrswasserbau verwendbaren Zemente

- Rezyklierte Gesteinskörnung nur für Bauteile mit vorwiegend ruhender Belastung gemäß DIN 19702, 5.3.2.4
- Für Betonvorsatzschalen:
  - Frischbetontemperatur maximal 28 °C statt vormals 25 °C
  - Begrenzung der adiabatischen Temperaturentwicklung des Betons auf maximal 45 K statt vormals 40 K → Bestimmung nach Gelbdruck BAW-MATB (Bestimmung der adiabatischen Temperaturerhöhung von Beton)
  - Regelungen zu Mikrohohlkugeln als Alternative zu herkömmlichem LP-Beton
- Bei Bauteilen mit Expositionsclassen XS2, XS3 → Verweis auf Gelbdruck BAW-MBM (Bau massiver Wasserbauwerke im Meerwasserbereich)
- Wasserabführende Schalungsbahnen bei wasserberührten Bauteilen mit XF3, XF4, XM2 oder XA2.

### **Gelbdruck ZTV-W LB 219 (2025) - Qualitätssicherung von Instandsetzungssystemen gemäß Abschnitt 5 bis 8**

Bei Instandsetzungsmaßnahme gemäß Abschnitt 5 bis 8 muss der Sachkundige Planer die projektspezifisch geforderten Leistungsmerkmale und zugehörige Prüfverfahren in Abhängigkeit der projektspezifischen Expositionsclassen vorgeben. Eine entsprechende tabellarische Auflistung ist der Leistungsbeschreibung beizufügen. Basis für diese Vorgaben sollte die BAW-Empfehlung Instandsetzungsprodukte sein, welche inhaltlich mit der später erschienenen TR-IH identisch ist.

Über mehrere Jahrzehnte hinweg erfolgte der Nachweis der Verwendbarkeit von Instandsetzungsprodukten im Rahmen einer „Präqualifikation“. Hierbei wurden die erforderlichen Leistungsmerkmale durch ein unabhängiges Institut geprüft („Grundprüfung“) und die anschließende Stoffherstellung durch eine ebenfalls anerkannte Stelle überwacht. Entsprechend qualifizierte Instandsetzungsprodukte wurden in Listen bzw. Zusammenstellungen geführt. Mit EuGH-Urteil aus 2027 wurde diese Vorgehensweise als nicht europarechtskonform eingestuft. In der aktuell gültigen ZTV-W LB 219 (2017) sind die vom AG ausgeschriebenen Leistungsmerkmale für Instandsetzungsprodukte gemäß Abschnitt 5 bis 8 vom AN, also der bauausführenden Firma projektspezifisch nachzuweisen. Da dieser Ansatz zwar europarechtskonform, in der Praxis aber angesichts des Aufwands nur bei besonderen Baumaßnahmen realisierbar ist, werden Prüffähige Bescheinigung gemäß Art. 30 BauPVO („DIBt-Gutachten“) gemäß ZTV-W LB 219 (2017) als Alternative anerkannt. Solche Prüffähige Bescheinigungen sind von den Produktherstellern in den letzten Jahren in großer Zahl beantragt und erstellt worden, werden dem Markt aktuell aber seitens der Produkthersteller nicht zur Verfügung gestellt.

*Anmerkung: Aktuell scheint sich hier für Anfang 2025 eine grundlegende Wende anzudeuten.*

Für die Neufassung der ZTV-W LB 219 (2025) wird die vorgenannte Vorgehensweise (Projektspezifischer Nachweis, alternativ Prüffähige Bescheinigung) als Variante 2 beibehalten. Neu aufgenommen werden wird eine Variante 1, bei der der AG weiterhin die erforderlichen Leistungsmerkmale ausschreibt. Der AN wählt geeignete Instandsetzungsprodukte aus, für die der Produkthersteller die Einhaltung der projektspezifisch erforderlichen Merkmale verbindlich

erklären muss. Der AG akzeptiert diese Erklärung zunächst, kann die tatsächliche Einhaltung der geforderten Leistungsmerkmale aber im Rahmen von baubegleitenden Kontrollprüfungen verifizieren. Diese Vorgehensweise entspricht prinzipiell den auf europäischer Ebene vorgesehenen Verfahren zur Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit von Instandsetzungsprodukten (AVCP- bzw. AVS-Verfahren 2+) und dem nach TR-ICH für den Regelfall vorgesehenen Ansatz „Erklärung durch den Hersteller gemäß DIN 18200, Anhang A, auf Grundlage von DIN 18200, Nachweisverfahren System B“.

### **Entwicklungsaspekte über den Gelbdruck der ZTV-W LB 219 (2025) hinaus**

Über den aktuellen Gelbdruck der ZTV-W LB 219 (2025) besteht absehbar Entwicklungspotential. Insbesondere sind Instandsetzungsmaßnahmen gemäß Abschnitt 3 und 4 (Vorsatzschalen aus Beton oder Spritzbeton (verankert, bewehrt) auch gemäß Gelbdruck der ZTV-W LB 219 (2025) auf ältere, unbewehrte Schleusenammerwände ausgerichtet. Eine Anwendbarkeit z. B. bei Wehrpfeilern und bei modernen Stahlbetonbauteilen ist nur bedingt möglich. Hier ist im Hinblick auf die Bemessung von Verankerung und Bewehrung solcher Vorsatzschalen insbesondere die Frage zu klären, ob der Ansatz eines pessimalen inneren Wasserdrucks, wie er für Stampfbetonbauwerke sicherlich angemessen ist, auch bei modernen Stahlbetonbauteilen erforderlich ist. Bei der Beantwortung dieser Frage ist unbedingt eine konsistente Vorgehensweise mit Blick auf die Bemessung im Neubau und die Nachrechnung bestehender Bauwerke sicher zu stellen.

Ein weiterer, der Bauausführung und der Qualitätssicherung des Betons für Vorsatzschalen dienlicher Ansatz wäre möglicherweise der Einsatz mobiler Mischeinrichtungen und die Verwendung vorkonfektionierte Trockenmischungen.

Bei Spritzmörtel/Spritzbeton (unverankert, unbewehrt, bis 60 mm) gemäß Abschnitt 5 der ZTV-W LB 219 wäre die Beantwortung der Frage wichtig, inwieweit das Risiko des Eintretens höherer Wassersättigungsgrade im Altbeton hinter dem Spritzmörtel auch bei modernen Betonen zu berücksichtigen ist.

Für neu zu erstellende Verkehrswasserbauwerke sollten Überlegungen angestellt werden, inwieweit diese instandsetzungsfreundlicher gestaltet werden können. Als ein Beispiel ist hier die Lage des bei fugenloser Bauweise ausgeprägten „Zugbandes“ im Planiebeton von Schleusenammerwänden zu nennen. Eine Instandsetzung des besonders exponierten Planiebetons (u. a. mechanischer Angriff, Frost in Verbindung mit Taumitteln), wie sie im Laufe der Nutzungsdauer bei vielen Schleusen erforderlich wird, ist angesichts der hier bei modernen Schleusen konzentrierten Bewehrung nur schwer möglich. Eine Tieferlegung der Bewehrung und eine Ausbildung der Planie im Sinne einer Brückenkappe wären diesbezüglich hilfreich.

### **Literatur**

TR-ICH (2021): Technische Regel Instandhaltung von Betonbauwerken. Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), 2021.

DIN 19702 (2013-02) Massivbauwerke im Wasserbau - Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit. Deutsches Institut für Normung (DIN).

- BAW-MDCC (2019): BAW Merkblatt Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC). Bundesanstalt für Wasserbau, 2019.
- ZTV-W LB 219 (2017): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für die Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken (Leistungsbereich 219). Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2017.
- ZTV-W LB 219 (2025) Gelbdruck: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für die Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken (Leistungsbereich 219). Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Gelbdruckverfahren ab 12/2024.
- DIN 1045 (2023): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Deutsches Institut für Normung (DIN).
- ZTV-W LB 215 (2025) Gelbdruck: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen - Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Leistungsbereich 215). Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Gelbdruckverfahren ab 12/2024.
- BAW MATB (2024): BAW Merkblatt Bestimmung der adiabatischen Temperaturerhöhung von Beton (MATB). Bundesanstalt für Wasserbau. Gelbdruckverfahren ab 12/2024.
- BAW-Merkblatt MBM (2025): BAW Merkblatt Bau massiver Wasserbauwerke im Meerwasserbereich (MBM). Bundesanstalt für Wasserbau, Gelbdruckverfahren ab 03/2025.
- BAWEmpfehlung Instandsetzungsprodukte (2019): BAWEmpfehlung Instandsetzungsprodukte – Hinweise für den Sachkundigen Planer zu bauwerksbezogenen Produktmerkmalen und Prüfverfahren. Bundesanstalt für Wasserbau, 2019.
- DIN 18200 (2021-04): Übereinstimmungsnachweis für Bauprodukte - Werkseigene Produktionskontrolle, Fremdüberwachung und Zertifizierung. Deutsches Institut für Normung (DIN).

## Bauwerke im und über dem Wasser erhalten mit der neuartigen UHFB-Technologie

Prof. em. Dr. Dipl.-Ing. ETH Eugen Brühwiler, ETH Lausanne (EPFL) und Bridging Consultant Ltd., Lausanne, Schweiz

### Zusammenfassung

Wasserbauwerke aus Stahlbeton zeigen oft Schäden infolge Hydro-Abrasion und AKR. Eine effiziente Instandsetzung dieser Schäden gelingt mit dem neuartigen Baustoff UHFB (oder auch UHPC genannt) und der zusammenhängenden Technologie zur dauerhaften Behebung der Schäden und Ertüchtigung der Bauwerke für eine lange dauernde, weitere Nutzungsdauer. In der Schweiz wird die UHFB-Technologie seit 20 Jahren vorwiegend für die Erhaltung von Brücken und Hochbauten eingesetzt. Erste Anwendungen für die Instandsetzung von Wasserbauwerken wurden vielversprechend ausgeführt.

### Einleitung

Der ultra-hochleistungsfähige *zementgebundene Faserverbundbaustoff* UHFB (UHPC) (Abb. 1a) ist weder Stahl noch Beton, sondern ein eigenständiger Verbundbaustoff, der aus einer Zementgebundenen Matrix aus feinen Partikeln (kleiner 0,5mm) besteht und durch eine sehr große Menge von etwa 15mm kurzen, schlanken Stahlfasern hochfest und verformungsfähig gemacht wird. Durch eine Optimierung der Partikel wird ein kompakter Baustoff erhalten, der auch unter Zugbeanspruchung wasserdicht und somit dauerhaft ist. UHFB weist zudem eine vergleichsweise hohe mechanische Festigkeit, Verformungsfähigkeit und Abriebfestigkeit auf.

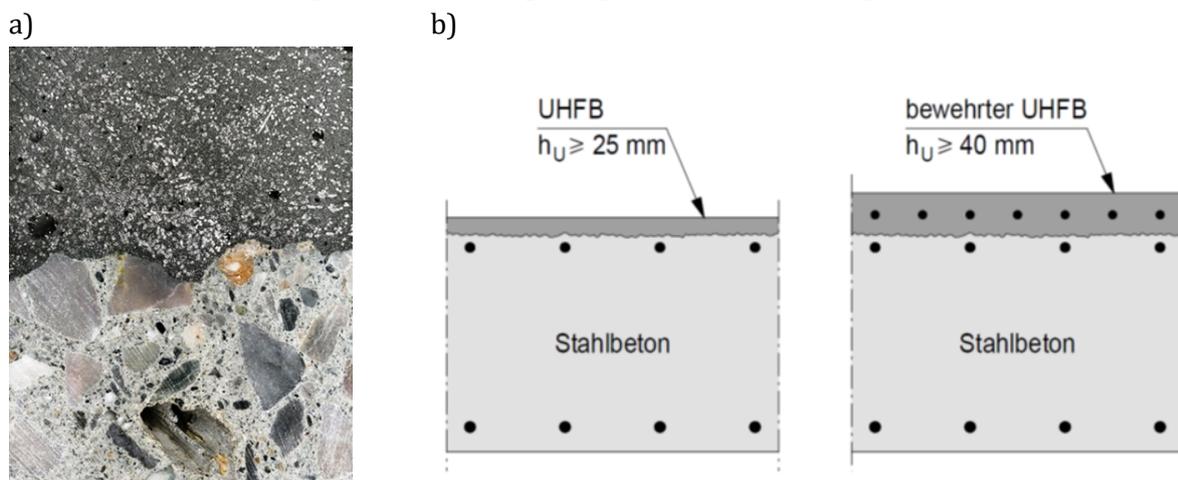


Abbildung 1: a) der optische Unterschied zwischen UHFB (oben) und Beton (unten) ist offensichtlich. b) Grundkonfigurationen des UHFB-Stahlbeton-Verbundbaus: links: Schutzfunktion und Erhöhung der Steifigkeit im Gebrauchszustand, rechts: Schutzfunktion sowie Erhöhung der Steifigkeit und des Tragwiderstands des Bauteils.

Der Baustoff UHFB wurde vor rund 50 Jahren in Dänemark von Hans-Henrik Bache erfunden und seither weiterentwickelt. Im Hinblick auf die Anwendung zur Instandsetzung und Verstärkung von Bauwerken wird seit 1999 an der ETH Lausanne (Schweiz) das Tragverhalten von UHFB-

Beton Verbundbauteilen untersucht. Die Idee besteht darin, Bauteile aus Stahlbeton mit UHFB gezielt zu «härten», um stark exponierte Oberflächen zu schützen und statisch stark beanspruchte Bauteile zu verstärken (Abb. 1b). Dadurch verbessert der UHFB die Tragfähigkeit und die Dauerhaftigkeit der Stahlbetonkonstruktion entscheidend. Durch den Einsatz von UHFB erhält das Stahlbetonbauwerk einen Mehrwert und eine lange Nutzungsdauer.

Seit 2004 werden in der Schweiz zahlreiche Betonbauten, insbesondere Brücken und Hochbauten, mit UHFB instandgesetzt, verstärkt und abgedichtet. Die bisher größte Anwendung betraf im Jahr 2014/15 den 2.1km langen Chillon-Autobahnviadukt entlang des Genfersees bei Montreux. Mit heute über 500 Anwendungen ist die UHFB-Bauweise in der Schweiz etabliert und normativ geregelt (ASTRA Dokumentation 82022).

Das einfache UHFB-Konzept ermöglicht die Erhaltung der bestehenden Bauwerke aus Stahlbeton und deren Ressourcen. Es handelt sich somit um eine Technologie, welche die Kriterien der Nachhaltigkeit sehr gut erfüllen kann. UHFB wird auch vorteilhaft für den Neubau eingesetzt. Bei der UHFB Bauweise handelt es sich möglicherweise um die wichtigste Innovation im konstruktiven Ingenieurbau der letzten 20 Jahre.

### **Hydro-mechanischer Abrasionswiderstand von UHFB im Vergleich mit Beton**

Hydro-Abrasion wird durch den Aufprall von im fließenden Wasser mitgeführten Feststoffen unterschiedlicher Größe auf das Flussbett verursacht. Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse einer im Jahr 2023 durchgeführten Studie (Lochmann et al. 2024) beschrieben, die zum Ziel hatte, den Widerstand von UHFB gegenüber Wasserabrieb zu messen und ihn mit Beton zu vergleichen.

Dazu wurde die ASTM C-1138 Methode mit dem entsprechenden Versuchsaufbau verwendet (Abb. 2). Die Methode simuliert den hydro-mechanischen Abrieb. Dazu wird ein „Kuchen-förmiger“ Prüfkörper mit einem Durchmesser von 300mm und einer Stärke von 100 mm in einen mit Wasser gefüllten Metallzylinder gelegt, auf dessen Oberfläche sich ein Satz Stahlkugeln mit unterschiedlichen Durchmessern befindet. Ein Rührpaddel ist an einem Motor befestigt und wird mit einer Geschwindigkeit von 1200 U/min gedreht, wodurch eine Kugelrollbewegung auf der Oberfläche der Probe entsteht. Der Versuch dauert 72 Stunden und ist in 6 12-Stunden-Intervalle unterteilt. Der Prüfkörper wurde vor Versuchsbeginn und anschließend nach jedem Intervall genau gewogen. Zudem wurde jeweils auch die Oberfläche der Prüfkörper mit einem hochpräzisen Scanner aufgenommen.



*Abbildung 2: Versuchsaufbau gemäß ASTM C1138.*

Folgende Ergebnisse wurden erhalten (Abb. 3 und 4):

- Der Massenverlust der Prüfkörper aus UHFB durch hydro-mechanischen Abrieb war im Durchschnitt etwa 4,5-mal geringer als bei Beton.
- Der Einfluss von Wasserabrieb auf die Oberflächenrauigkeit von UHFB ist etwa 14-mal langsamer als bei Beton (Abb. 3).

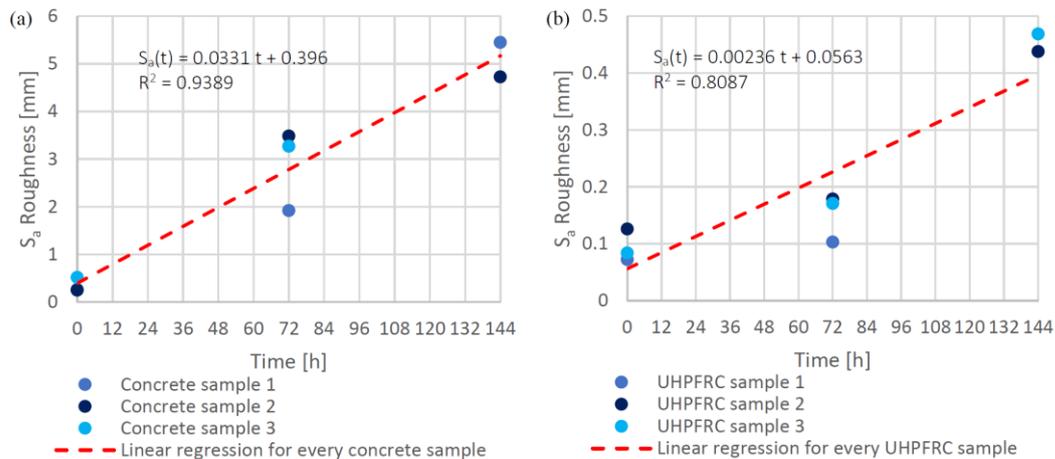


Abbildung 3: Zeitliche Entwicklung des Rauheitsparameters  $S_a$  für (a) Beton und (b) UHPFB. (Man beachte den etwa 10 Mal kleineren Maßstab der Ordinate für UHPFB.)

- Im Gegensatz zu Beton erfolgt die Hydro-Abrasion von UHPFB in zwei Phasen. Die erste Phase ist der Hydro-Abrieb der zementösen Oberfläche. Sobald diese Haut abgerieben ist, gelangen die schlanken Stahlfasern an die Oberfläche und werden von den Schleifkugeln angegriffen.
- Das bekannte Hydro-Abriebverhalten von Beton wurde bestätigt. Zunächst wird die Oberflächenschicht des Betons abgetragen. Anschließend treffen die Schleifkugeln auf die Zuschlagstoffe Sand und Kies. Diese Zuschlagstoffe werden dann durch Ausreißen aus dem Zementstein und durch schrittweise Erosion abgerieben.
- Die Aufnahmen der abgeriebenen Oberflächen (Abb. 4) mit dem hochpräzisen Scanner ermöglichten neuartige Information zu erhalten, die ein besseres Verständnis der Mechanik der Hydro-Abrasion aufschlossen.

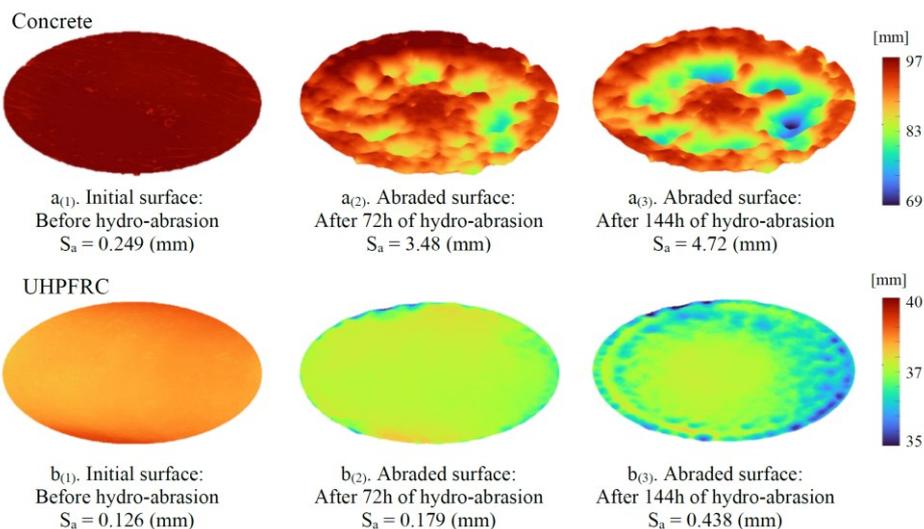


Abbildung 4: Abgeschliffene Oberflächen in unterschiedlichem Stadium für Beton (oben) und UHPFB (unten).

Das Forschungsprojekt zeigt, dass UHFB eine deutlich höhere Wasserabriebfestigkeit aufweist als Beton oder andere Materialien, die als Oberflächenbeschichtung zum Schutz vor Wasserabrieb in Wasserbauwerken verwendet werden.

## Pilotanwendungen im Wasser

### UHFB-Schutzschicht auf Flussschwelle

Die durch Hydro-Abrasion beschädigten Stahlbetonplatten von Schwellen des Wasserkraftwerks Matte in Bern mit einer Neigung von 6 % wurden im Frühjahr 2015 mit einer durchgehenden, 40mm dünnen Schicht (d. h. ohne Fugen) aus UHFB beschichtet (Abb. 5). Vor dem Gießen des Frisch-UHFB mit thixotropen Eigenschaften, um das Gefälle zu halten, wurde der Betonuntergrund mit einem Hochdruckwasserstrahl aufgeraut und vor dem Gießen des UHPFRC mit Wasser gesättigt.



Abbildung 5: „Matteschwelle“ nach dem Einbau der UHFB-Schutzschicht auf vorbereitetem Betonuntergrund der Schwelle (Foto rechts: Holcim Schweiz).

Nach neun Jahren im Betrieb weist die Oberfläche der UHFB-Schutzschicht keinen signifikanten Abrieb auf. In den Bereichen höchster Einströmgeschwindigkeiten sind die Stahlfasern oberflächlich freigelegt, die gesamte Fläche (einschließlich der Arbeitsfugen) ist intakt und frei von Ausbrüchen oder Rissen (Cracknell et al., 2023).

### UHFB-Auskleidung von Betonwänden in einem Turbinenhaus

Im Jahr 2023 wurde eine UHFB-Schutzschicht auf die der Hydro-Abrasion ausgesetzten Oberflächen der Betonkonstruktion der Auslasskammern im Turbinenhaus eines Wasserkraftwerks in der Schweiz gegossen (Abb. 6).

Auch hier wurde die Betonuntergrundoberfläche durch Hochdruckwasserstrahlen vorbereitet und die 60 mm dicke UHFB-Schicht hinter einer Schalung eingegossen. Die erhaltene UHFB-Oberfläche ist glatt und eben; sie weist keine Fugen auf.



Abbildung 6: UHFB-Schutzbeschichtung (in dunkelgrau) auf der Bodenplatte und den Seitenwandflächen der Auslasskammern des Turbinenhauses.

### Anwendungen über dem Wasser

Stellvertretend für zahlreiche UHFB-Anwendungen zur Ertüchtigung und Erhaltung von Brücken über dem Wasser wird nachfolgend das UHFB-Projekt einer Wehrbrücke kurz beschrieben. Die historische Hafewehrbrücke über den Nidau-Büren-Kanal im Kanton Bern, Schweiz, wurde 1938 eingeweiht. Dieses Mehrzweckbauwerk dient als wichtige Straßenbrücke, als mechanisiertes Wehr, als Schleuse für Kanalboote sowie als Wasserkraftwerk (Abb. 7).



Abbildung 7: Wehrbrücke Port: Luftaufnahme während den Ertüchtigungsarbeiten im Jahr 2022.

Bei Inspektionen im Jahr 2018 wurden an diesem denkmalgeschützten Bauwerk bedeutende Betonschäden und Bewehrungskorrosion festgestellt. Da zudem die Tragsicherheitsnachweise ungenügend waren, mussten temporäre Verstärkungsmaßnahmen getroffen werden. Mithilfe eines projektspezifischen Verkehrslastmodells konnten die temporären Verstärkungsarbeiten auf wenige kritische Elemente beschränkt werden, sodass die Brücke im Jahr 2019 wieder für den schweren Straßenverkehr zugelassen werden konnte.

Im Jahr 2022 wurde die originale Wehrbrücke aus Stahlbeton unter Beibehaltung des Betriebs ertüchtigt (Abb. 8). Das Projekt umfasste eine UHFB-Verstärkung des Brückenüberbaus (bestehend aus T-Trägern) und eine Verbreiterung der Fahrbahnplatte zur Anpassung an moderne Verkehrsanforderungen. Zusätzlich wurde eine neue Fußgängerbrücke seitlich angehängt.



Abbildung 8: UHFB-Einbau auf der bestehenden Brückenplatte zur Instandsetzung und Verstärkung der Brückenplatte. Foto rechts: Ansicht nach Abschluss der Arbeiten (Fotos: B+S AG, Consulting Engineers, Bern, Schweiz).

Eine verfeinerte Tragwerksanalyse, die mithilfe von Materialtests und standortspezifischen Verkehrslastmodellen aktualisiert wurde, führte zu einem optimierten, möglichst wenig invasivem Erhaltungsprojekt. So viel wie möglich von der ursprünglichen Stahlbetonkonstruktion wurde erhalten, womit der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck und die Umweltauswirkungen minimiert werden konnten. Die Bauarbeiten wurden mit minimalen nächtlichen Sperrungen der Fahrbahn und ununterbrochenem Zugang für Kanalboote durch die Schleuse ausgeführt.

## Folgerungen

Der neuartige Baustoff UHFB und die damit zusammenhängende Bauweise bieten eine vielversprechende Technologie an, um die Problematik der starken Beschädigungen infolge Hydro-Abrasion der Betonoberflächen von Wasserbauwerken weitgehend oder ganz zu beheben. Denn UHFB weist einen rund 10 Mal besseren Abrasionswiderstand auf als Beton. Die kurz beschriebenen UHFB-Anwendungen bestätigen die Effizienz der neuen UHFB-Technologie.

## Literatur

- ASTM (2019) C-1138 Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method) Böhme (2005) EN 13892-3 Part 3: Determination of the abrasion resistance according to Böhme.
- ASTRA Dokumentation 82022, «UHFB für die Erhaltung und den Bau von Kunstbauten» (Verfasser: E.Brühwiler), Bundesamt für Strassen, Bern, Schweiz, 2023.
- Cracknell, N., Albayrak, I., Adriano, L., Boes, R., Wassmann, K., Hydroabrasionsbeurteilung einer Ultra-Hochleistungs-Faserbetonsohle mittels Feldmessung und Abrasionsmodell, 21. Wasserbau-Symposium: Wallgau (D), Tagungsband 1 Herausgeber: Technische Universität München, Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft, 2023, S.147-156.
- Lochon, M., Delhaye, J., Valentini, T., De Cesare, G., Brühwiler, E., Hydro-abrasion resistance of UHPFRC and concrete according to the ASTM C1138 method, Proceedings, 10th International Symposium on Hydraulic Structures Zurich, Switzerland 17-19 June 2024.
- Tracy, M., Jokisch, F., Brühwiler, E., Modernising a monument: The challenges of strengthening and widening a historic bridge structure under live traffic, EUROSTRUCT 2023 Wien Austria, Proceedings (Editors: A.Strauss and K.Bergmeister) in Civil Engineering, Ernst&Sohn Wiley Online Library, ce/papers, Volume 6, Issue 5, Sep 2023, pp.135-144.

## Welchen Beitrag können moderne Berechnungsmethoden zur realitätsnahen Untersuchung und Erhaltung bestehender Brücken- und Wasserbauwerke leisten?

Dr.-Ing. Roger Schlegel, Geodynardo GmbH

Dipl.-Ing. Claus Kunz, Abteilungsleitung Bautechnik, Bundesanstalt für Wasserbau

### Einleitung

Die Erhaltung von bestehenden Brücken- und Wasserbauwerken gewinnt vor dem Hintergrund einer nachhaltigen Bewirtschaftung und Ressourcenschonung gegenüber dem Neubau immer mehr an Bedeutung. Ein wichtiger Baustein dabei ist eine realitätsnahe Untersuchung und Einschätzung der vorhandenen Bausubstanz hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit, damit bauliche Maßnahmen zur Erhaltung und ggf. zur Ertüchtigung effizient und auf das Notwendige fokussiert geplant werden können. Der Beitrag diskutiert an Hand von Beispielen inwieweit moderne Berechnungsmethoden die Qualität und Möglichkeiten einer realitätsnahen Nachrechnung der Tragfähigkeit von Gewölbebrücken unter Eigen-/Verkehrslast und Schiffsanprall verbessern können.

### Numerische Modellierung und Simulation von bestehenden Bauwerken

Gegenüber einfachen, klassischen Ingenieurmodellen bieten moderne, numerische Simulationsverfahren bei der realitätsnahen Bewertung bestehender Bauwerke wesentliche Vorteile. Diese liegen vor allen in der Möglichkeit ganze Bauwerke im Gesamtmodell oder repräsentativen Teilmodellen zu berechnen und dabei die Interaktionen verschiedener Strukturbereiche unter Einbeziehung nichtlinearen Verhaltens (materielle und geometrische Nichtlinearitäten, Statuswechsel / Kontakt) berücksichtigen zu können. In Abbildung 1 ist das Finite-Element Modell der Mainbrücke in Marktheidenfeld dargestellt.

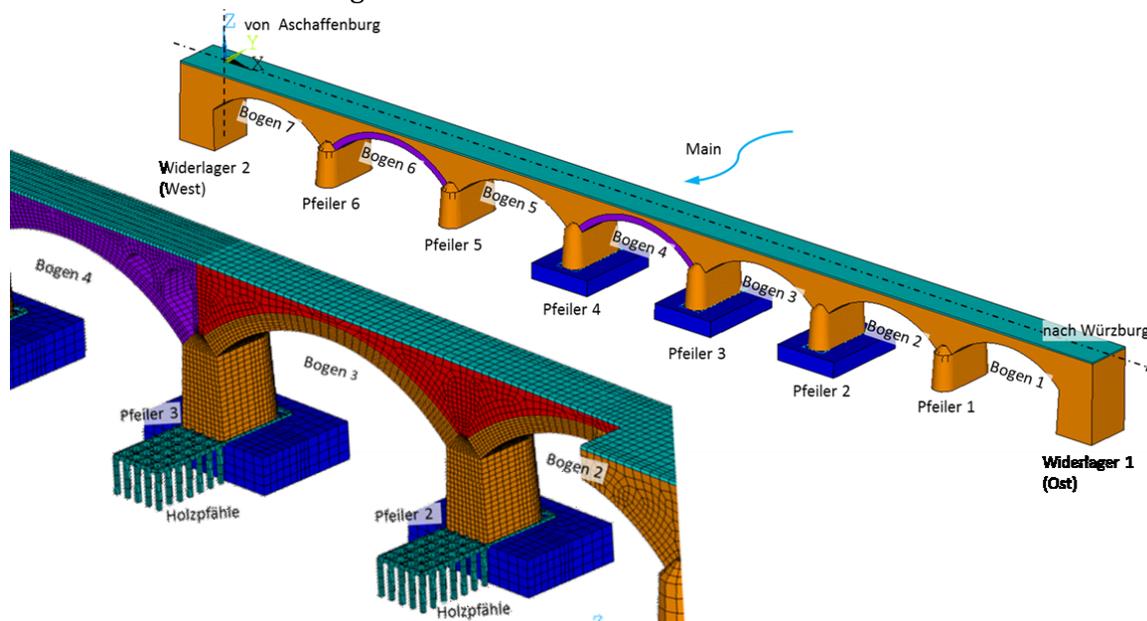


Abbildung 1: Finite-Element Modell der Mainbrücke in Marktheidenfeld (Schlegel, Mrozek)

Es zeigt wie detailliert derartige Gesamtmodelle eines Bauwerks aufgebaut werden können. Das Berechnungsmodell besteht aus 85112 Finiten Elementen und enthält sämtliche Tragglieder sowie deren Strukturbereiche, wie z.B. den mehrschaligen Aufbau der Brückenpfeiler, die Hinterfüllung der Brückenbögen oder die Holzpfähle im Untergrund.

Darüber hinaus bietet leistungsfähige Simulationssoftware die Möglichkeit durch Aktivierung / Deaktivierung von einzelnen Elementen Bauzustände, Einstürze und Wiederaufbau von Teilbereichen sowie das nachträgliche Verstärken der Tragstruktur in der realen nichtlinearen Lastgeschichte zu berücksichtigen. Viele Bestandsbauwerke aus Mauerwerk, Beton und Stahlbeton werden dadurch erst realitätsnah berechenbar.

### **Nichtlineare Berechnung der Gebrauchstauglichkeit und Standsicherheit**

Bei der Nachrechnung von bestehenden Brückenbauwerken im Zuge von Wasserstraßen werden häufig Untersuchungen der Gebrauchstauglichkeit und Standsicherheit gegenüber Eigengewicht und Verkehrseinwirkungen sowie gegenüber außergewöhnlichen Einwirkungen, wie z.B. Schiffstoß erforderlich, s. Kunz und Schlegel 2018. Der Einsatz nichtlinearer Berechnungsmethoden ermöglicht das Baustoff- und Bauwerksverhalten realitätsnah zu simulieren, Lastumlagerungen innerhalb der Tragstruktur zu berücksichtigen und damit oftmals, im Vergleich zu vereinfachten Ingenieurmethoden, erhebliche Lastreserven zu erschließen. Der Einsatz nichtlinearer Berechnungsmethoden ist in der Normung u.a. in DIN EN 1992-1-1 und dem zugehörigen nationalen Anhang sowie in der Nachrechnungsrichtlinie geregelt.

Das wesentliche Merkmal einer nichtlinearen Berechnung ist, dass das Superpositionsprinzip wie in einer linear elastischen Analyse nicht mehr anwendbar ist. Daher ist in einer nichtlinearen Berechnung die Lastgeschichte in einzelnen Lastschritten zu simulieren. Das bedeutet, dass der jeweils folgende Lastschritt auf den verformten Gleichgewichtszustand des vorherigen Lastschritts aufsetzt und damit Lastumlagerungen durch nichtlineares Materialverhalten simuliert werden können. Dementsprechend werden in den ersten Lastschritten zunächst Primärspannungs- bzw. Eigengewichtszustände berechnet. Danach erfolgt in weiteren Lastschritten die Aufbringung der restlichen Einwirkungen z.B. aus Umwelteinflüssen (Temperaturlastfälle sowie Windlasten) sowie der zu untersuchenden Verkehrs- und Sonderlasten.

Um das nichtlineare Verhalten der Baustoffe wie Beton, Stahlbeton oder Mauerwerk realitätsnah simulieren zu können, bedarf es der Verwendung geeigneter Materialmodelle. Für Finite-Element Simulationen haben sich hierfür elastoplastische Materialmodelle bewährt. Dabei wird der Dehnungsvektor aus einem elastischen und einem plastischen (irreversiblen) Anteil berechnet. Zur Modellierung von Rissbildungen kann der plastische Anteil mit einem Ver- und Entfestigungsmodell erweitert werden, s. Schlegel (2004).

Ist eine Tragstruktur stabil, so muss ein Gleichgewichtszustand in den nichtlinearen Berechnungen aufgefunden werden. Treten dabei Überschreitungen zulässiger Spannungen auf, werden diese Spannungsüberschreitungen mit Hilfe der elastoplastischen Materialgesetze identifiziert und es werden durch plastische Dehnungen Kraftumlagerungen in der Struktur initiiert. Können die plastischen Ungleichgewichtskräfte von der Struktur aufgenommen werden (können die Kräfte erfolgreich umgelagert werden), wird ein ausreichendes Kraftumlagerungsvermögen nachgewiesen. Zusätzlich zum Nachweis des Kraftumlagerungsvermögens sind die in den Normen geregelten Auslastungsgrenzen (max. Dehnungen z.B. in Mauerwerk, Beton, Bewehrungsstahl, ...) und Verformungen nachzuweisen.

Für die realitätsnahe Untersuchung der Tragfähigkeit gegenüber Schiffsstoß ist neben der Einbeziehung des nichtlinearen Tragverhaltens auch die Simulation des dynamischen Bauwerksverhaltens wichtig. Durch eine transient dynamische Analyse können oftmals im Vergleich zu vereinfachten, quasistatischen Berechnungen weitere Lastreserven erschlossen werden.

In Abbildung 2 ist die Belastungskurve nach DIN EN 1991-1-7 für den Frontalstoß an den Pfeilern 2 und 3 der Mainbrücke Marktheidenfeld dargestellt. Abbildung 3 zeigt die Kontrollpunkte, die in den Simulationen für die Ergebnisauswertung an den Pfeilern 2 und 3 herangezogen wurden. Abbildung 4 und 5 zeigen die Historie der Horizontalverformung an den ausgewählten Kontrollpunkten sowie die Historie der Reaktionskräfte an den einzelnen Brückenpfeilern infolge des Frontalstoßes auf Pfeiler 2 der Mainbrücke Marktheidenfeld. Der zeitliche Verlauf der Verformungs- und Reaktionskraftsignale zeigt, dass der angestoßene Pfeiler 2 nur ca. 50% der Stoßkraft übernimmt. Die Stoßkraft verteilt sich hauptsächlich zwischen den Pfeilern 1, 2, und 3. Die Verteilung der Reaktionskräfte zwischen den nächststehenden Pfeilern 1 und 3 ist nicht gleichmäßig, sondern von der jeweiligen Untergrundsteifigkeit abhängig.

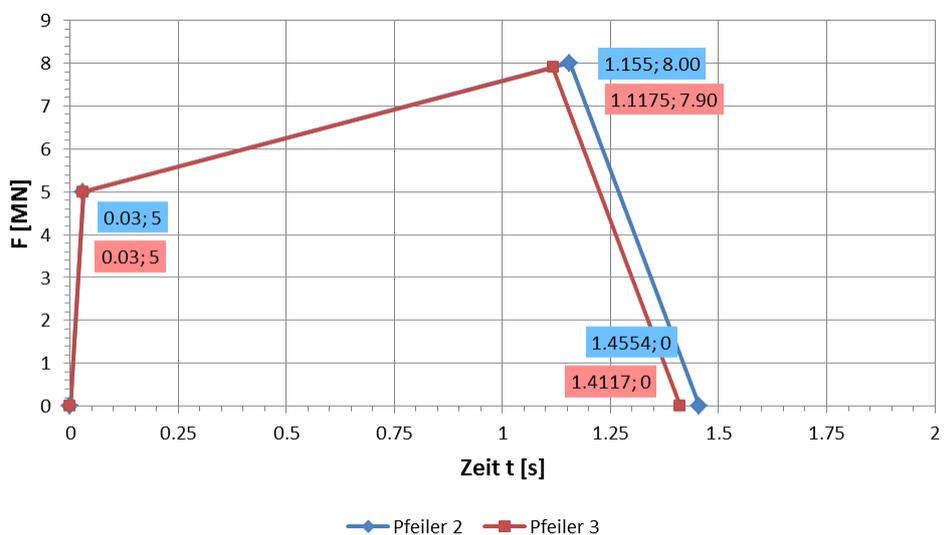


Abbildung 2: Belastungskurve nach DIN EN 1991-1-7 für den Frontalstoß auf Pfeiler 2 bzw. 3

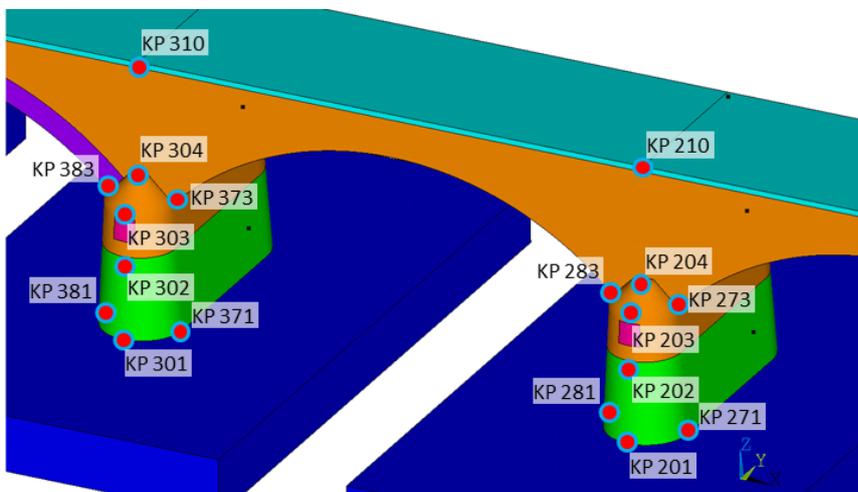


Abbildung 3: Positionen der Kontrollpunkte für die Auswertung der Verschiebungen

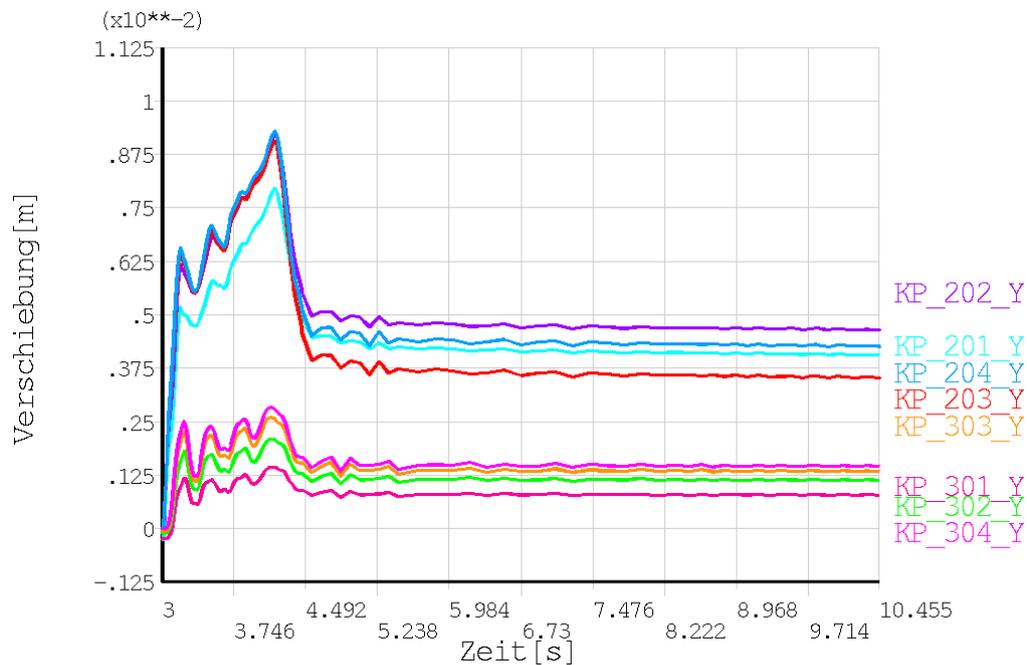


Abbildung 4: Frontalstoß auf Pfeiler 2: Historie der Verformung an den ausgewählten Kontrollpunkten,  $UY [m]$  (Stoßbeginn bei 3s)

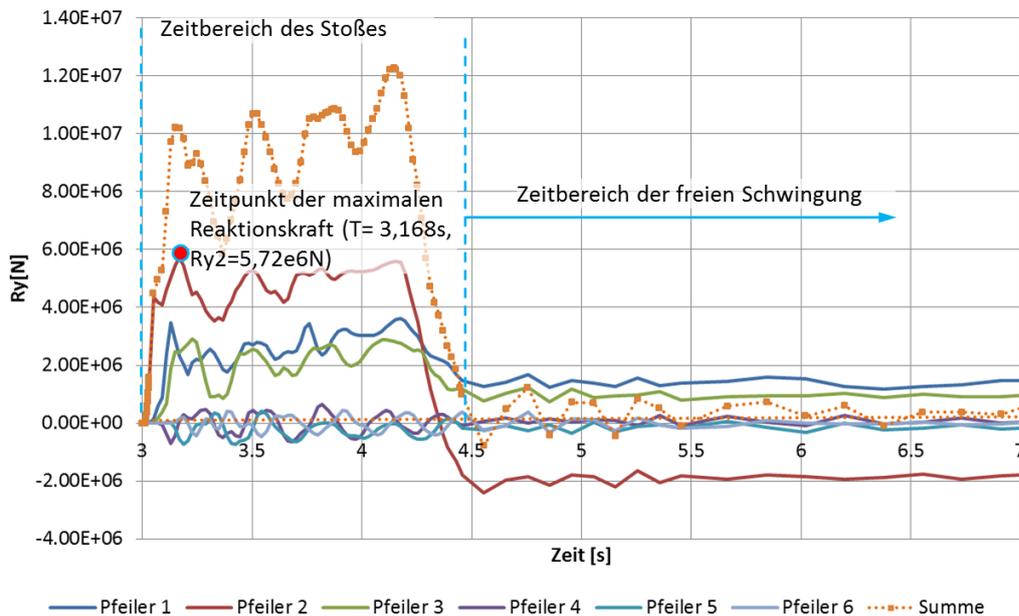


Abbildung 5: Frontalstoß auf Pfeiler 2: Historie der Reaktionskräfte der Pfeiler – Zeitbereich des Stoßes,  $RY [N]$  (Stoßbeginn bei 3s)

Gut sichtbar wird auch die dynamische Bauwerksantwort. Das Maximum der Reaktionskräfte unter dem Pfeiler 2 liegt nicht im Zeitpunkt der maximalen Lastamplitude, sondern am Ende der ersten Impulsphase, die einen deutlich größeren Gradienten hat. Abbildung 6 zeigt die plastischen Dehnungen am Ende des Stoßvorgangs. Es wird deutlich, dass die in Abbildung 4 dargestellten, bleibenden Verformungen von ca. 5mm am Pfeiler 2 und 1,5 mm am Pfeiler 3 vorwiegend durch die plastischen Dehnungen im Untergrund verursacht werden.

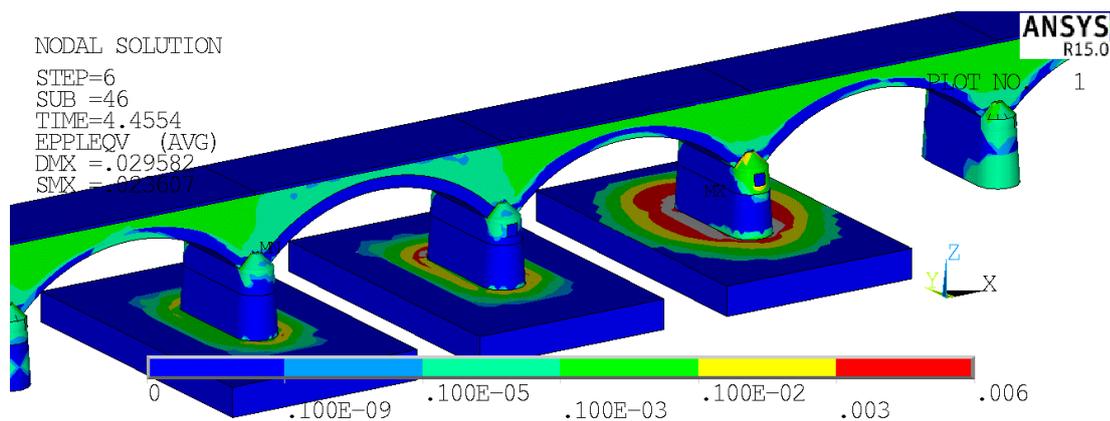


Abbildung 6: Plastische Dehnungen EPPL\_EQV am Ende des Stoßvorgangs

Das hier dargestellte Beispiel des Schiffstoßes an der Mainbrücke Marktheidenfeld zeigt die Möglichkeiten moderner Berechnungsverfahren auf, durch genauere Simulation der Einwirkungen und der Bauwerksantwort Lastreserven zu erschließen und damit die Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit eines bestehenden Bauwerks realitätsnah einzuschätzen.

### Parametrische Untersuchungen und stochastische Analyse

Zusätzlich zur Verwendung hochwertiger Simulationsverfahren können auch parametrische Untersuchungen und stochastische Analysen für die Bewertung bestehender Bauwerke einen großen Mehrwert bringen. Bei parametrischen Untersuchungen werden die Eingangsparameter eines Simulationsmodells (z.B. Lasten, Materialkennwerte oder Geometrie) variiert und damit auch die Berechnungsergebnisse (z.B. Spannungen, Dehnungen, Verformungen, Nachweisgrößen) als streuende Antwortgrößen berechnet. Technische Voraussetzung für die Durchführung parametrischer bzw. varianzbasierter, stochastischer Simulationen sind eine parametrische Definition des Simulationsmodells sowie dessen automatisierte Berechnung und Ergebnisausgabe.

Parametrische Simulationen können z.B. für Sensitivitätsanalysen oder Modellkalibrierungen verwendet werden. Sensitivitätsanalysen haben zum Ziel die Abhängigkeit (Sensitivität) bestimmter Ergebnisgrößen von der Varianz der Eingangsgrößen zu ermitteln. Bei Modellkalibrierungen werden häufig die Ergebnisgrößen des Simulationsmodells best möglich mit verfügbaren Messdaten am Bauwerk in Abgleich gebracht. Damit soll die Realitätsnähe und Prognosefähigkeit des Simulationsmodells verbessert werden.

Die Motivation für die stochastische Analyse kann z.B. aus der Frage nach dem Sicherheitsniveau eines vorhandenen Bauwerks resultieren. So ist es zwar möglich, mit einem auf Sicherheitsfaktoren beruhenden Nachweiskonzept einen Standsicherheitsnachweis zu führen, soll auf dieser Basis jedoch ein vorhandener Sicherheitsabstand bis zum Versagen des Bauwerks prognostiziert werden, stellt sich zum Beispiel bei Wasserbauwerken, die Frage, ob dieser durch eine Laststeigerung oder durch eine Widerstandsreduktion bis zum Bauwerksversagen bestimmt werden soll. Mittels stochastischer Analyse können bei Einführung der last- und widerstandsseitigen Streuungen Versagenswahrscheinlichkeiten auch bei nichtlinearen Analysen bestimmt werden. Dieses Vorgehen ist in EN 1990:2002 (Anhang B und C) enthalten.

## Literatur

- Kunz, C.; Schlegel, R.: (2018): Nachweis von Bogenbrücken gegenüber Schiffsanprall. Bundesanstalt für Wasserbau, Kolloquium Entwicklungen und Fortschritte im Brücken- und massiven Verkehrswasserbau, Karlsruhe, 18. und 19. April 2018, Tagungsband S. 25-37.
- DIN EN 1992-1-1: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010 (2011).
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau: Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie 2011).
- Schlegel, R.: (2004): Numerische Berechnung von Mauerwerkstrukturen in homogenen und diskreten Modellierungsstrategien. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, Universitätsverlag (2004) ISBN 3-86068-243-1.
- Schlegel, R.; Mrozek: (2017): Nichtlineare und dynamische Nachrechnung der Straßenbrücke Marktheidenfeld, Main-km 179,79. Technischer Bericht zum Gutachten, Dynardo GmbH
- DIN EN 1991-1-7: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen Außergewöhnliche Einwirkungen; Deutsche Fassung EN 1991-1-7:2006.
- Schlegel, R.: (2021): Standsicherheitsuntersuchungen von Mauerwerkstrukturen mit Hilfe von stochastischen numerischen Simulationen.
- DIN EN 1990:2002: Eurocode 1: Grundlagen der Tragwerksplanung. 2006.





Abbildung 2: Erscheinungsbild vor der Instandsetzung © Büchting+Streit AG

### **Ertüchtigung oder Neubau**

Im Ergebnis einer statischen Nachrechnung und unter Berücksichtigung des schlechten Bauwerkszustandes wurde die Brücke 2006 für den Straßenverkehr gesperrt. Aufgrund dessen und der Forderung des WNA Aschaffenburg nach einer Nachrechnung der Brücke für den Lastfall Schiffanprall im Zuge des Fahrrinnenausbaus des Mains zur Wasserstraßenklasse Vb führte die Gemeinde im Jahr 2008 zunächst eine Bürgerbefragung durch, die zum Ergebnis kam, dass auch in Zukunft an gleicher Stelle eine Brücke vorhanden sein soll. Daraufhin wurde das IB Büchting + Streit AG von der Marktgemeinde Zellingen beauftragt zu überprüfen, ob eine Sanierung der Alten Mainbrücke Zellingen grundsätzlich möglich sei. Eine genauere Bauwerksuntersuchung hinsichtlich der vorhandenen Baustahlqualität unter Hinzuziehung der Expertise von Herrn Prof. Mensinger, Institut für Metallbau, TU München ergab, dass das Stahlhaupttragwerk und damit das Bestandsbauwerk sanierungsfähig ist. Das im Anschluss ebenfalls vom IB Büchting + Streit AG zu erarbeitende Ertüchtigungskonzept sollte neben der Sanierung des vorhandenen Bauwerksbestandes den Schutz der Mainbrücke gegen Schiffanprall sicherstellen.

### **Konzept zur Instandsetzung und Schiffstoßsicherung**

Für die Instandsetzung des Überbaus waren die Stahlkonstruktion zu sanieren, die stark geschädigte Betonfahrbahnplatte zu ersetzen sowie der nach dem zweiten Weltkrieg nachträglich, seitlich angeordnete Rad- und Gehweg aus Lastgründen zu entfernen.

Für die Schiffstoßsicherung mussten der Schutz des Überbaus gegen ein Anprall von Schiffen, die Sicherstellung einer lichten Mindestdurchfahrtshöhe für den Schiffsverkehr und der Schutz der Bauwerkspfeiler gegen direkten Schiffstoß beachtet werden.

Der Bestandsüberbau kann keinen direkten Schiffsanprall abtragen. Das vom IB Büchting + Streit AG erarbeitete Sicherungskonzept sah deshalb vor, die durch Schiffsanprall gefährdeten Überbaubereiche (Feld 2 bis 4) durch untergehängte Opferverbände zu schützen. Diese Opferverbände sorgen dafür, dass die anzusetzende Schiffstoßlast nur auf den jeweils direkt betroffenen Opferverband wirkt und nicht auf den Bestandsüberbau. Abbildung 3 zeigt den neuen Überbauquerschnitt mit untergehängtem Opferverband.

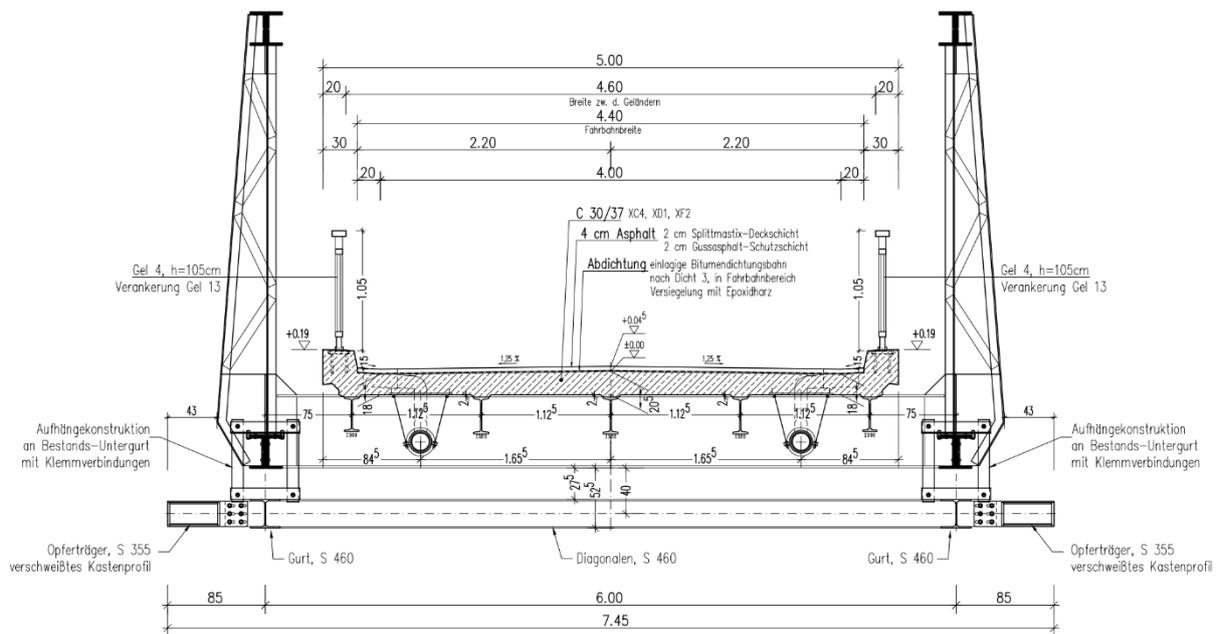


Abbildung 3: Neuer Überbauquerschnitt mit untergehängtem Opferverband © Büchting+Streit AG

Allerdings vermindert sich durch die untergehängten Opferverbände das zur Verfügung stehende Lichtraumprofil für die Mainschiffahrt. Deshalb sah das Sicherungskonzept vor, die betroffenen Einfeldträger des Überbaus so weit anzuheben, dass sich keine Verschlechterung der lichten Durchfahrtshöhe gegenüber dem Bauwerksbestand ergibt. Unter Weiterverwendung der historischen Bauwerkslager sollten die Bestandspfeiler entsprechend aufgehöhht und mit einer neuen Betonauflegerbank versehen werden. Über die neuen Auflagerbänke kann somit der Schiffstoß aus dem jeweiligen Opferverband problemlos in die Bauwerkspfeiler abgeleitet werden. Die Bauwerkspfeiler wurden so weit wie möglich unter Berücksichtigung der anzusetzenden Schiffstoßlasten statisch nachgewiesen. Die Pfeiler, bei denen dieser statische Nachweis nicht gelingt, sollten durch unabhängige, vorgesetzte Schutzbauwerke gegen Schiffsanprall gesichert werden. In Abbildung 4 ist die prinzipielle Ausbildung der Schutzbauwerke für die Pfeiler in einer Draufsicht dargestellt und in Abbildung 5 sind in einer Seitenansicht zusätzlich die vorgesehenen Opferverbände zu sehen.

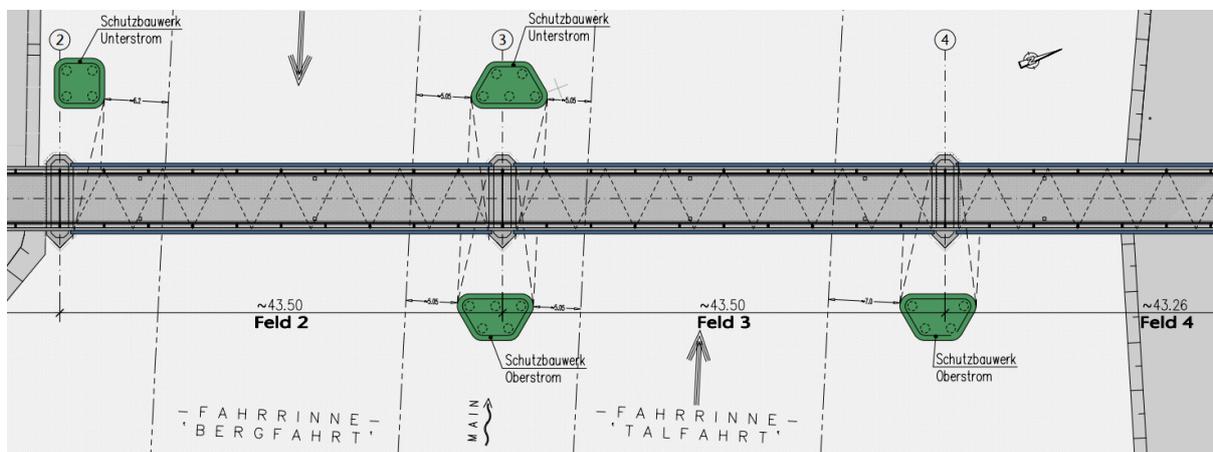


Abbildung 4: Ausbildung der Schutzbauwerke (Draufsicht) © Büchting+Streit AG

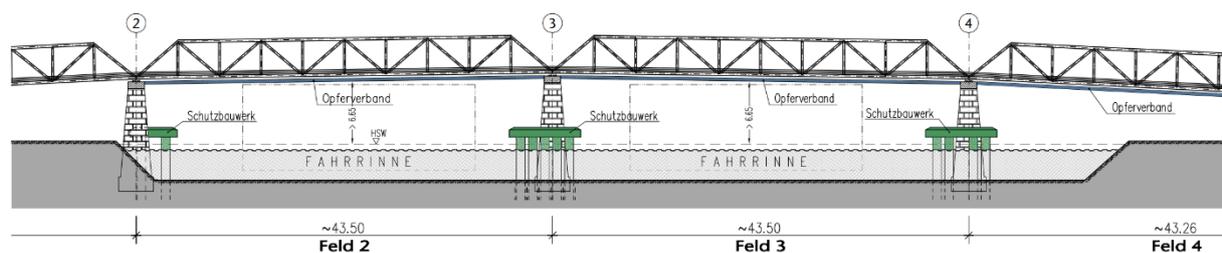


Abbildung 5: Ausbildung der Schutzbauwerke und Opferverbände (Seitenansicht)  
© Büchting+Streit AG

Mit diesem Gesamtkonzept ließ sich die historische Alte Mainbrücke Zellingen instandsetzen und gegen Schiffsanprall sichern.

### Festlegung der Ausführungsvariante

In einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde aufgezeigt, dass eine Ertüchtigung des Bestandsbauwerkes klare wirtschaftliche Vorteile gegenüber einem eventuellen Rückbau und anschließendem Pfeilerfreien Neubau einer neuen Mainquerung hat.

Im Rahmen einer nochmaligen Bürgerbefragung entschied sich der Markt Zellingen für eine Weiternutzung als Rad- und Fußgängerbrücke. Der damit gewählte Fahrbahnplattenquerschnitt ist ebenfalls in Abbildung 3 dargestellt.

Nach erfolgter Ausschreibung erhielt die Baugesellschaft Adam Hörnig, Aschaffenburg den entsprechenden Bauauftrag.

### Umsetzung der Schiffstoßsicherung

Die theoretischen Grundlagen und Vorschriftenwerke zum Schiffsanprall sind bereits in [2] übersichtlich dargestellt. Ebenso ist dort ein umfangreiches Literaturverzeichnis angegeben, auf dessen Wiederholung hier verzichtet wird.

Die anzusetzenden Schiffstoßlasten waren in DIN 1055-9 in Abhängigkeit der Wasserstraßenklasse geregelt. Der vorliegende Abschnitt des Maines liegt hierbei in der Wasserstraßenklasse Vb. Ergänzende Angaben befinden sich in [3] und [4].

Damit beträgt die nach Norm auf den Überbau anzusetzende statische Ersatzlast  $F = 1,0 \text{ MN}$ . Für die Pfeilerbemessung ergeben sich statische Ersatzlasten von  $FF_{\text{dyn}} = 10,0 \text{ MN}$  für den Frontalstoß und  $FL_{\text{dyn}} = 4,0 \text{ MN}$  für den Flankenstoß. Diese Beanspruchungen können durch die Bestandspfeiler nicht abgetragen werden.

Für die Schiffstoßsicherung der Alten Mainbrücke Zellingen wurde deshalb – wie beim Nachweis von Bestandsbauwerken üblich – ein Einzelfallgutachten für die anzusetzenden Schiffstoßlasten bei der Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe in Auftrag gegeben. Dieses Gutachten [5] berücksichtigt die speziellen Randbedingungen, die bei dem jeweiligen Bauwerk vorliegen. Dies sind im Wesentlichen die geometrische Situation in der Draufsicht, die örtliche Fließgeschwindigkeit des Maines, die bisherige Anprallhäufigkeit und die Fahrtrichtung der Schiffe.

Da aus gestalterischen Gründen eine externe Sicherung der Pfeiler gegen Flankenstoß unerwünscht war, wurde in Ergänzung zu den Schiffstoßlasten abgefragt, welche Geometrie die Schutzbauwerke gegen Frontalstoß haben müssen, um gleichzeitig einen Flankenstoß auf die Bestandspfeiler auszuschließen (Bestandspfeiler liegt im Stoßschatten des Schutzbauwerkes).

Auf Basis dieser Angaben erfolgte die Festlegung der erforderlichen Schutzbauwerke. In Abbildung 6 sind die erforderlichen Schutzbauwerke und die anzusetzenden Stoßlasten dargestellt.

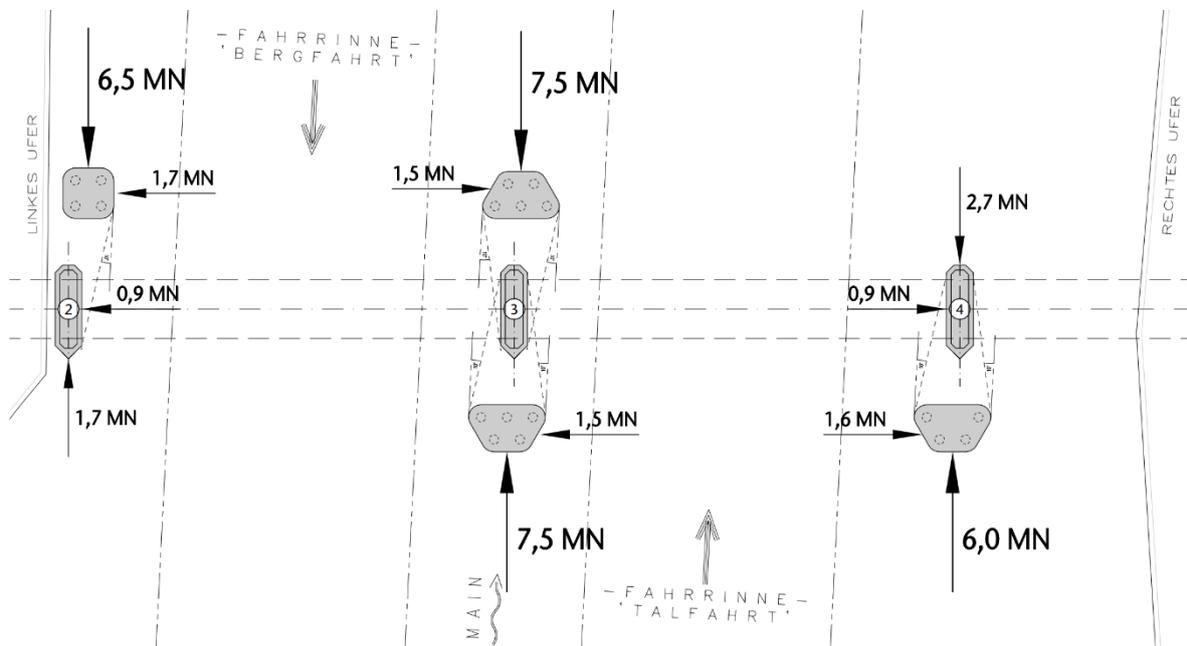


Abbildung 6: Anzusetzende Schiffstoßlasten © Büchting+Streit AG

Bei der Festlegung der Lage der Schutzbauwerke sollten folgende Randbedingungen erfüllt werden. Damit sich die Schutzbauwerke und die Bestandspfeiler optisch so wenig wie möglich beeinflussen, sollten diese räumlich ausreichend voneinander getrennt angeordnet werden. Eine weitere Forderung war, dass die Schutzbauwerke bei einem stattfindenden Schiffstoß nicht gegen die Bestandspfeiler stoßen. Weiterhin sollte die Geometrie der Schutzbauwerke so ausgebildet sein, dass sie die zur Verfügung stehende Schifffahrtsrinne so wenig wie möglich einengen, aber gleichzeitig einen Flankenstoß auf die Bestandspfeiler verhindern. Diese drei Bedingungen ergaben die in Abbildung 6 dargestellte Anordnung.

Die Schutzbauwerke bestehen aus ausbetonierten Stahlrohren DN 914 mm, die in Bohrungen DN 1200 mm eingestellt werden. Damit sind sie in dem an der Flusssohle anstehendem Fels eingespannt. Um ein Zusammenwirken sämtlicher Stahlrohre bei einem Schiffstoß zu gewährleisten, werden die Stahlrohre am Kopf durch eine Stahlbetondecke miteinander verbunden. Die Anzahl der Stahlrohre wurde in Abhängigkeit der zu berücksichtigenden Schiffstoßlast gewählt. Bedingt durch die Stauhaltung im Main schwankt der schiffbare Wasserstand nur gering (60 cm), sodass die Dicke der Pfahlkopfplatte als Anstoßpunkt für den Schiffstoß auf eine Höhe von 1,0 m begrenzt werden konnte. In Abbildung 7 ist ein fertiggestelltes Schutzbauwerk zu sehen.



Abbildung 7: Schutzbauwerk kurz nach Fertigstellung © Büchting+Streit AG

Die Schutzbauwerke wurden dynamisch mit dem Programmsystem Sofistik bemessen. In Abbildung 8 ist eine sich ergebende Verformungsfigur beim Schiffstoß abgebildet. Die Energie des Schiffstoßes wird durch die Energie der sich verformenden Schutzbauwerke ausgeglichen, so dass das Schiff zu stehen kommt, bevor das Schutzbauwerk den Pfeiler berührt.

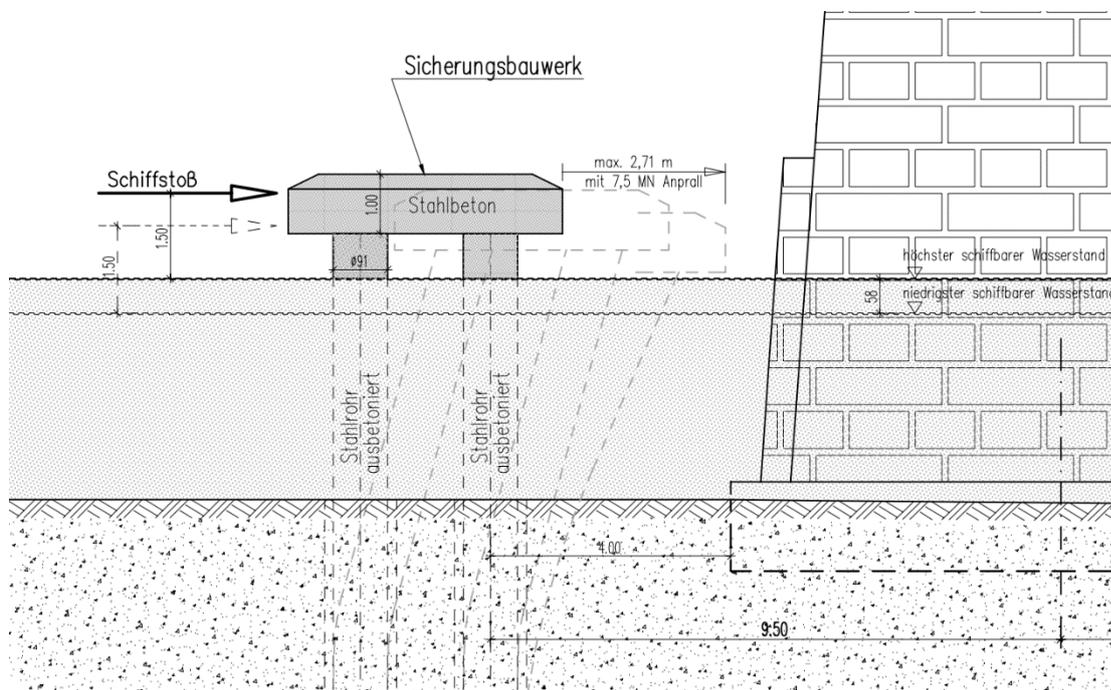


Abbildung 8: Rechnerische Verformungsfigur © Büchting+Streit AG

Grundsätzlich sind nicht nur die Brückenfelder oberhalb der Schifffahrtsrinnen gegen Schiffstoß zu sichern. Je nach Ausbildung der Uferbereiche muss auch davon ausgegangen werden, dass ein Schiff auf das Ufer ‚aufreitet‘ und auch ‚im Trockenen‘ gegen den Überbau stößt.

Bei der Alten Mainbrücke Zellingen ist nur das Uferfeld auf der Zellinger Seite durch den vorhandenen Uferpfeiler gegen einen solchen Anprall gesichert. Damit müssen die beiden Flussfelder und das Uferfeld auf der Retzbacher Seite gegen Schiffstoß gesichert werden.

Die Schiffstoßsicherung des Überbaues erfolgt wie bereits oben erläutert durch Anordnung eines Opferverbandes. Der Opferverband wird unter den bestehenden Überbau gehängt und ragt seitlich über den Bestandsüberbau hinaus. Damit ist gewährleistet, dass ein Schiff immer zunächst gegen den Opferverband stößt und nicht gegen den Bestandsüberbau. Die vertikale Aufhängung des Opferverbandes wird dabei so weich ausgebildet, dass der Schiffstoß alleinig über den steifen Opferverband zu den Auflagerbänken der Unterbauten abgetragen wird. Die Unterbauten sind für die Abnahme der Schiffstoßlast dimensioniert.

In Abbildung 9 sind die fertig montierten Opferverbände zu sehen. Zu erkennen sind die außen angeordneten Stoßstangen, die zunächst primär angestoßen werden. Je nach Stärke des auftretenden Schiffstoßes braucht nur diese Stoßstange bzw. dieser Opferträger nach einem Anprall ersetzt werden.



Abbildung 9: Montage des Opferverbandes © Adam Hörnig Baugesellschaft mbH & co.KG

Beim vorliegenden statischen Längssystem mit vier voneinander unabhängigen Einfeldträgern ist ein Anheben des Überbaues problemlos möglich. Auf Wunsch der Wasserschiffahrtsdirektion Schweinfurt wurden die Überbauten nicht nur um 55 cm, dem Maß der Höhe des untergehängten Opferverbandes angehoben, sondern zur Verbesserung der Durchfahrtshöhen im Hochwasserfall zusätzlich um weitere 25 cm. Das Gesamtanhebemaß des Überbaues in den Flussfeldern betrug damit 80 cm. Bei der vorgesehenen Verwendung des Bauwerkes als Rad- und Fußwegbrücke ergeben sich auch im Hinblick auf die Bauwerkstrassierung keine Einschränkungen. In den Endauflagerachsen an den Widerlagern wurden die Überbauten nur um 10 cm angehoben, so dass ein nahezu unveränderter Übergang zum Anschlussstraßenbestand gegeben ist.

### Schlussbemerkung

Mit der erfolgreichen Ertüchtigung der Alten Mainbrücke Zellingen wurde gezeigt, dass auch leichte, historische Stahlbrücken gegen Schiffstoß gesichert werden können (Abbildung 10). Damit konnte nicht nur ein markantes, geschichtsträchtiges Wahrzeichen des Marktes Zellingen erhalten werden, sondern die Bauwerksinstandsetzung und -sicherung war gegenüber eines Pfeilerfreien Neubaus auch in wirtschaftlicher und in emissionstechnischer Hinsicht ein Erfolg.



Abbildung 10: Die Alte Mainbrücke Zellingen nach Abschluss der Baumaßnahme © Hochreither Vorndran Ingenieurgesellschaft mbH

#### Projektbeteiligte

Bauherr	Markt Zellingen
Entwurf und Tragwerksplanung	Büchting + Streit AG, München
Bauausführung	Adam Hörnig Baugesellschaft mbH & Co. KG, Aschaffenburg
Prüfingenieur	Dr. Heinrich Hochreither, Aschaffenburg
Bauüberwachung	Hochreither – Vorndran Ingenieurgesellschaft mbH Margetshöchheim
Überwachung Korrosionsschutz	Ingenieurbüro Bernd Koller, Nürnberg

#### Literatur

Alte Mainbrücke Zellingen. URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php>.

Keuser, M., Goj, R., Lenner, R.: Verstärkung historischer Brücken über den Main unter besonderer Berücksichtigung des Schiffsanpralls, Bautechnik 92 (2015), Heft 7, Seiten 469 bis 478.

Kunz, C.: DIN 1055, Teil 9 – Außergewöhnliche Einwirkungen und probabilistische Verfahren, Der Prüfingenieur, Oktober 2006, Seiten 53 bis 63.

Kunz, C.: Schiffsanprall auf Brücken nach DIN 1055-9, BAW-Brief Nr. 1 – März 2006, Bundesanstalt für Wasserbau, Seiten 1 bis 5.

Ermittlung von Schiffsstoßlasten für die Str. Brücke Zellingen, Main-km 235,41, Bundesanstalt für Wasserbau, BAW-Nr. A395 100 10101 – März 2012, Seiten 1 bis 19.

## Zusammenarbeit BAW-WNA Heidelberg: Ein Mehrwert für den Neckar?!

Dipl.-Ing. Klaus Michels, Wasserstraßen-Neubauamt Heidelberg

### Die Bundeswasserstraße Neckar

Der Neckar entspringt im Schwarzwald bei Villingen-Schwenningen und mündet nach 367 km bei Mannheim in den Rhein. Auf dem 203 km langen Abschnitt zwischen Mannheim und Plochingen ist er Bundeswasserstraße.



Abbildung 1: Die Bundeswasserstraße Neckar [Grafik: Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes]

Zur Verbesserung der Schifffahrtsverhältnisse begannen in den 1920er Jahren die Baumaßnahmen im Rahmen der sogenannten „Neckarkanalisation“. Diese beinhaltete den Bau von Staustufen, die zunächst aus einer Schleusenkammer, einer Wehranlage und einem Wasserkraftwerk bestanden. Die Ausbauplanungen sahen die ganzjährige Befahrbarkeit des Neckars mit einem 80 m langen und 10,25 m breiten Schiff vor. Die maximale Eintauchtiefe dieses Bemessungsschiffes wurde mit 2,30 m festgelegt. 1935 waren die 11 Staustufen auf dem 113 km langen Abschnitt zwischen Mannheim und Heilbronn fertiggestellt.

Nach kriegsbedingter Unterbrechung wurde die 75 km lange Strecke Heilbronn – Stuttgart mit der Eröffnung des Hafens Stuttgart 1958 vollendet. Da 1950 der Güterverkehr auf dem Neckar den ursprünglich prognostizierten Wert von 3 Mio. Tonnen überschritt und ein weiterer Anstieg erwartet wurde, entschied man sich, die bereits errichteten Schleusenanlagen mit einer 2. Kammer zu ergänzen und alle weiteren Schleusenanlagen gleich als Doppelschleuse zu konzipieren [1]. 1968 wurde mit der Fertigstellung der letzten Staustufen der Hafen Plochingen an den stau-regelten Neckar angeschlossen.

Neben 29 Wasserkraftwerken, betrieben durch Dritte, zählt die Bundeswasserstraße Neckar zurzeit 52 Schleusenkammern, 27 Wehre und drei Hochwassersperrtore. Die Bauwerke weisen mittlerweile alterungs- und betriebsbedingte Schäden auf. Um dem nachhaltigen Verkehrsträger „Schifffahrt“ weiterhin eine sichere, zuverlässige und leistungsfähige Wasserstraße zur Verfügung stellen zu können, hat die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) bereits vor einiger Zeit begonnen, die in ihrer Unterhaltungslast liegenden Verkehrswasserbauwerke grundlegend instand zu setzen oder durch Neubauten zu ersetzen. Dieses Programm wird in den nächsten Jahrzehnten fortgeführt. Exemplarisch werden im Folgenden einige Bauvorhaben mit ihren bestandserhaltenden Maßnahmen vorgestellt. Ergänzt werden diese Erläuterungen durch die Präsentation zukunftsgerichteter Überlegungen, die in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) am Neckar entstehen.

### **Bestandserhaltende Baumaßnahmen am Neckar**

In diesem Kapitel werden beispielhaft die Grundinstandsetzung des Wehres Horkheim sowie die Grundinstandsetzung der linken Schleusenkammer Lauffen vorgestellt. Diese Baumaßnahmen stehen stellvertretend für die Grundinstandsetzungen von Verkehrswasserbauwerken am Neckar.

#### **Grundinstandsetzung des Wehres Horkheim**

Das Wehr Horkheim wurde zwischen 1927 und 1929 als 3-feldrige Wehranlage mit Rollschützen als Verschlussorgane errichtet. Neben dem Austausch der Rollschütze, die nunmehr alle mit Aufsatzklappen zur Feinregulierung versehen sind, erhält das Wehr eine neue Elektro-, Steuerungs-, Nachrichten- und Antriebstechnik.



*Abbildung 2: Grundinstandsetzung des Wehres Horkheim mit zugehörigem, neu errichteten Technikgebäude auf dem linken Ufer des Seitenkanals, Stand 2022 [Foto: WNA Heidelberg]*

Im Bereich des Massivbaus sind folgende Arbeiten an den Wehrpfeilern und der Wehrsohlen auszuführen: Die vier jeweils 17,4 m langen und max. 4,5 m breiten Wehrpfeiler sind weitgehend unbewehrt ausgebildet worden. Sie weisen einen jeweils zweischaligen Aufbau auf, der durch eine 30 cm dicke Vorsatzschale aus vergleichsweise festem Beton und einen aus minderfestem Beton bestehenden Pfeilerkern charakterisiert ist.

Die statischen Nachweise ergaben, dass eine Verankerung der Wehrpfeiler im Baugrund nicht erforderlich ist. Die Pfeiler sind einzig im Bereich der Pfeilernischen mit einer Horizontalbewehrung zu verstärken. Im Laufe der Jahrzehnte sind die Vorsatzschalen brüchig geworden und Regenwasser konnte, insbesondere über die Pfeilerköpfe, in die Pfeiler eindringen. Um die Frostschädigung durch eingedrungenes Regenwasser zu unterbinden, werden die Hohlräume und wasserführenden Risse in den Wehrpfeilern mittels Betoninjektionen geschlossen, was deren Durchnässung merklich reduziert.

Wie die Wehrpfeiler sind auch die Wehrsohlen unbewehrt ausgebildet. Nach dem Herausbrechen der alten Wehrsohlen erhalten die jeweils 25 m x 11 m großen Wehrfelder eine 40 cm starke neue Stahlbetonsohle, die jeweils auf einer 25 cm mächtigen Filterkiesschicht und einer 10 cm dicken Sauberkeitsschicht gegründet ist. Da die Wehrsohlen im Revisionsfall nicht auftriebssicher sind, muss jede Wehrsohle mit jeweils 18 Verpressankern (2 Reihen à 9 Einstabankern), Durchmesser 36 mm (in Richtung Oberwasser) und 32 mm (in Richtung Unterwasser), deren Gesamtlänge jeweils 11 m misst, gesichert werden.



Abbildung 3: Bewehrungsarbeiten mit eingebauten Verpressankern in der Sohle des Wehres Horkheim [Foto: WNA Heidelberg]

### Grundinstandsetzung der linken Schleusenammer Lauffen

Die Arbeiten zur Errichtung der linken Kammer der Schleuse Lauffen begannen 1938. Kriegsbedingt mussten die Bauarbeiten unterbrochen werden, so dass die linke Schleusenammer erst 1951 dem Verkehr übergeben werden konnte. Entsprechend ihrem Alter wies sie nutzungsbedingte Bauwerksschäden sowie eine mittlerweile veraltete technische Ausrüstung auf. Um den Bauwerksbestand funktionsfähig zu erhalten, wurden die Bauwerksschäden im Betonbau behoben, indem der durch Risse und Abplatzungen gekennzeichnete Wandbeton in einer Tiefe von 40 cm abgefräst und durch eine neue 40 cm starke, doppellagig bewehrte Stahlbetonschale ersetzt wurde. Mit den Schleusenammerwänden erhielten auch die Schleusenplanen einen neuen 30 cm starken, bewehrten Stahlbetonaufbau.



Abbildung 4: Linke Schleusenammer Lauffen – Fräsarbeiten [Foto: WNA Heidelberg]

Die abgängigen Stemmtore am Ober- und Unterhaupt wurden durch neue Stemmtore in neu hergestellten Tormasken ersetzt. Ergänzend umfasst das Instandsetzungsprogramm auch den Einbau einer an der DIN 19703 angepassten neuen Schleusenausrüstung (Steigleitern, Poller, etc.). Die Hubhöhe im Unterwasser der Schleuse Lauffen beträgt fast 8,40 m, so dass statt einer Seilstoßschutzanlage ein neuer Stoßschutzbalken am Unterhaupt eingebaut werden konnte.



Abbildung 5: Linke Schleusenammer Lauffen - Einbau der jeweils 44 Tonnen schweren Stemmtorflügel des Untertores [Foto: WNA Heidelberg]

Die Defizite in der technischen Ausrüstung werden derzeit durch den Ersatz der Antriebs-, Elektro-, Steuerungs- und Nachrichtentechnik beseitigt. Die Planung und der Einbau der neuen Komponenten berücksichtigt dabei die künftige Fernbedienbarkeit der Schleusenanlage. Die nutzbare Schleusenammerlänge der linken Kammer maß 109,40 m. Im Zuge der Grundinstandsetzung wurde am Oberhaupt ein neuer Drempel errichtet und der alte abgebrochen. Die neue nutzbare Kammerlänge misst nunmehr 114 m und ermöglicht damit die sichere Passage eines 110 m langen GMS. Im Rahmen des Versatzes des Drempels wurde dieser auch tiefer gelegt, so dass nun die Wassertiefe am Oberhaupt 3,50 m unter hydrostatischem Stau beträgt.

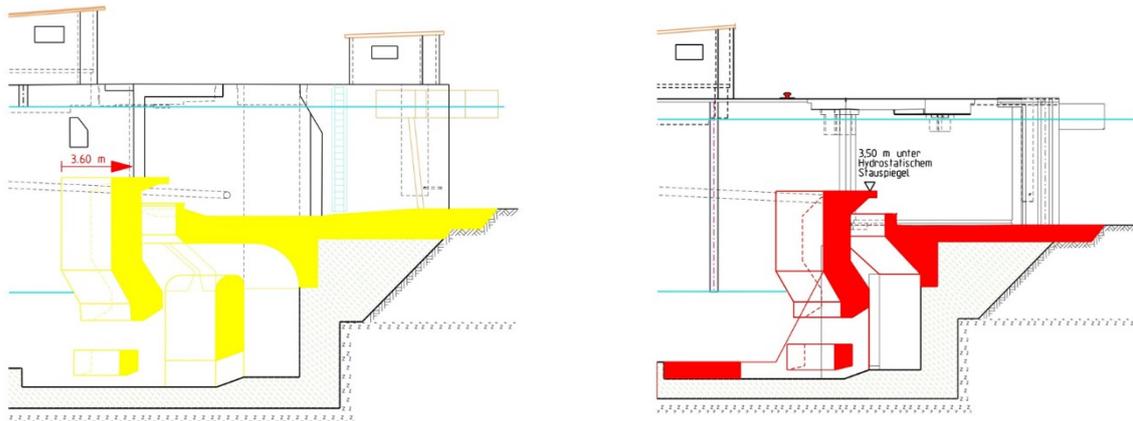


Abbildung 6: Linke Schleusenammer Lauffen - Versatz und Tieferlegung des Drempels am Oberhaupt [Grafik: WNA Heidelberg]

Die statische Nachrechnung der bestehenden Schleusenammersohlen und -wände sowie Schleusenhäupter entsprechend der neuen Nachweisformate zeigt, dass diese i.d.R. nicht auftriebs- bzw. standsicher sind. Verschärft wird dieser rechnerisch unsichere Zustand, wenn die Schleusenammerwände für die Herstellung der neuen 40 cm starken Vorsatzschalen abgefräst und die Vouten als Eckaussteifungen zwischen den Schleusenammerwänden und der Schleusenammersohle beseitigt werden müssen. Letzteres ist erforderlich, um den Schiffen einen größeren Kammerquerschnitt zur Verfügung zu stellen, damit sie tiefer abladen sowie schneller in die Schleusenammern einfahren können. Die Standsicherheit der Schleusenammersohle und -wände wird in Lauffen durch den Einbau von insgesamt 204 Verpressankern in den Kammerwänden, in senkrechter oder geneigter Anordnung, sowie 72 Zugpfählen in der Sohlplatte gewährleistet. Die maximale Länge der Verpressanker beträgt 34 m.

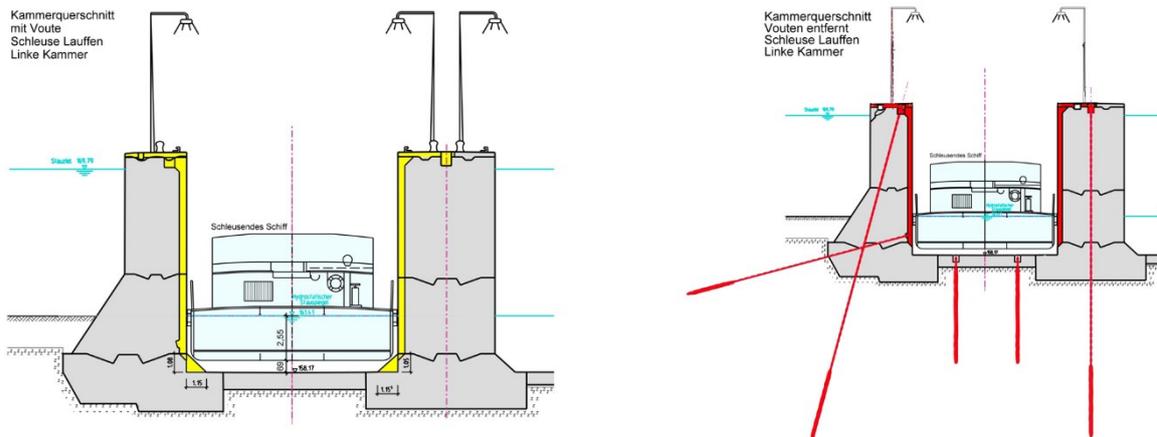


Abbildung 7: Linke Schleusenkommer Lauffen - Anordnung von Verpressankern und Zugpfählen [Grafik: WNA Heidelberg]

### Der Schleusen-Statik-Schnelltest („3S-Test“)

Der Planung der bestehenden Verkehrswasserbauwerke am Neckar lagen die damals gültigen technischen Vorschriften zugrunde. Im Laufe der Jahrzehnte haben sich mit fortschreitendem Kenntnisstand die technischen Regelwerke weiterentwickelt.

In der WSV gibt es für die existierenden Bauwerke keinen Bestandsschutz, so dass die Standsicherheit der alten Bauwerke mit den heutigen technischen Vorschriften nachgewiesen werden muss. Aus den Nachrechnungen können sich die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Sicherungsmaßnahmen, bspw. in Form eines Einbaus mit Verpressankern, ergeben. Aufgrund der Vielzahl der alten Schleusenbauwerke an Bundeswasserstraßen ist es erforderlich, eine Vorgehensweise zu definieren, mit deren Hilfe eine Reihung der potenziell standsicherheitsgefährdeten Schleusenkommer festgelegt werden kann. Hierfür hat die BAW den „3S-Test“ entwickelt. Er liefert eine erste Tendenzangabe, inwiefern die Schleusenbauwerke hinsichtlich ihrer Standsicherheit potenziell gefährdet sind. Der „3S-Test“ legt weiterhin die Dringlichkeit der Eingriffszeitpunkte für die einzelnen Anlagen fest [2]. Wichtig ist es, in diesem Zusammenhang zu betonen, dass der „3S-Test“ eine Priorisierung der standsicherheitsgefährdeten Bauwerke aufzeigt; der „3S-Test“ ersetzt jedoch nicht eine Bewertung der Tragfähigkeit bestehender massiver Wasserbauwerke gemäß des gleichnamigen BAW-Merkblatts „Bewertung der Tragfähigkeit bestehender massiver Wasserbauwerke“, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Juli 2016.

Aufgrund der großen Anzahl an Schleusenbauwerken am Neckar und der erkannten Standsicherheitsdefizite bei den ersten in der Instandsetzung befindlichen Schleusenkommern wurde im WNA Heidelberg eine aus vier Ingenieuren bestehende Statik-Gruppe aufgebaut. Deren Aufgabe ist es momentan, die Standsicherheitsgefährdung der Schleusenkommern am Neckar zu ermitteln, die im Rahmen abgeschlossener Instandsetzungsmaßnahmen noch nicht gesichert wurden oder die sich nicht in einer aktuellen Instandsetzungsplanung befinden. Weitere Ausführungen zum „3S-Test“ ergeben sich aus dem Vortrag sowie Aufsatz von Herrn Dr.-Ing. Christoph Stephan und Herrn Dr.-Ing. Engin Kotan (beide BAW) „Zwischen Bestandserhaltung und

Sicherheitsanforderungen – Herausforderungen bei der Tragfähigkeitsbewertung bestehender Wasserbauwerke“ im Rahmen des BAW-Kolloquiums „Erhaltung gestalten“.

### **Instandsetzung (von Schleusenammern) unter Betrieb - IUB**

Nicht nur die Schleusenbauwerke am Neckar, sondern auch die Schleusenanlagen an anderen Bundeswasserstraßen sind mittlerweile mehrere Jahrzehnte alt, einige weisen sogar ein Alter von mehr als 100 Jahren auf. Die rechnerische Lebensdauer der Bauwerkskomponenten, wie die Elektro-, Steuerungs-, Nachrichten- und Antriebstechnik, der Stahlwasserbau, aber auch der Massivbau ist bei vielen dieser Anlagen erreicht, teilweise bereits weit überschritten. Einzelne Bauwerkskomponenten lassen sich in mehrtägigen Schifffahrtssperren austauschen, bspw. die Schleusentore. Die Erfahrungen am Neckar zeigen jedoch, dass für eine Grundinstandsetzung einer Schleusenammer in konventioneller Abwicklung diese für mehrere Jahre außer Betrieb genommen werden muss. Dort, wo Doppelkammerschleusen an Bundeswasserstraßen existieren, wie am Neckar, ist dieses kein Problem. An Bundeswasserstraßen, an denen jedoch nur Einkammerschleusen vorhanden sind, müsste, soweit keine Umfahrungsmöglichkeiten existieren, vorauslaufend vor der mehrjährigen Außerbetriebnahme der Einkammerschleusen jeweils eine neue Schleusenammer parallel zur alten liegend errichtet werden, um die Befahrbarkeit des Wasserstraßenabschnitts weiter sicher stellen zu können.



*Abbildung 8: Staustufe Würzburg von Unterwasser aus gesehen (von links nach rechts: Wasserkraftanlage, 2-feldriges bewegliches Wehr, Streichwehr, Boots- und Großschifffahrtsschleuse) [Foto: WSV]*

Der Neubau von Schleusenammern ist jedoch vielfach aufgrund der langjährigen Vorlaufzeiten, verbunden mit dem erforderlichen hohen Ressourceneinsatz, aber auch aufgrund der örtlichen Randbedingungen nicht möglich. Ein Beispiel für Letzteres ist die Lage der Einkammerschleuse in Würzburg, welche in das dicht bebaute, historisch geprägte Stadtbild eingebettet ist.

Die Grundinstandsetzung unter laufendem Schiffsverkehr (kurz: „Instandsetzung unter Betrieb – IUB“) ist daher die einzige Möglichkeit, den Schiffsverkehr auf staugeregelten Wasserstraßen auch künftig unter Berücksichtigung der örtlichen Randbedingungen sowie eines moderaten Ressourceneinsatzes langfristig zu gewährleisten.

Das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (FuE-Vorhaben) „IUB“ soll an der Schleusenanlage Oberesslingen erprobt werden. Die Schleusenanlage Oberesslingen wurde als vorletzte Schleusenanlage an der Bundeswasserstraße Neckar in Form einer Doppelkammerschleuse errichtet (vgl. auch Bild 1). Seit 1968 nimmt die linke Schleusenkammer den Schiffsverkehr auf. In der rechten Schleusenkammer wurde das Massivbauwerk fertig gestellt, eine Ausrüstung mit Toren sowie einer Elektro-, Steuerungs-, Nachrichten- und Antriebstechnik fand nicht statt, so dass diese Schleusenkammer auch bis heute für den Schleusenverkehr nicht genutzt werden konnte. In dieser rechten Schleusenkammer soll das FuE-Vorhaben umgesetzt werden.



Abbildung 9: Doppelkammerschleuse Oberesslingen [Foto: WNA Heidelberg]

Der Schwerpunkt des FuE-Vorhabens liegt in der vergleichenden Beurteilung der verschiedenen Abtragsverfahren für den schadhaften Beton sowie den unterschiedlichen Ansätzen der Betoninstandsetzung unter einem simulierten Schleusenbetrieb.

Für den Abtrag des alten, schadhafte Betons sollen das Fräsen, das Sägen und das Hochdruckwasserstrahlen als Varianten getestet und deren Leistungsdaten für spätere Bauvorhaben systematisch erhoben sowie ausgewertet werden.

Damit die Schleusenammer während der Instandsetzung weiter von der Schifffahrt genutzt werden kann, stehen für die Bauarbeiten arbeitstäglich nur 12 Stunden zur Verfügung. Unter Berücksichtigung dieses Zeitfensters sowie den Mindestanforderungen an die Qualität der Schleusenammerwände, beispielsweise die Druckfestigkeit, Dichtheit gegenüber Durchfeuchtung, Widerstandsfähigkeit gegenüber Verschleißerscheinungen und Maßhaltigkeit, sollen folgende Instandsetzungsvarianten in Form von Bauteilversuchen an einzelnen Kammerwandabschnitten untersucht werden:

- Einsatz von mit Beton hinterfüllten Spundwänden,
- Betonfertigteile,
- schnell abbindender Ortbeton und
- mit Stahlfasern bewehrter Spritzbeton.

Die instandgesetzten Schleusenammerwände beinhalten zum Schluss neue Ausrüstungselemente, wie Steigleitern oder Poller.

Innerhalb des Zeitfensters von 12 Stunden ist das vollständige Lenzen und Wiederbefüllen der instand zu setzenden Schleusenammer mit produktiven Arbeitsschritten an den Kammerwänden kaum zu schaffen. Daher sollen die Arbeiten in definierten Arbeitsbereichen über die gesamte Kammerwandhöhe von einem Süllkasten aus erfolgen.

Süllkasten – Ansicht (in Schleusenammer eingebaut)

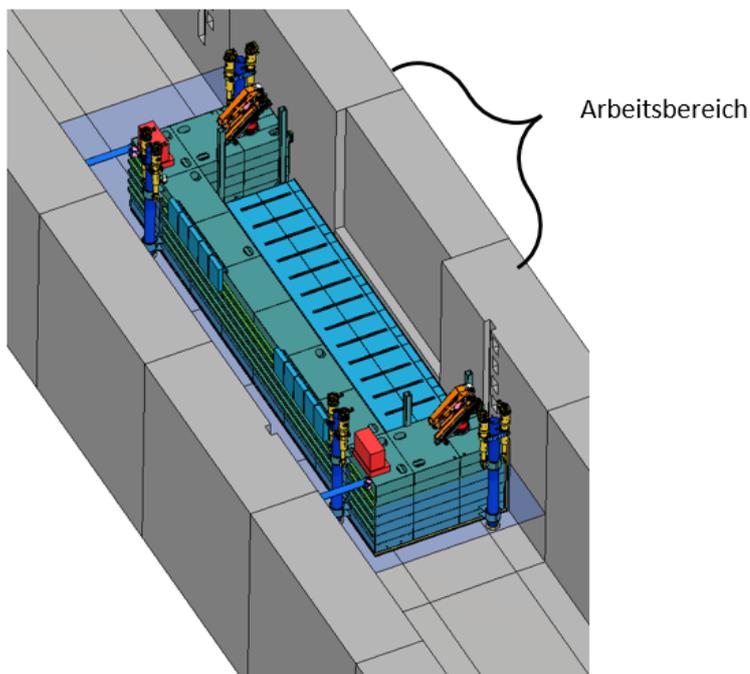


Abbildung 10: Süllkasten [Grafik: Ingenieurbüro „Krebs und Kiefer“]

Das Zerlegen des großformatigen Trockenlegens einer Schleusenammer bei konventioneller Instandsetzung in eine abschnittsweise Trockenlegung mit kurzen Zeitfenstern bei einer

Schleuseninstandsetzung unter laufendem Schifffahrtsbetrieb erfordert innovative Ideen in baubetrieblicher wie auch bautechnologischer Sicht. Aus diesem Grund wurde über ein Verhandlungsverfahren eine ARGE gefunden, die sich aus Ingenieurbüros und Baufirmen zusammensetzt. Zusammen mit der ARGE plant der Auftraggeber die Bauteilversuche im Detail.

Die BAW mit ihrer Abteilung „Bautechnik“ formuliert auftraggeberseitig die technischen Anforderungen bei den Bauteilversuchen. Weiterhin ist das Fachgebiet „Baubetrieb“ des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) in das FuE-Vorhaben eingebunden. Das KIT erhebt Leistungsdaten von den Bauteilversuchen, wie Dauer, Personalaufwand und Kosten. Diese Leistungsdaten werden benötigt, um den Aufwand künftiger Grundinstandsetzungen von Einkammerschleusen unter laufendem Schiffsverkehr im Vorfeld abschätzen zu können. Das Wasserstraßen-Neubauamt Heidelberg ist Bauherr des Bauvorhabens.

Die Detailplanung des ersten Bauteilversuchs hat im Herbst 2023 begonnen. Sukzessive erfolgt die Detailplanung für die weiteren Bauteilversuche. Der bisherige Zeitplan sieht den geplanten Baubeginn für den ersten Bauteilversuch in 2025 vor. Der letzte Bauteilversuch soll Ende 2027 abgeschlossen sein.

## **Fazit**

Der vorstehende Aufsatz beschreibt exemplarisch die Instandsetzungsaktivitäten des WNA Heidelberg bei Wehren und Schleusen zum Erhalt der Verkehrsinfrastruktur am Neckar. Bei diesen Bauvorhaben werden etliche bautechnische Fragen mit der BAW erörtert und geklärt.

Mit dem von der BAW entwickelten „3S-Test“ werden erstmalig Schleusenkammern an Bundeswasserstraßen auf ihre potenzielle Standsicherheitsgefährdung untersucht und, bei einer Gefährdung, Angaben zum Eingriffszeitpunkt gemacht. Eine Statik-Gruppe im WNA Heidelberg führt diese Untersuchungen in Abstimmung mit der BAW derzeit pilothaft an der Bundeswasserstraße Neckar durch.

Mit dem Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Instandsetzung unter Betrieb“ wollen die beauftragte ARGE sowie der Auftraggeber (BAW mit KIT, GDWS und WNA Heidelberg) der WSV künftig Optionen anbieten, unter laufendem Schifffahrtsbetrieb die Bausubstanz bestehender Schleusanlagen instandsetzen und damit erhalten zu können.

Das Engagement der BAW an der Bundeswasserstraße Neckar dient im nennenswerten Umfang dem Erhalt der Verkehrswasserbauwerke und ermöglicht somit auch einen künftig sicheren sowie zuverlässigen Betrieb der Wasserstraße.

## **Literatur**

Kompendium der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest. Eigenverlag, Juni 2007.

Empfehlungen zur Durchführung eines Schleusen-Statik-Schnelltest „3S“. BAW/Ref. B1, B3951.01.12.10322, vom 28.11.2022.

## **Zwischen Bestandserhaltung und Sicherheitsanforderungen – Herausforderungen bei der Tragfähigkeitsbewertung bestehender Wasserbauwerke**

Dr.-Ing. Christoph Stephan, Dr.-Ing. Engin Kotan, Bundesanstalt für Wasserbau

### **Einleitung**

Die Bedeutung möglichst langer Nutzungsdauern von Wasserbauwerken für einen nachhaltigen Umgang mit Ressourcen ist unumstritten. Allerdings darf dieser Beitrag zur Nachhaltigkeit nicht auf Kosten sicherheitsrelevanter Aspekte beruhen. Dieser Beitrag zeigt die Herausforderungen und Möglichkeiten bei der statischen Bewertung bestehender massiver Wasserbauwerke auf.

### **Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen**

Die Sicherheit im Bauwesen ist gemäß Schneider (1994) ein qualitativer Begriff. Eine Sicherheit gegenüber einer Gefährdung besteht nach SIA 160 (1989) dann, wenn „diese Gefährdung durch geeignete Maßnahmen unter Kontrolle gehalten oder auf ein akzeptierbares kleines Maß beschränkt wird. Eine absolute Sicherheit kann nicht erreicht werden.“

Als Zuverlässigkeit im Bauwesen bezeichnet man die Eigenschaft eines Bauwerks bzw. Bauteils eine festgelegte Funktion unter vorgegebenen Bedingungen und für eine festgelegte Nutzungsdauer mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit sicher zu stellen. Im Gegensatz zu Sicherheit ist die Zuverlässigkeit eine quantifizierbare Größe, die für den Erhalt und die Bewertung bestehender Bauwerke eine wesentliche Zielgröße darstellt.

### **Besonderheiten bei der Bewertung bestehender Wasserbauwerke**

Neben äußeren Einwirkungen, wie beispielsweise Erddruck und Wasserdruck, die für die Bemessung insbesondere älterer Wasserbauwerke maßgeblichen Einfluss hatten, erfahren massive Wasserbauwerke zusätzliche Beanspruchungen aus Wasserdruck im Inneren der Bauteile. In Rissen, Poren und Spalten ist gemäß DIN 19702:2013-02 bei von Wasser berührten Bauteilen mit einem als Auftriebskraft wirkenden Wasserdruck zu rechnen. Diese Beanspruchung durch inneren Wasserdruck hat eine Vergrößerung der klaffenden Fuge bzw. eine Verringerung der Druckzone zur Folge und kann insbesondere bei Bauwerken aus Mauerwerk und unbewehrtem Beton einen erheblichen Einfluss auf die Nachweisführung haben.

Das **BAW-Merkblatt „Bewertung der Tragfähigkeit bestehender, massiver Wasserbauwerke – TbW“** bietet eine strukturierte Methode zur Überprüfung der Tragfähigkeit älterer massiver Wasserbauwerke, wie Schleusen oder Wehre. Es richtet sich an Tragwerksplaner im Wasserbau und basiert auf aktualisierten Bestandsdaten, um Tragreserven zu identifizieren und Sicherheitsanforderungen einzuhalten. Der Anwendungsbereich bezieht sich auf Wasserbauwerke älter als zehn Jahre, die nicht nach aktuellen Normen errichtet wurden. Ziel dabei ist eine standardisierte Vorgehensweise, die spezifische Gegebenheiten massiver Bauwerke berücksichtigt. Die Methodik sieht einen dreistufigen Ansatz (Stufen A bis C) mit einem steigenden

Detaillierungsaufwand vor, um die Tragfähigkeit bestehender, **massiver Wasserbauwerke zu bewerten. Wesentliche Aspekte hinsichtlich der gemäß TbW vorgesehenen** Sicherheits- und Nachweisformate sind die Berücksichtigung von modifizierten Teilsicherheitsbeiwerten für massive Wasserbauwerke, die Anpassung der Nachweisformate an spezifische Lasten, wie Riss- und Porenwasserdruck, sowie die Integration neuer Bemessungsgleichungen, z. B. zur Querkrafttragfähigkeit unbewehrter Querschnitte.

### **Statische Defizite und mögliche Kompensationsmaßnahmen**

Können auch bei detaillierter Betrachtung nicht alle Nachweise erbracht werden, eröffnet das TbW in Stufe C die Möglichkeit, rechnerische Defizite zu kompensieren. Eine Möglichkeit sind hierbei betriebliche Maßnahmen zur Reduzierung der Beanspruchung. Abhängig von der konkreten Bauwerkssituation können dies zum Beispiel Eisfreihaltungen, Einschränkungen bei Auflasten, Sperrung einzelner Festmacheeinrichtungen oder die Überwachung des Grundwasserstandes sein. Solange dies durch organisatorische Maßnahmen wie Dienstanweisungen o.ä. sichergestellt ist, können die Nachweise ohne die entsprechenden Lasten geführt werden. Dies bietet sich insbesondere dann an, wenn sich Nachweise in der vorübergehenden Bemessungssituation, wie beispielsweise der Trockenlegung einer Schleusenkammer, nicht erbracht werden können.

Eine weitere Möglichkeit zur Kompensation bietet das Bauwerksmonitoring. Wenn die Auswirkungen einer rechnerischen Überlastung bekannt sind, können entsprechende Größen wie Neigungen oder Verschiebungen messtechnisch erfasst und mit Grenzwerten abgeglichen werden. Unabdingbare Voraussetzung hierfür ist das Vorliegen eines Ankündigungsverhaltens. Das bedeutet, dass deutlich messbare Tragwerksreaktionen vorliegen müssen, bevor ein Versagen eintritt. Dies ist in der Regel bei der Biegebeanspruchung bewehrter Querschnitte der Fall, während es bei Querkraft- oder Stabilitätsversagen in der Regel kein Ankündigungsverhalten gibt. Wichtig ist auch, dass bei der Planung des Monitoringsystems die zu beantwortende Fragestellung explizit formuliert ist, sodass die Messgrößen, die Auswahl der Sensoren, die Abtastraten usw. darauf abgestimmt werden können. Ebenfalls müssen die „natürlichen“ Tragwerksantworten auf Veränderungen von Umgebungseinflüssen bei der Auswertung berücksichtigt werden.

### **Abstufung von Gefahren und sicherheitsbezogener Handlungsbedarf**

Für den Fall, dass Standsicherheitsdefizite an mehreren Schleusenanlagen identifiziert wurden und eine Festlegung einer Priorisierung von sicherheitsrelevanten Maßnahmen erfolgen muss, kann die folgende Abbildung 1 zur Abstufung von Gefahren und der daraus resultierende sicherheitsbezogene Handlungsbedarf herangezogen werden. Diese Unterscheidung von „Gefahren“ wurde im Rahmen der „Empfehlung zur Durchführung eines Schleusen-Statik-Schnelltests „3S““ vom 28.11.2022 für Wasserbauwerke als sinnvoll erachtet und sieht gemäß Kunz (2022) die drei Gefahrenstufen „Akute Gefahr“, „Konkrete Gefahr“ und „Abstrakte Gefahr“ vor.

	Randbedingungen	Bewertungskriterien	Priorisierungsmöglichkeiten
<b>1</b>	<b>Akute Gefahr</b> E und R charakteristisch Eislast, lokale Lasten (Pollerzug, Schiffsanlegestoß) = 0, aktiver Erddruck  $\gamma_{E,d} = \gamma_{E,k} = 1,0$ $\gamma_{R,d} = \gamma_{R,k} = 1,0$  <b><math>ALG_k &gt; 1,0</math></b>	<b><math>ALG_k \leq 1,0</math></b>  Bewertung unter den Randbedingungen „Konkrete Gefahr“	<b><math>ALG_k &gt; 1,0</math></b>  Tragsicherheit nicht gegeben. Keine rechnerischen Tragreserven nutzbar.  ⬇️ Sofortige gutachterliche Bewertung erforderlich => Übergabe an BAW. ➡️
<b>2</b>	<b>Konkrete Gefahr</b> E charakteristisch R mit Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma_{E,d} = \gamma_{E,k} = 1,0$ $\gamma_{R,d}$ gem. TbW  <b><math>ALG_{mix} &gt; 1,0</math></b>	<b><math>ALG_{mix} \leq 1,0</math></b>  Bewertung unter den Randbedingungen „Abstrakte Gefahr“	<b><math>ALG_{mix} &gt; 1,0</math></b>  Über weiterführende statische Untersuchungen und Bewertungen zu bestimmender Handlungsbedarf und Einleitung begleitender Maßnahmen (verstärkte Bauwerksüberwachung, Monitoring, Entlastungsmaßnahmen, ...) ➡️  Priorisierung der weiterführenden statischen Bewertungen aufgrund der jeweiligen Versagensarten (mit bzw. ohne Vorankündigung) und ob ein rechnerischer Defizit ggf. durch eine Bestandsaufnahme zu beheben ist.  Kurzfristiger Nutzungszeitraum noch möglich.
<b>3</b>	<b>Abstrakte Gefahr</b> E mit Teilsicherheitsbeiwerten R mit Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma_{E,d}$ gem. TbW $\gamma_{R,d}$ gem. TbW  <b><math>ALG_d &gt; 1,0</math></b>	<b><math>ALG_d \leq 1,0</math></b>  Tragsicherheit nachgewiesen => kein Handlungsbedarf gegeben	<b><math>ALG_d &gt; 1,0</math></b>  Über weiterführende statische Untersuchungen und Bewertungen zu bestimmender Handlungsbedarf. ➡️  Priorisierung der weiterführenden statischen Bewertungen aufgrund der jeweiligen Versagensarten (mit bzw. ohne Vorankündigung) und ob ein rechnerischer Defizit ggf. durch eine Bestandsaufnahme zu beheben ist.  Kurz- bis mittelfristiger Nutzungszeitraum noch möglich.

Abbildung 1: Abstufung von Gefahren und sicherheitsbezogener Handlungsbedarf bei bestehenden massiven Wasserbauwerken

Wenn eine Nachweisführung mit charakteristischen Werten sowohl auf der Einwirkungs- als auch auf der Widerstandsseite ( $\gamma_{E,d} = \gamma_{E,k} = 1,0$  und  $\gamma_{R,d} = \gamma_{R,k} = 1,0$ ) sowie Vernachlässigung von bestimmten veränderlichen und außergewöhnlichen Einwirkungen (Eislast, lokalen Lasten wie beispielsweise Pollerzug oder Schiffsanlegestoß) und i.d.R. bei Ansatz eines rein aktiven Erddrucks zu einem Auslastungsgrad ( $ALG_k$ ) höher als 1,0 führt, ist unter den Annahmen des 3S-Tests von einer potenziell „**Akuten Gefahr**“ auszugehen. Unter diesen Randbedingungen sind zunächst sämtliche rechnerischen Tragreserven ausgeschöpft. Im Nachgang zu den 3S-Tests ist daher unmittelbar eine gutachterliche Bewertung vorzunehmen. Bestätigt sich der Auslastungsgrad höher 1,0, sind unverzüglich Maßnahmen zu ergreifen. Diese können von betrieblichen Maßnahmen über temporäre Sicherungsmaßnahmen bis hin zur sofortigen Außerbetriebnahme reichen.

Für den Fall, dass keine akute Gefahr vorliegt, aber unter Berücksichtigung von charakteristischen Werten auf der Einwirkungsseite ( $\gamma_{E,d} = \gamma_{E,k} = 1,0$ ) und Design-Werten auf der Widerstandsseite ( $\gamma_{R,d}$  nach Regelwerk) die Nachweise zu einem Auslastungsgrad ( $ALG_{mix}$ ) höher als 1,0 führen, liegt eine „**Konkrete Gefahr**“ vor. Über weiterführende statische Untersuchungen und Bewertungen sind dann der konkrete Handlungsbedarf zu ermitteln und begleitende Maßnahmen (verstärkte Bauwerksüberwachung, Monitoring, Entlastungsmaßnahmen, ...) abzuleiten. Ein kurzfristiger Nutzungszeitraum ist hier noch möglich. Falls durch die 3S-Tests für eine Vielzahl von Anlagen eine „Konkrete Gefahr“ gegeben sein sollte, kann eine Priorisierung der weiterführenden statischen Bewertungen aufgrund der jeweiligen Versagensarten (Versagen mit bzw. ohne Vorankündigung) und die Behebung eines rechnerischen Defizits durch eine eingehende Bestandsaufnahme (Baustoffkennwerte, Bodenkennwerte, ...) vorgenommen werden.

Von einer „**Abstrakten Gefahr**“ ist auszugehen, wenn eine Nachweisführung unter Berücksichtigung von Design-Werten sowohl auf der Einwirkungs- als auch auf der Widerstandsseite ( $\gamma_{E,d}$  und  $\gamma_{R,d}$  nach Regelwerk) zu einem Auslastungsgrad ( $ALG_d$ ) höher als 1,0 führt. Für einen näher und

über weitere statische Bewertungen zu bestimmenden Handlungsbedarf kann das Bauwerk ggf. noch für einen kurz- bis mittelfristigen Zeitraum, der für die Wiederherstellung eines regelwerk-konformen Zustands zu nutzen ist, betrieben werden. Entsprechend zur Handhabung bei Vorliegen einer „Konkreten Gefahr“ kann auch hier eine Priorisierung von Anlagen vorgenommen werden, für die durch die 3S-Tests eine „Abstrakte Gefahr“ identifiziert wurde. Grundsätzlich können zwei Kriterien für eine Priorisierung herangezogen werden. Mögliche Versagensfälle ohne Vorankündigung sind mit einer höheren Priorität zu behandeln als Versagensfälle, die unter Belastung plastische Verformungen aufweisen, bevor das Versagen eintritt (Vorankündigung des Versagens). Das zweite Kriterium für eine Priorisierung könnte die Möglichkeit sein, durch eine eingehende Zustandsanalyse (z. B. durch die Ermittlung von vorliegenden Materialfestigkeiten oder realen Bodenkennwerten) die rechnerischen Defizite in den Nachweisen auszugleichen.

### **Ideen und Überlegungen für TbW 2.0**

Neben möglichen Kompensationsmaßnahmen rechnerischer Tragfähigkeitsdefizite und Vorgehensweisen zur Priorisierung von Bauwerken beschäftigt sich das Referat Massivbau der BAW auch mit der Frage, ob die bestehenden Regelungen zur statischen Nachrechnung im TbW weitere Tragreserven nutzen können. Dies ist insbesondere damit begründet, dass im Bereich der WSV Bauwerke vorhanden sind, die in der Vergangenheit Einwirkungssituationen widerstanden haben, bei denen rechnerisch ein Versagen vorliegen würde.

Im Folgenden werden exemplarisch einige Überlegungen vorgestellt, wie Berechnungen weniger konservativ gestaltet und vereinfacht werden könnten. Diese Vorschläge sind teilweise bereits durch geltende Regelungen abgedeckt, die allerdings in der Praxis oft nicht angewendet werden. Einige Vorschläge gehen aber auch darüber hinaus und müssten vor einer Anwendung mit der obersten Bauaufsicht abgestimmt werden.

**Modifizierung des äußeren Wasserdrucks:** Die Einwirkung „Wasser“ ist bei massiven Wasserbauwerken von besonderer Bedeutung. Ein ansteigender Wasserdruck lässt die Beanspruchungen im Querschnitt der Stützwände stark überproportional anwachsen. Steigerungen beim Erddruck – oder bei den Verkehrslasten – führen demgegenüber zu erheblich geringeren Beanspruchungsanstiegen. Ein besonders gravierender Anstieg der Beanspruchung ist bei Annäherung an den Versagenszustand (Grenzzustand) aufgrund der extrem überlinearen Abhängigkeit vom Wasserstand festzustellen (sensitive Phase). Ein möglichst realistischer bzw. physikalisch sinnvoller Ansatz der sicherheitsbehafeten Bemessungsgröße Wasser ist dementsprechend für die statische Nachweisführung von zentraler Bedeutung. Der bisher übliche Ansatz erfolgt unter Berücksichtigung der hydrologischen Randbedingungen und der Jährlichkeiten in Form eines charakteristischen Wasserstandes (Grundwasser bzw. offene Fluss- oder Kanalwasserstände), mit dem die zugehörige Druckverteilung auf die Tragwerkskontur ermittelt wird. Die Druckgrößen werden mit den entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten für Wasser  $\gamma_{Fw}$  in Bemessungswerte umgerechnet. Der Wert  $\gamma_{Fw}$  enthält auch einen Anteil  $\gamma_{sd}$  für die Modellunsicherheit auf der Einwirkungsseite. Besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Wasserdruck und Schnittgrößen (i.d.R. aufgrund der Rissbildung nicht der Fall), können zunächst auch nur die Schnittgrößen als charakteristische Werte ermittelt und diese dann mit den Teilsicherheitsbeiwerten versehen werden. Alternativ besteht die Möglichkeit, die charakteristischen Wasserstände mittels

Sicherheitszuschlag in Bemessungswasserstände umzurechnen ( $\Delta h$ -Konzept). Dieses Vorgehen ist physikalisch konsistent, EC-konform und führt ggf. rechnerisch auch zu günstigeren Ergebnissen. Die beiden Varianten sind in Abbildung 2 (links) exemplarisch für eine Schleusenammerwand dargestellt.

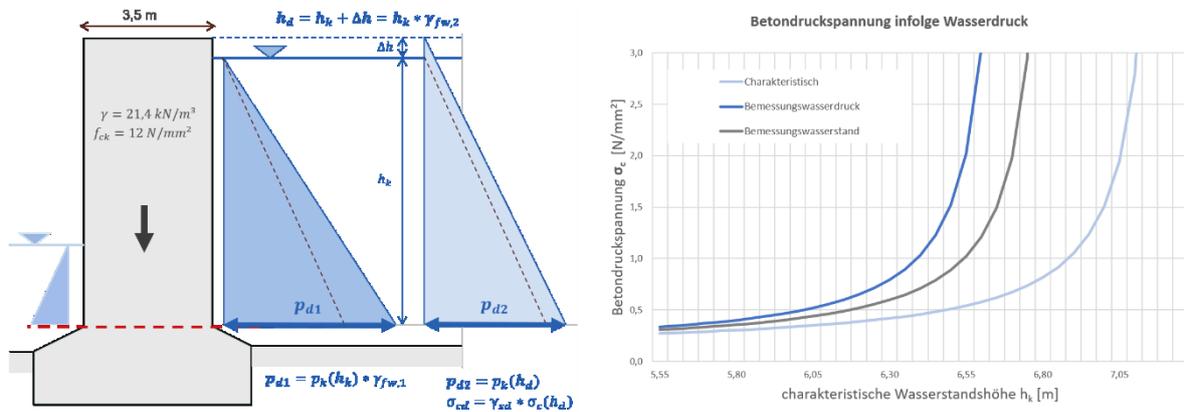


Abbildung 2: links: Beispiel zum Vergleich von Bemessungswasserdruck und Bemessungswasserstand, rechts: Entwicklung der Betondruckspannungen

Während sich die Resultierende des Wasserdrucks nur wenig unterscheidet, ist der Einfluss auf die maximale Druckspannung im Querschnitt kurz vor Erreichen des Grenzzustandes immens (Abbildung 2 (rechts)). Ein weiterer Vorteil der Verwendung eines Bemessungswasserstands anstatt des Bemessungswasserdrucks, da sich hierdurch der Berechnungsablauf vereinfacht.

**Ansatz von Betonzugfestigkeiten:** Insbesondere bei unbewehrten Konstruktionen würde ein Ansatz einer sehr geringen Betonzugfestigkeit rechnerisch bereits große Vorteile bringen. Daher wurden die Voraussetzungen und Folgen eines solchen Ansatzes intensiv untersucht. Als Resultat dieser Untersuchungen können folgende Erkenntnisse festgehalten werden:

In Arbeitsfugen oder anderweitig gestörten Zonen sind keine oder nur rudimentäre Zugfestigkeiten vorhanden und können dementsprechend bei rechnerischen Nachweisen auch nicht angesetzt werden. Um plötzliches Versagen auszuschließen, sollte bei statischen Nachweisen die Zugfestigkeit nur dann berücksichtigt werden, wenn bei Ausfall der Zugfestigkeit und der dann verbleibenden Druckzone immer noch ein stabiler Zustand nachweisbar ist. Zugfestigkeiten könnten nur bei ungeschädigtem Beton mit grundsätzlich normgerechten Festigkeitseigenschaften angesetzt werden. Ein ungestörter, dem heutigen Regelwerk entsprechender Beton ist beispielsweise vorhanden, wenn gemäß Eurocode 2 (2011) der Variationskoeffizient der Betonfestigkeit einen Wert von ca. 15 % nicht überschreitet.

Bei Umsetzung dieser Erkenntnisse ergeben sich rechnerische Standsicherheitsreserven nur bei Querkraftnachweisen; für Nachweise ausreichender Biegetragfähigkeit (Begrenzung der Betondruckspannung) entstehen keine Vorteile. Darüber hinaus ist festzuhalten, dass ein solcher Ansatz von Betonzugfestigkeiten bislang bauaufsichtlich nicht zulässig ist.

**Reibungsbeiwert bei Gleitnachweisen:** Gemäß Eurocode 2 bzw. TbW ist bei Verbundfugen zwischen zwei zu unterschiedlichen Zeitpunkten betonierten Abschnitten (Arbeitsfugen) nachzuweisen, dass die Haftreibung in dieser bevorzugten Gleitfläche die einwirkende Querkraft aufnehmen kann. Die reibungsbestimmende Rauigkeit der Verbundfugen ist gemäß Eurocode 2 maximal mit  $\mu = 0,9$  ansetzbar. Voraussetzung gemäß Norm ist eine sehr raue oder verzahnte Oberfläche mit mindestens 6 mm Rauigkeit. Bei den Fugenoberflächen an massiven Wasserbauwerken kann von einer sehr großen Rauigkeit ausgegangen werden. BAW-Untersuchungen an Arbeits- bzw. Betonierfugen an Schleusenkamerwänden (Bundesanstalt für Wasserbau (2019)) haben in der Regel Reibungsbeiwerte  $\mu > 0,9$  ergeben. Aufgrund des Versagensprozesses beim Abgleiten in einer großflächigen Fuge kann ferner immer davon ausgegangen werden, dass nicht der kleinste sondern der mittlere Reibungsbeiwert maßgebend ist. Dementsprechend kann, wenn keine genaueren Werte aus Laboruntersuchungen vorliegen, beim statischen Nachweis der Gleitsicherheit in der Arbeitsfuge unbewehrter Querschnitte an Wasserbauwerken immer ein Reibungsbeiwert von  $\mu = 1,0$  angesetzt werden.

**Anpassungswerte der Betonfestigkeit:** Ein Sicherheitselement im semiprobabilistischen Nachweiskonzept sind die Abminderungsbeiwerte  $\alpha_{cc}$  und  $\alpha_{ct}$  bzw.  $\alpha_{cc,pl}$  und  $\alpha_{ct,pl}$  für die Betonfestigkeiten, die Langzeiteffekte bei hoher Dauerbeanspruchung berücksichtigen. Da bei den Gewichtsstützwänden im Wasserbau, mit üblicherweise großen Querschnitten im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (Ist-Zustand), i.d.R. von einem relativ niedrigen Druckspannungsniveau ausgegangen werden kann, sind Langzeitauswirkungen auf die Betonfestigkeit infolge einer ständig vorhandenen, hohen Grundbeanspruchung nicht zu erwarten. Dementsprechend kann der Abminderungsbeiwert für die Druckfestigkeit bei insbesondere unbewehrten Querschnitten zu 1,0 gesetzt werden.

**Verwendung eines globalen Sicherheitskonzeptes:** Die meisten Bauwerke im Bereich der Bundeswasserstraßen wurden bei ihrer Errichtung mit einem globalen Sicherheitskonzept nachgewiesen. Das bedeutet, dass alle Berechnungen mit charakteristischen Eingangswerten durchgeführt wurden und erst im letzten Schritt ein Sicherheitsbeiwert berücksichtigt wurde. Bei der Einführung des semiprobabilistischen Sicherheitskonzeptes wurden die aktuellen Teilsicherheitsbeiwerte am vorherigen globalen Sicherheitsbeiwert orientiert, sodass sich für lineare Berechnungsverfahren keine substantiellen Änderungen ergeben. Bei nichtlinearen Berechnungen hingegen ergibt sich ein eklatanter Unterschied dadurch, ob die Sicherheitsbeiwerte am Beginn oder am Ende der Berechnung berücksichtigt werden. Dies kann am Beispiel von Gewichtsstützwänden demonstriert werden. Während bei der Berechnung nach dem globalen Sicherheitskonzept häufig nur geringe Auslastungen der Betondruckfestigkeiten ermittelt werden, ist eine Nachweisführung nach dem semiprobabilistischen Konzept häufig nicht möglich. Durch die Reduzierung des günstig wirkenden Eigengewichts bei gleichzeitiger Erhöhung des einwirkenden Momentes kommt es rechnerisch zu einem „Kippen“ des Querschnitts, in dessen Folge keine Spannungsberechnung möglich ist. Durch den o.g. inneren Wasserdruck, der in der Regel bauzeitlich nicht berücksichtigt wurde, wird dieser Effekt noch erheblich verstärkt. Es sollte daher in Erwägung gezogen werden, dass bei Bauwerken die ursprünglich nach dem globalen Sicherheitskonzept bemessen wurden und die in den Anwendungsbereich des TbW (BAW (2016), Abschnitt 1) fallen, auch Nachrechnungen nach diesem Prinzip erfolgen dürfen.

## Zusammenfassung

Das Bedürfnis nach Sicherheit ist jedem Menschen eigen. Als Gesellschaft müssen wir uns allerdings die Frage stellen, welches Maß wir hier fordern, da es keine absolute Sicherheit gibt und ein höheres Maß auch immer mit höheren Investitionen an finanziellen, personellen und anderen Ressourcen einhergeht. Dieses Niveau muss bauaufsichtlich festgelegt und von der WSV umgesetzt werden. Allen Ingenieurinnen und Ingenieuren, die mit der Nachrechnung bestehender Wasserbauwerke betraut sind, kommt allerdings ebenfalls eine Verantwortung zu. Es gilt von Fall zu Fall zu entscheiden, welche Reserven rechnerisch angesetzt werden können, um Bauwerke zu retten, anstatt sie „kaputt zu rechnen“. Der Rahmen und wichtige Vorgaben für die Umsetzung sind im TbW enthalten. Ausgewählte Vorschläge, wie diese noch realitätsnäher gestaltet werden können, wurden vorgestellt und sollen auch als Anregungen für Diskussionen unter allen Beteiligten dienen.

## Literatur

- BAW (2016): BAWMerkblatt: „Bewertung der Tragfähigkeit bestehender, massiver Wasserbauwerke (TbW)“, Ausgabe Juli 2016.
- Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2019): Scherfestigkeit von Beton und Mauerwerk an bestehenden Wasserbauwerken. FuE-Abschlussbericht B3951.03.04.70014. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.
- DIN 19702:2013-02: Massivbauwerke im Wasserbau – Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit.
- DIN EN 1992-1-1:2011-01: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.
- Kunz, C. (2022): Konzept: Abstufung von „Gefahren“ und sicherheitsbezogener Handlungsbedarf bei bestehenden (massiven) Wasserbauwerken. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 07.10.2022; unveröffentlicht.
- Schneider, J. (1994): Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen – Grundwissen für Ingenieure, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.
- SIA Norm 160 (1989): Einwirkungen auf Tragwerke – Verständigung, Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit, Berechnung, Bemessung und Nachweise, Einwirkungen.

## **Maintenance, durability, sustainability and resilience in the fields of hydraulic structures**

Prof. Philippe RIGO, PIANC InCom Chair, University of Liege , Belgium, ph.rigo@uliege.be

### **Abstract**

This paper reviews six PIANC INCOM Working Group Reports, which contribute to the dissemination of knowledge in the field of maintenance, durability, sustainability and resilience of IW hydraulic structures. It discusses Health Monitoring (SHM), Asset Management, Maintenance and Renovation, Corrosion Protection of Mechanical components, and Management of IW accidents.

### **Introduction**

The paper reviews a list of six PIANC INCOM Working Group Reports, which contribute to the dissemination of knowledge in the field of Maintenance, durability, sustainability and resilience of IW hydraulic structures.

It focuses on six (6) published PIANC InCom WGs:

- WG 199 - Health Monitoring of Port and Waterways Structures (PIANC 2023)
- WG 241 - Crisis Management of Accidents in Navigation Hydraulic Structures (PIANC 2024)
- WG 138 - Mechanical and Electrical Engineering Lessons Learnt from Navigation Structures (PIANC 2014)
- WG 129 - Waterway Infrastructure Asset Maintenance Management (PIANC 2013)
- WG 025 - Maintenance and Renovation of Navigation Infrastructure (PIANC 2006)
- WG 190 - Coating Based Corrosion Mitigation for Hydraulic Steel Gates (PIANC 2024)

More published PIANC WG reports may also be relevant:

- WG 119 - Inventory of Inspection and Repair Techniques of Navigation Structures (Steel, Concrete, Masonry and Timber) both Underwater and In-the-Dry (PIANC 2013)
- WG 137 - Navigation Structures: Their Role within Flood Defence Systems (Resilience and Performance under Overloading Conditions) (PIANC 2014)

as well as some PIANC INCOM WG in progress and terms of Reference (TOR) :

- WG 255 - Structural Re-assessment of Existing (IW) Hydraulic Structures (PIANC 2024)
- TG 257 - Digital Twins for Operation and Monitoring of Inland Waterways and its Infrastructure (PIANC 2024)
- WG XXX – Innovative Digitalization Approaches for Managing Hydraulic Structures of IW (New WG starting in 2025)

All these reports target, directly or indirectly, Health Monitoring (SHM), Asset Management, Maintenance and Renovation, Corrosion Protection to Mechanical components, and Management of accidents.

## **Health Monitoring of IW structures**

*Ref: WG 199 - Health Monitoring of Port and Waterways Structures (PIANC 2023)*

The development of waterborne transportation generally requires the construction and maintenance of port and waterway infrastructure. Individual infrastructure assets for ports and waterways are often large scale (e.g. locks, weirs and dams) and relate to of a larger waterway network.

Port and waterway infrastructure is of extreme economic importance to the global economy, facilitating the transportation of goods, which reaches a significant percentage of the global Gross Domestic Product (GDP). For example, in the European Union, over  $0.54 \cdot 10^6$  tons of goods were shipped on inland waterways in 2018 (Eurostat, 2019), while in China  $3.5 \cdot 10^6$  tons of cargo was handled at river ports on inland waterways. In the U.S.,  $80 \cdot 10^6$  tons of goods were processed through the most used lock on the Ohio River alone in 2015. The value of this infrastructure to the global economy is such that continued operability through routine inspection and timely maintenance and upkeep is of the utmost importance.

Regular inspection and maintenance of waterway infrastructure is often challenging due to inaccessibility. Much of the infrastructure can be in remote areas, and critical components are often submerged under water. Visual inspection and regular upkeep of the infrastructure can often require specific infrastructure for drainage purposes to allow for visual inspection (sometimes with divers). Therefore, these inspections require taking an infrastructure asset out of service which, given the infrastructure network, needs to be coordinated heavily with infrastructure stakeholders to minimize economic impact. The cost of the inspection and maintenance, as well as the potential impact to the economy, is such that these inspections tend to occur irregularly.

The irregularity of inspections means that asset owners and operators are typically operating their assets with little-to-no information on the current condition of the asset. This operational environment may lead to the development of significant damage to the asset as a small and unnoticed problem grows larger under continued use, thus requiring unscheduled downtime for emergency repairs. The unscheduled downtime, having not been coordinated with infrastructure stakeholders, can be devastating to the economy. For instance, in March 2021, a container ship became wedged in the Suez Canal and the disruption in shipping was estimated to US\$ 9.6 billion of trade per day due to vessels unable to pass through the canal.

## **Structural Health Monitoring (SHM)**

The economic importance of waterways infrastructure, coupled with the difficulty of inspection and maintenance, has led to a desire amongst many asset managers to consider alternative

methods of structural inspection and assessment. One such method includes the use of Structural Health Monitoring (SHM).

SHM systems are designed with the goal of moving away from a prescribed and infrequent maintenance schedule to a system where maintenance decisions are based on information gathered about the condition of the asset. Some systems also aim to detect any impending failures before their occurrence, as well as operational problems that may present themselves.

SHM is traditionally defined as a process of detecting damage and characterising the state of a structure by periodically/continuously and remotely collecting observations of the structure and measurements from an installed sensor system, thus mitigating the challenges of traditional visual inspection. Data from the sensors is used to extract measurements of the structural behaviors that are sensitive to damage or other conditions that are detrimental to the global structural performance and its reliability.

An efficient structural health monitoring system (Figure 1) can be seen as having the goal of answering the following four questions:

- Is there any damage?
- Where is located this damage?
- How large is this damage?
- How much longer can the structure be used safely?

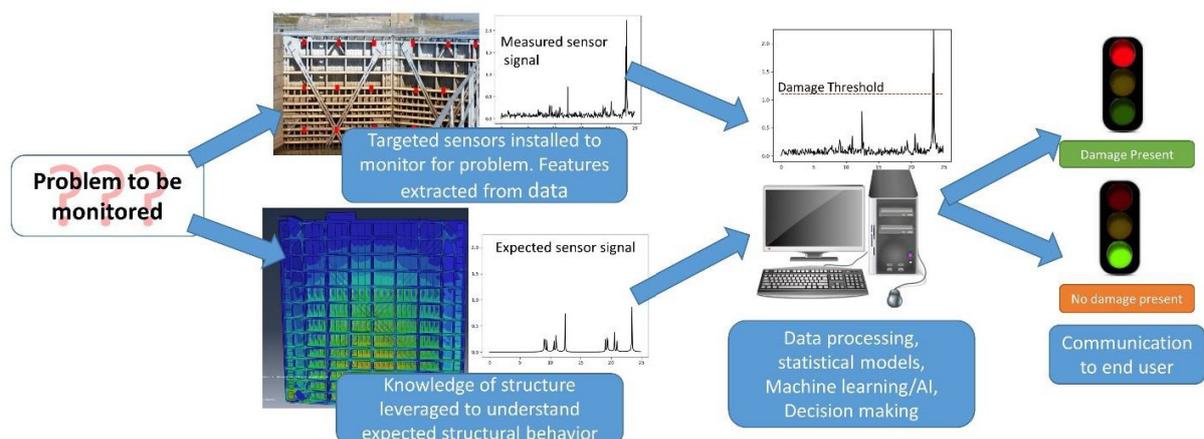


Figure 1: Overview of an SHM system (PIANC WG199, 2023)

### Steps to develop an efficient SHM

A structural health monitoring system will typically begin with planning a detection target that needs to be monitored. This is an important first step, as it must be stressed that installing a sensor system to monitor for every possible damage scenario or detrimental condition may be economically impractical, if not wholly impossible.

First, sensor type and placement should be selected carefully for the specific potential issues that may arise, as haphazard installation of sensors may provide little useful information. SHM system

may include detection of cracks in fractured critical members, extent of scouring due to erosion, extent of corrosion on steel structures... The WG 199 report outlines the best practices to consider when planning the objectives of a structural health monitoring system and discusses the types of infrastructure and issues that could benefit from SHM, and potential methodologies to monitor.

Then, with the objectives of a well-defined monitoring system, and a well-known structural system, the selection of the appropriate sensors needs to be addressed (to monitor changes in the issue being monitored). Some of the changes in structural behaviour that are typically monitored for damage are changes in modal frequencies, redistribution of stresses, or increased deflection due to the presence of a load. Some of the sensors might include traditional sensing technologies such as accelerometers, strain gages, or displacement transducers. More recently, novel methods of acquiring similar data have been developed such as PZT patches (*lead zirconate titanate ceramic used for ultrasonic sensors*) and commercial standard cameras deployed on automated drones. The report also discusses in detail many types of sensing technologies available to monitor various types of issues that are experienced in IW infrastructure.

After the sensor selection, data acquisition and management need to be similarly thoroughly planned. Data acquisition parameters, such as sampling rates and signal conditioning need to be carefully considered.

Additional challenges are powering all the equipment, and then communication between the equipment, the data acquisition equipment, and the platform where the data processing and analysis is to be performed. For long term monitoring, data storage can pose a significant challenge, as cybersecurity. The best practices and lessons learned regarding these data collection and management concerns are discussed in the report.

With the sensors installed and data being collected, it's important to note that **sensors themselves do not typically detect damage**. The sensors provide a data signal that needs to be interpreted in the context of structural behaviour, and often needs to be further processed to provide useful information on structural behaviour. **The extracted features from the data then need to be compared against some known acceptable values** to determine whether (or not) there is an issue that needs to be addressed, while careful consideration needs to be given to how environmental issues such as seasonal temperature variation will affect the data.

### **Crisis Management of Accidents**

*Ref: WG 241- Crisis Management of Accidents in Navigation Hydraulic Structures (PIANC 2024)*

While the objective of hydraulic structures such as lock gates, navigation river weirs and storm surge barriers are to remain in service, engineers must also be capable to adequately handle their failures. Despite the ongoing development of navigation expertise, design tools, norms, and construction methods, there are still a considerable number of accidents, calamities, and failures that happen to such structures. In addition, the costs of these accidents and failures are growing for several reasons including the increasing complexity and growing demand of waterborne infrastructure.

Accidents and failures to hydraulic structures happen not only when their loads exceed the design strength. Other possible causes are lack of inspection and maintenance, improper operation, extreme weather events and navigation errors. In addition, there are often combinations and complex sequences of events that may lead to accidents.

The PIANC WG 241 collected information on navigation accidents and provides assessment and lesson learnt.

### **WG 241 Recommendations:**

It is recommended that a risk prevention policy be implemented at all navigation structures. This policy should be revisited on a periodic basis. A good risk prevention policy makes all parties of the waterway administration responsible for controlling the risks associated with activity at a navigation site. The reduction of risks is thus the cardinal principle of prevention initiatives.

It is imperative that all lock operators be properly trained in the locking of vessels and safety incorporated into the work culture. As example, damage to gates or vessels may occur if the gate is inadvertently closed before the vessel has cleared the gate and the gate impacts the vessel or if a vessel impacts a closed or partially open gate. To meet this responsibility, an operator must be trained in such a way as to reduce the associated risks as much as possible (including in its work organisation) including setting up prevention measures. There must be detailed response measures in place in the event of an accident. This includes operator training for all possible accident scenarios.

Remote operation of locks adds more risk, and it is imperative that all risks are evaluated as movable bridges have nearly the same risk factor as navigation lock gates. By extension, this applies also to movable bridge operators. Bridges are also often operated from the same control center and same operators as navigation locks.

It is also recommended that the Ports, Canal, and Maritime Administrations should promote the lessons learned, to flow up and out of their areas and/or to become industry suggestions, standards, or regulations through associations such as PIANC, IMO or governments. Surely, this already happens, but in some instances, it may be triggered by accidents and calamities with very negative consequences and high media and legal exposure. By introducing regulations based on smaller accidents, these high consequential cases may be avoided, or their impact may be smaller.

Implementing a risk-based culture and mindset is imperative for maximum safety and accident prevention. Each member of the organisation, and by extension every partner (suppliers, contractors, clients), should be aware of their role. This includes the design engineer to the maintenance managers but also the legal department and other support services. All members should be thinking beyond their specific role and communicating across departments.

For example, for design engineers, it is very useful to be acquainted with operational and maintenance procedures. Regular exchange and contact between design engineers and maintenance personnel in the field should be implemented in a systemic way.

A best practice is to extend his mindset outside the boundaries of the organisation by sharing experiences with other organisations in other countries, partners, universities, professional organisations (e.g. PIANC). Another is to involve external parties to evaluate and improve procedures and policies related to safety and risk reduction. Organisations outside the waterway administration can provide additional insights that can be overlooked and can have more impact. Outside external parties may also have insight into other accidents.

### **Key Mechanical and Electrical Components for Reliability of IW structures**

*Ref: WG 138 - Mechanical and Electrical Engineering Lessons Learnt from Navigation Structures (PIANC 2014)*

The objective of the WG 241 report is to assemble 'lessons learnt' from navigation lock operating systems.

The mechanical and electrical design considerations for selecting operating machinery included in the WG 241 report concern gate types, loading conditions, site conditions, operations, maintenance and operator preference. Several different gate types are utilised for navigation structures and most of them have their own unique design features, including lock service gates, fill/empty gates and dam gates. A variety of mechanical/electrical systems used to operate these gates are typically hydraulic cylinders or electrically operated gear-driven machinery.

Problems with mechanical/electrical systems quickly emerge causing expensive unscheduled closures. The comprehensive 'lessons learnt' on navigation operating machinery included in the WG 241 report may facilitate the design of new construction or rehabilitation and in troubleshooting with operational and maintenance issues. Therefore, the WG 241 report provides a comprehensive summary of lessons learned and best practices that can be incorporated into future lock operating machinery designs. The report includes a summary of relevant guidance documents from various countries and provides guidance on the choice of systems to use in designs of navigation structures.

The WG compiled case studies to compile lessons learnt on hydraulic machinery, electro-mechanical machinery and electrical control systems and to determine best practice to improve reliability and thus availability. Some of the issues that have been investigated include:

- Troubleshooting – Difficulty for lock personnel to (re)program PLC.
- Exterior Mounted Components – Vulnerable to sun, water and flooding
- Custom designed cylinders and other components with long lead times for service and delivery
- Possibility of impact damage on machinery connections to the gate

- Use PLC versus hardwire systems as use of programmable logic controller may replace many (hardwire) parts and is more flexible for adopting changes
- Hydraulic components with fewer moving parts, centralised Hydraulic Power Unit (HPU), accurate speed control, shock absorbing, smooth operation and fewer installation/alignment issues and less pivot points for wear.
- Labour-intensive maintenance

### **Asset Maintenance Management**

*Ref: WG 129 - Waterway Infrastructure Asset Maintenance Management (PIANC 2013)*

Owners and managers of navigational or hydraulic infrastructure constantly seek to balance limited financial and other resources with the need to ensure the continued serviceability of their assets. Good quality condition, serviceability and consequences of failure grading data is fundamental to the assessment and prioritization of resources for the maintenance and repair of navigational assets. Increasingly this prioritization is supported by computerized asset management systems.

The diversity of types and usage of navigational assets, their required current and future service levels, and the nature and degree of damage to which they may be exposed in differing operational environments, means that there is a need for robust and consistent approaches to the grading of these assets.

The WG 129 report identified good international practice by gathering input from a wide variety of waterway organizations internationally and provides practical guidelines for the potential uses of asset grading systems. The report proposes a methodology to assist decision makers in prioritizing investment on infrastructure maintenance and repairs, and to optimize actions to give the most effective and sustainable solutions. This methodology is a part of a computerized asset management system, will help to prioritize the asset maintenance and investment in waterway infrastructure throughout the world, and should assist in any future development of a worldwide database.

Waterway infrastructure is complex and consists of many different types of structures, such as navigation locks, quay walls, weirs, etc. with both static and movable parts controlled by mechanical and electrical components. It is also very extensive, some covering thousands of kilometers and may cross the borders of different municipalities, provinces or even countries. Most of the infrastructure is unique and was designed and built in different periods, many of which have a very long lifespan. Because of that, they can sometimes stay in service for many years even without much inspection and maintenance. As such, Asset Management may be overlooked by organizations until the infrastructure reaches an advanced state of deterioration.

There is currently no generally accepted or standardized Asset Management System for waterway infrastructure. In general, it can be visualized as having three looping and interrelated processes that take place at the strategic, tactical and operational levels (Figure 2).

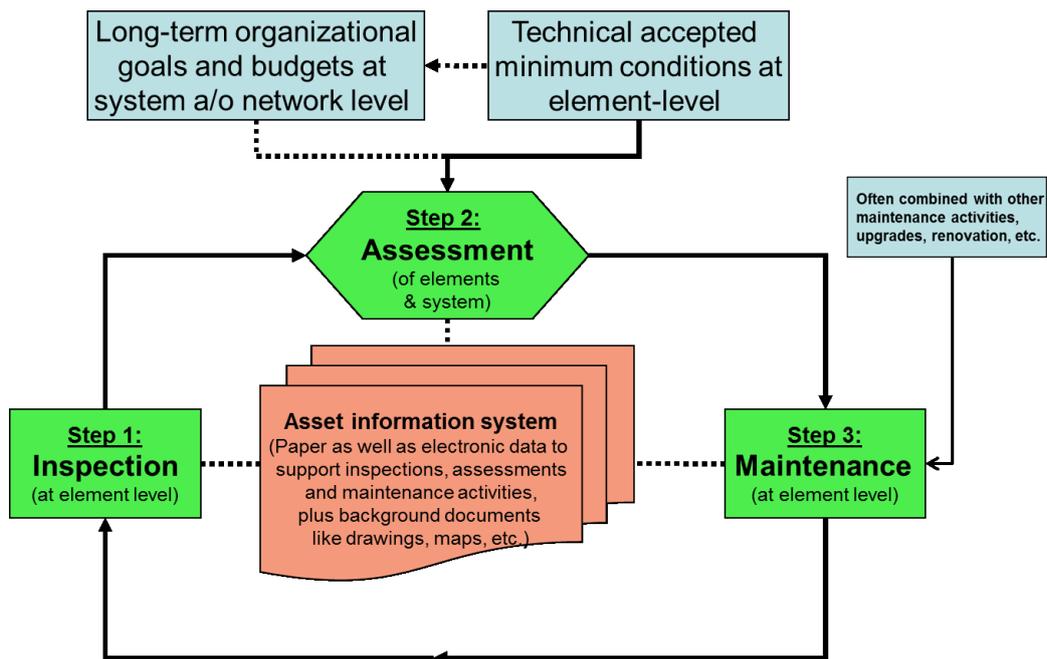


Figure 2: Basic Scheme of Asset Management Process (PIANC INCOM WG 129, 2013)

The Asset Management System must support all the activities and decisions at three levels:

- At the strategic or policy level, management is concerned about information at a very high level, such as present and projected capacities and overall performance level of the waterway or the overall transportation network, the annual maintenance budget as well as the future funding requirements for renewing the assets.
- At the tactical or maintenance level, management is concerned about the asset information in greater details, the performance level at the structure or sub-structure level, the inspection and monitoring program, the assessment of the structure conditions, the required maintenance actions including costs, and the prioritization of maintenance actions based on the various constraints such as budget, resources, locations etc.
- At the operational level, the inspectors, whether internal or external, requires access to design data and drawings, historical inspection data, inspection procedures. They input new data into the system in a unified and standardized manner to support decisions at the tactical level.

The Asset Management System, whether in use for many years or just under construction, often originate from completely different backgrounds and requirements. As a result, they may be quite different, but all will share some common features, which are:

- Systematic organization of asset data, usually in a hierarchical format
- Standardized inspection and assessment procedures to determine the condition of the assets
- Deterioration models (physical / mathematical, deterministic / probabilistic) to predict the future behavior and/or remediation costs

- Budget planning and/or allocation based on asset conditions or risks.

Few of the **recommended good practices** of WG 129 report that should be considered when implementing an Asset Management System are:

- There should be a clear link between the organization goals and objectives, its strategic plan, and its asset management strategy and performance. These are best linked within an organizational asset management plan.
- Asset management systems must be supported by appropriate quality data within an asset inventory, at a sufficient level of detail that is required to allow management decisions to be made. It is recognized that there is a cost to owning and maintaining such data, and therefore each organization must decide what data is required. Too little data may not allow the support of appropriate management decisions. Too much may result in a degree of complexity that obscures the most significant data on which management decisions depend.
- An organization must have appropriate written standards for the inspection of infrastructure assets. These standards should clearly define the hierarchy of inspections, their cycles, the inspection outputs and the training and competency requirements of the inspectors. Competency need not simply be defined in terms of qualification, as it is recognized that for many navigational assets the application of experience may be equally if not more important. The standards should also clearly define how grades are to be applied and supported (if appropriate) by photographs and examples of assets at each grade. This document will assist in achieving a consistent approach and that the application of grade, or individual damages does not vary with time, location or inspector.
- There are two different approaches for the application of condition grades to navigational assets, both appear equally valid:
- The first one allows the application of an overall grade to each asset based on an overall assessment undertaken by a competent assessor. This could be considered a less rigorous approach that if unconstrained may be influenced by subjectivity. However, it can be controlled by setting and monitoring standards for inspection and assessment.
- The second one is based on the inspection and assessment of specified individual damages to each asset, the condition grade then being calculated independently by application a suitable algorithm. This largely removes subjectivity in application of the grade but could diminish flexibility of approach and the application of knowledge and experience.

It is for each organization to decide which approach is most appropriate to its own system and asset management maturity level.

- To reduce subjectivity in the application of grades it is good practice to utilize separate inspection personnel to those undertaking the assessment.
- It is recommended that, when applying grades, to navigational assets, both material condition (condition grade) and performance condition (serviceability) should be considered. It is possible to combine these at the reporting stage.
- The number and definitions of grades (whether condition, serviceability or consequence of failure) are specific to each organisation. It is recognized that with time such grades may

need to be expanded or refined to suit the circumstances of the time or the need to refine prioritization of repairs.

- For life-cycle management, the concept of assessments should be upgraded from condition assessment to performance assessment. Therefore, it is required to quantitatively make overall assessment of a structure from the viewpoint of structural performance. The visual inspection is only able to provide the change in appearance of structural member, but structural performance must be evaluated as precisely as possible.
- Additional recommendations are available in the WG 129 report.

## **Maintenance and Renovation of Navigation Infrastructure**

*Ref: WG 25 - Maintenance and Renovation of Navigation Infrastructure (PIANC 2006)*

The navigation structures in many nations are approaching, or have reached and moved beyond, their design life. Preservation and extended use of existing facilities is dependent upon efficient operation, maintenance, repair and renovation of these structures. WG 25 has identified practical guidelines for identifying cost-effective and timely solutions to these problems.

WG 25 identified cost effective and timely solutions to navigation infrastructure asset management. It provides an inventory of existing decision-making tools, establishes guidelines, provides recommendations for timing and methods for periodic inspections, and for scheduling maintenance and repairs during asset life. It also provides a rational means of prioritization of infrastructure repairs.

Examining the levels of asset management, it is identified that there is a basic approach which usually includes creating a hierarchical asset register, a simple life cycle approach, meeting existing levels of service and drawing up maintenance plans on the best available current inspection data. At the same time financial and service performance are measured in order that trends can be monitored and long-term predictions created.

An advanced approach has also been identified, which would look at detailed benchmarking of asset condition performance and historic costs, life cycle financial modelling, asset deterioration modelling, risk management techniques, optimised decision making and a fully integrated operation and maintenance programme.

WG 25 report contains two key sections: “*Inventory of Decision-Making Tools*” and “*Recommended Best Practices for Prioritization*”. The latter is subdivided into subsections that deal respectively with “Basic Asset Management” and “Advanced Asset Management”.

The selection of the most appropriate approach will depend on:

- The costs and benefits to the organization,
- Legislation of the country involved,
- Size, condition and complexity of the assets,

- The level of risk and tolerability associated with asset failure,
- Resources (financial/people/time) availability,
- Expectations of the customers or the public.

The Basic Asset Management is carried out to meet the minimum legislative and organizational requirements for infrastructure management, financial planning and reporting. It provides simple outputs such as statements of levels of service, forward maintenance and repair programmes, and financial projections. It is usually a snap-shot of current practices and strategies (rather than the aspirations of the organisation).

Basic Asset Management will usually include:

- Hierarchical asset register including classification and attributes.
- A simple lifecycle approach.
- Asset Management plans based on the best available current inspection data (not necessarily complete) and assumptions where it does not exist.
- Meeting existing levels of service.
- Long-term financial predictions based on local knowledge and options for meeting the current levels of service.
- Financial and service performance measures monitor the trends.

The Advanced Asset Management approaches optimise activities and programs to meet agreed or aspirational service standards in the most cost-effective way, through the collection and detailed analysis of key data on asset condition profiles, performance, deterioration rates, usage, lifecycle cost management, risk analysis and refurbishment options. It leads to optimisation and true asset management strategies. It will usually involve lifecycle Asset Management.

Advanced Asset Management would be likely to utilise (amongst others):

- Detailed benchmarked data on asset condition, performance and historical costs with minimal assumptions and a high degree of confidence.
- Lifecycle financial modelling.
- Asset deterioration (predictive) modelling.
- Risk management techniques.
- Optimised decision-making.
- Option evaluation.
- A holistic approach with full assessment of the impact of other strategic plans on the Asset Management process.
- Asset utilisation and rationalisation.
- Integrated operation and maintenance.
- A full review process.

In determining the optimal maintenance strategy, various options may be considered. For instance, different idealized strategies for the maintenance of assets are shown schematically in Figure 3.

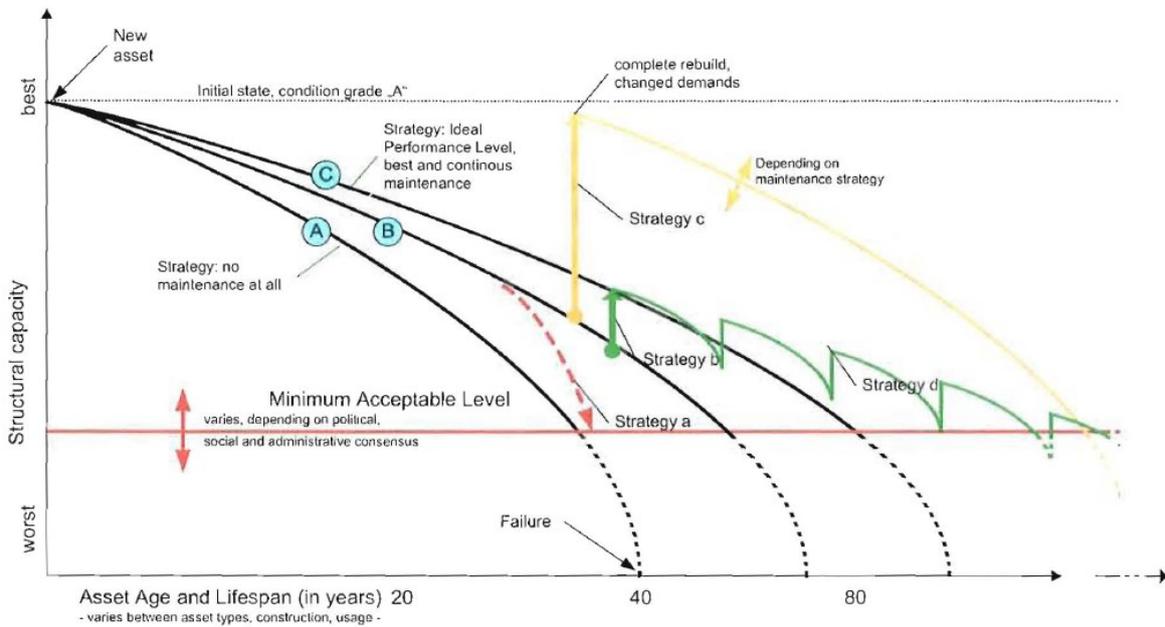


Figure 3: Different idealized strategies for the maintenance of assets (PIANC WG25, 2006)

### Preventative/corrective maintenance

In applying different maintenance strategies, it is important to strike a balance between preventative and corrective maintenance. It must be understood that the use of corrective maintenance may result in the restriction of navigational traffic before it shows results. There are also significant influences on cost and maintenance levels (Figure 4).

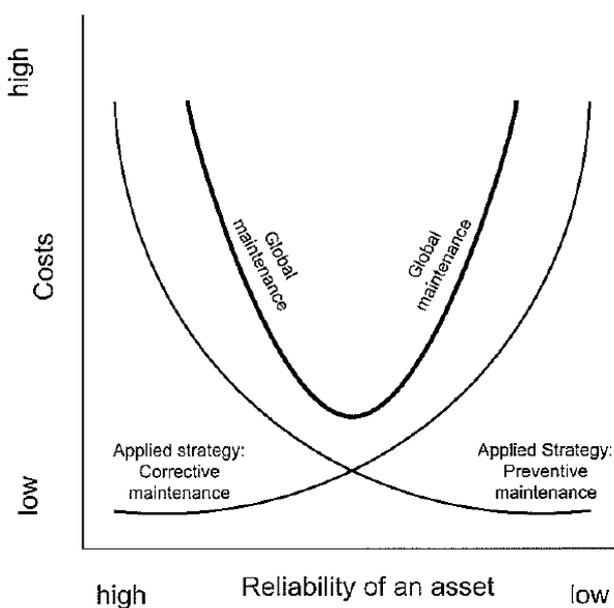


Figure 4: Preventative/corrective maintenance (PIANC WG25, 2006)

## Programmed Inspection Frequency

The primary purpose of asset inspection is to identify and manage risks associated with those assets. It is essential to identify faults that may affect the business of the navigation authority, the planned level of service for its assets, threats to the safety of its customers, neighbours, staff or the public, and to ensure that remedial works are properly prioritised.

Where asset performance relates to the ability of the asset to meet target levels of service, inspections allow the monitoring of that performance with time. Monitoring asset condition and service throughout the asset lifecycle is important to identify under-performing assets or those

Inspection frequencies differ between navigation authorities, asset types and facilities. Differing construction types, planned maintenance regimes, exposure to environmental (e.g., marine corrosion) and human factors also have a significant influence. However, there is a clear hierarchical structure of short, medium and high frequency of inspections as shown in Table 1.

Table 1: *Inspection frequencies in the framework of Asset Management (PIANC WG25, 2006)*

Cycle	Inspection Type	Asset Type	Inspection Format	Inspection Output	Inspector Competency
<b>1 day to 3 months</b>	Routine Inspection (Short Term)	- All infrastructure assets - Operating equipment - Earthworks	Visual + tactile looking for change, damage and safety defects	Simple or standard report with work identified to manager	Local staff familiar with the operation of the asset type and certified to carry out inspections
<b>6 months to 5 years</b>	Intermediate or Monitoring Inspection (Medium Term)	- All infrastructure assets - Earthworks - Buildings	Visual + tactile + measurement, looking for rates of change	Standard report with condition grade, conceptual repair solutions + estimated costs to manager. Data input to asset register	General Civil or Structural Engineer certified to carry out inspections
<b>3 years to 20 years</b>	Principal or Comprehensive Inspection (Long Term)	- All infrastructure assets (above and below water) - Earthworks - Buildings	Visual + tactile + measurement + intrusive investigation, looking for significance of change	Comprehensive technical report to manager with condition grade, cause assessment, recommended solutions, detailed construction and hydromechanical data for design. Data input to asset register	Specialist & Professional Engineer certified to carry out inspections
<b>Emergency When required, (response to damage or extreme event)</b>	Specific or Diagnostic Inspection (Non-cyclic)	All assets	Visual + tactile measurement + intrusive  Investigation. Damage diagnosis.	Damage focused technical report to manager with condition grade, fault diagnosis, recommended solutions, detailed construction and hydromechanical data for design. Data input to asset register	Specialist & Professional Engineer certified to carry out inspections

The **Condition Index** (Ic) relates to a generic description of the facility status, the measures (precise actions to undertake) and the intervention time limit (see Table 2).

Table 2: *Index Condition (Ic), with facility status, measures and time limit (PIANC WG25 , 2006)*

<b>Ic</b>	<b>Facility Status</b>	<b>Measures</b>	<b>Time limit</b>
<b>1</b>	The facility needs standard maintenance	Preventative maintenance	Long term (>3 years)
<b>2</b>	The facility needs important or specialized repair work, but service level is not affected in the medium-term period	Specialised preventative maintenance	Medium term (2 / 3 years)
<b>3</b>	The facility needs important or specialized repair work, to guarantee its function and the service level in the mid-term period	Curative maintenance or Specialised preventative maintenance	Medium term (2 / 3 years)
<b>4</b>	The facility has serious disorders that may impact upon the service level in the short-term period	Curative maintenance (and/or) Detailed inspection	Short term (1 / 2 years)
<b>5</b>	The Immediate safety is not assured	Curative maintenance/Renovation; Precise actions to remedy the cause of the lack of safety of the structure and equipment. Detailed inspection is required.	Immediate action.

## Corrosion Protection

*Ref: WG 190 - Coating Based Corrosion Mitigation for Hydraulic Steel Gates (PIANC 2024)*

The PIANC WG 190 report presents strategies for mitigating corrosion in hydraulic steel gates, locks, and navigation weirs (dams) via coating systems, stressing the importance of selection based on environmental and operational criteria. It highlights the necessity of proper surface preparation and application techniques for successful corrosion protection and mitigation.

Effective corrosion mitigation is achievable through strategic coating selection and maintenance, extending the life and reliability of hydraulic steel structures. This report underscores the importance of a comprehensive approach to structure design that encompasses coating selection, application, and ongoing care to combat corrosion effectively and extend the service life of these structures.

Main recommendations of WG 190 report are:

- Select **coating systems** meticulously, considering environmental impact and corrosion rate profiles based upon the intended location for the hydraulic systems.
- Ensure all **personnel** involved in application and inspection of coatings are thoroughly and possess the proper certifications based on country guidelines and specifications.
- Adopt a regime of **regular inspection and maintenance** to prolong the coatings efficacy and service life performance.

Additional specific recommendations are:

**Paint-Friendly Design:** Paint-friendly design of structures greatly increases the overall performance of the structure. For example, including proper drainage in the design will help to avoid holding water during operation and will increase the lifetime of the coating. Additionally, accessibility to all areas in the structure is imperative to achieve proper surface preparation, coating application, and ease of access for maintenance. Coating thickness becomes thin around sharp edges and corners due to surface tension so eliminating such sharp structural details is beneficial. The Netherlands used such paint-friendly design by using curved edges for the huge Storm Surge Barrier of Rotterdam.

**Proper Surface Preparation:** It is necessary to specify and achieve a high level of surface preparation for optimal coating adhesion and performance. The steel surface should be solvent cleaned first to remove any oil/grease and then abrasive blasted to create an angular profile. The better the surface preparation is, the greater coating adhesion will be thus leading to an overall increased service life. At a minimum, the surface profile requirements listed on the manufacturer's product data sheet for the coating must be achieved for proper coating adhesion.

**Galvanic Corrosion Protection:** Using galvanic systems to protect the steel can contribute to corrosion protection and lengthening coatings' service life. Hydraulic gates should be protected galvanically with organic zinc-rich primers by metallisation, galvanization, or by having a cathodic protection system installed (sacrificial anode or induced current). By using a zinc-rich primer or duplex system (coatings over metallising/ galvanising), corrosion is held to isolated coating defects that can be repaired. Without galvanic protection, small defects will continue to corrode and spread across the structure underneath the coating.

It is important to note that some coating technology (as the US' vinyl system), will *blister*<sup>(1)</sup> the steel elements by inducing current cathodic protection systems and so ensuring compatibility between the cathodic protection methods and coating systems.

(1) **Cathodic blistering** is caused by the electrochemical reduction of oxygen beneath intact (and sometimes defective) coatings, creating an increasingly alkaline condition).

**Coating Selection:** Coatings should be selected based on environmental and local parameters in order to prepare for long-term performance.

In USA, for the coating in fresh water, vinyl coatings are used and for salt water (exceeding 1,000 ppm chlorides) coal tar epoxy is still used (even if highly toxic).

In Europe, due to environmental impacts, these 2 coating systems are prohibited. For this reason, Germany has developed a testing program to produce a list of qualified products. So that, contractors can select any coating that has passed testing for use on their projects. To alleviate the risk in allowing newer technologies, contracts must include significantly longer maintenance schedules and a warranty of 20 years.

Lastly, coating system selection must include considerations for performance, including levels of impact or abrasion and how frequently a structure is used. For bulkheads or stoplogs, which remain primarily dry until used, UV protection is more critical as opposed to continually submerged components.

**Corrosion Maintenance:** Routine corrosion maintenance will significantly extend the service life of hydraulic steel structures. Complete inspection and repair usually require dewatering of the structure. The frequency of maintenance/dewatering must be chosen regarding many factors: consequences of failure and redundancy of the structure, condition of the structure or its corrosion protection, local monitoring requirements, and available funding.

Regular inspection and maintenance are especially advised if the consequences of failure of the structure can be fatal. For example, in the Netherlands, the inspection schedule includes an annual quick scan and a technical inspection every six years. Depending on the inspection results, maintenance is likely to be necessary because many of the lock and dam structures exist to protect the population during storms or flood events. However, when the consequences are less severe, maintenance can be done less frequently. In the United States, many structures are used for commerce and transportation are only dewatered for maintenance every 15-20 years, depending on funding availability.

From an economic point of view, inspections should be frequent enough to avoid damage to the steel structure since repairing steelwork is usually more expensive than the cost of regular inspections and maintenance of the corrosion protection systems. When inspection reports show no damage on the corrosion protection, less frequent dewatering can be feasible. However, if inspection reports show damage to the corrosion protection system, or even corrosion damage on the steel structure, more frequent inspection and maintenance is advised.

**Certified Workers:** Certified applicators and inspectors should ensure quality control and provide certifications. These quality control and quality assurance measures are critical for the success of the coating. Certifications is a matter of experts and must belong to field applicators, shop applicators, and inspectors to meet the work requirements.

## References

- WG 025 Maintenance and Renovation of Navigation Infrastructure (PIANC 2006).
- WG 119 Inventory of Inspection and Repair Techniques of Navigation Structures (Steel, Concrete, Masonry and Timber) both Underwater and In-the-Dry (PIANC 2013).
- WG 129 Waterway Infrastructure Asset Maintenance Management (PIANC 2013).
- WG 137 Navigation Structures: Their Role within Flood Defence Systems (Resilience and Performance under Overloading Conditions), (PIANC 2014).
- WG 138 Mechanical and Electrical Engineering Lessons Learnt from Navigation Structures (PIANC 2014).

WG 199 Health Monitoring of Port and waterways structures (PIANC 2023).

WG 241 Crisis Management of Accidents in Navigation Hydraulic Structures (PIANC 2024).

WG 255 Structural Re-assessment of Existing (IW) Hydraulic Structures (PIANC 2024).

TG 257 Digital Twins for Operation and Monitoring of Inland Waterways and its Infrastructure (PIANC 2024).

WG XXX Innovative Digitalization Approaches for Managing Hydraulic Structures of IW (New WG starting in 2025).

## Loch an Loch und hält doch – Detektion und Wachstum von Ermüdungsrissen in genieteten Altstahltragwerken

Dr.-Ing. Lars Sieber, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden  
Dr.-Ing. Thomas Riedel, DB InfraGO AG

### Einleitung

Ein großer Teil der Eisenbahnbrücken, die in Europa zu Beginn des 20. Jahrhunderts entstanden sind, wird noch immer betrieben. Stählerne Eisenbahnbrücken unterliegen als zyklisch belastete Bauwerke einer Ermüdungsbeanspruchung.

An die zuständigen Infrastrukturbetreiber besteht die Anforderung des jederzeit sicheren Betriebes der Eisenbahninfrastruktur. In diesem Kontext besteht die wirtschaftliche Notwendigkeit, den Zeitpunkt eines Ersatzneubau für Brückenbauwerke optimal zu wählen sowie Instandhaltung zielgerichtet und effizient durchzuführen. Die Anwendung zutreffender Methoden zur Beurteilung des Zustands der Infrastrukturanlagen ist dabei eine wichtige Grundlage.

Für die Bewertung der Ermüdungssicherheit von zyklisch beanspruchten Konstruktionen hat sich neben dem Nennspannungskonzept das Konzept der Bruchmechanik etabliert. Mit Hilfe der Bruchmechanik können die Risswachstumsphase und das Versagensverhalten gerissener Bauteile beschrieben werden. In dem vorliegenden Beitrag wird der Nachweis der Ermüdungssicherheit einer knapp 100 Jahre alten genieteten Eisenbahnbrücke mit der Methode der Bruchmechanik vorgestellt.

### Die Brücke über die Elbe in Meißen

Die zweigleisige Eisenbahnbrücke über die Elbe wurde im Jahr 1925 gebaut. Sie besteht aus zwei eingleisigen, konstruktiv getrennten Überbauten auf gemeinsamen massiven Pfeilern und Widerlagern. Die drei Hauptöffnungen über dem Fluss, mit Stützweiten von jeweils 56,20 m werden mit durchlaufenden Fachwerküberbauten überbrückt. Die offene Fahrbahn ist etwa in der Mitte der Hauptträgerhöhe angeordnet (siehe Abbildung 1).

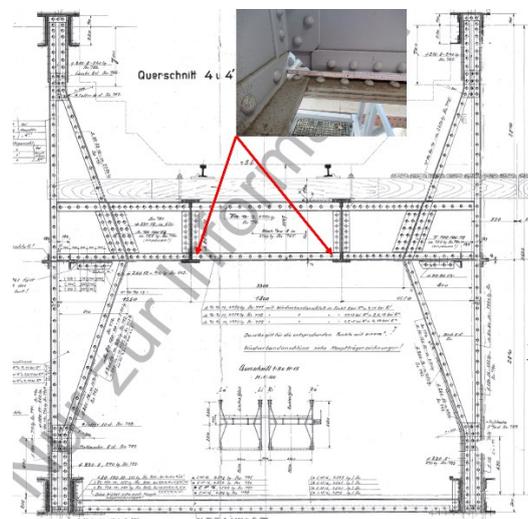


Abbildung 1: Querschnitt des Brückenüberbaus (Quelle: DB InfraGo AG)

Die Fahrbahnlängsträger und Querträger bestehen jeweils aus genieteten, vollwandigen Trägern mit Doppel-T Querschnitt. Die Untergurtwinkel der Längsträger sind an den Querträgeranschlüssen unterbrochen. Die Durchlaufwirkung der Längsträger wird über durchlaufende Laschen hergestellt. An jedem Kreuzungspunkt sind die Längsträgerlaschen mit jeweils vier Niete mit den Querträgeruntergurten verbunden (siehe Abbildung 1).

Die biegebeanspruchten Untergurte der Querträger im Bereich der Längsträgeranschlüsse wurden im Rahmen einer Nachrechnung des Brückentragwerks im Jahr 2011 als ermüdungskritische Details identifiziert. Dabei wurde auf Basis des Nennspannungskonzepts eine verbleibende Restnutzungsdauer von 20 Jahren bestimmt. Im Folgenden werden die Methodik und Ergebnisse einer Untersuchung auf bruchmechanischer Basis vorgestellt.

### Bruchmechanische Risswachstumsberechnungen

Das Risswachstum in stählernen Strukturen unter zyklischen Beanspruchungen wird in der Regel mit dem Risswachstumsgesetz nach Paris / Erdogan (1963) beschrieben.

$$\frac{da}{dN} = C_{Pa} \cdot \Delta K^{m_{Pa}} \quad (1)$$

Die linke Seite der Gleichung beschreibt die Änderung der Risstiefe  $a$  über die Lastwechselzahl  $N$  und entspricht damit der Risswachstumsgeschwindigkeit bzw. Rissfortschrittsrate. Für  $N \rightarrow 1$  ergibt sich die Risstiefenänderung  $\Delta a$  für einen Lastwechsel  $\Delta N$ . Die rechte Seite enthält den zyklischen Spannungsintensitätsfaktor  $\Delta K$ . Dieser entspricht der Differenz der Risspitzenbeanspruchung für einen Beanspruchungswechsel.

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (2)$$

Der Spannungsintensitätsfaktor  $K$  ist bei Anwendung der linear-elastischen Bruchmechanik (LEBM) die wesentliche Beanspruchungsgröße des gerissenen Bauteiles.

$$K = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y \quad (3)$$

Der Spannungsintensitätsfaktor (SIF) ist abhängig von der Bauteilbruttopannung  $\sigma$  der Risstiefe  $a$  und der Korrekturfunktion  $Y$ . Diese Funktion dient zur Beschreibung der Bauteil- und Rissgeometrie sowie zur Erfassung weiterer Einflüsse auf die Risspitzenbeanspruchung.  $Y$  ist in den meisten Fällen wiederum abhängig von der Risstiefe  $a$ .

Der Einfluss der Nietklemmspannung auf das Risswachstum wurde von Riedel (2024) sowohl numerisch als auch experimentell umfassend untersucht. Abbildung 2 zeigt das numerische Modell einer Nietverbindung mit schematischen Angaben zur äußeren Beanspruchung und dem Eigenstresszustand infolge Nietklemmwirkung.

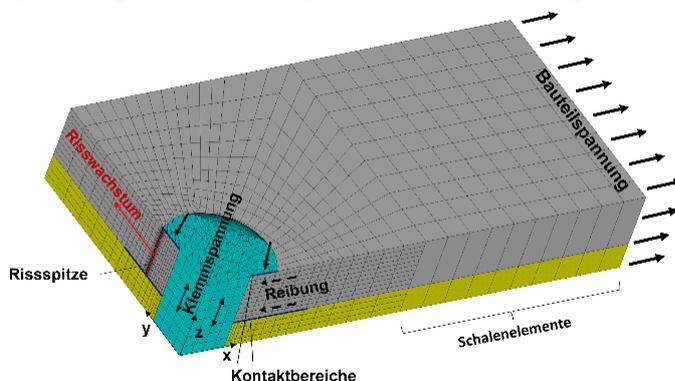


Abbildung 2: Numerisches Modell einer Nietverbindung

Aus der durch die Nietklemmung generierten Druckspannung in Blechdickenrichtung resultiert infolge der behinderten Querdehnung eine zusätzliche Druckspannung in der Blechebene. Diese überlagert sich mit der für die Rissöffnung verantwortlichen Bauteilspannung und ist dieser entgegen gerichtet. Befindet sich die Risspitze innerhalb dieses Spannungsfeldes, verringert sich die Risspitzenbeanspruchung. Der Anteil am SIF, der aus diesem Effekt resultiert, wird im Folgenden  $K_{press}$  bezeichnet.

Der Bewegung der Rissflanken bei der Rissöffnung infolge einer zyklischen Beanspruchung wirkt an den Blechoberflächen eine Tangentialspannung entgegen, die aus der Klemmspannung und dem Reibbeiwert resultiert. Durch die behinderte Rissöffnung verringert sich ebenfalls die Spannungsintensität an der Risspitze. Der Anteil am SIF, der darauf zurückzuführen ist, wird im folgenden  $K_{fric}$  genannt.

Die Beanspruchung an der Risspitze entsprechend Gleichung (3) setzt sich aus drei Beanspruchungsanteilen zusammen. Der Anteil  $K_{geo}$  resultiert aus der Bauteilgeometrie (gelochtes Blech),  $K_{press}$  resultiert aus der Querdruckspannung und  $K_{fric}$  aus der Reibung zwischen den Querschnittelementen.

$$K = K_{geo} + K_{press} + K_{fric} \quad (4)$$

Bei Anwendung der linear-elastischen Bruchmechanik (LEBM) lassen sich alle drei Beanspruchungsanteile an dem numerischen Modell (Abbildung 2) bestimmen. Der Beanspruchungsanteil  $K_{geo}$  kann unabhängig davon auch mit formelmäßig aufbereiteten Lösungen aus der Fachliteratur ermittelt werden [5], wie z.B. Führung (1973) oder Berger (2018). Für typische Nietgrößen und Bauteilabmessungen in Nietverbindungen wurde von Riedel (2024) der Beanspruchungsanteil  $K_{fric}$  in einer Parameterstudie bestimmt.

## Materialkennwerte

Entsprechend der historischen Bestandsunterlagen wurde für die Tragkonstruktion der Elbebrücke Meißen der höherfeste Baustahl St 48 verwendet. Da keine detaillierten Materialeigenschaften dokumentiert sind, wurden umfangreiche Materialuntersuchungen durchgeführt. Der Untersuchungsschwerpunkt lag dabei auf der Bestimmung der bruchmechanischen Materialparameter  $C_{pa}$ , die Paris-Konstante und  $m_{pa}$ , den Paris-Anstieg entsprechend Gleichung (1). Abbildung 3 links zeigt die Stichprobenverteilung der mit Hilfe von Risswachstumsversuchen von Riedel et al. (2023) an normalfestem Baustahl St 37 ermittelten Werte für den Paris-Gradenanstieg  $m_{pa}$ . Die Auswertung basiert auf 18 Einzelversuchen an sechs verschiedenen alten Flusstählen. Im Vergleich mit den Versuchsergebnissen am St 48 konnte kein Einfluss der Materialart auf das Rissfortschrittsverhalten festgestellt werden.

Von Riedel et al. (2023) wurde gezeigt, dass für alte Stähle eine starke Korrelation zwischen den Paris-Parametern  $C_{pa}$  und  $m_{pa}$  der Gleichung (1) besteht. Die Regressionsbeziehung wird im Allgemeinen durch folgende Beziehung beschrieben:

$$C_{pa} = A \cdot \Delta K_0^{-m_{pa}} \quad (5)$$

Für die Stichprobe der Elbebrücke Meißen sind die korrelierten Werte in Abbildung 3 rechts dargestellt. Die Konstanten der Korrelationsbeziehung (5) wurden mit  $A = 2,13e - 5$  und  $K = 15,63$  bestimmt.

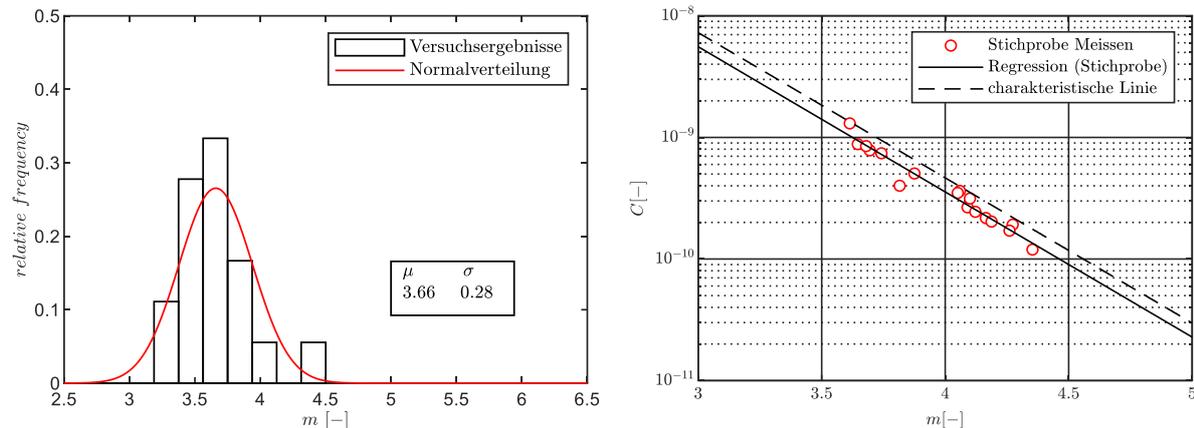


Abbildung 3: links: Verteilung der Paris-Geradenanstiege  $m$   
rechts: Korrelationsbeziehung zwischen den Paris-Parametern

### Bestimmung des Anfangsrisses $a_0$

Die Beschreibung des Risswachstums erfolgt immer für ein Intervall zwischen einer Anfangsrisstiefe  $a_0$  und einer Endrisstiefe. Da letztere das Versagen des gerissenen Bauteils bestimmt, wird sie als kritische Risstiefe  $a_c$  bezeichnet. Für den in der Praxis überwiegend vorkommenden Fall der Beurteilung eines Bauwerkes, für das keine Risse bekannt sind, muss der anzunehmende Anfangsriss  $a_0$  so groß gewählt werden, wie ein Riss der bei der Inspektion übersehen worden sein könnte. Die Festlegung der Anfangsrisstiefe ist also maßgeblich vom Inspektionsverfahren abhängig, welches bei der Brückenbewertung zum Einsatz kommt.

Bei einer visuellen Prüfung gilt allgemein ein Riss als auffindbar, wenn er 5 mm unter dem Nietkopf herausgewachsen ist. Der Zeitraum zwischen Rissinitiation am Lochrand bis zum Erreichen dieser Risslänge ist ein ganz wesentlicher Teil der tatsächlichen verbleibenden Nutzungsdauer des Bauteils. Um stattdessen Risse bereits unterhalb der Nietköpfe sicher detektieren zu können, wurde an der Elbebrücke Meißen Phased-Array-Ultraschallprüfung eingesetzt und für die Anwendung an genieteten Brücken weiterentwickelt.

Im Rahmen der ZfP-Untersuchungen war zunächst zu klären, welche Rissgröße am Lochrand unter Berücksichtigung der vorliegenden konkreten Randbedingungen im Bauwerk (Geometrie des Konstruktionsdetails, Beschichtungsaufbau, Zugänglichkeit) mit Sicherheit detektiert werden kann. Für die Erarbeitung des Prüfkonzeptes und die Validierung des Prüfverfahrens wurden mehrere Prüfkörper hergestellt (siehe Abbildung 4), die jeweils aus einem Blech mit Loch und einer Schraube mit Halbrundkopf darin bestanden. Unter dem Nietkopf wurden am Lochrand künstlich Risse mit unterschiedlichen Geometrien (Eckanriss, Durchriss) und Größe erzeugt.



Abbildung 4: Beschichteter Prüfkörper mit Nietkopfschraube zur Verfahrensvalidierung

Im Zuge dieser Verfahrensvalidierung konnten Eckenrisse mit einer Länge von 1 mm sicher und reproduzierbar detektiert werden. Bei der Prüfung im Bauwerk wurde an keinem Nietloch der als ermüdungsgefährdet klassifizierten Stellen ein Riss mit dieser Größe nachgewiesen.

## Nietklemmkräfte

Nietklemmkräfte können nicht zerstörungsfrei am Bauwerk bestimmt werden. Um bei der Risswachstumsberechnung diese Klemmkräfte berücksichtigen zu können, wird auf die statistische Auswertung einer großen Anzahl experimentell bestimmter Nietklemmkäfte aus verschiedenen Bauwerken zurückgegriffen. Frühere, experimentell bestimmte Nietklemmkräfte sind aus der Literatur von Graf (1935), Valtinat (1994) und Zhou (1994) bekannt. Von Leonetti et al. (2020) wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm zur Bestimmung von Nietklemmspannungen an Bauteilen der Botlek Brücke vorgestellt. Darüber hinaus wurden an der HTW Dresden von Riedel (2024) an Bauteilen aus fünf verschiedenen Bauwerken experimentell Nietklemmspannungen ermittelt. Eine gemeinsame Auswertung der insgesamt 152 Einzelwerte ergab für die Nietklemmspannung einen Mittelwert von 108 MPa und eine Standardabweichung 42,5 MPa. Entsprechend DIN EN 1990, Anhang D wurde darauf aufbauen der charakteristische Wert der Nietklemmspannung für Niete mit einem Schaftdurchmesser von  $d_{\text{schaft}} = 20$  mm und einer Schaftlänge von  $l_{\text{schaft}} = 24$  mm (entspricht dem Konstruktionsdetail an der Elbebrücke) mit 66 MPa bestimmt. Dieser Wert gilt für heiß geschlagene Niete aus St 34. Den Untersuchungen von Taras et al. (2007) folgend wurden die Gleitkräfte in den Nietverbindungen der Elbebrücke Meißen aufgrund des höherfesten Werkstoffs St 48 um ein Drittel reduziert berücksichtigt.

## Ergebnisse

Unter Anwendung des Risswachstumsgesetzes von Paris / Erdogan (1963) wurden mit den beschriebenen Randbedingungen Risswachstumsintervalle für die relevanten Stellen im Tragwerk der Elbebrücke Meißen bestimmt. Die Abbildung 5 zeigt die errechneten Risswachstumskurven. Unter der gegenwärtigen Betriebsbelastung beträgt die Zeitperiode für stabiles Risswachstum, bis zum Erreichen der kritischen Rissgröße 10.837 Tage (ca. 30 Jahre). Unter Berücksichtigung der Nietklemmung beträgt die Risswachstumsperiode sogar 15.210 Tage (ca. 41 Jahre). Da es am Bauwerk keine Anzeichen gibt, die auf locker sitzende Niete hindeuten, wie z.B. Spaltkorrosion ist aus Sicht der Autoren die Berücksichtigung der Nietklemmspannung gerechtfertigt.

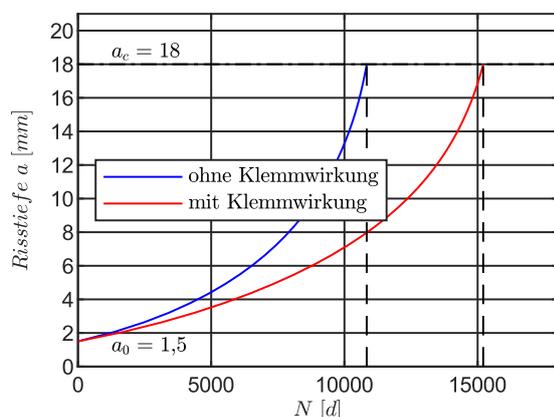


Abbildung 5: Risswachstumskurven für das maßgebende Anschlussdetail

## Zusammenfassung / Schlussfolgerungen

Genietete Brücken stellen immer noch einen großen Teil der in Betrieb befindlichen Eisenbahninfrastruktur dar. Die Frage der Sicherheit gegen Ermüdungsversagen wird mit zunehmendem Alter der betreffenden Bauwerke immer wichtiger. Das bruchmechanische Konzept ist eine effektive Methode, den Ermüdungszustand dieser Bauwerke zutreffend zu beschreiben. Damit werden Infrastrukturbetreiber in die Lage versetzt, wirtschaftliche Entscheidungen über Weiterbetrieb, Ersatzinvestition oder Verstärkung zu treffen. Die Einbeziehung der Nietvorspannung bei der Rissfortschrittsberechnung ermöglicht es, die Leistungsfähigkeit dieser Bauwerke realitätsnah zu beschreiben.

Einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis bruchmechanischer Berechnung hat die am Bauwerk detektierbare Anfangsrisgröße. Mit Hilfe der Phased-Array-Methode ist es möglich, Risse unter dem Nietkopf mit einer Länge von maximal 1 mm sicher auszuschließen. Am Beispiel der Elbebrücke Meißen konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe genauer Rissdetektionsmethoden und bruchmechanischer Bewertung die sichere Weiternutzung historischer Brückenbauwerke möglich ist.

## Literatur

- Berger, C. (2018): Forschungskuratorium Maschinenbau, Hrsg: TH Darmstadt, und Fraunhofer-IWM, FKM-Richtlinie - Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, 4. Ausgabe, Frankfurt am Main: VDMA-Verlag.
- DIN EN 1990:2010-12, Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002+ A1:2005+ A1:2005/AC:2010, Beuth Verlag GmbH.
- Führung, H. (1973): „Approximation functions for K-factors of cracks in notches“, Int J Fract, Bd. 9, Nr. 3, S. 328–331, doi: 10.1007/BF00049211.
- Graf, O. (1935): „Dauerversuche mit Nietverbindungen“, Deutscher Stahlbau Verband.
- Leonetti, D.; Maljaars, J.; Pasquarelli, G.; Brando, G. (2020): „Rivet clamping force of as-built hot-riveted connections in steel bridges“, Journal of Constructional Steel Research, Bd. 167, doi: 10.1016/j.jcsr.2020.105955.
- Paris, P.; Erdogan, F. (1963): „A Critical Analysis of Crack Propagation Laws“, Journal of Basic Engineering, Bd. 85, Nr. 4, S. 528–533, doi: 10.1115/1.3656900.
- Riedel, T.; Hähnel, U.; Flederer, H.; Hübner, P.; Sieber, L. (2023): „Fracture-mechanical crack growth parameters of historical mild steels“, Engineering Fracture Mechanics, Bd. 290, S. 109517, doi: 10.1016/j.engfracmech.2023.109517.
- Riedel, T. (2024): „Beitrag zur Beurteilung der Ermüdungssicherheit genieteteter Eisenbahnbrücken aus Flussstahl auf der Grundlage bruchmechanischer Untersuchungen“, Dissertation, Technische Universität München, Verfügbar unter: <https://mediatum.ub.tum.de/1725220>
- Taras, A.; Greiner, R. (2007): Statische Festigkeit und Ermüdungsfestigkeit genieteteter Bauteile - Auswertung der Versuchsdaten und Bemessungsvorschläge. Forschungsbericht F-5-15-2007 der TU Graz.
- Valtinat, G. (1994): „Restnutzungsdauer bestehender, genieteteter Stahlbrücken“.
- Zhou, Y. (1994): „Fatigue strength evaluation of riveted bridge members“, Lehigh University.

## **Smarte Instandhaltung des Massivbaus und Stahlwasserbaus im WSA Donau MDK**

Anita Ella-Mvogo, Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Donau MDK, Nürnberg

Manfred Espert, Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Donau MDK, Nürnberg

### **Einleitung**

Smarte Instandhaltung wasserbaulicher Anlagen mit dem Ziel der frühzeitigen Beseitigung vorgefundener Schäden findet im WSA Donau MDK momentan maßgeblich in den Bereichen Massivbau und Stahlwasserbau statt: Nachfolgend werden die für den Massivbau geschlossenen Verträge sowie das im Stahlwasserbau angewandte „Smart-Repair“-Verfahren näher ausgeführt.

### **Instandhaltung des Massivbaus mit Hilfe mehrjähriger Verträge**

Das WSA Donau MDK hat aktuell bereits zum zweiten Mal einen mehrjährigen Instandsetzungsvertrag für die Beseitigung von Schäden am Massivbau seiner Schleusen- und Wehranlagen sowie weiteren Stahlbetonbauten abgeschlossen.

### **Instandhaltung mit Hilfe von Dritten**

Im Bereich des Main-Donau-Kanals (MDK) werden einmal jährlich die Schleusen für einen Zeitraum von zwei bis drei Wochen außer Betrieb genommen um die Bauwerksprüfung, Wartungsarbeiten und Instandsetzungen an den Bauwerken durchzuführen.

Im Zuge der Bauwerksprüfung nach VV-WSV 2101 stellt das WSA Donau MDK im Bereich des Massivbaus eine altersbedingte Zunahme von Schäden fest, die möglichst bereits im Anfangsstadium behoben werden sollten. Neben den Arbeiten zur Anlagentrockenlegung kann dies aber durch die geringen Personalressourcen in den Außenbezirken kaum mehr in Eigenregie erledigt werden. Das WSA Donau MDK ist daher genötigt, für diese Instandsetzungen auf Leistungen Dritter zurückgreifen.

Hinsichtlich der Vertragsgestaltung stellt sich für das WSA Donau MDK damit die Frage, welche Möglichkeiten zur Verfügung stehen, Dritte für das Unterhaltungsamt tätig werden zu lassen.

Das Vergaberecht und die Verwaltungsvorschriften der WSV halten hierzu verschiedene Möglichkeiten bereit, wie zum Beispiel das Bestellscheinverfahren, „große“ VOB-Verträge in Zusammenhang mit Grundinstandsetzungen oder mehrjährige VOB-Verträge. Jede dieser Möglichkeiten hat ihre jeweiligen Vor- und Nachteile.

Das WSA Donau MDK hat sich nach reiflicher Überlegung für mehrjährige VOB-Verträge entschieden, um den Bauwerkszustand der Ingenieurbauwerke möglichst gut zu erhalten.

Mit Hilfe solcher Vertragskonstruktionen sollen folgende Leistungen abrufbar sein:

- Betoninstandsetzung (ohne Eingriff ins statische System)
- Rissinstandsetzung
- Rollstränge austauschen / erneuern

## Der Weg zum Vertrag

Im Vorfeld der Vertragsausgestaltung, die im WSA Donau MDK durch den Fachbereich W vorgenommen wird, sind umfangreiche Vorarbeiten und Abstimmungen mit den Außenbezirken erforderlich, damit die auf Grundlage der mehrjährigen Bauverträge zu erbringenden Leistungen vollständig und erschöpfend beschrieben werden können. Hierzu zählen die Aufstellung der Technischen Entwurfsunterlagen sowie die Erstellung der Verdingungsunterlagen. Die Vergabe der nach Außenbezirken abgegrenzten Lose erfolgt dann unter Beteiligung und mit Unterstützung der hauseigenen Vergabestelle. Die Abwicklung der Vertragslose und die Abstimmung zwischen den beauftragten Unternehmen und dem jeweiligen Außenbezirk übernimmt anschließend der zuständige Außenbezirksleiter.

Um den unterschiedlichen örtlichen Gegebenheiten (Zugänglichkeit, betriebliche Einschränkungen etc.) gebührend Rechnung zu tragen, wurden neben den verschiedenen klassischen Leistungspositionen auch angepasste Zulagepositionen verwendet.

Die Vergabe erfolgte unter der Prämisse, dass ein Bieter für maximal zwei Lose beauftragt werden kann. Diese Maßnahme ermöglicht auch kleineren und regional verwurzelten Unternehmen die Teilnahme am Wettbewerb. Bei der Vergabe von Prüfleistungen für Brücken hat sich dieses Verfahren im WSA Donau MDK bereits gut bewährt.

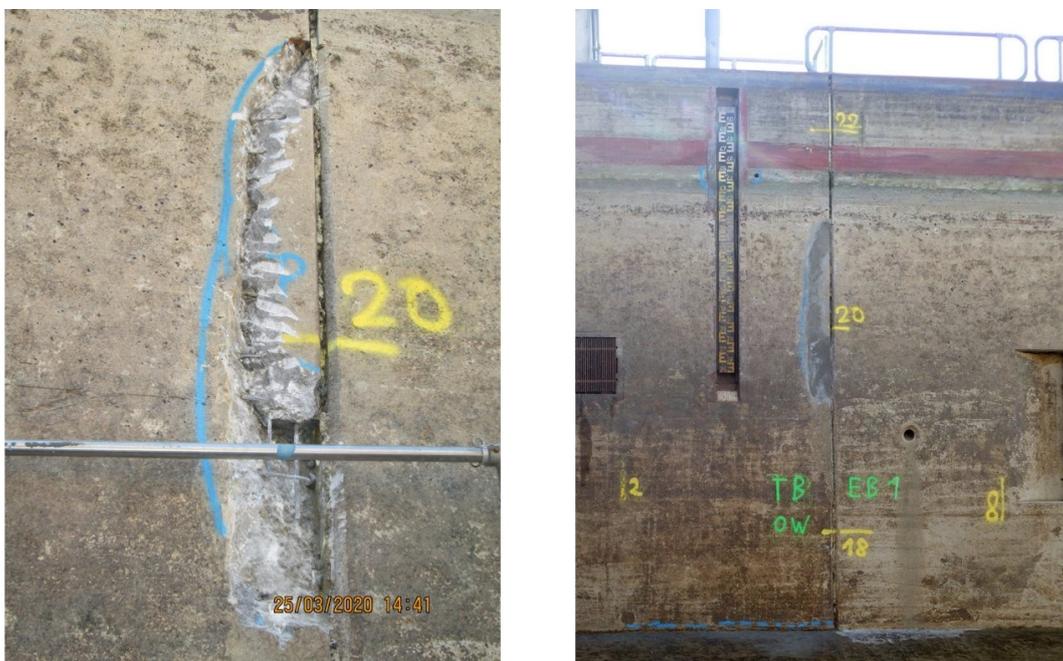


Abbildung 1: Kantenabplatzungen an einer Bauwerksfuge im Ein- / Ausfahrbereich

Für die Teilnahme am Wettbewerb müssen interessierte Unternehmen eine Reihe von Eignungskriterien bei der Angebotsabgabe beibringen. Im Rahmen der Angebotsprüfung wird weiterhin kontrolliert, ob die Bieter über die notwendige Personalstärke für die Zeiten der maximalen Leistungsabforderung während der jährlichen Schifffahrtssperren verfügen und ob die eingesetzten Mitarbeiter die erforderlichen Qualifikationen (SIVV-Schein etc.) besitzen, um für den Auftrag

überhaupt in Frage zu kommen. Dadurch wird gewährleistet, dass nur geeignete Bieter einen Auftrag bekommen.

### **Der Weg zur Ausführung**

Reparaturbedürftige Schäden, die im Zuge der Bauwerksinspektion detektiert werden, wie z. B. Kantenabplatzungen an Bauwerksfugen (s. Abbildung 1) werden an den jeweiligen Außenbezirksleiter gemeldet. Dieser veranlasst dann nach sinnvoller und auftragsgerechter Gruppierung für die Instandsetzung dieser Schäden einen entsprechenden Abruf aus dem Rahmenvertrag.

Auch Schadstellen mit freiliegender Bewehrung (s. Abbildung 2) oder die Erneuerung des Verschlusses bzw. der Abdichtung von Bauwerksfugen (s. Abbildung 3) können durch Abruf der Leistung wieder instandgesetzt werden.



*Abbildung 2: Instandsetzung freiliegender Bewehrung an Maschinenhallendecke*

### **Erfahrungen und Ausblick**

Die aktuell sieben Außenbezirksleiter im WSA Donau MDK haben im Rahmen der vertraglichen Abwicklung sehr unterschiedliche Erfahrungen mit dem laufenden Vertragswerk gemacht. Eine gute Zusammenarbeit mit den Auftragnehmern ist neben einem anwendbaren Bauvertrag auch stark von dem für das jeweilige Los beauftragten Unternehmen abhängig.

Resümierend konnte aber bislang festgestellt werden, dass es sich bei der vertragsgestützten Instandhaltung um ein gutes Tool für die Bauwerkserhaltung des Massivbaus handelt.

Das WSA Donau MDK wird auch künftig die Erhaltungsmaßnahmen mit Hilfe von mehrjährigen und nach Außenbezirken aufgeteilten Bauvertragslosen ausschreiben, um den Schadensfortschritt kleinerer Schäden zu verhindern und damit die Schadensentwicklung insgesamt deutlich einzudämmen. Zukünftig ist aber vorgesehen, sich dem vergaberechtlichen Instrument der Rahmenvereinbarung mit einer mehrjährigen Laufzeit zu bedienen.

Die gemachten guten Erfahrungen mit der längerfristigen vertraglichen Bindung Dritter sind sicherlich auch auf andere Gewerke übertragbar und somit auch z. B. für den Korrosionsschutz von Stahlwasserbauteilen gut anwendbar.



Abbildung 3: Erneuerung bzw. Abdichtung von Bauwerksfugen an Fischaufstiegsanlage

### **„Smart-Repair“ im Stahlwasserbau**

Im Stahlwasserbau erfolgt beim WSA Donau MDK die Instandsetzung kleinerer Schäden ebenfalls im Anfangsstadium mittels verschiedener Formen des sogenannten „Smart-Repair“-Verfahrens. Dies geschieht aufgrund der Zugänglichkeit und des prüfungsbedingt guten Reinigungsgrades der Stahlwasserbauteile vorwiegend im unmittelbaren zeitlichen Zusammenhang mit der Bauwerksprüfung.

### **Instandhaltung des Korrosionsschutzes von Verschlüssen**

Die Bauwerksprüfungen gemäß VV-WSV 2101 für den Stahlwasserbau umfassen in erster Linie die Betriebsverschlüsse der Anlagen. Für die Durchführung der Bauwerksinspektion müssen die Bauteile vorlaufend gründlich gereinigt werden. Somit besteht zum Prüfungszeitpunkt auch die Möglichkeit, Instandsetzungsarbeiten am Korrosionsschutz durchzuführen.

Grundsätzlich unterscheidet das WSA Donau MDK bei der Instandhaltung der Betriebsverschlüsse in große und kleine Bauteile.

Große Bauteile sind hierbei Schleusentore und Wehrverschlüsse, also Konstruktionen, die nur mit einem erheblichen Aufwand ausgetauscht werden können.

An diesen werden kleinere und mittlere Korrosionsschutz -Schäden in der Regel im eingebauten Zustand instandgesetzt. Große bzw. flächige Schäden werden im Rahmen der turnusmäßig eingepplanten Grundinstandsetzungen behoben. Der Korrosionsschutz wird hierbei komplett erneuert.

Zu den keinen Bauteilen zählen die gruppenweise standardisierten Längskanal- und Sparbalkenverschlüsse, die auch außerhalb einer Schleusensperre und somit ohne nennenswerte Einschränkung der Schifffahrt ausgewechselt und durch Reserveverschlüsse ersetzt werden können. Bei diesen Bauteilen beschränkt sich die Beseitigung von Korrosionsschäden im eingebauten Zustand im Wesentlichen auf Minimalschäden, wohingegen für größere Maßnahmen die Bauteile ausgebaut werden. Dies bietet die Möglichkeit, die Verschlüsse unter Werkstattbedingung im eigenen Bauhof oder bei externen Fachfirmen teilweise oder ganz neu zu beschichten.

### Handlungserfordernis

Für den langfristigen Zustands- und Funktionserhalt ist es bei den großen wie den kleinen Bauteilen unerlässlich, Schäden bereits im Anfangsstadium zu behandeln, um den korrosionsbedingten Schadensfortschritt zu verlangsamen bzw. möglichst komplett zu verhindern.



Abbildung 4: Entwicklung eines unbehandelten Korrosionsschadens innerhalb eines Prüfmittels

Da Stahlwasserbauteile in der Regel in durchaus korrosionsfördernden Umgebungsbedingungen installiert sind, zeigt vorstehendes Beispiel eines Aussteifungswinkels auf der Unterwasserseite eines Wehrverschlusses, was die Folge sein kann, wenn Korrosionsschäden, die im Zuge der Bauwerksinspektion erkannt wurden, nicht zeitnah behandelt werden (s. Abbildung 4).

### „Smart-Repair“ - Grundsätze

Zielstellung der als „Smart-Repair“ bezeichneten Maßnahmen zur Behandlung vorgefundener Korrosionsschutz- bzw. Korrosionsschäden ist die kurzfristige Wiederherstellung des Korrosionsschutzes, um ein Fortschreiten der Korrosion bis zur Durchführung einer fachgerechten und dauerhaften Instandsetzung bzw. zur Überbrückung der Restlebensdauer zu verhindern oder zumindest zu verlangsamen.

Die Anforderungen sind ausgerichtet auf eine einfache und schnelle Anwendung und damit deutlich niedriger, als dies bei einer klassischen Korrosionsschutz-Instandsetzung nötig wäre. Hierzu zählen in erster Linie die Vorarbeiten für die Untergrundvorbereitung, insbesondere, wenn die vorhandene Altbeschichtung schadstoffbelastet sein sollte. Hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der Instandsetzung muss objektspezifisch eine temporär begrenzte Wirksamkeit ausreichend sein. Letztlich sollte aber die fertig gestellte Reparaturstelle gut erkennbar sein, damit man bei einer

späteren „klassischen“ Instandsetzung die reparierten Bereiche schnell wieder auffinden kann. Letzteres entfällt bei einer geplanten kompletten Erneuerung des Korrosionsschutzes.

### **„Smart-Repair“ –Arbeitsablauf und Vorbereitung**

Eine gute Untergrundvorbereitung ist essentiell für den Erfolg von Instandsetzungsmaßnahmen am Korrosionsschutz. Zur Vorbereitung ist eine gründliche Reinigung der Bereiche unabdingbar. Werden die Maßnahmen im Nachgang zur Bauwerksinspektion durchgeführt, dürfte regelmäßig bereits ein relativ guter Reinigungsgrad vorliegen.

Um einen guten Verbund der Reparaturbeschichtung mit dem Untergrund zu erreichen, müssen zusätzlich alle losen Beschichtungsteile und Korrosionsprodukte mittels Drahtbürste oder Abziehklinge entfernt werden (s. Abbildung 5). Bei „Smart-Repair“-Maßnahmen ist hierfür in der Regel ein Reinheitsgrad ST 2 gemäß DIN 55928 ausreichend.



*Abbildung 5: Abgeschlossene Untergrundvorbereitung nach Handentrostung*

Die Durchführung der Arbeiten im Vollschutz (Schutzanzug, Schutzbrille, Atemschutzmaske FFP 3, Schutzhandschuhe) ist hierbei obligatorisch. Bei schadstoffbelasteten Altbeschichtungen müssen abhängig von der Art der Belastung weitere Vorgaben des Arbeitsschutzes beachtet werden. Bei Belastung der Altbeschichtung durch PAK / Asbest sind bei der Untergrundvorbereitung auch unbedingt die Einhaltung zugelassener Verfahren bzw. der Einsatz zugelassener Geräte (Staubsauger mit TRGS-Zulassung) zu beachten.

Anschließend müssen die Instandsetzungsbereiche gründlich entfettet und getrocknet werden. Abhängig von der Art der Altbeschichtung und dem verwendeten Instandsetzungsmaterial kann es zusätzlich zur Erzielung eines guten Verbundes erforderlich werden, die Altbeschichtung oberflächlich anzulösen.

Die Entfettung und Trocknung kann mittels Spiritus erfolgen, der nach flächigem Auftrag und kurzer Einwirkzeit mit geeigneten Tüchern abgerieben wird. Durch den flächigen Auftrag wird auch Feuchtigkeit, die sich ggf. noch auf / in den Poren der Oberfläche befindet, ausgetrieben.

Alternativ zur Verwendung von Spiritus kann dies auch mit ein zum vorgesehenen Beschichtungssystem verträglicher Verdünner genutzt werden, was insbesondere bei beabsichtigter Anlösung der Altbeschichtung vorzuziehen oder als gesonderter Arbeitsgang durchzuführen ist.

Da sowohl Spiritus als auch Verdünner hoch entzündlich sind, ist während der Durchführung dieser Arbeiten im gesamten Arbeitsbereich dafür Sorge zu tragen, dass keine Zündquellen vorhanden sind und weiterhin eine gute Durchlüftung der Arbeitsbereiche zum Schutz der Beschäftigten gewährleistet wird.

### „Smart-Repair“ – Applikation des Beschichtungssystems

Unverzüglich nach Abschluss der Untergrundvorbereitung wird auf die Metalloberfläche eine Grundbeschichtung aufgetragen. Die Applikation erfolgt mit dem Pinsel durch einbürsten, kann aber auch mittels Airless-Spritzverfahren vorgenommen werden. Um ein vollständiges Umschließen der porigen Stahloberfläche oder dort ggf. noch vorhandener, festhaftender Korrosionsprodukte zu gewährleisten, ist es zweckmäßig, die Viskosität durch Zugabe der für das Beschichtungssystem maximal verträglichen Verdünnermenge einzustellen.

Nach dem Auftrag der Grundbeschichtung ist vor weiteren Schritten auf eine ausreichende Ausgaszeit zu achten. Diese hängt insbesondere von der Temperatur sowie von der Menge des zugegebenen Verdünners ab. Aufgrund der üblicherweise niedrigeren Temperaturen von Stahlwasserbauteilen sollten 24 Stunden möglichst nicht unterschritten werden.

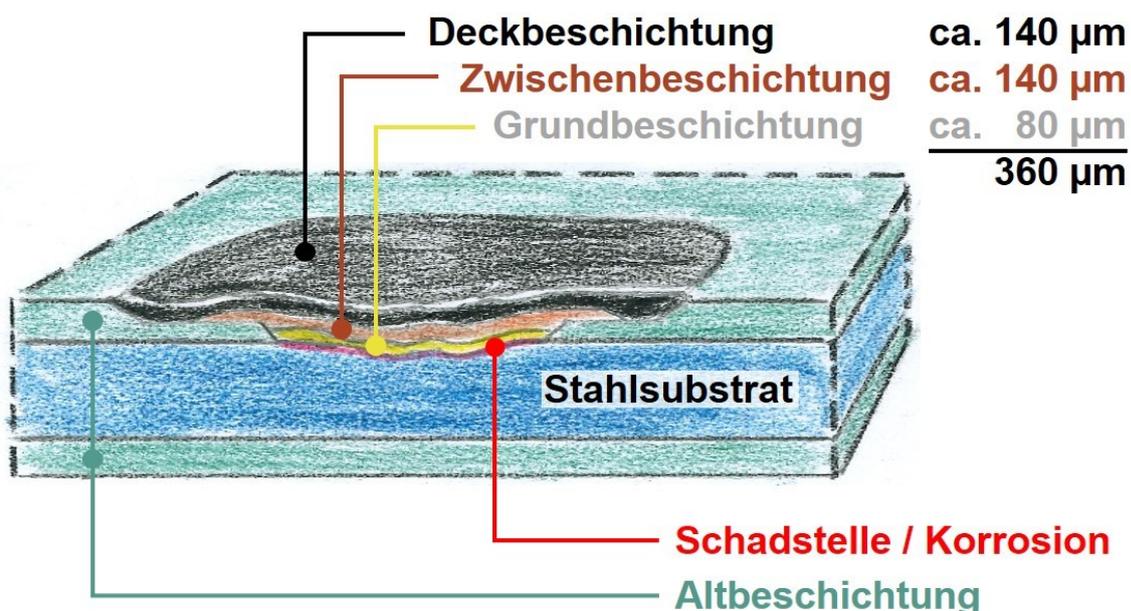


Abbildung 6: Schematische Schnittdarstellung einer „Smart-Repair“-Instandsetzungsstelle

Anschließend erfolgt der Auftrag einer Zwischen- und einer Deckbeschichtung in gleicher Weise. Auch hier ist eine niedrigere Viskosität von Vorteil, um einen vollflächigen Auftrag sicher zu

stellen. Die Applikation sollte ebenfalls mit dem Pinsel erfolgen, der Einsatz von Airless-Spritzen oder ausnahmsweise auch einer Rolle ist aber auch hier möglich. Die Einhaltung ausreichender Ausgaszeiten ist analog der Vorgaben für die Grundbeschichtung zu beachten.

In der Praxis hat sich der vorstehend beschriebene und dargestellte Beschichtungsaufbau als wirksam und zweckmäßig erwiesen (s. Abbildung 6).

### **Dauerhaftigkeit von „Smart-Repair“-Maßnahmen**

Das WSA Donau MDK wendet das „Smart-Repair“-Verfahren seit langem im Rahmen der Bauwerksinspektion von Stahlwasserbauteilen am MDK an. Mitte der 2010er Jahre wurden auch einige größere Maßnahmen durchgeführt, deren langfristige Ergebnisse dann im Rahmen nachfolgender Bauwerksprüfungen hinsichtlich Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit dokumentiert nachvollzogen werden konnten.

Nachfolgend sei als Beispiel die Ertüchtigung des Korrosionsschutzes an den Untertoren der Schleusen Erlangen und Kriegenbrunn kurz dargestellt. Diese erfolgte mit der Zielstellung, die Restlebensdauer dieser beiden Untertore bis zum Neubau zu überbrücken. Dabei bleibt anzumerken, dass der Umfang der dort vorgenommenen Maßnahmen flächenmäßig sicherlich die Obergrenze des Verfahrens darstellt.

Der Korrosionsschutz war in den instand gesetzten Bereichen auch 7 Jahre nach der Durchführung noch vollständig intakt (s. Abbildung 7). Das Ziel, der Restlebensdauerüberbrückung bis zum Ersatz der Untertore im Jahr 2024 wurde somit sicher erreicht.



Abbildung 7: „Smart-Repair“-Maßnahme Untertor – Zustand bei Ausführung und nach 7 Jahren

### **„Smart-Repair“ - Bewertung und Beurteilung**

Das im WSA Donau MDK praktizierte „Smart-Repair“ im Stahlwasserbau nutzt Synergieeffekte, die sich aus der für die Bauwerksinspektion notwendigen gründlichen Reinigung der Bauteile

ergeben. Hierdurch kann der Fortschritt korrosionsbedingter Schäden an den Stahlbauteilen zeitlich begrenzt verhindert oder zumindest vermindert werden. Auch für die Verlängerung der Restnutzungsdauer liefert das Verfahren einen wertvollen Beitrag. Hinsichtlich werkzeugtechnischer Ausstattung und Baustelleneinrichtung sind die Anforderungen vergleichsweise gering. Dies alles macht „Smart-Repair“ zu einem kostengünstigen Instandsetzungsverfahren.

Zu beachten ist jedoch der eingeschränkte Anwendungsbereich sowohl hinsichtlich des Umfangs zu bearbeitender Schäden als auch des temporär limitierten Instandsetzungsziels, das nicht der Standzeit einer klassischen Grundinstandsetzung des Korrosionsschutzes entspricht. Darüber hinaus werden auch bei diesem Verfahren zusätzliche Maßnahmen notwendig, wenn an schadstoffbelasteten Altbeschichtungen gearbeitet wird. Die Anforderungen an die handwerkliche Ausführungsqualität und das Personal ist hingegen vergleichsweise hoch.

In der Gesamtbeurteilung kann aber festgestellt werden, dass „Smart-Repair“ im Stahlwasserbau ein wichtiges und einfach anzuwendendes Instandhaltungs-Instrument zur Verlängerung der Lebensdauer von Bauteilen darstellt und damit dem Erhalt der verkehrlichen Infrastruktur zweckdienlich ist.

## Wartung von massiven Verkehrswasserbauwerken

Nancy Freitag, Bundesanstalt für Wasserbau

### Einleitung

Wartung wird in zahlreichen technischen Bereichen bereits seit Jahrzehnten praktiziert und gehört insbesondere im Anlagen- und Gebäudesektor zum etablierten Umfang einer regelmäßigen Instandhaltung. Unter Wartung werden in der Regel alle Maßnahmen verstanden, die der Kontrolle des ordnungsgemäßen Zustandes und dem Funktionserhalt einer Anlage dienen. Im Bereich des Verkehrswasserbaus wird Wartung in erster Linie im Stahlwasserbau als „Smart Repair“ (Reparatur kleiner Schadstellen am Korrosionsschutz) durchgeführt und hilft dort, durch längere Nutzungsdauern von Beschichtungen die Verfügbarkeit der Bauteile zu steigern und langfristig Kosten zu sparen.

Demgegenüber werden an Massivbauteilen im Verkehrswasserbau vorwiegend umfangreiche Instandsetzungen durchgeführt, während regelmäßige Wartungsmaßnahmen seltener stattfinden. Auch kleine, in regelmäßigen Abständen durchgeführte Maßnahmen können jedoch einen wertvollen Beitrag zur Erhaltung und zum sicheren Betrieb der massiven Verkehrswasserbauwerke leisten und die Notwendigkeit größerer Eingriffe verzögern. Zur Akzeptanz von Wartungsmaßnahmen kann sowohl die Vereinheitlichung von Abläufen als auch ein stärkeres Bewusstsein für den positiven Effekt von Wartungsmaßnahmen beitragen.

### Allgemeine Wartungsbegriffe

Gemäß DIN 31051:2019-06 umfasst Wartung „alle Maßnahmen zur Verzögerung des Abbaus des vorhandenen Abnutzungsvorrates“ und bildet zusammen mit der Inspektion, der Instandsetzung und der Verbesserung den Bereich der Instandhaltung (siehe Abbildung 1).

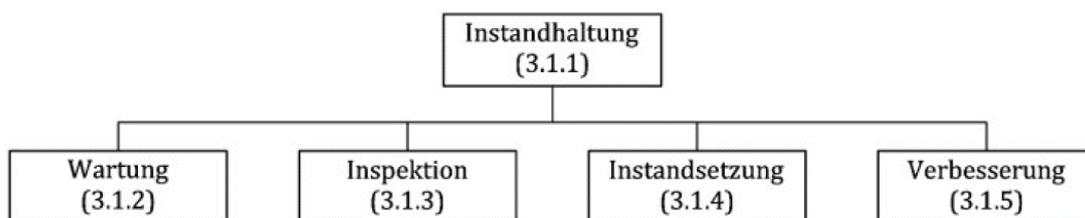


Abbildung 1: Unterteilung der Instandhaltung gemäß DIN 31051:2019-06

Als Abnutzungsvorrat wird gemäß DIN 31051 der „Vorrat an möglichen Funktionserfüllungen, der einem Objekt unter bestimmten Randbedingungen innewohnt“, definiert. Dieser Abnutzungsvorrat nimmt im Laufe der Nutzungszeit mit unterschiedlichen Funktionsverläufen ab, bis er einen Grenzwert erreicht, der ein Eingreifen durch Instandsetzung, Verbesserung oder Ersatz erfordert.

## Wartung bei massiven Verkehrswasserbauwerken

Wartungsmaßnahmen an massiven Verkehrswasserbauwerken sollen die geplante Nutzungsdauer, d.h. den Zeitraum bis zum Erreichen der geplanten Abnutzungsgrenze, sicherstellen und gegebenenfalls verzögern, d.h. die Nutzungsdauer verlängern. Im Gegensatz zu Instandsetzungsmaßnahmen handelt es sich im Rahmen von Wartung jedoch um kleinteiligere Maßnahmen, die je nach vorliegendem Bauteilzustand als präventive oder korrektive Maßnahmen geplant und ohne Eingriff in den Betriebsablauf, beispielsweise in Trockenlegungszeiten während regulärer Bauwerksinspektionen, durchgeführt werden können.

In der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) werden Wartungsmaßnahmen bislang sehr heterogen praktiziert, so dass sich die Frage nach einer Vereinheitlichung stellt. Dazu wurde zunächst eine stichprobenartige Auswertung von Ergebnissen zurückliegender Bauwerksinspektionen durchgeführt, um daraus Hinweise für die Planung und Durchführung geeigneter Wartungsmaßnahmen ableiten zu können (BAW 2024).

### Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksinspektionen

Aus einer Stichprobe eines Teilnetzes der Wasserstraßen mit den entsprechenden Bauwerken und ca. 8000 erfassten Schäden der *Teilnotenkategorie Massivbau* entfallen ca. 3 % auf Fugenbereiche, alle anderen liegen im Bereich der *Objektteilkategorie Konstruktion*. Von diesen Schäden können 79 % auf der *Materialgruppe Beton* zugeordnet werden und werden dann noch weiter in einzelne Schadensgruppen unterteilt. 4 % der Schäden gehören zur *Materialgruppe Mauerwerk*, was auf die deutlich geringere Bauwerksanzahl zurückzuführen ist. Die meisten Schäden sind den Schadensgruppen Risse und Beton zugeordnet. Innerhalb der Schadensgruppe Beton sind ca. 28% der Schäden mit dem Schadensbegriff Abplatzung und weitere 26% als Ausbruch oder Kantenabbruch charakterisiert (siehe Abbildung 2a für Beton- bzw. 2b für Mauerwerksschäden).

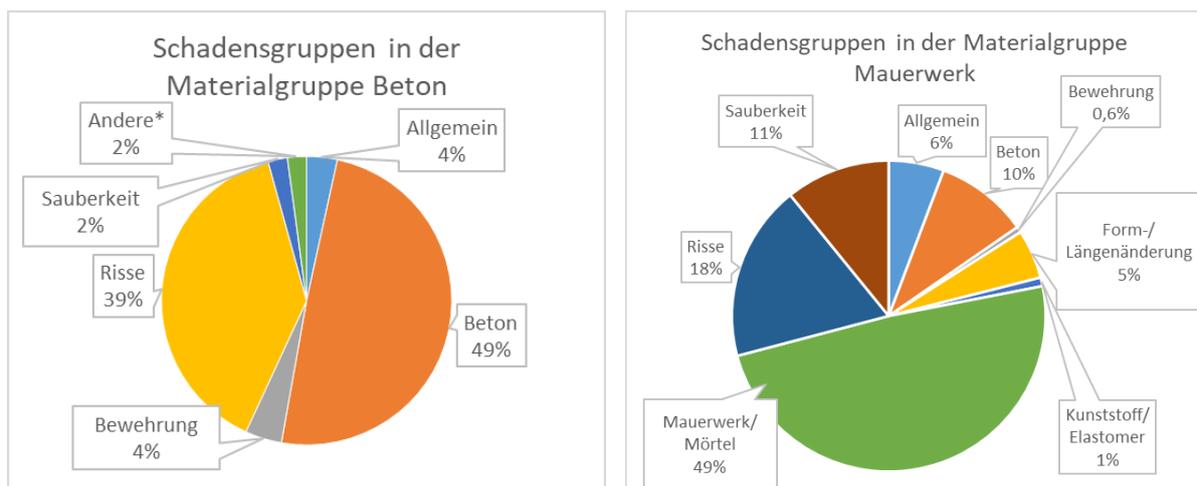


Abbildung 2 a und b: Verteilung der Schäden auf Schadensgruppen in der Materialgruppe Beton (links) bzw. Mauerwerk (rechts) (BAW 2024)

Die vorgenannten Schadensbegriffe deuten (zusammen mit der Mengen- bzw. Umfangsangabe der Schäden) auf flächig begrenzte Schäden hin, die durch kleinteilige Wartungsmaßnahmen

ausgebessert werden könnten. Hier ist allerdings zu beachten, dass die Schadensursache und die Zugänglichkeit zum Schadensort in WSVPruf nicht hinterlegt sind.

Einen weiteren Anhaltspunkt zur Beurteilung, inwieweit Schäden wartungsgeeignet sind, liefert die Schadensklasse, d.h. die Schwere der Schäden. Es lässt sich feststellen, dass ca. 80 % der Schäden auf die unteren Schadensklassen SK 1 und SK2 mit einer geringen Schwere entfallen. Auch für Mauerwerkskonstruktionen lässt sich eine vergleichbare Verteilung der Schäden auf die Schadensklassen feststellen.

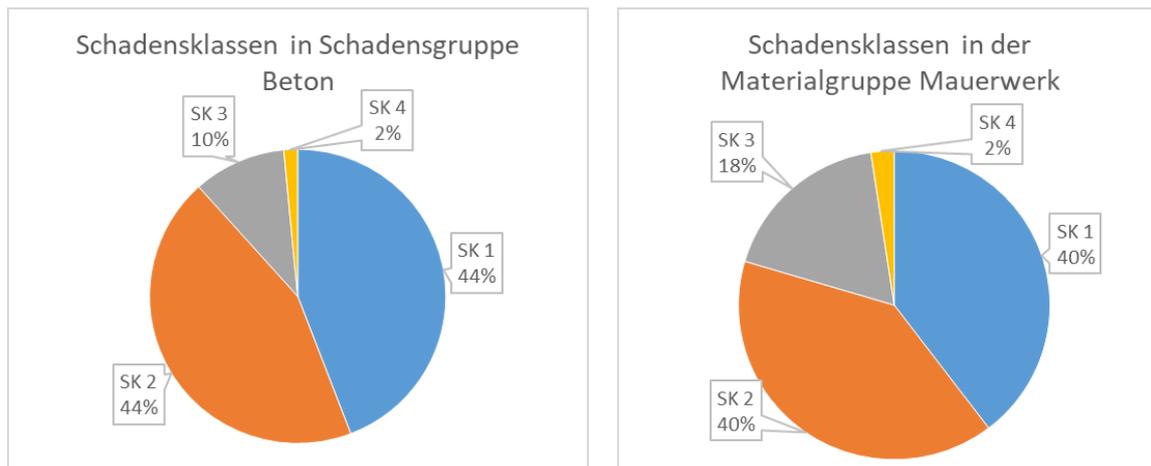


Abbildung 3 a und b: Verteilung der Schäden innerhalb der Schadensgruppe Beton (links) und Mauerwerk (rechts) auf Schadensklassen (BAW 2024)

Ein Großteil der Schäden stellt somit keine bzw. nur eine geringe Beeinträchtigung von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit dar, sodass hier von einem geringeren, gegebenenfalls wartungsgeeigneten Schadensausmaß ausgegangen werden kann.

Insgesamt lässt sich aus der Betrachtung der Ergebnisse der Bauwerksprüfung feststellen, dass ein großer Teil der Schäden als wartungsgeeignet einzustufen ist und mit einem moderaten Aufwand (Planung, Beauftragung und Durchführung, Kosten) beseitigt werden kann.

### Wartungsplanung und Wartungsmaßnahmen

Perspektivisch erscheint es zielführend, alle wartungsrelevanten Informationen für Massivbauteile von Wasserbauwerken bauwerksspezifisch bereitzustellen. Diese Informationen sollten in einem der Wartung entsprechendem Umfang übersichtlich und schnell abrufbar sein und wesentliche Informationen, wie z.B. Bauart und Hauptbaustoffe, planmäßige Expositionsklassen, bereits durchgeführte präventive Schutz- und Wartungsmaßnahmen oder Hinweise auf zu beobachtende Schadensmechanismen enthalten. In Verbindung mit den Ergebnissen der Bauwerksinspektion wären damit die nötigen Informationen vorhanden, um planmäßige Wartung am Massivbau sowie darüber hinaus gegebenenfalls Instandsetzungsmaßnahmen zielgerichtet, standardisiert und mit geringem Aufwand zu planen, durchzuführen und zu verfolgen.

Massivbauteile mit planmäßig hohen Wassersättigungsgraden des Betons, wie zum Beispiel Schleusenammerwände oder Wehrpfeiler im Wasserwechselbereich, unterliegen vor allem

bezugnehmend auf den Frostangriff einer besonders intensiven dauerhaftigkeitsrelevanten Beanspruchung. In diesen Bauwerksbereichen beschränkt sich die Wartung auf das Ausbessern lokaler Fehlstellen und das Entfernen von Bewuchs. Durch das anstehende Wasser kann der betonkorrosionsentscheidende Wassersättigungsgrad hier nicht beeinflusst werden.

Anders verhält es sich mit Bauwerks- und Bauteilbereichen, die während der Nutzungsphase nicht planmäßig mit Wasser beaufschlagt sind, also Bauteilen oberhalb des Oberwasserstands. Für diese Bereiche sollten hohe Wassersättigungsgrade unbedingt vermieden werden. Dies ist einerseits durch entsprechende Planung und Ausführung bei der Errichtung der Bauwerke, insbesondere durch sinnvolle Wasserführung und Ableitung von Regenwasser sicherzustellen. Andererseits besteht die Möglichkeit, während der Nutzungsphase regelmäßige Wartungsmaßnahmen zu ergreifen. Dazu gehören das regelmäßige Entfernen von Bewuchs und Verschmutzungen, um ein schnelles Abtrocknen der Bauteile nach Regenfällen zu gewährleisten, sowie die Sicherstellung der Funktionsfähigkeit von Entwässerungen.

Neben regelmäßig durchzuführenden präventiven Wartungsarbeiten können korrektive Wartungsarbeiten gegebenenfalls direkt im Zuge der Bauwerksinspektion vorbereitet und durchgeführt oder für einen späteren Zeitpunkt während des normalen Bauwerksbetriebs eingeplant werden. Darüber hinaus können bei der jährlichen Bauwerksbesichtigung und während der normalen Nutzung des Bauwerks Wartungsbedarfe festgestellt und zeitnah behoben werden. Durch die Unterscheidung zwischen planmäßigen, regelmäßig durchzuführenden präventiven Wartungen und kurzfristig eingeplanter korrektiver Wartung liegt es nahe, einen Wartungsplan entsprechend dieser Unterscheidung aufzustellen. Dafür wurde eine exemplarische Wartungscheckliste erarbeitet.

Als Wartungsmaßnahmen an Massivbauteilen aus Beton bzw. Mauerwerk kommen folgende Möglichkeiten in Frage:

- Reinigung (insbesondere Stellen, an denen sich aufgrund Moos- und Algenbewuchs Feuchtigkeit sammeln, wodurch Schädigungsprozesse beschleunigt werden könnten)
- ggf. Hydrophobierung exponierter Flächen zur Regulierung des Feuchtegehaltes des Betons oder zum Schutz vor Eindringen von Stoffen
- Betonersatz im Handauftrag
- Rissverfüllung
- Reprofilierung von lokal begrenzten Ausbrüchen
- Handwerklicher Steintausch und Fugenfüllung / Verfugung bei Mauerwerksteilen

Denkbar ist die Durchführung der Wartungsmaßnahmen durch speziell geschulte Mitarbeiter der Außenbezirke und Bauhöfe oder beispielsweise auch durch Rahmenverträge mit geeigneten Fachfirmen.

### **Fazit: Warten statt Warten!**

Regelmäßige Wartung sollte als Teil der kontinuierlichen Erhaltung der Infrastruktur der WSV verstärkt etabliert werden. Auch kleine regelmäßige Maßnahmen können einen wertvollen Beitrag zur Erhaltung und zum sicheren Betrieb der massiven Verkehrswasserbauwerke leisten und

die Notwendigkeit größerer Instandhaltungsmaßnahmen verzögern. Dazu kann sowohl die Stärkung des Verantwortungsbewusstseins für diese Infrastruktur als auch die Vereinheitlichung von Wartungsabläufen beitragen. Nicht zuletzt ist in diesem Zusammenhang ein Bewusstsein für die Bedeutung der Nutzungsphase von Bauwerken zur Instandhaltung der Verkehrsinfrastruktur sowie der Wartung als Teil der Instandhaltungsstrategie zu schaffen, damit die Akzeptanz und reale Durchführung dieser Maßnahmen zur gängigen Praxis werden kann.

## **Literatur**

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Programmsystem WSVPruf, Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

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

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (2024): Abschlussbericht zum FuE-Vorhaben „Wartung von massiven Verkehrswasserbauwerken, unveröffentlicht. Karlsruhe, Bundesanstalt für Wasserbau.

DIN 31051:2019-06: Grundlagen der Instandhaltung.

International Federation for Structural Concrete fib (2020): fib Bulletin 93. Birth Certificate and Trough-Life Management Documentation. Technical Report Task Group 8.2.



Bundesministerium  
für Digitales  
und Verkehr



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

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

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