

Erhöhung der Dauerhaftigkeit von Wasserbauwerken durch faserbewehrte, zementgebundene Komposite

Dipl.-Ing. Michaela Reichardt, Dipl.-Ing. Steffen Müller, Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine
Institut für Baustoffe der TU Dresden, 01062 Dresden
E-Mail: michaela.reichardt@tu-dresden.de, Telefon: +49 351 463 42850

Zusammenfassung

Sehr viele Infrastrukturbauwerke haben bereits eine hohe Nutzungsdauer hinter sich und müssen instandgesetzt oder neu errichtet werden. Im Zuge der aktuellen Bestrebungen, mit möglichst geringen Materialeinsätzen die notwendige Bauwerkssicherheit zu erzeugen, rücken dünne Instandsetzungsschichten immer häufiger in den Fokus der Planenden. Aufgrund fehlender Beispielbauten und Umsetzungsrichtlinien werden solche Lösungen jedoch oft nicht ausgeführt. Im hier vorgestellten Beispiel wird anhand einer über 100 Jahre alten Schleuse die Möglichkeit einer Sanierung mit dünnen Schichten aus hochduktilen Beton (engl.: *strain-hardening cement-based composites*, SHCC) und Textilbeton (engl.: *textile reinforced concrete*, TRC) vorgestellt sowie Ergebnisse aus dem nunmehr dreijährigen Bauwerksmonitoring dargelegt.

1 Dünne Instandsetzungsschichten – Anforderungen und Vorteile

Die Verkehrsinfrastruktur ist in vielen Ländern zunehmend in die Jahre gekommen. Sowohl Platzmangel als auch enge Zeitfenster für den Bau schränken die Möglichkeiten für Ersatz oder Neubau erheblich ein. Darüber hinaus macht die Notwendigkeit, die Ressourcen so effizient wie möglich zu nutzen, Instandhaltung zu einer überaus nachhaltigen Maßnahme. Insbesondere bei flächigen Instandsetzungen sind Lösungen mit geringen Anforderungen an den vorhandenen Untergrund, möglichst kleinen Schichtdicken, hohen rissbreitenregulierenden Eigenschaften des Instandsetzungsmaterials und dessen schnelle Verarbeitung gefragt. Diese Anforderungen können durch dünne, dehnungshärtende Materialschichten erfüllt werden, wie in verschiedenen Studien gezeigt wurde [1]–[3]. Der Einsatz solcher Schichten scheitert aber oft an den bestehenden Regelwerken und Normen, weshalb praktische Demonstratoren dringend erforderlich sind. Im Folgenden wird ein wasserbaulicher Demonstrator, eine Schifffahrtsschleuse, und seine Instandsetzung mit dem Ziel der Wiederherstellung der Dichtheit des Bauwerks vorgestellt. Als Instandsetzungswerkstoffe werden hochduktiler Kurzfaserbeton (SHCC) und Textilbeton (TRC) näher untersucht.

2 Das Bauwerk

2.1 Grundsätzliche Einordnung

Das instand zu setzende Bauwerk, die Schleuse Schustergraben, befindet sich im Nordosten Deutschlands im Nationalpark Unteres Odertal im Polder 10 bei Schwedt/Oder. Die 1926 erbaute Schleuse verbindet die Oder (Strom-km: 702,58) mit dem Gatower Graben. Sie diente früher dazu, die Wasserflächen des Polders 10 trotz unterschiedlicher Wasserstände zwischen Polder und Oder für die Fischerei schiffbar zu machen. Heute dient das Bauwerk dem Ausgleich der Wasserstände zwischen Oder und Naturschutzgebiet. Die Schleuse ist 26,93 m lang, 5,25 m tief und 6,5 bis 7 m breit. Sie ist in Ost-West-Richtung ausgerichtet. Die Nord- und Südwand sind in der Aufteilung der Wandabschnitte und der Verwendung von Einbauteilen spiegelbildlich zueinander. Die Dehnungsfugen befinden sich in einem Abstand von etwa 7,30 m von der Mitte der Wände. Die Konstruktionsunterlagen für die Schleuse sind nicht mehr verfügbar, aber es kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei der Konstruktion um eine Schwergewichtsmauer handelt.

2.2 Baulicher Zustand

Aufgrund ihres Alters und sichtbarer Schäden an der Betonstruktur wurde die Schleuse vom Eigentümer als sanierungsbedürftig eingestuft. Im Sommer 2019 sowie nach der Wasserhaltung im Herbst desselben Jahres wurden Voruntersuchungen durchgeführt, um den Altbeton und den allgemeinen Zustand des Bauwerks zu charakterisieren:

- Rissbreitenüberwachung mit gleichzeitiger Aufzeichnung der Umgebungstemperatur,
- Indirekte Bestimmung der Druckfestigkeit mit Hilfe eines Rückprallhammers,
- Risskartierung und Schadensbeurteilung,
- Bestimmung der Druckfestigkeit an Bohrkernen und der In-situ-Haftzugfestigkeit.

In der Mitte der Hauptwände des Bauwerks wurden vertikale Trennrisse von mehreren Millimetern Breite festgestellt. In den Torkammerbereichen war die Rissbildung noch ausgeprägter und bestand aus horizontalen und vertikalen, jeweils mehrere Millimeter breiten Rissbahnen. Die Rissensoren zeigten eine besondere Aktivität an den vertikalen Fugen der Nordwand (Rissbreitenänderungen von bis zu 0,6 mm) und dem Riss hinter der Leiter auf der Südseite. Außerdem wurde festgestellt, dass die horizontalen Risse kaum Bewegungen unterworfen waren (Rissbreitenänderungen $< 0,1$ mm) und dass die Nordwand, wahrscheinlich aufgrund einer stärkeren Sonneneinstrahlung, deutlich höheren Strukturbewegungen ausgesetzt war. Das Ausmaß der Rissbreitenänderungen diente als Ausgangspunkt für die Bemessung des Instandsetzungssystems.

Die untersuchten Betonproben zeigten sehr große Unterschiede zwischen den Proben von der Luftseite und denen aus der Wasserwechselzone. Die Kennwerte waren nach den geltenden Vorschriften [4], [5] so niedrig, dass normativ ein großflächiger Abtrag des Altbetons und das Aufbringen massiver Instandsetzungsschichten mit Stahlbetonergänzung erforderlich wäre. Die gemessenen Kennwerte für Druckfestigkeit und Haftzugfestigkeit sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1 Druck- und Zugfestigkeiten des Bestandsbauwerks (Standardabweichung in Klammern)

Entnahmebereich	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Zugfestigkeit [N/mm ²]
Bauwerkskrone	25,7 (0,5)	1,21 (0,59)
Wasserwechselzone	15,0 (7,3)	0,67 (0,41) (Minimum: 0,09)

Wie deutlich zu sehen ist, streuen die Werte teilweise sehr stark, und zwar insbesondere im Bereich der Wasserwechselzone. Der Beton wurde durch Wasseraufnahme und Frost-Tauwechsel geschädigt. Weitere Gründe für die hohe Streuung sind zum einen die deutlich sichtbaren Betonageabschnitte mit entsprechend unterschiedlichen Materialeigenschaften. Zum anderen wurde durch den ständigen Wasserkontakt permanent Bindemittel nahe der Oberfläche der Betonmauern ausgewaschen. Abplatzungen und Auswaschungen traten vor allem in der Wasserwechselzone und im Übergangsbereich Wand–Sohle auf. Bild 1 zeigt Schadstellen wie Risse und lokale Auswaschungen sowie anderweitig geschädigte Bereiche.

3 Instandsetzung

3.1 Instandsetzungsabschnitte und Materialien

Aufgrund der teilweise sehr geringen Tragfähigkeit und der unbekanntenen Statik wurde auf einen großflächigen und tiefen Betonabtrag verzichtet und stattdessen eine möglichst dünne Sanierungsschicht verwendet, um die Wasserdichtigkeit des Bauwerks wiederherzustellen. Die alten Betonwände wurden sandgestrahlt, um lose Anhaftungen und Schmutz zu entfernen. Anschließend wurden ausgewaschene Bereiche/Hohlräume vor der eigentlichen Sanierung reprofiliert, um Hohlräumbildungen zu vermeiden.

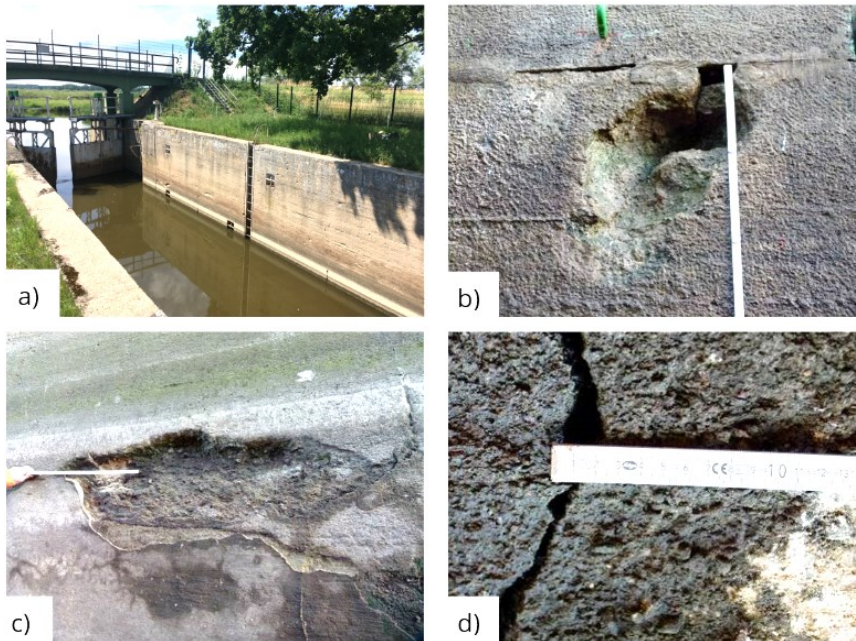


Bild 1 Zustand der Schleuse vor der Instandsetzung: a) Überblick, b) tiefe Erosion/ Auskolkung, c) großflächige Auswaschung, d) Risse mit großer Rissöffnung. Fotos: Michaela Reichardt

Die Größe des bestehenden Bauwerks und die Experimentierfreudigkeit des Betreibers ermöglichten die Verwendung verschiedener Materialkombinationen für die Reparatur. Ausgehend von der undefinierten Hauptrissrichtung wurde in den Torkammern kein textiles Gelege mit gerichteter Bewehrung verwendet, sondern SHCC mit Polyvinylalkohol (PVA)-Kurzfasern eingesetzt, welcher wegen der ungerichteten Faserausrichtung in allen Richtungen auf der applizierten Fläche Zugkräfte aufnehmen und Risse überbrücken kann. Die übrigen Bereiche wurden in vier etwa gleich große Abschnitte (jeweils ca. 7,3 m lang und 5 m hoch) unterteilt, wobei die Südwand mit einer Carbonbewehrung mit weicher, Styrolbutadien-basierter Imprägnierung reprofiliert wurde (Oderseite, Abschnitt A: 3 Lagen; Polderseite, Abschnitt B: 1 Lage). Das Bewehrungstextil entsprach der Tudalit-Zulassungsgeometrie [6] und wurde von der TUDATEX GmbH hergestellt. Die Instandsetzung der Nordwand wurde in Abschnitt C (Oderseite) mit einer 2-lagigen Carbontextilbewehrung mit steifer Duroplast-Polymer-Imprägnierung ausgeführt (solidian CCE Q85/85) [7], während in Abschnitt D (Polderseite) eine mineralisch imprägnierte Variante (engl.: *mineral coated fibre*, MCF) mit vergleichbarem Bewehrungsgehalt in Haupttragrichtung verwendet wurde (vgl. [8]). Nach früheren Untersuchungen beeinflusst die Art der Imprägnierung das Verbundverhalten zwischen Garn und Betonmatrix in hohem Maße und hiermit das Rissverhalten [8], [9].

Das Matrixmaterial für die TRC-Abschnitte war ein feinkörniger Spritzbeton auf Portlandzementbasis, der Mikrohohlkugeln enthielt, um den Elastizitätsmodul zu verringern und die Frost-Tausalz-Beständigkeit der Reparaturschicht zu verbessern. Das detaillierte Mischungsdesign war Teil der Entwicklung durch den Industriepartner und kann daher hier nicht veröffentlicht werden. Nach dem Spritzvorgang konnten folgende mechanische Eigenschaften ermittelt werden: Druckfestigkeit am Bohrkern ($d = 50 \text{ mm}$) von $50,1 \text{ N/mm}^2$ (Standardabweichung $5,4 \text{ N/mm}^2$) und Biegezugfestigkeit (gemessen an Prismen mit $160 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$) von $1,73 \text{ N/mm}^2$ (Standardabweichung $0,2 \text{ N/mm}^2$). Die Dichte des gespritzten Materials betrug $2,13 \text{ kg/dm}^3$. Der untersuchte SHCC wurde bereits in mehreren Projekten [10]–[14] und Studien eingesetzt, unter anderem als Spritzmaterial im Wasserbau [15]. Seine Zusammensetzung ist in Tabelle 2 angegeben.

Tabelle 2 Zusammensetzung des SHCC in kg/m^3

Zement CEM I 42,5 R	Flugasche	Feinsand	Wasser	Fließmittel	Stabilisierer	PVA-Fasern
505	621	536	338	10	4,8	26

Alle TRC-Anwendungen wurden im Trockenspritzverfahren durchgeführt, was Vorteile hinsichtlich der benötigten Materialmenge und des Reinigungsaufwands hat, da Restmaterial über Nacht im Schlauchpaket verbleiben kann. Die Spritzqualität und die Materialeigenschaften hängen jedoch stark vom Düsenführer ab, da er die Dosierung des zuzuführenden Wassers durch Erfahrung einstellt. Im Verfahrensablauf wurde auf ein angefeuchtetes Substrat eine erste Mörtelschicht aufgespritzt, in die das entsprechende Textil leicht angedrückt und dann überspritzt wurde. Dadurch entfielen jegliche Arbeiten zur Befestigung der Bewehrung auf der alten Betonstruktur. Dieses Verfahren wurde am nächsten Tag für die jeweils nächste Schicht wiederholt, bis die endgültige Anzahl von Schichten aufgebracht war.

Für den SHCC war ein Nassspritzverfahren mit vor Ort gemischten 60-l-Chargen und begleitender Qualitätskontrolle (Klumpenbildung, Ausbreitmaß etc.) vorgesehen. Ein Maschinenausfall zwang dazu, das Verfahren auf Handauftrag umzustellen. Um eine gleichmäßige Gesamterscheinung der sanierten Flächen zu erhalten, wurde abschließend eine Schicht TRC-Mörtel mit einer Dicke von weniger als 2 mm auf die SHCC-Oberflächen aufgespritzt. Weitere Glättungsmaßnahmen wurden nicht durchgeführt.

Die Nachbehandlung erfolgte durch regelmäßiges Befeuchten der Oberflächen.

3.2 Funktionsweise der Sanierschichten

Die Wirkungsweise aller Materialkombinationen, die zur Wiederherstellung der Dichtheit der Schleusenstruktur eingesetzt werden, beruht auf dem Prinzip der Verringerung der Breite der vorhandenen Risse an der Strukturoberfläche. Zu diesem Zweck sollen die breiten Risse im Untergrund auf möglichst viele schmale Risse in der Reparaturschicht „verteilt“ werden. Dafür ist es notwendig, entlang jedes größeren Risses im Untergrund einen Entkopplungsbereich einzuführen [16]. Der Entkopplungsbereich schafft eine freie Länge in der Reparaturschicht, die eine Grundvoraussetzung für die Bildung eines multiplen Rissbildes darstellt, siehe Bild 2. Zu diesem Zweck wurden die Hauptrisse mit einem 14 cm breiten Klebeband abgedeckt, um eine ausreichend glatte Oberfläche zu schaffen. Die Funktionalität dieser praktischen Lösung wurde in früheren Laborversuchen an Systemprüfkörpern gemäß [16] bestätigt.

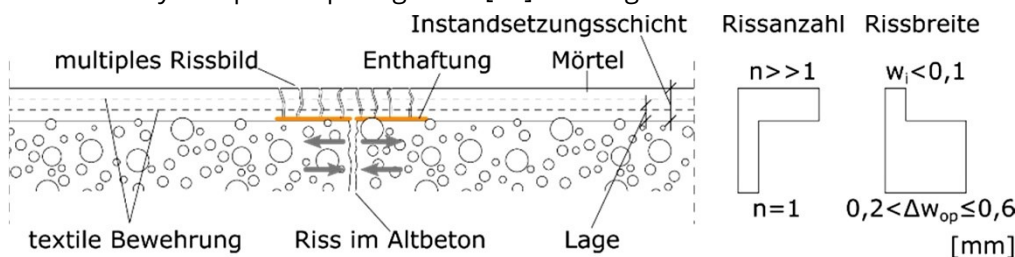


Bild 2 Funktionsweise und Aufbau einer mehrfach reißenden Instandsetzungsschicht mit Entkopplungsbereich. Grafik: Michaela Reichardt, nach [16]

4 Umsetzung

Sowohl vor der Umsetzung der Maßnahme als auch begleitend dazu wurden verschiedenste Versuche, von der Ermittlung der mechanischen Eigenschaften bis zu komplexeren Systemproben zur Beurteilung der Rissbildungsprozesse, durchgeführt. Nachfolgend werden ausschnittsweise die Ergebnisse der aktuell noch laufenden Monitoringkampagne gezeigt. Diese umfasst sowohl die Messung von Dehnungen in der Bewehrungsebene mittels Dehnungsmessstreifen, die direkt über dem Riss an der Bewehrung angebracht wurden, als auch die Aufzeichnung von Verschiebungen an der Oberfläche im Bereich der zuvor identifizierten Hauptrisse. Da auf den Kurzfasern im SHCC keine Dehnungsmessungen erfolgen können, wurden dezidierte Dehnelemente in die Instandsetzungsschicht eingebracht. Insgesamt wurden über einen Zeitraum von 1,5 Jahren zum Zeitpunkt der Berichterstattung Daten von 7 Dehnungsmessstreifen (3-mal Abschnitt C, je 2-mal Abschnitte

D und SHCC), 3 Rissöffnungsmessern (Abschnitte C und D sowie Leiterbereich), 4 Temperatursensoren (2-mal Luft, 1-mal im Beton über dem Wasserspiegel, 1-mal Beton unter dem Wasserspiegel) und die Messung des Wasserstandes in der Schleuse aufgezeichnet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Dehnungen der Bewehrung unabhängig von den äußeren Bedingungen wie Temperatur oder Wasserstand und nur sehr gering sind ($< 0,2$ mm/m). Die Verschiebungsmessungen an der Oberfläche zeigen eine deutliche Abnahme der Rissbreitenänderungen über die Zeit. Während am Haupttriss von Abschnitt C vor der Instandsetzung Veränderungen von bis zu 0,5 mm festgestellt wurden, sank dieser Wert nach der Instandsetzung auf weniger als 0,1 mm, siehe Bild 3.

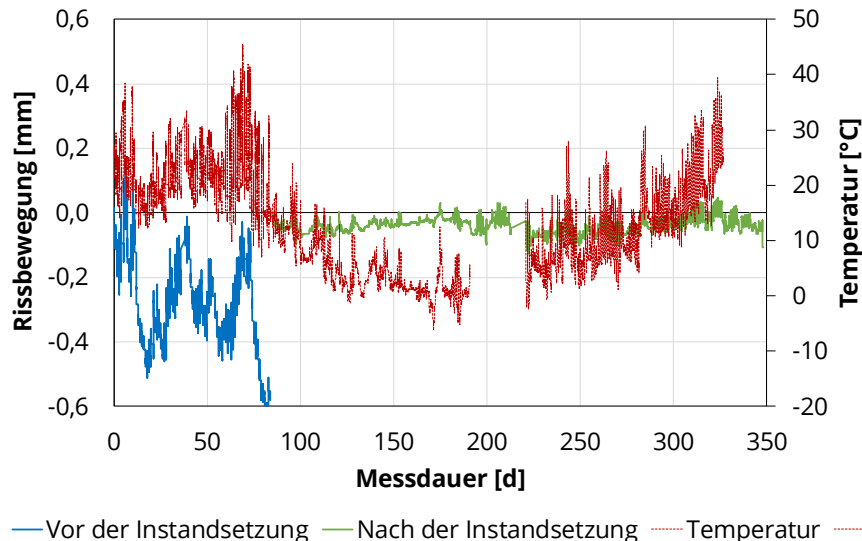


Bild 3 Veränderungen der Rissöffnung in Abschnitt C bei wechselnder Temperatur; blau: vor der Instandsetzung, grün: nach der Instandsetzung. Diagramm: Steffen Müller

5 Fazit und Ausblick

Der vorgestellte, realmaßstäbliche Einsatz von textildbewehrtem Beton und SHCC als Instandsetzungsschichten an einem Wasserbauwerk hat die Machbarkeit dieses materialeffizienten Ansatzes gezeigt. Begleitende Untersuchungen an Materialproben haben gezeigt, dass die in Vorversuchen ermittelten Werte auch unter Baustellenbedingungen erreicht werden können.

Das Erscheinungsbild der Instandsetzungsflächen ist nach wie vor sehr gut. Nach 2,5 Jahren mit drei Frostperioden konnte keine Verschlechterung festgestellt werden, siehe Bild 4. Die Untergründe sind nicht in ihrer bisherigen Ausdehnung an die Oberfläche gedrungen, sondern es sind sehr schmale, fein verteilte und kaum erkennbare Risse in der Reparaturschicht entstanden.

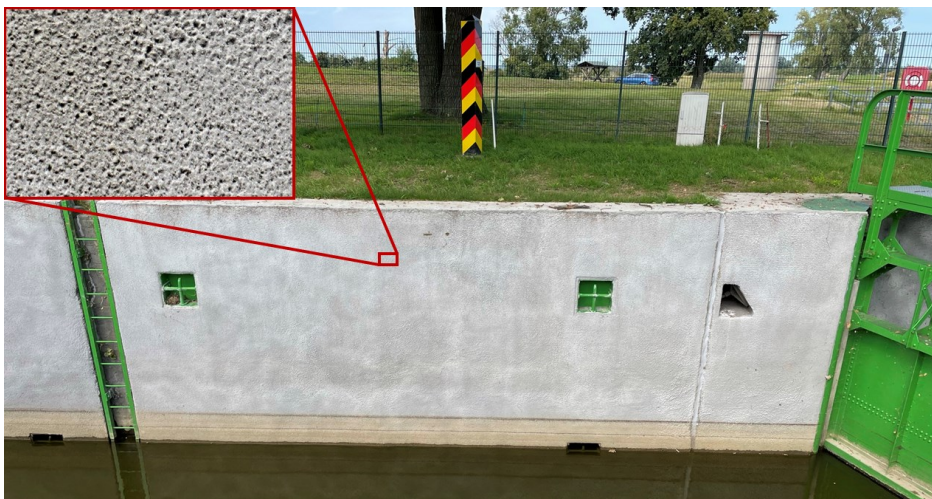


Bild 4 Instandgesetzte Schleusenwand Abschnitt C mit einem Oberflächendetail. Fotos: Kai Schneider, graphische Bearbeitung: Steffen Müller

Die instandgesetzte Schleuse bietet die Möglichkeit einer langfristigen Untersuchung/Überwachung. Die bemerkenswerte Leistungsfähigkeit der Reparaturmaßnahme dient als Nachweis der Praxistauglichkeit für weitere Genehmigungs- und Zulassungsverfahren. Aus diesem Grund wird das Monitoring in den kommenden Jahren fortgesetzt und die Ergebnisse sollen detailliert veröffentlicht werden. Die in diesem Beitrag nicht erwähnten, aber während der Ausführung ermittelten Bauparameter ermöglichen es den ausführenden Firmen, erste Planungsgrundlagen für eine ökonomische Berechnung solcher Anwendungen zu erarbeiten.

Dank

Dieses Projekt wurde im Rahmen des Zwanzig20-Vorhabens C³ – Carbon Concrete Composite, Projekt C3-V4.9 „Instandsetzung von Stahlbetonbauwerken durch dünne Schichten“ mit dem Förderkennzeichen 03ZZ0349A durch das BMBF gefördert. Besonderer Dank gilt dem Landesumweltamt Brandenburg für die Experimentierfreudigkeit und Flexibilität während der Umsetzung und die Zurverfügungstellung des Bauwerkes. Ebenso sei den Mitarbeitern der umsetzenden Firma Barg Betontechnik und Instandsetzungs GmbH & Co. KG aus Berlin gedankt.

Literatur

- [1] Mechtcherine, V. (2012) *Towards a durability framework for structural elements and structures made of or strengthened with high-performance fibre-reinforced composites*. Construction and Building Materials 31, S. 94–104. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.072>
- [2] Mechtcherine, V.; Lieboldt, M. (2010) *Permeation of water and gases through cracked textile reinforced concrete*. Cement Concrete Composites 33, S. 725–734. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.001>
- [3] Büttner, T.; Morales Cruz, C.; Raupach, M. (2013) *Durable protective layers of textile concrete for structural surfaces in hydraulic engineering*. Bautechnik 90, H. 8, S. 485–490. <https://doi.org/10.1002/bate.201300037>
- [4] DAfStb [Hrsg.] (2001) *DAfStb-Richtlinie: Instandsetzung von Betonbauteilen*. Beuth-Verlag, Berlin.
- [5] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) [Hrsg.] (2017) *ZTV-W LB 219: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Schutz und Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken (Leistungsbereich 219)*. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.
- [6] Deutsches Institut für Bautechnik (2016) *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-31.10-182*. Berlin.
- [7] solidian GmbH (2022) *Datenblatt solidian GRID Q85/85-CCE-21*. www.solidian.com, Albstadt.
- [8] Mechtcherine, V.; Michel, A.; Liebscher, M.; Schneider, K.; Großmann, C. (2019) *Neue Carbonfaserbewehrung für digitalen, automatisierten Betonbau*. Beton- und Stahlbetonbau 114 (12), S. 947–955.
- [9] Kruppke, I.; Butler, M.; Schneider, K.; Hund, R.-D.; Mechtcherine, V.; Cherif, C. (2019) *Carbon Fibre Reinforced Concrete: Dependency of Bond Strength on Tg of Yarn Impregnating Polymer*. Materials Science and Applications 10, S. 328–348. <https://doi.org/10.4236/msa.2019.104025>
- [10] Müller, S.; Mechtcherine, V. (2019) *Fatigue Behaviour of Strain-Hardening Cement-Based Composites (SHCC)*. Cement and Concrete Research 92, S. 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.11.003>
- [11] Jun, P.; Mechtcherine, V. (2010) *Behaviour of Strain-Hardening Cement-Based Composites (SHCC) under Monotonic and Cyclic Tensile Loading – Part 1 – Experimental Investigations*. Cement and Concrete Composites 32, S. 801–809. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.019>
- [12] Ranjbarian, M.; Mechtcherine, V. (2018) *A Novel Test Setup for the Characterization of Bridging Behaviour of Single Microfibres Embedded in a Mineral-Based Matrix*. Cement and Concrete Composites 92, S. 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.05.017>
- [13] Ranjbarian, M.; Mechtcherine, V. (2019) *Influence of Loading Parameters in Cyclic Tension-Compression Regime on Crack-Bridging Behaviour of PVA Microfibres Embedded in Cement-Based Matrix*. Construction and Building Materials 228, Art. 116760. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116760>
- [14] Junger, D.; Storm, J.; Müller, S.; Kaliske, M.; Mechtcherine, V. (2021) *Increasing the Fatigue Resistance of Strain-Hardening Cement-Based Composites (SHCC) by Experimental-Virtual Multi-Scale Material Design*. Materials 14, H. 19, Art. 5634. <https://doi.org/10.3390/ma14195634>
- [15] Müller, S.; Mechtcherine, V. (2018) *Use of Strain-Hardening Cement-Based Composites (SHCC) for Retrofitting*. ICCRRR 2018, MATEC Web of Conf. 199, Art. 09006. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819909006>
- [16] Bundesanstalt für Wasserbau [Hrsg.] (2019) *BAW Merkblatt Flächige Instandsetzung von Wasserbauwerken mit textildbewehrten Mörtel- und Betonschichten (MITEX)*. Karlsruhe.