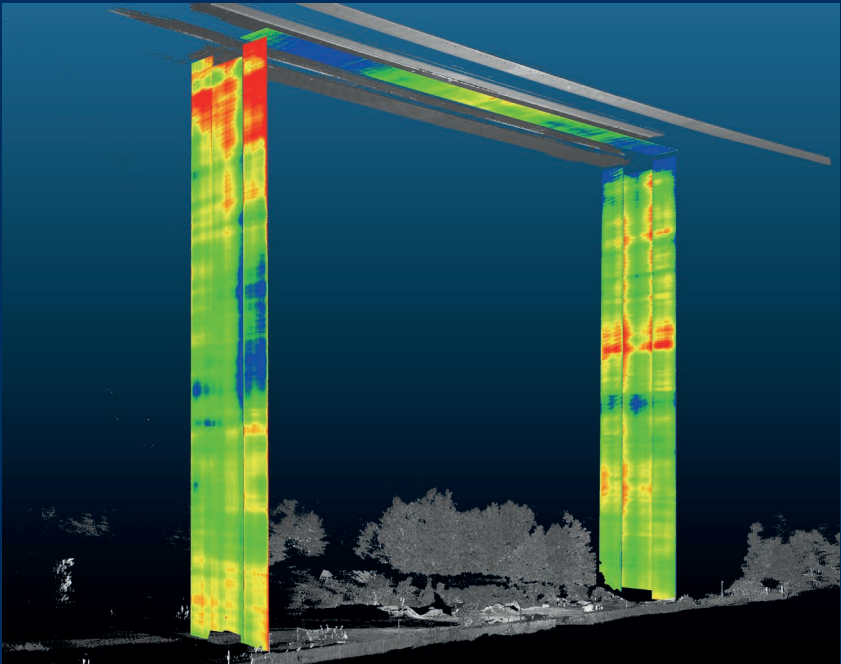




**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 55



Manfred Curbach, Steffen Marx,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

11. SYMPOSIUM EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN VON BAUKONSTRUKTIONEN

08. März 2021



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Manfred Curbach, Steffen Marx,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

**11. SYMPOSIUM
EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN
VON BAUKONSTRUKTIONEN**

08. März 2021

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 55

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
Prof. Dr.-Ing. Peer Haller
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe
Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx
Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann

Institut für Massivbau
Technische Universität Dresden
D - 01062 Dresden

Tel. +49 351 463-3 65 68
Fax +49 351 463-3 72 89

© 2021 Technische Universität Dresden

Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit schriftlicher Genehmigung der Herausgeber. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichnungen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind. Für die Inhalte sind die Autor*innen verantwortlich.

Herausgeber: Manfred Curbach, Steffen Marx, Silke Scheerer, Torsten Hampel
Redaktion: Silke Scheerer
Layout: Stefan Gröschel und Silke Scheerer
Korrekturen: Silke Scheerer, Sabine Wellner und Theresa Fritsche
Anzeigen: Sabine Wellner
Umschlag und Druckvorbereitung: Stefan Gröschel

Titelbild: 3D-Punktwolke des fünften Feldes der Siegtalbrücke; zur Veranschaulichung wurden bereichsweise unterschiedliche Einfärbungen verwendet: Intensitätswerte (Graustufendarstellung) und Ebenheitsabweichungen (Regenbogendarstellung) | © Dr.-Ing. Florian Schill, Fachgebiet Geodätische Messsysteme und Sensorik, TU Darmstadt Institut für Geodäsie

Der Tagungsband ist open access auf der Homepage des Instituts für Massivbau der TU Dresden verfügbar: <https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb>.

Druck: addprint AG · Am Spitzberg 8a · 01728 Bannewitz

Veröffentlicht: Dresden, März 2021

ISSN 1613-6934
ISBN 978-3-86780-665-7

Inhalt

Grußwort.....	5
Torsten Hampel, Sabine Wellner und Silke Scheerer	
Experimentelle Untersuchung von Balkenreihentragwerken	8
Oliver Steinbock, Olaf Mertzsch und Sabine Wellner	
Experimentell gestützte Nachweise von Eisenbahn-Stampfbetonbrücken.....	20
Marc Gutermann und Werner Malgut	
Berührungslose Überwachung von Brücken mit großer Stützweite	32
Florian Schill und Gregor Schacht	
Ultraschalluntersuchung von Baukonstruktionen.....	46
Sebastian Schulze	
Monitoring von Kräften und signifikanten Bauwerksparametern in einer Stahlbeton- brücke zur Analyse von Schädigungsprozessen	54
Jens Kühnapfel, Gunter Hahn, Markus Fischer und Stefan Mortag	
Structural Health Monitoring der Maintalbrücke Gemünden zur Unterstützung einer prädiktiven Instandhaltung.....	66
Ralf Herrmann, Ronald Schneider, Patrick Simon, Falk Hille, Samir Said und Matthias Baeßler	
Rissweitenmessung mittels nachträglich angebrachten, verteilten faseroptischen Messsystemen	78
Alois Vorwagner, Maciej Kwapisz, Werner Lienhart, Madeleine Winkler und Urs H. Grunicke	
Verbesserte Bestimmung des Chloridgehaltes in Beton durch neues Messverfahren	88
Fritz Binder und Stefan L. Burtscher	
Spanndrahtbruchdetektion mit Schallemissionsmonitoring.....	96
Max Käding, Gregor Schacht und Steffen Marx	
Ansätze zur objektspezifischen Ermittlung und Bewertung von KKS-Schutzkriterien	106
Ulrich Schneck	
Probebelastung einer mit Carbonbeton verstärkten Plattenbrücke.....	118
Oliver Steinbock, Nina Josiane Giese und Manfred Curbach	
Experimentelle Tragfähigkeitstests des OML in den Jahren 2019 und 2020.....	130
Sabine Wellner, Torsten Hampel und Silke Scheerer	

Monitoring von Kräften und signifikanten Bauwerksparametern in einer Stahlbetonbrücke zur Analyse von Schädigungsprozessen

Dipl.-Ing. (FH) Jens Kühnapfel¹, Dipl.-Ing. (FH) Gunter Hahn², Markus Fischer M.Sc.²,
Dipl.-Ing. (FH) Stefan Mortag¹

¹ sains Ingenieure GmbH, Leipzig

² lexB Ingenieurgesellschaft für experimentelle Bauwerksuntersuchung mbH, Leipzig

KURZFASSUNG

Eine Stahlbetonbrücke in Leipzig weist mehrere Jahre nach ihrer Errichtung wiederholt Schäden im Bereich der Übergangskonstruktionen und an den Fahrbahnrändern in Form von Aufwölbungen der Fahrbahnoberflächen auf. Diese resultieren aus dem Aufschieben des unbewehrten und nicht verankerten Aufbetons in Richtung der Randaufkantung der tragenden Überbauplatte.

Im vorliegenden Beitrag wird die Entwicklung und Umsetzung eines Monitoringsystems zur unmittelbaren, kontinuierlichen Kraft- und Temperaturaufzeichnung im Aufbeton aufgezeigt. Mit diesem System konnte der vorherrschende Schädigungsmechanismus am Brückenbauwerk bestimmt und quantifiziert werden.

Es ist den Projektbeteiligten gelungen, ein widerstandsfähiges Monitoringsystem zu entwickeln und zu applizieren, welches bei geringem Platzbedarf und widrigen äußeren Einflüssen bis heute eine zuverlässige Datenermittlung ermöglicht.

1 Einleitung

1.1 Konstruktionsdetails des Bauwerkes

Die Berliner Brücke mit einer Grundfläche von ca. 8.640 m² (ohne Rampen) nördlich des Leipziger Stadtzentrums wurde zwischen 1998 und 2000 errichtet. Auf der Brücke befindet sich die Kreuzung von zwei Hauptverkehrsachsen, weiterhin wird die Straßenbahn der Leipziger Verkehrsbetriebe (LVB) mit zwei einspurigen Richtungsgleisen überführt. Unter dem Bauwerk verlaufen mehrere Gleise der DB AG in nahezu Nord-Süd-Richtung (Bild 1).

Östlich und westlich der Bahntrassen ist jeweils ein Brückenraum vorhanden. Parallel zwischen den Gleisen sind zwei Pfeilerscheiben als Zwischenstützen der Platte angeordnet (Bild 2). Der

Brückenüberbau ist als massive Stahlbetonplatte mit Dicken zwischen 1,1 und 1,3 m und zum Großteil horizontaler Oberseite ausgeführt. Die Oberfläche weist an den zwei langen Armen Richtung Nordost und Südwest ein Gefälle in Richtung der Rampen auf.

Auf der Überbauplatte ist ein unbewehrter und mit Pressfugen unterteilter Aufbeton (= Ausgleichsschicht) mit Dicken zwischen 5 cm und 85 cm betoniert. Dieser dient dem Höhenausgleich zwischen der Straßenbahntrasse im Schotterbett und den Fahrbahnen sowie der Herstellung der kuppenförmigen Gradienten der überführten Straßen. Die Ausgleichsschicht ist durch vertikale Pressfugen in einzelne Segmente von ca. 6 × 6 m Kantenlänge unterteilt. Die Segmente besitzen untereinander keine kraftschlüssige Verbindung und sind nicht mit der Überbau-



Bild 1: Systemübersicht – Luftbild

platte verbunden. Jedoch besitzt diese zur seitlichen Sicherung des Aufbetons an allen Überbaurändern umlaufende Aufkantungungen (Bild 3).

1.2 Standsicherheitsnachweise und Konstruktion bei Errichtung des Bauwerkes

Der Aufbeton wurde in den Standsicherheitsnachweisen für die Bemessung von Überbauplatte, Lagern und Unterbauten aus dem Jahr 1997 [1] als Masse berücksichtigt. Ihm wurde

aber keine Plattensteifigkeit zugewiesen, da er in unbewehrte Segmente unterteilt ist. Aufgrund der, im Vergleich zu den Abmessungen der Überbauplatte, zumeist deutlich geringeren Dicke und der ebenfalls viel geringeren Längenabmessungen der einzelnen Aufbetonsegmente ist dies auch gerechtfertigt. Die aus der Ausgleichsschicht resultierende, zusätzliche Überbaudicke wurde beim Nachweis der Überbauplatte im Lastfall ‚Temperaturdifferenz‘ zwischen Ober- und Unterseite der Überbauplatte abmindernd berücksichtigt.

Unberücksichtigt geblieben ist dagegen, dass bei Durchbiegungen der Überbauplatte Schubspannungen zwischen Platte und Ausgleichsschicht hervorgerufen werden. Zudem weist die tragende Platte durch ihre große Masse eine erheblich größere Trägheit bei der Änderung ihrer

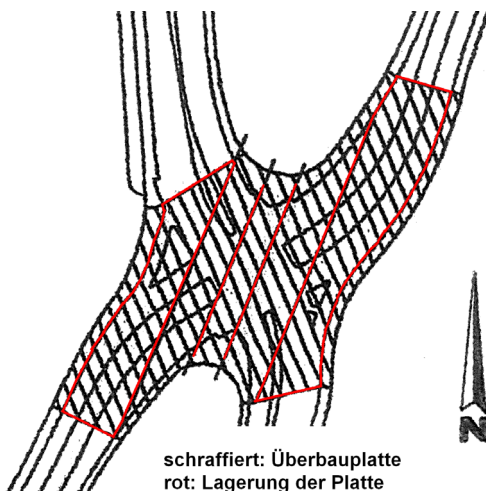


Bild 2: Systemübersicht – Systemskizze

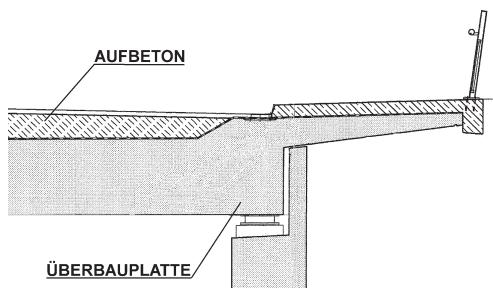


Bild 3: Überbauquerschnitt



Bild 4: Belagschaden vor FÜK

mittleren Temperatur auf als der Aufbeton, welcher zudem von oben direkt durch die Sonneneinstrahlung erwärmt wird. Die mittlere Aufbetontemperatur schwankt somit deutlich mehr als die der Überbauplatte, was zu Dehnungsdifferenzen zwischen beiden Schichten führt.

Die beschriebenen zu erwartenden Dehnungsdifferenzen werden konstruktiv, statt über eine flächige schubfeste Verbindung, nur durch die Anordnung der umlaufenden Aufkantung aufgenommen. Weiterhin wurden in [1] zwar global Bremskräfte von Fahrzeugen für die Überbau- und Lagerbemessung angesetzt, jedoch nicht zur Bemessung der Festhaltung des Aufbetons verwendet.

1.3 Schadensbild am Bauwerk

Nach einigen Jahren traten an den Fahrbahnrändern vor den Kappen sowie insbesondere im Bereich der Fahrbahnübergänge sichtbare Aufwölbungen der bituminösen Fahrbahnbeläge auf. Zunächst wurde zur Beseitigung der ermittelten Schadstellen der

Fahrbahnbelag abgefräst. Im weiteren Verlauf trat, nach mehrmaligem Fräsen, der Aufbeton zum Vorschein (Bild 4).

Als unmittelbare Schadensursache wurden horizontale Verschiebungen des Aufbetons ermittelt. Die abgeschrägte Randaufkantung der Überbauplatte kann die Verschiebungen des Aufbetons offenbar nicht verhindern (Bild 5).

An den Aufbetonrändern wurden horizontale Verschiebungen bis in den Dezimeterbereich festgestellt. Nach dem Abtragen des Fahrbahn-



Bild 5: Überbaurandbereich nach teilweisem Ausbau des Aufbetons

belags zeigten sich an den ehemals spaltfreien Pressfugen des Aufbetons geöffnete Fugen von mehreren Millimetern bis zu ca. 1,5 cm.

1.4 Sicherungsmaßnahmen

In den Jahren 2012/2013 wurde in zwei Bereichen unmittelbar vor den Fahrbahnübergängen je ein bewehrter Stahlbetonblock (im Folgenden als ‚Verankerungsblock‘ bezeichnet) errichtet (Bild 6). Die Verbindung zwischen diesem neuen, bewehrten Aufbeton und der Überbauplatte wurde mit Tellerankern realisiert. Mit dieser Maßnahme erhoffte man sich, das Verschieben des Aufbetons auf die Randaufkantung mit den resultierenden Belagschäden unmittelbar zu verhindern.

Zwei Jahre nach dem Einbau dieser ersten Verankerungsblöcke waren erneut beginnende Verformungen des Belags zu verzeichnen, sodass in der Folge von einem Versagen der Verankerungen auszugehen war.

Bei den in den Jahren 2015 und 2016 analog geplanten Verankerungen sollten daher die Last-

annahmen angepasst werden. Als problematisch stellte sich heraus, dass der Mechanismus hinter den beobachteten, großen, seitlichen Verschiebungen weiterhin nicht bekannt war und diese Verschiebungen für die Bemessung abgeschätzt werden mussten. In der Folge wurden deutlich höhere Lasten angenommen, was eine Verdopplung der benötigten Telleranker je Verankerungsblock nach sich zog.

1.5 Veranlassung und Zielstellung des geplanten Monitorings

Die Verankerung des Aufbetons wirkt den schädigenden Verschiebungen zunächst entgegen, erzeugt jedoch gleichzeitig Zwängungen im Aufbeton. Diese Lasten wurden als Lagerreaktion auf die Überbauplatte bisher nicht betrachtet.

Auch nach 2016 war die Instandsetzung und Sicherung weiterer Aufbetonränder durch Verankerungsblöcke geplant. Bis dato bestand eine große Unsicherheit bezüglich der möglichen Ursachen und Größen der schädigungswirksamen Mechanismen und der damit verbundenen Dau-



Bild 6: Einbau ‚Verankerungsblock‘ mit Tellerankern und unterer Bewehrungslage

erhaftigkeit der Instandsetzungsmaßnahmen. Daraufhin wurde 2017 die Entwicklung eines Monitoringsystems zur Überwachung des Aufbetons mit folgenden Zielstellungen beauftragt:

- Einbau des Monitoringsystems im Rahmen einer bereits geplanten Sicherungsmaßnahme,
- Direkte Ermittlung der im Aufbeton auftretenden, schädigungswirksamen, horizontalen Kräfte und eines sich ggf. einstellenden maximalen Lastniveaus, aus dem sich Einwirkungen für zukünftige Nachweise ableiten lassen,
- Parallele Messung der Temperaturgradienten am Bauwerk und im Überbauquerschnitt,
- Erfassung und Aufzeichnung der Messdaten für einen Mindestzeitraum von einem Kalenderjahr, um alle jahreszeitlichen Last- und Temperaturzustände im Überbau zu erfassen,
- Kurzzeitmessungen von Überfahrten und Bremsversuchen eines schweren LKW sowie Messungen mit Protokollierungen des laufenden Straßen- und Tramverkehrs.

1.6 Postulierte Lastfälle

Auf Grundlage der vorherrschenden Schadensmechanismen wurden zunächst sieben mögliche relevante Lastfälle betrachtet. Diese waren im Einzelnen:

- **Lastfall 1: Anfahr- und Bremskräfte von Fahrzeugen.** Die Trägheit beim Beschleunigen und Abbremsen der Fahrzeugmassen ruft im Aufbeton eine Gegenkraft hervor, welche zu einer Längsverschiebung führt.
- **Lastfall 2: Fliehkräfte aus Kurvenfahrt.** Alle Straßen auf dem Bauwerk sind in Kurven angelegt, was je nach Geschwindigkeit und Masse beim Befahren der Brücke mehr oder minder große Fliehkräfte und entsprechende Gegenkräfte im Aufbeton erzeugt.
- **Lastfall 3: Horizontaldruck des Gleisschotters.** Das Schotterbett der Tramgleise wird beidseitig vom Aufbeton begrenzt. Bei vertikalen Belastungen ist analog des aktiven Erddruckes bei Böden eine horizontale Reaktion und damit eine Einwirkung im Aufbeton zu erwarten.
- **Lastfall 4: Eisdruck durch Ausfrieren.** Die Abdichtungsebene des Überbaus befindet sich

unter dem Aufbeton. In den Segmentfugen dieser Ausgleichsschicht wurde Stauwasser nachgewiesen. Ein Durchfrieren dieses Wassers kann zu einer Aufweitung der Pressfugen zwischen den Aufbetonsegmenten und zu einer daraus resultierenden Lasterhöhung führen.

- **Lastfall 5: Abgleiten.** Die Oberfläche der Überbauplatte ist in Teilbereichen geneigt. Auf diesen schiefen Ebenen ist ein Abgleiten der Aufbetonsegmente möglich.
- **Lastfall 6: Temperaturdifferenzen.** Unterschiedliche Erwärmung und Abkühlung von Aufbeton und Überbauplatte können zu Dehnungsdifferenzen und damit zu horizontalen Bewegungen führen.
- **Lastfall 7: Durchbiegung der Überbauplatte.** Durchbiegungen der Überbauplatte führen auf Grund der fehlenden schubfesten Verbindung zum Aufbeton zu differenziellen Verschiebungen in der Fuge zwischen beiden Bauteilen.

Alle festgestellten, großen Verschiebungen des Aufbetons können nur auftreten, wenn bei ausreichend hoher horizontaler Kraft die Haftreibung zwischen Aufbeton und Abdichtung auf der Überbauplatte überschritten wird. Maßgeblich dafür ist der Haftreibungskoeffizient, welcher wiederum davon abhängt, wie die Oberflächen in der Gleitfuge beschaffen sind. Verschmutzungen, Oberflächenrauheiten und -unebenheiten, Nässe bzw. Eisbildung und weitere Faktoren beeinflussen die Reibung in erheblichem Maße.

2 Planung und Umsetzung des Monitorings

Bereits zu Beginn der Planungsphase war die Idee geboren, die schädigungswirksamen Kräfte direkt im Aufbeton zu erfassen. Im Gegensatz zu den vielfach im Bauwerksmonitoring praktizierten Dehnungsmessungen sollten damit möglichst viele der postulierten Lastfälle aus Abschnitt 1.6 unmittelbar messtechnisch erfasst, gegeneinander abgegrenzt und, wenn möglich, quantifiziert werden. Weiterhin sind die gemessenen Kräfte auch für zukünftige Bemessungen am Bauwerk zu verwenden.

Der Einbauort des Monitoringsystems stand, bedingt durch die in Planung befindlichen Sicherungsmaßnahmen, für den Sommer 2017 im Voraus fest. Es sollte parallel zur Errichtung des Verankerungsblocks installiert werden. Die Verankerung des Aufbetons erfolgte in Fahr­bahn­längsrichtung. Für die hypothetischen Einwirkungen, welche eine Verschiebung quer zur Fahrtrichtung erzeugen, konnte somit keine Kraftaufzeichnung erfolgen. Die Lastfälle ‚Fliehkräfte‘ und ‚Gleisschotterdruck‘ konnten somit nicht betrachtet werden.

Für die direkte Messung der horizontalen Kräfte wurde eine Lösung mittels elektronischer Kraftmesssensoren (KMS) gewählt. Diese sollten im vertikalen Übergang der Fugen zwischen neuem Verankerungsblock und dem Bestands-Aufbeton eingebaut werden. Der vorgefundene Aufbeton wies im Einbaubereich des Verankerungsblocks eine mittige Längsfuge auf, was im ersten Schritt der Planung die Anordnung von mindestens zwei KMS erforderte. Auf Grund der beschriebenen Unsicherheiten bei den Lastannahmen sollten die einzubauenden Messgeber auf ca. 200 % der angenommenen Lasten ausgelegt werden. Dies erforderte die Ausführung von KMS mit je 4 MN Traglast, welche aber sowohl die zur Verfügung stehende Bauhöhe im Aufbeton, als auch die Betondruckspannungen durch die begrenzte Lasteinleitungsfläche überschritten hätten. Somit wurden die einzutragenden Lasten regelmäßig auf vier Sensoren á 2 MN verteilt (Bild 7).

Eine besondere Herausforderung stellte weiterhin die Entwicklung eines gekapselten Messsystems dar, da nach dem Einbau und Betonieren keinerlei Zugriff mehr möglich gewesen wäre.

Dieses musste auch unter ungünstigen vorherrschenden Randbedingungen (wie Frost-Tau-Wechsel, Nässe, Temperaturänderung, Salzbelastung) unabhängig, zuverlässig und dauerhaft Werte ermitteln und übertragen.

Um die Lastfälle ‚Eisdruck‘ und ‚Temperaturdifferenzen‘ direkt nachweisen und möglichst von anderen Lastfällen abgrenzen zu können, sollten die Temperaturgradienten im Überbauquerschnitt parallel zu den Kräften tiefengestaffelt erfasst werden. Die Temperatursensoren sollten so geplant werden, dass diese möglichst gleichmäßig über die Höhe des gesamten Querschnittes aus Überbauplate und Aufbeton verteilt sind (Bild 8). Der oberste und unterste Sensor war möglichst nahe an den Bauteiloberflächen zu platzieren. Ein weiterer Sensor musste möglichst im Bereich der Trennfuge zwischen Überbauplate und Aufbeton angeordnet sein.

Zusätzlich zu den Temperaturen im Überbau sollten die oberflächennahe Temperatur (unmittelbar unter Kappenoberfläche), die Lufttemperatur im Brückeninnenraum sowie die Außenlufttemperatur im Schatten unter dem benachbarten Kragarm aufgezeichnet werden.

Das Monitoring wurde wie folgt umgesetzt:

Sensoren zur Kraftmessung: Im Bereich des neu einzubauenden Verankerungsblocks wurde das letzte Segment des Aufbetons zwischen der Aufkantung vor der Fahrbahnübergangskonstruktion (FÜK) und der ersten Pressfuge des Aufbetons abgebrochen. Auf der freiliegenden Oberfläche der Überbauplate wurden Telleranker in mehreren Reihen mit eingebohrten Klebeankern befestigt. Nach oben weisende Kopf-

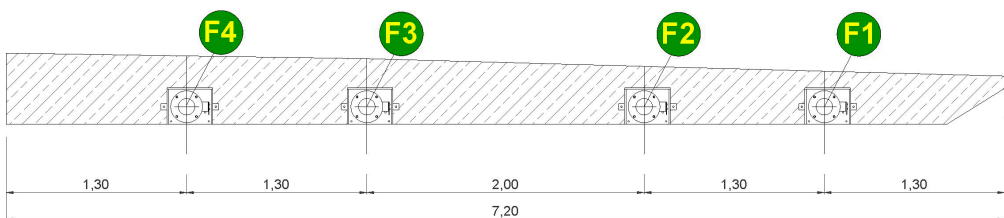


Bild 7: Gewählte Positionierung der Kraftmesssensoren im Aufbetonquerschnitt

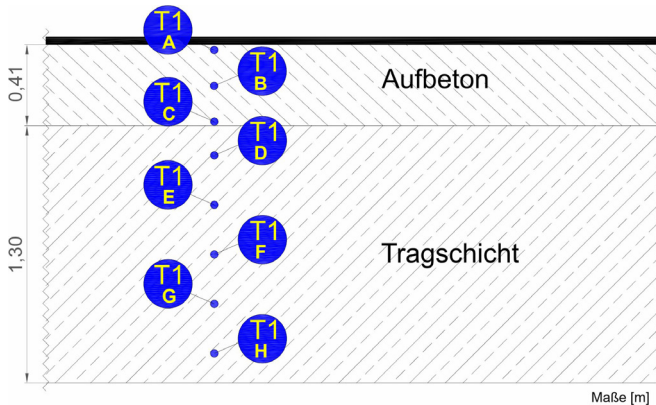


Bild 8: Verteilung der Temperatursensoren über Tragschicht und Aufbeton

Anforderungen der Umgebungsbedingungen widerstehen sollten. Diese wurden in eigens entwickelte und gefertigte Sensorträger mit beweglichen Lasteinleitungsplatten verbaut. Besonderes Augenmerk lag hierbei auch in der Vermeidung von möglichen Einflüssen aus Querbelastungen der Sensoreinheiten. Als zusätzliche Schutzmaßnahmen wurden die Sensorpakete nochmals komplett gekapselt, ohne dabei eine ungewollte Aussteifung innerhalb des Sensorträgers einzubringen.

bolzendübel der Telleranker sind in der Lage, über die Bewehrung des Verankerungsblocks die Auflagerkräfte direkt in den Konstruktionsbeton abzuleiten (siehe Bild 6). Die im Aufbeton auftretenden horizontalen Kräfte werden somit durch die Kraftsensoren gegen das geschaffene Widerlager des Verankerungsblocks geleitet.

Die Positionierung der Kraftmesssensoren erfolgte kurz oberhalb der Abdichtungsebene. Hierfür wurden die Grundplatten der KMS an der vertikalen Oberfläche der ehemaligen Pressfuge angedübelt und somit für die Betonage fixiert (Bild 9).

Die gekapselten Kraftsensoren wurden in die Bewehrung des Verankerungsblocks eingebunden (Bild 10). Der Einbau von EPS-Platten mit einem geringen Verformungswiderstand zwischen Alt- und Neubeton ermöglicht die Entkopplung in der Arbeitsfuge und die gezielte Lasteinleitung in die kraftübertragenden Kontaktpunkte an den Sensoren.

Für den Bau der gekapselten Kraftmesseinheiten kamen spezielle Sensoren zum Einsatz, welche den erhöhten

Sensoren für Temperatur: Für die Temperaturmessungen im Überbauquerschnitt, an der Bauteiloberfläche sowie im Brückenraum kamen unterschiedliche Temperatursensoren zum Einsatz. Es wurde ein Sensorträger entwickelt, mit welchem die Temperaturgradienten im Aufbeton sowie in der Tragkonstruktion parallel gemessen werden können. In einer senkrechten Kernbohrung durch die Überbauplatte wurde der untere Teil des geteilten Sensorträgers positioniert und die Bohrung anschließend verfüllt. Der obere Teil des Sensorträgers wurde



Bild 9: Gekapselte Kraftsensoren vor dem Bewehren

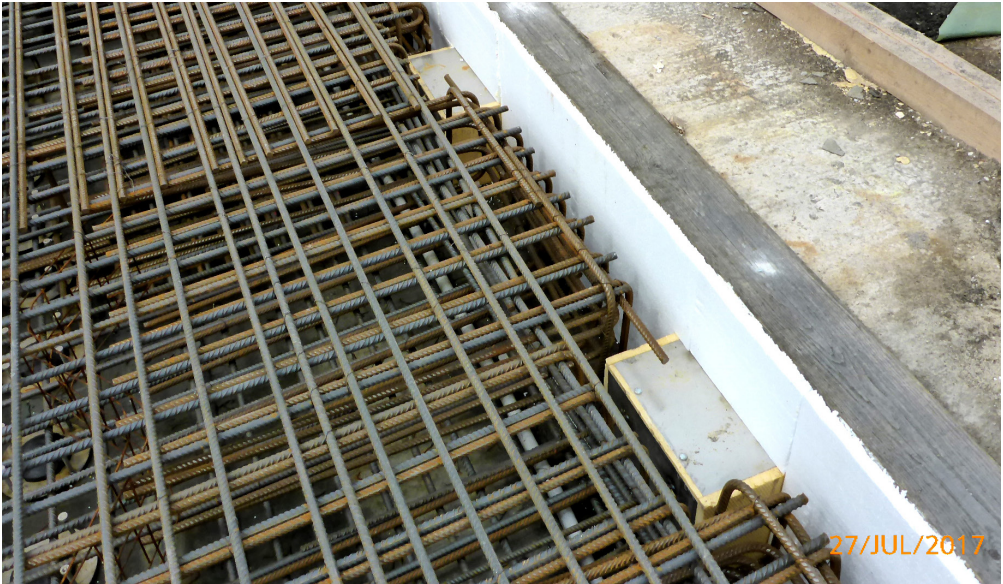


Bild 10: In die Bewehrung eingebundene Kraftsensoren vor dem Betonieren

an der Bewehrung des Verankerungsblockes fixiert und nach der Betonage vom neuen Beton umschlossen (Bild 11). Die Oberflächentemperaturmessung erfolgt unmittelbar unter der Bauteiloberfläche der benachbarten Kappe.

Alle benötigten Lufttemperatursensoren wurden an geeigneter Stelle im Brückenraum und unterhalb des Kragarmes auf der Außenseite der Brücke installiert, um möglichst ungestörte Temperaturverhältnisse zu erhalten.

Datenerfassung und Funktionstest: Die Datenerfassung der einzelnen Sensoren erfolgt über mehrere Messverstärker im Brückeninnenraum. Die Erfassung und Speicherung der Daten wird dabei kontinuierlich über ein computerunterstütztes Messsystem realisiert.

Die Abtastrate des Langzeitmonitorings wurde im Laufe der Messungen angepasst und mit

einem 50-Sekunden-Takt optimiert [4], [5]. Hierdurch wurde schon im Vorfeld die Anpassung der benötigten Datenmengen auf die Anforderungen des Monitorings erreicht. Zur Erfassung der Lastfälle aus den kurzzeitigen Beanspruchungen aus dem Straßen- und Tramverkehr wurden zusätzlich gesonderte Messkampagnen mit hoher Abtastrate geplant und durchgeführt.



Bild 11: Sensorträger im Bewehrungskorb vor der Betonage

Nach dem Applizieren der Sensoren erfolgte die Betonage des neuen Verankerungsblocks. Durch die hieraus entstehende Hydratationswärme im Beton konnten erste Messergebnisse verzeichnet werden. Proportional zur Erwärmung des Betons wurde ein erster Kraftanstieg – in Summe bis zu 50 kN – registriert. Das sensible Verhalten unseres implementierten Monitoring-systems konnte auch beim späteren Aufbringen der neuen Asphaltfahrbahn einen signifikanten Anstieg der Kräfte parallel zum Temperaturanstieg im Brückenüberbau aufzeigen.

3 Messergebnisse und deren Interpretation

3.1 Kurzzeitversuche

Um die Auswirkungen des Verkehrsgeschehens zu verifizieren, wurden in zwei Messkampagnen die Lastfälle 1 und 7 untersucht. Hierbei wurden hohe Abtastraten gewählt, um die Kraftreaktionen an den einzelnen KMS parallel zu den Fahrzeugüberfahrten zu registrieren. Ein Beispiel der Messwertkurven zeigt Bild 12.

Diese Versuche der Kurzzeit-Messkampagne erfolgten mit einem auf 18,0 t Gesamtgewicht beladenen, vierachsigen Muldenkipper. Der Messbereich wurde von diesem in beiden Richtungen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten überfahren. Weiterhin wurden mehrere Bremsversuche in unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Abständen zu den KMS durchgeführt. In einer zweiten Messkampagne wurde der laufende Straßen- und Tramverkehr zu den auftretenden Kräften protokolliert.

Die durchgeführten Messungen wiesen an allen KMS kurzzeitige Lasterhöhungen bei den Überfahrten auf, sowohl unmittelbar auf der Straße über dem Messbereich als auch auf den Straßenbahngleisen oder der Gegenfahrbahn. Alle erhöhten Kräfte gingen bei den einzelnen Überfahrten mit dem LKW jeweils innerhalb weniger Minuten auf den Ausgangswert zurück. Aus dem Vergleich der Versuche mit und ohne Bremswirkung konnte der Anteil der Plattenverformung (Lastfall 7) am gesamten Kraftanstieg abgeschätzt werden. Auch die Kraftanstiege bei den protokollierten Über-

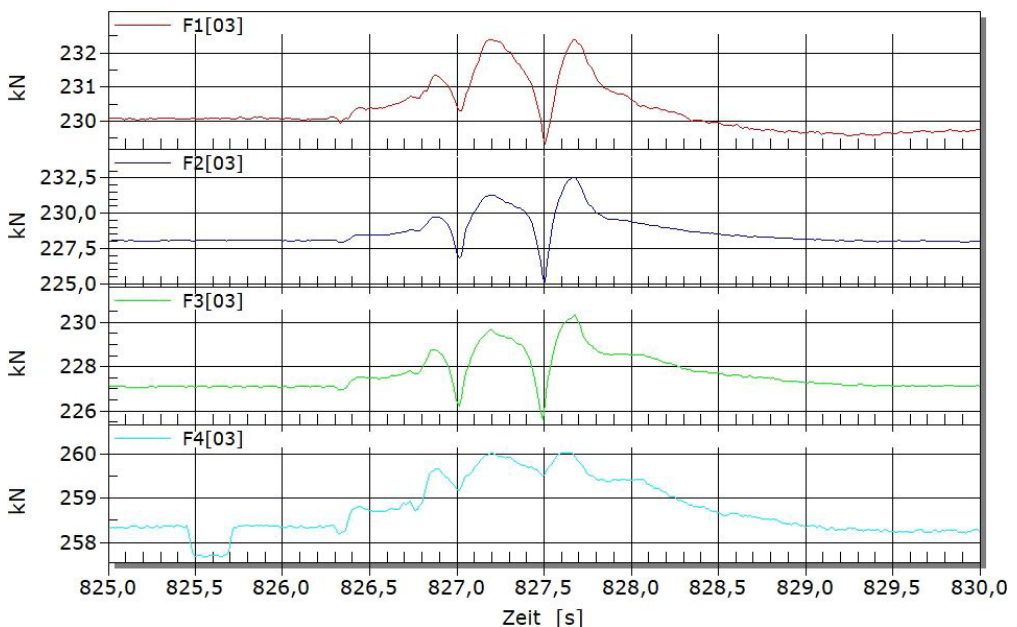


Bild 12: Beispiel Messung Überfahrt LKW – Kraftkurven der vier KMS

fahrten auf der Gegenfahrbahn bestätigen den Lastfall 7.

Die Ergebnisse der Kurzzeitmessungen [3], [6] zeigen die Empfindlichkeit des Messsystems und den Einfluss von Fahrzeugüberfahrten sowie Bremsen und Beschleunigen auf die Brücke. Zum Versuchszeitpunkt waren alle Verformungen aus den Kurzzeitversuchen elastischer Natur und die Lastfälle 1 und 7 sind somit als nicht schädigungsrelevant zu werten.

3.2 Langzeitmonitoring

Für die Auswertung des nunmehr seit über drei Jahren laufenden Langzeitmonitorings wurden Messdaten ab August 2017 herangezogen. Zu diesem Zeitpunkt waren die zeitlich begrenzten Einflüsse von nicht konstruktionstypischen Einwirkungen aus der Herstellung des Verankerungsblocks und der Fahrbahn weitgehend abgeklungen und die Kräfte der einzelnen KMS stabilisiert.

Durch die gewählte Abtastrate sind die Auswirkungen der vor allem durch Sonneneinstrahlung induzierten Temperaturänderungen geglättet sowie Werte der einzelnen KMS hinreichend

genau beschrieben. Kurzzeitige Schwankungen, insbesondere aus dem Verkehrsgeschehen, sowie die systemeigenen Messwertschwankungen werden hingegen aus den Messdaten weitestgehend herausgefiltert.

Im Diagramm in Bild 13 wurde über den gesamten Zeitraum des Langzeitmonitorings der Verlauf der Summe aller KMS in Rot dargestellt. Der Verlauf der mittleren Aufbetontemperatur ist demgegenüber in blau abgebildet. Der Verlauf lässt einen langfristigen Trend der Kraftzunahme im Aufbeton erkennen. Ein Ende der Kraftzunahme ist momentan noch nicht absehbar.

Diesem langfristigen Trend unterliegen starke Schwankungen innerhalb kurzer Zeiträume (Stunden bis Tage). Diese Kraftamplituden sind je nach Jahreszeit unterschiedlich groß. In den Wintermonaten liegen deutlich geringere Schwankungen als im Sommer vor. Hieraus ist bereits eine signifikante Abhängigkeit der auftretenden Kräfte von den Temperaturen im Aufbeton abzuleiten.

Auffällig ist die Trendlinie der Kraft bei abfallenden Temperaturen. Diese fällt nicht pro-

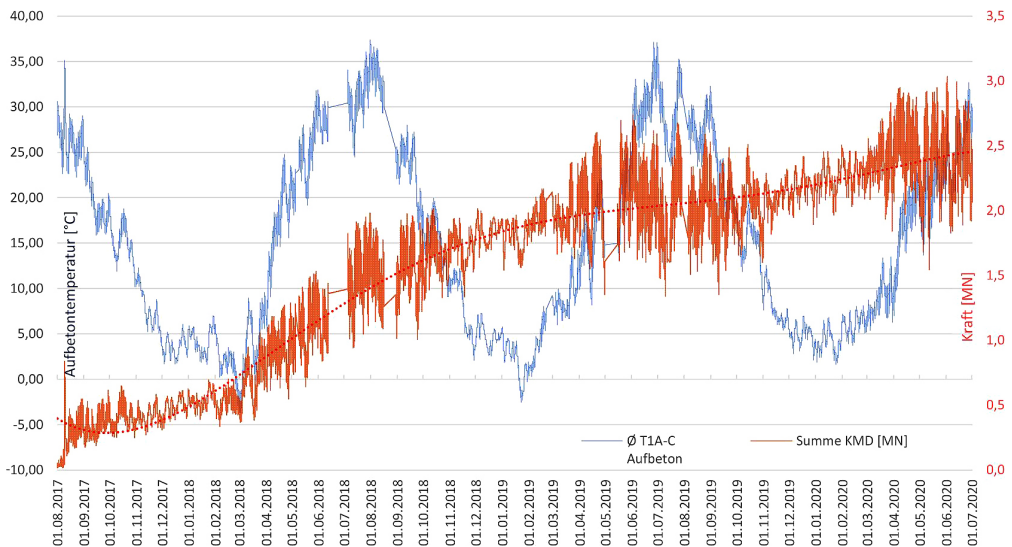


Bild 13: Langzeitmonitoring – Kräftesumme und mittlere Aufbetontemperaturen 2017–2020

portional zur Abkühlung, sondern lediglich der Anstieg, und somit die mittlere Rate des Kraftzuwachses, flacht etwas ab bzw. verstärkt sich sogar noch gering (1. Quartal 2019). Dies zeigt, dass sich das Verhalten des Aufbetons mit einem einfachen Modell, in dem die Temperaturen und die Kräfte (z. B. als Reaktion auf behinderte Dehnung) direkt proportional sind, nicht ausreichend beschreiben lässt.

Die Ursache für das stetige Anwachsen der gemessenen Kräfte im Aufbeton, die in der Regel im Winterhalbjahr abfallen müssten, konnte noch nicht eindeutig geklärt werden. Das vorliegende Verhalten der Konstruktion ist insbesondere dahingehend bemerkenswert, als dass der Aufbeton durch diverse Fugen unterbrochen und unbewehrt ist. Bei ausreichender Abkühlung sollten sich die Fugen quer zur Kraftrichtung öffnen und einen Abbau der zuvor durchgeleiteten Druckkräfte aus Temperaturausdehnung bewirken.

Die Kurve der mittleren Aufbetontemperatur bildet sowohl den Verlauf der jahreszeitlichen Temperaturschwankungen als auch den täglichen Temperaturgang deutlich ab.

Analog zu den Schwankungen der KMS-Summe sind auch die Temperaturschwankungen im Winter deutlich geringer als im Sommer. Um diesen Zusammenhang zu verifizieren, wurden innerhalb eines definierten Zeitraums (hier 24 h) die minimalen und maximalen Messwerte ermittelt und als laufende Werte ausgegeben. Man erhält hiermit eine Aussage über die maximale Amplitude im betrachteten Zeitfenster. Dieser Wert wird in der Grafik in Bild 14 für die mittlere Aufbetontemperatur und die KMS-Summe dargestellt.

Es zeigt sich hierin eine weitgehende Korrelation dieser beiden Kurven. Hieraus ist abzuleiten, dass die Schwankungen der gemessenen Kräfte offensichtlich unmittelbar an die Schwankungen der Aufbetontemperatur gekoppelt sind. Weiterhin wird die Aussage bestärkt, dass nicht die absolute Temperatur des Aufbetons die Größe der gemessenen Kräfte bestimmt, sondern deren Amplitude.

Um den Lastfall ‚Eisdruck‘ durch Ausfrieren von mit Wasser gefüllten Pressfugen zu betrachten, wurden die aufgezeichneten Temperaturdaten gefiltert, bei denen ein beliebiger Sensor im Aufbeton Temperaturen $< 0\text{ °C}$ aufwies und

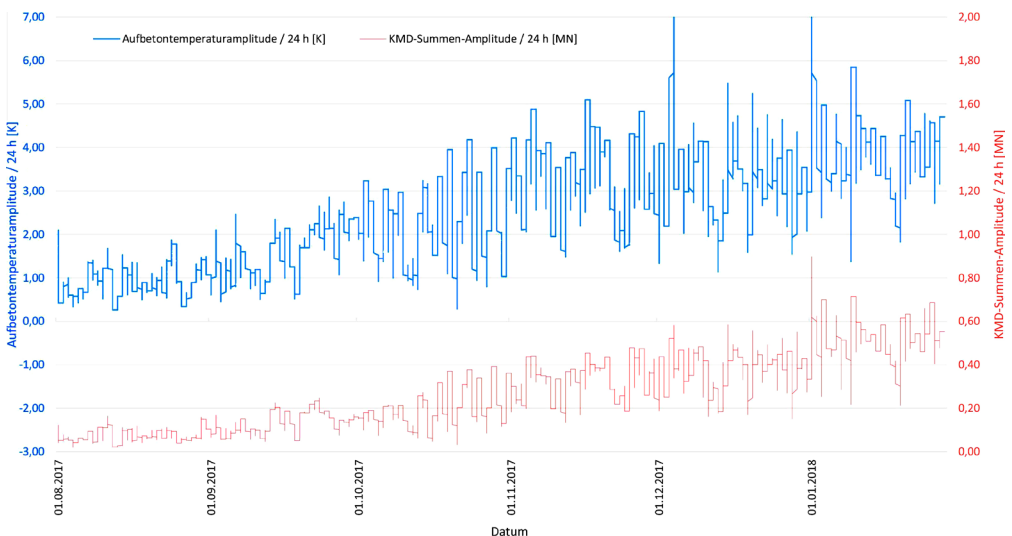


Bild 14: Aufbetontemperaturamplitude zu KMS-Summenamplitude

gleichzeitig ein fallender Temperaturrend im Aufbeton vorlag. Damit wurde der Fall ausgeschlossen, dass eine Krafterhöhung direkt aus einer Temperaturerhöhung auf einem Level $< 0^\circ\text{C}$ resultiert. Bei diesem betrachteten Lastfall ist eine Zunahme der Kräfte durch die mögliche Eisdrukbbildung im Vergleich zu den unmittelbar davor- und dahinterliegenden Zeiträumen zu erwarten. Im bisherigen Messzeitraum konnte ein solches Verhalten nicht registriert werden. Der Fall kann vor dem Monitoringzeitraum aufgetreten sein und ist für die Zukunft nicht auszuschließen. Ein maßgeblicher Anteil an den vorgefundenen Schäden ist auf Grund der Seltenheit der notwendigen Umgebungsbedingungen zum Ausfrieren der gefüllten Pressfugen unwahrscheinlich.

Beim postulierten Lastfall ‚Abgleiten‘ (ohne zusätzliche Einwirkung aus z. B. Temperatur) wurde ein ähnliches Verfahren angewendet. Dieser Lastfall tritt bei sonst gleicher äußerer Belastung am ehesten auf, wenn die Haftreibung zwischen Abdichtung und Aufbeton möglichst gering ist. Dies ist am wahrscheinlichsten, wenn sich Eis in der nachweislich zumeist mit Wasser gefüllten Lagerfuge bildet. Auch hier wurden nur Zeiträume mit einer relativen Abkühlung gewertet. Ein relevanter Kraftanstieg bei den vorgenannten Bedingungen konnte im Zeitraum des Monitorings nicht nachgewiesen werden.

4 Fazit

Als maßgebliche Ursache für die auftretenden hohen Kräfte im Aufbeton und die damit beobachteten Schäden an den Aufbetonrändern sind Unterschiede in der Dehnung von Überbauplatte und Aufbeton als Reaktion auf von außen einwirkende Temperaturveränderungen anzusehen. Diese leiten sich zum einen aus den stark abweichenden Bauteildicken beider Schichten ab, was zu stark unterschiedlichen absoluten Wärmekapazitäten und -trägheiten führt. Zum anderen ist der Aufbeton nahe der Brückenoberseite stark von der Sonneneinstrahlung und der Außenlufttemperatur beeinflusst, während die Überbauplatte in den

großen Brückenräumen kaum Änderungen der Umgebungstemperatur erfährt.

Die bisher dokumentierten Belastungen am neu hergestellten, horizontalen Widerlager des Aufbetons übersteigen zwischenzeitlich die für dessen Bemessung verwendete charakteristische Lastannahme. Ein maximales Lastniveau ist bisher nicht erreicht. Um eine verlässige Aussage zu den auftretenden Kräften im Aufbeton des Brückenbauwerks zu erhalten, ist die Fortsetzung der Datenerfassung angezeigt.

Literatur

- [1] Leonhardt, Andrä und Partner: Berliner Brücke – Neubau; Standsicherheitsnachweis. Dresden, 10/1997 (unveröffentlichtes, internes Dokument)
- [2] Leonhardt, Andrä und Partner: Berliner Brücke – Neubau, Ausführungsplanung. Dresden, 1997–2000 (unveröffentlichtes, internes Dokument)
- [3] Kühnapfel, J.: BW I/R 05 – Berliner Brücke – Gutachten zu Verschiebungen des Aufbetons an den Überbaurändern auf Basis Monitoring – Auswertung 08/2017 bis 03/2019. Leipzig, 18.07.2019 (unveröffentlichtes, internes Dokument)
- [4] Ingenieurgesellschaft für experimentelle Mechanik mbH: Entwicklung eines Monitoring-Systems zur Ermittlung von Druckkräften und Temperaturen – 1. Zwischenbericht. Markkleeberg, 22.08.2017 (unveröffentlichtes, internes Dokument)
- [5] Ingenieurgesellschaft für experimentelle Mechanik mbH: Entwicklung eines Monitoring-Systems zur Ermittlung von Druckkräften und Temperaturen – 2. Zwischenbericht. Markkleeberg, 01.06.2018 (unveröffentlichtes, internes Dokument)
- [6] Ingenieurgesellschaft für experimentelle Mechanik mbH: Entwicklung eines Monitoring-Systems zur Ermittlung von Druckkräften und Temperaturen – Bericht zu den Überfahrtsmessungen am 13.09.2018. Markkleeberg, 21.09.2018 (unveröffentlichtes, internes Dokument)

Bildquellen

Bild 1: Stadt Leipzig, Geodatenservice
 Bilder 2–4, 6, 12, 13, 14: Jens Kühnapfel
 Bild 5: Uwe Roland, Stadt Leipzig, Verkehrs- und Tiefbauamt (VTA)
 Bilder 7–11: Gunter Hahn

Das 11. Symposium „Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen“ (SEUB) fand am 08. März 2021 als digitale Veranstaltung an der TU Dresden statt. Im vorliegenden Buch sind die schriftlichen Beiträge zusammengestellt.

In der Keynote Lecture wurde über Versuche an einem Brückenbauwerk sowohl in situ als auch im Prüflabor berichtet – eine Verifizierung, die nur selten vorkommt. Danach spannte sich der thematische Bogen über die Tragfähigkeit von Gewölbebrücken, berührungslose Messverfahren im Praxistest, über Monitoring und schwingungsbasierte Messungen an Bauwerken hin zu faseroptischen Messsystemen und ihren Einsatzmöglichkeiten bei der Risserfassung. In weiteren Beiträgen wurde eine neue Methode zur verbesserten Bestimmung des Chloridgehalts im Beton vorgestellt, über ein Verfahren zur Spanndrahtbruchdetektion mittels Schallemission und über das Potential des kathodischen Korrosionsschutzes berichtet. Mit einem Bericht über eine erfolgreiche Probelastung einer mit Carbonbeton verstärkten Plattenbrücke endete die Tagung.

Das 12. SEUB ist für März 2023 geplant.

Der vorliegende Tagungsband ist als digitale Version Open Access auf der Homepage des Instituts für Massivbau der TU Dresden abrufbar.