

# Ertüchtigung und Instandsetzung von Stahlbrücken mit Hochfestem Beton am Beispiel der Rheinbrücke Maxau und die begleitende Bestimmung der dynamischen Brückeneigenschaften

Breuer P., Held S., Konopka E., Hochschule für Technik Stuttgart  
Gorski P., Politechnika Opolska, Opole/Polen  
Mrotzek S., Contec International GmbH, Bad Waldsee  
Serwin, B., Contec A/S, Aarhus/Dänemark

## Zusammenfassung

Die im Jahr 1966 eröffnete Rheinbrücke der B10 in Maxau bei Karlsruhe wurde im Jahr 2018 in vier Bauabschnitten mit einem extra für diesen Zweck entwickelten Stahlbetonsystem, mit einem hochfesten Stahlfaserbeton erfolgreich instandgesetzt. Bei der Planung wurden die Betoneigenschaften und die Details der Bewehrung des Systems an die örtlichen Gegebenheiten, nach den langjährigen Erfahrungen des dänischen Herstellers des Trockenbetons der Firma Contec A/S aus zahlreichen *ähnlichen* Baumaßnahmen in den Niederlanden angepasst. Vor Beginn der Instandsetzung und in der Bauphase wurden die dynamischen Eigenschaften der Brückenkonstruktion durch die Partnerhochschulen, Hochschule für Technik Stuttgart und Politechnika Opolska/Polen bestimmt. Die registrierten, charakteristischen Eigenschaften der Brückenkonstruktion sollen in der Zukunft ermöglichen, eine schnelle und zerstörungsfreie Bestimmung von eventuellen negativen Veränderungen in den instandgesetzten Stahlkonstruktionen, bzw. eine Grundlage für ein *dauerhaftes* Monitoring der Brücke bilden.

## 1. Einführung

Die ständig zunehmende Verkehrsentwicklung in Deutschland führte bei den nach dem Zweiten Weltkrieg projektierten Stahlbrücken bereits in den 1990-er Jahren zu ersten signifikanten Ermüdungserscheinungen in Form von Rissen an den Schweißnähten. Nach einer ähnlichen Situation in den Niederlanden hat das zuständige Ministerium (Rijkswaterstaat) gemeinsam mit der Uni Delft und der dänischen Firma Contec A/S aus Aarhus die Anwendung von ultrahochfesten Betonen (UHPC) für die Ertüchtigung orthotroper Fahrbahnplatten der Stahlbrücken im Rahmen eines langjährigen Forschungsprojektes untersucht [1, 2]. Die Ergebnisse der langjährigen Forschung wurden im Mai 2003 für die Verstärkung der Stahlplatte der Caland-Brücke und die Verhinderung der Bildung von weiteren Ermüdungsrissen als Pilotprojekt umgesetzt.

Seit 2003 wurden mit dem neuen System insgesamt 12 große Stahlbrücken in den Niederlanden dauerhaft verstärkt [3]. Im Netz der Bundesstraßen in Deutschland befinden sich derzeit mehr als 51.000 Brücken, davon sind 5,8 % der Bauwerke aus Stahl [4]. Die rasante Verkehrsentwicklung mit der Zunahme des KFZ-Verkehrs von 1970 bis 2015 nur auf den Bundesautobahnen um ca. 220 % führt bei Straßenbefestigungen und Bauwerken zu immer größeren Beanspruchungen. Nach den neuesten

Verkehrsprognosen wird der Güterverkehr auf den Straßen der EU bis 2030 nochmals um etwa 40 % zunehmen. Auch die nach StVZO zulässigen Gesamtgewichte und Achsenlasten sind in den letzten Jahren deutlich gestiegen [5]. Eine im Jahr 2011 in Deutschland durchgeführte Machbarkeitsstudie hat ergeben, dass die Verstärkung der orthotropen Fahrbahnplatten der Stahlbrücken am besten durch das Aufbringen einer dünnen Schicht aus Hochfestem (HPC) oder Ultrahochfestem Beton (UHPC) erreicht wird. Für die geplante Verstärkung von Stahlbrücken in den Niederlanden hat die Firma Contec A/S einen Kompositzement „Binder N“ speziell für diesen Zweck entwickelt und ein fugenloses UHPC-Stahlbeton-System mit Stahlfasern „Contec-Ferroplan®“ patentieren lassen. In der Betontechnologie werden Betone von der Festigkeitsklasse C55/67 bis einschließlich C100/115 als Hochfester Beton und alle Betone mit der Druckfestigkeit von  $> 115 \text{ N/mm}^2$  (MPa) als Ultrahochfester Beton bezeichnet. In Deutschland wird Hochfester Beton seit 1990 im Hochbau eingesetzt [6]. Das „Contec-Ferroplan®“-System wurde durch das Deutsche Institut für Bautechnik in Berlin als „Contec Ferroplan®“-Estrichdichtschicht“ im Anwendungsbereich der Abdichtung von Rückhalteeinrichtungen in Anlagen zum Lagern, Abfüllen und Umschlagen (LAU-Anlagen) wassergefährdender Flüssigkeiten mit der Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-74.1-71 gemäß der technischen

Regel wassergefährdender Stoffe (TRwS) 781, 782 und 784 zugelassen.

## 2. Instandsetzung der Rheinbrücke in Maxau

Die Rheinbrücke Maxau im Zuge der B 10 bei Karlsruhe wurde für maximal 33.000 Fahrzeuge pro Tag als

eine Schrägseilstahlbrücke mit je zwei Fahrstreifen pro Fahrtrichtung und mit einer Länge von 292 m projektiert. Sie ist im Jahr 1966 für den Verkehr freigegeben worden. Die Dicke der orthotropen Stahlfahrbahnplatte beträgt 12 mm. Über die Maxau-Brücke fahren täglich rd. 80.000 Fahrzeuge mit einem Schwerververkehrsanteil von rund 9 %.



Abbildung 1: Maxau-Brücke, Ansicht von Nord-Ost

Bereits in 1990-er Jahren wurden die ersten Ermüdungsrisse an den Schweißnähten festgestellt. Im Jahr 2007 wurden die ersten Instandsetzungsmaßnahmen der aufgetretenen Schweißnahttrisse durchgeführt. Eine vom Regierungspräsidium Karlsruhe im Jahr 2011 veröffentlichte Machbarkeitsstudie hat auf Grundlage eines durchgeführten Vergleichs ergeben, dass die optimale Verstärkung mit einer dünnen Schicht aus Ultrahochfestem Beton die vorteilhafteste Methode aus technischer

und wirtschaftlicher Sicht sei [7]. Da eine Instandsetzung von Stahlbrücken mit einem UHPC-System in Deutschland noch nicht angewandt worden war, hat das Land Baden-Württemberg beschlossen, vor dem geplanten Einsatz auf der Rheinbrücke Maxau ein UHPC-System im Rahmen eines Pilotprojektes an einer kleinen Stahlbrücke zu erproben. Für diesen Zweck wurde die kleine Bahnbrücke in Beimerstetten im Zuge der L 1239 bei Ulm gewählt.



Abb. 2: Pilotprojekt in Beimerstetten, links Verlegen des Betons im Zelt, rechts Befüllen eines Zwangsmischers mit dem vorgefertigten Contec-Trockenbeton aus einem Big-Bag

Die Betonarbeiten in Beimerstetten wurden im Jahr 2014 durch die Firma Leonhardt Weiss aus Göppingen ausgeführt. Die Firma Contec International GmbH, Bad Waldsee hat den vorgeschriebenen Trockenbeton mit der Festigkeitsklasse C90/105 mit einem Stahlfasergehalt von  $80 \text{ kg/m}^3$  geliefert. Die tragenden Längs- und Querbewehrung wurde mit einem Durchmesser von 12 mm in einem Raster von 75 mm ausgeführt. Der Hochfeste Beton wurde in einer Schichtdicke von 65 mm eingebaut. Die Betonoberfläche wurde mit einer mit Bauxitsplitt abgestreuten Epoxidharzschicht zur dauerhaften Sicherstellung einer ausreichenden Fahrbahngriffigkeit beschichtet. Das in Beimerstetten verwendete HPC-System wurde mit dem Innovationspreis bei der internationalen Bauausstellung BAUMA 2015 geehrt.

Bei dem aktuellen Projekt wurde im Rahmen der geplanten Verstärkung der Maxau-Brücke ein neues Belagssystem als Ersatz für den alten Asphaltbelag auf der Fahrbahntafel aufgebracht, nämlich: Haftschrift Boligrip W/MB, HPC-System Contec-Ferroplan® nach der Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Nr. Z-74.1-71 des Deutschen Instituts für Bautechnik, Berlin, Tabelle 2, Variante B und Dünnbelag Boligrip W24414/4. Die Haftzugfestigkeit Boligrip W/MB-Schicht wurde durch die Planer mit  $\geq 7,0 \text{ N/mm}^2$ , des HPC-Systems auf der Boligrip W/MB-Schicht von  $\geq 3,0 \text{ N/mm}^2$  und der Boligrip W24714/4-Schicht  $\geq 3,5 \text{ N/mm}^2$  vorgeschrieben. Die

Ebenheit der dünnen Boligrip W24714/4-Schicht sollte 3 mm/3 m betragen.

## 2.1 System „Contec Ferroplan®“

Die Entwicklung der modernen Zusatzmittel, sog. Superplastifikatoren (z. B. Polycarboxylatether (PCE)), und die Verwendung von Siliziumdioxid (Nano- und Mikropartikel) hat ermöglicht, die Betonfestigkeiten von mehr als  $115 \text{ N/mm}^2$  auch unter Baustellenbedingungen sicher zu erreichen. Das von der Firma Contec A/S entwickelte „Contec-Ferroplan®“-System basiert auf dem zuvor Kompositzement „Binder N“, der mit der Anwendung von modernsten Betonzusatzmitteln und Zusatzstoffen so hergestellt wird, dass das Zugabewasser stark reduziert und die Betondruckfestigkeit auf den Baustellen bis zu  $180 \text{ N/mm}^2$  sicher erreicht werden kann, je nach der Art der verwendeten Gesteinskörnungen.

Der vor Ort hergestellten HPC-Betons wird in dünnen Schicht von 40 mm bis 70 mm aufgebracht. Die Entstehung unerwünschter Rissbildung mit Rissbreiten von  $> 0,1 \text{ mm}$  wird durch die Zugabe von speziellen Stahlfasern verhindert.

Die Hauptbewehrung besteht aus einer engmaschigen Betonstahlmatte, die durch Schraubanker oder eingeschweißte bzw. aufgeklebte Niederhalter mit Haken mit dem jeweiligen Untergrund dauerhaft verbunden wird.

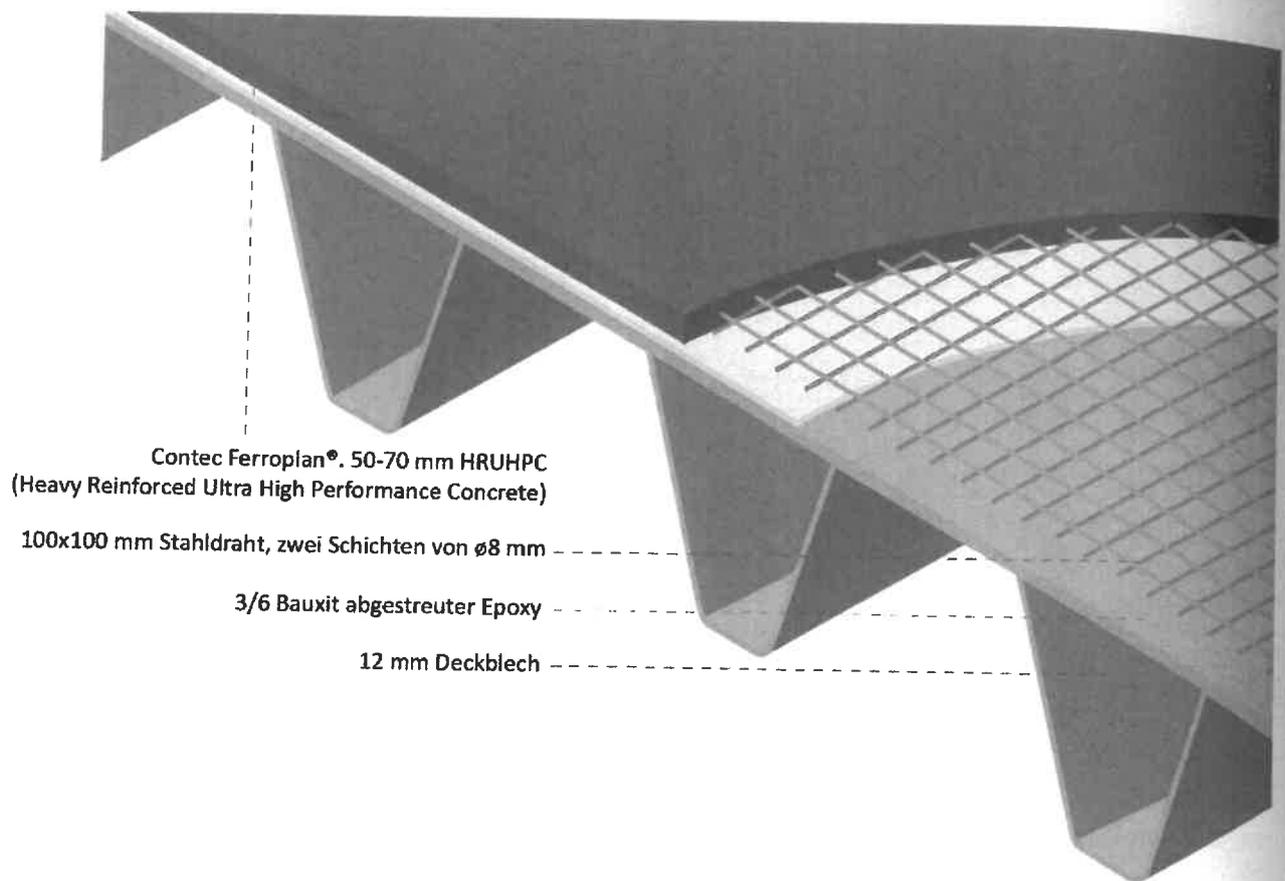


Abb. 3: Schematische Darstellung der Verstärkung von Stahlbrücken mit Contec Ferroplan®

## 2.2 Erstprüfung der Betonmischung

Nach der Baubeschreibung wurde im Labor der Öffentlichen Baustoffprüfstelle an der Hochschule für Technik Stuttgart eine umfangreiche Erstprüfung (Eignungsprüfung) durchgeführt. Im Rahmen dieser Erstprüfung wurden folgende Frisch- und Festbetonprüfungen ausgeführt:

am Frischbeton: Bestimmung von Rohdichte, Luftgehalt, Ausbreit- und Verdichtungsmaß bei unterschiedlichen Frischbetontemperaturen und

am Festbeton: Ermittlung von Druckfestigkeit im Alter von 24 h, 7 d, 14 d, 28 d, 56 d und 90 d, Biegezugfestigkeit, Biegezugfestigkeit und Nachrissbiegezugfestigkeit nach DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“, Elastizitätsmodul, Frost- und Tausalz widerstand mit dem CDF-Test,

Chloridwiderstand nach der NT Build 492 „Nordtest Method“ und Entwicklung der Hydratationswärme.

## 2.3 Probefeld

Nach der erfolgreichen Erstprüfung wurde vor der Betonage auf der Brücke durch das Generalunternehmen eine Probeplatte auf dem Baustellengelände vorbereitet, an der das Auftragen der Haftschrift (Epoxidharz mit Bauxit-Splitt), das Aufkleben der Niederhalter und der Randstellprofile, das Verlegen der Bewehrung einschließlich der Abstandshalter, sowie der Einbau des HPC-Betons erprobt werden sollte. An der o. g. Probeplatte wurden die Eigenschaften der geplanten Verstärkung bestimmt und deren angestrebte Qualität erfolgreich bestätigt.



Abb. 4: Probefeld auf der Baustelle in Maxau

#### 2.4 Bauphase - Betonierarbeiten

Die Betonierarbeiten erfolgten in vier Abschnitten vom 19./20.04.19 und bis zum 26.10.2019. Die Betonherstellung erfolgte auf der Baustelle aus separat gelagerten Ausgangsstoffen: Contec „Binder N“, Contec Quarzsand B9 mit der Körnung 0,1-1,5 mm, Contec Hyperit-Splitt B7 2 – 5 mm und 75 kg/m<sup>3</sup> Stahlfasern 0,4 x 12,5 mm mit einem w/Binder-Wert von 0,32. Der Frischbeton wurde mit Betonmischfahrzeugen zur Brücke transportiert. Dort wurde er in speziell für diesen Zweck hergestellte, auf Traktoranhängern befestigten Behältern mit einem

Volumen von 1 m<sup>3</sup> umgefüllt und zur Einbaustelle mit kleinen Traktoren transportiert.

Jede Betoncharge wurde nach ihrer Herstellung in den Mischfahrzeugen auf die vorgeschriebenen Frischbetoneigenschaften an der stationären Betonmischanlage überprüft. Der Einbau und die Verdichtung des Betons erfolgte mit einem speziell für diesen Zweck vorbereiteten Straßenfertiger in einem Schutzzelt mit Klimatisierung und bei Vollsperrung des Verkehrs. Unmittelbar nach der Verdichtung erfolgte das Glätten und im Nachgang wurde der flüssige Verdunstungsschutz „Contec AC“ mit einer Menge von 100 g/m<sup>2</sup> aufgespritzt (Curing-Mittel).



Abb. 5: Längs- und Querbewehrung des 1. Bauabschnittes im klimatisierten Zelt am 19.04.2019



Abb. 6: Transport des Frischbetons mit einem Traktor zur Einbaustelle und der Einbau des Betons mit einem speziellen Fertiger



Abb. 7: Verlegen des Betons und Aufbringen des Verdunstungsschutzes nach dem Verdichten



Abb. 8: mechanisches Glätten der Betonoberfläche

Nach dem Erreichen der Druckfestigkeit von mind. 35 N/mm<sup>2</sup> wurde die Betonoberfläche für das Aufbringen des Dünnschichtbelags Boligrip W24414/4 mittels Kugelstrahl-Behandlung vorbereitet. Nach dem Aufbringen des Dünnschichtbelags und der erfolgreichen Durchführung aller Bestätigungsprüfungen konnte die Brücke für den Straßenverkehr freigegeben werden.

### 3. Monitoring der charakteristischen dynamischen Eigenschaften der Brückenkonstruktion

Windlast regt schlanke Bauwerke, wie Türme, Kamine und Brücken, zu Eigenschwingungen an. Brücken werden zusätzlich durch Verkehrsbelastung zu Schwingungen angeregt. Die Hochschule für Technik Stuttgart und die Politechnika Opolska/Polen befassen sich seit Jahrzehnten im Rahmen ihrer Hochschulpartnerschaft mit der Quantifizierung von Auslenkungen und Schwingungen an der Spitze von hohen Türmen und Kaminen sowie an Brücken mittels GPS-Monitoring. Hierbei wurde das sog. GPS-Basislinienverfahren im kinematischen Modus eingesetzt, das unter günstigen Bedingungen für die Bestimmung der horizontalen Auslenkung eine relative Lagegenauigkeit von < 5 mm liefert.

Die von den Autoren bisher überwachten Bauwerke wiesen Eigenschwingungen auf mit einer Periodendauer von 2 bis 6 Sekunden. Die GPS-Positionen bei der Auslenkung durch Windeffekte wurden mit Datenfrequenzen von 1, 2, 10 und 20 Hertz aufgezeichnet. Bei einer Datenregistrierung mit 20 Hz und einer Schwingungsperiode von 2 bis 6 Sekunden wird eine Anzahl von 40 bis 120

Stützpunkten pro Schwingungsperiode aufgezeichnet. Aus dieser hohen Zahl der Stützpunkte in Verbindung mit einem längeren Beobachtungsintervall lassen sich die Schwingungsparameter mit hoher Signifikanz ermitteln und analysieren. Die Schwingungsparameter (Frequenz, Amplituden, Phase, Dämpfung) werden durch die statischen und dynamischen Eigenschaften des Bauwerkes und von der Ausbildung seines Fundamentes bestimmt. Es ist davon auszugehen, dass eine Veränderung der Schwingungsparameter gewisse Hinweise geben auf Änderungen der Bauwerkseigenschaft aufgrund von Schäden und Materialermüdung.

#### 3.1 GPS-Methode

Bei dem angewendeten GPS-Monitoring wurde von dem verfügbaren GNSS (Global Navigations-Satellite System) bisher nur das amerikanische GPS (Global Positioning System Navstar) genutzt. Bei allen satellitengestützten Systemen ist aufgrund der geometrischen Konstellation im Satelliten-Orbit die erreichbare Lagegenauigkeit in der Grundriss-Ebene deutlich besser als die Genauigkeit der Höhenbestimmung. Der mittlere Fehler bei der Ermittlung der Höhenkomponente  $z$  ist ungefähr um den Faktor 2 größer als derjenige der Lage-Komponenten  $x$  und  $y$ . Aus diesem Grund war es interessant, das bisher angewendete GPS-Verfahren an einer Brücke zu erproben, einem Projekt an dem die vertikale Schwingungskomponente von großem Interesse ist. Das GPS-Monitoring an der Maxau-Brücke wurde begleitet durch eine gleichzeitige Messung mit einem

Accelerometer im Inneren des Brückenkörpers. Diese Messungen wurden von Mitgliedern der Politechnika Opolska ausgeführt. Die Ergebnisse der unterschiedlichen Messmethoden sollten verglichen und gleichzeitig die Eignung der GPS-Methode für eine zuverlässige Bestimmung der Höhenkomponente getestet werden. Aufgrund des geplanten zeitlichen Ablaufes der Brücken-Instandsetzung entstand die Idee, die dynamischen Eigenschaften des Bauwerkes vor Beginn der Bauarbeiten und während der Bauphase sowie nach der Beendi-

gung der Baumaßnahmen zu bestimmen und eventuell auftretende Veränderungen mit den theoretischen Erwartungen zu vergleichen. Für die Überwachungsmessungen an der Brücke sollten folgende Zeitpunkte ins Auge gefasst werden: der Zustand vor dem Umbau, nach dem Ausbau des alten Fahrbahnbelages, nach der Ertüchtigung der Brücke mit dem modifizierten „FERROPLAN®“-System und abschließend nach der Inbetriebnahme aller vier Fahrbahnen. Abbildung 9 zeigt eine Skizze der ‘einhüftigen’ Schrägseilbrücke.

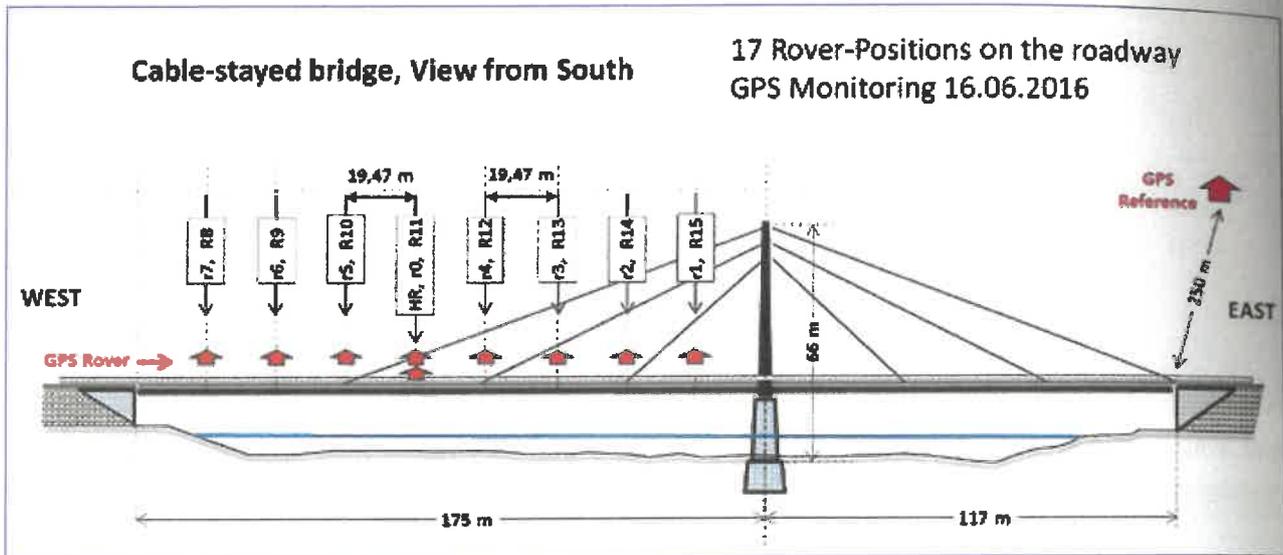


Abb. 9: Rheinbrücke Karlsruhe-Maxau im Längsprofil mit Markierung der GPS-Messstellen im westlichen Brückenfeld

Die Brückenachse verläuft annähernd in West-Ost-Richtung. Die Höhe des Mittelpylons beträgt 66 m. Dieser teilt den Brückenkörper in zwei asymmetrische Felder von 175 m (West) und 117 m Länge (Ost). Jedes Brückenfeld ist am Pylonen an drei Seilbündeln aufgehängt, die im Mittelstreifen der Brücke verankert sind (Abb. 9 und 10). Am 16.06.2016 – vor Beginn der Umbaumaßnahmen – fanden Accelerometer-Messungen im Inneren des Brückenkörpers und gleichzeitig GPS-Messungen auf der Brücke an den äußeren Fahrbahnrandern statt. Nachfolgend werden diese GPS-Messungen beschrieben und ihre Ergebnisse mit den

Resultaten der Accelerometer-Messung verglichen. Die GPS-Messungen beschränkten sich auf das längere westliche Brückenfeld, wo die größeren Vibrationen durch Verkehrsbelastung zu erwarten sind. Innerhalb dieses Brückenfeldes wurden - jeweils einander gegenüberliegend – entlang des südlichen und des nördlichen Straßenrandes in gleichen Abständen nacheinander eine Reihe von GPS-Messungen ausgeführt. Die Positionen dieser Mess-Stellen auf Parallelen zur Brückenachse waren durch die Lage der Kammern im Brückenkörper vorgegeben, wo die Messungen mit dem Accelerometer stattfanden.

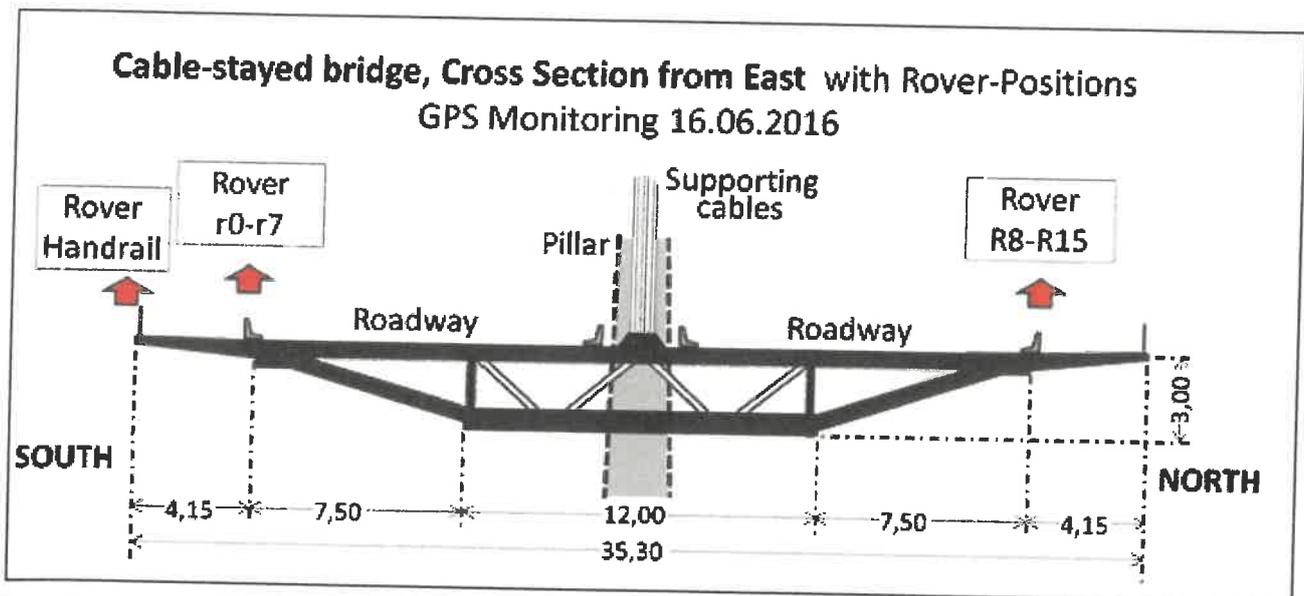


Abb. 10: Positionierung der GPS-Antennen in Bezug auf das Brücken-Querprofil

### 3.2 Messverfahren

Als Hilfsmittel für die GPS-Beobachtungen standen 4 Receiver von Leica Geosystems zur Verfügung mit einer Aufzeichnungsrate von 20 Hz. Bei der Messung wurde das Basislinien-Verfahren angewendet, das für den 3D-Vektor zwischen Referenz und Rover eine hohe relative Genauigkeit verspricht. Hierbei wird für die Referenz-Station ein unveränderlicher stabiler Standpunkt gewählt. Die Rover-Antenne wird am zu beobachtendem Objekt befestigt. Wählt man die Basislinie, die Raumstrecke zwischen Referenz und Rover, kürzer als 10 km, so fallen für den 3-Vektor zwischen beiden Stationen die Einflüsse der Ionosphäre und der Atmosphäre auf die Ausbreitung der Satellitensignale weitgehend heraus.

Die Referenz-Station wurde nördlich der Brücke in einer Entfernung von rund 250 m am rechtsrheinischen Ufer installiert (Abb. 11). Die verbleibenden 3 Receiver wurden als Rover-Stationen eingesetzt, zwei als Permanent-Stationen und eine als mobile Station. Die erste Einheit wurde in der Mitte des westlichen Brückengeldes am südlichen Straßenrand auf einem Stativ als permanente Ro-

ver-Station r0 aufgestellt. Ein zweiter ortsfester Receiver wurde als permanente Rover-Station in der Mitte des westlichen Brückengeldes (in Verlängerung der Geraden R11-r0) auf dem südlichen Brückengeländer befestigt, im Abstand von 4 m zu Rover r0 (Abb. 10).

Die verbleibenden 3 Receiver wurden als Rover-Stationen eingesetzt, zwei als Permanent-Stationen und eine als mobile Station. Die erste Einheit wurde in der Mitte des westlichen Brückengeldes am südlichen Straßenrand auf einem Stativ als permanente Rover-Station r0 aufgestellt. Ein zweiter ortsfester Receiver wurde als permanente Rover-Station in der Mitte des westlichen Brückengeldes (in Verlängerung der Geraden R11-r0) auf dem südlichen Brückengeländer befestigt, im Abstand von 4 m zu Rover r0 (Abb. 10).

Das Prinzip des Basislinien-Verfahrens besteht darin, dass auf beiden Endpunkten der Basis gleichzeitig die Signale identischer Satelliten empfangen werden. Für das angestrebte Verfahren der kinematischen Lösung ist eine Mindestanzahl von fünf verfügbaren Satelliten erforderlich. Diese Bedingung ist täglich bei freier Sicht zum Himmel über 24 Stunden weitgehend gesichert.

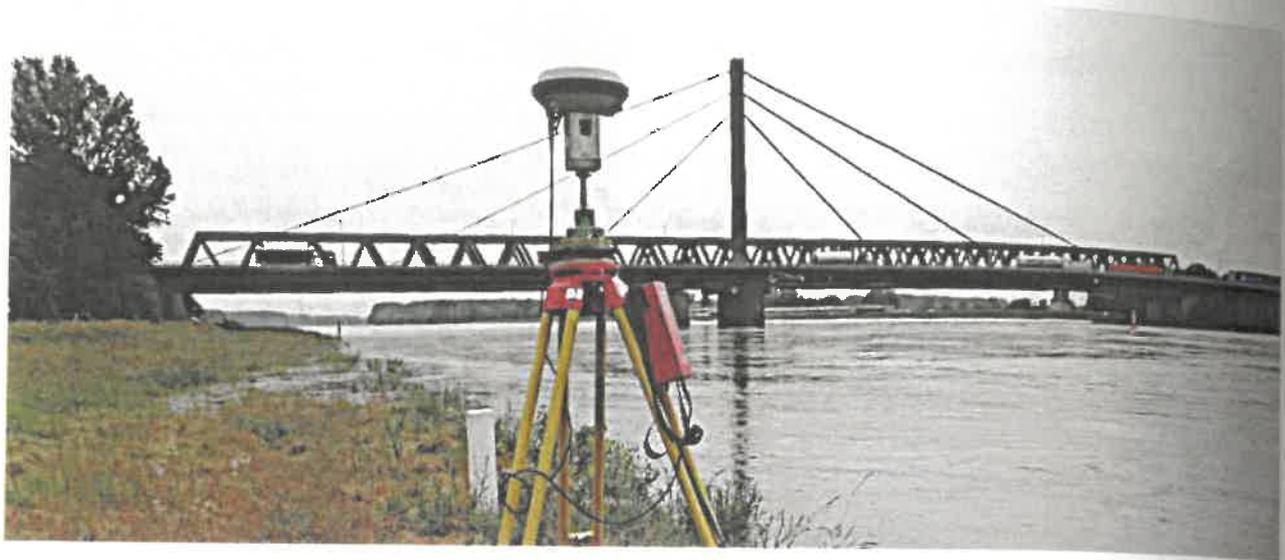


Abb. 11: GPS-Referenz-Station, 250 m flussabwärts am rechten Rheinufer

Sichthindernisse zwischen Receiver und Satellit, wie Bäume, Bauwerke oder Leitungen, schirmen die Satellitensignale ab oder reflektieren diese, wodurch verlässige Positionsbestimmungen erschwert oder verhindert werden. Da in der nördlichen Hemisphäre die Spuren der Satelliten einen gewissen Himmelssektor aussparen, sind beim vorliegenden Objekt auf der Südseite der Brücke bessere Empfangsbedingungen zu erwarten als auf der nördlichen Brückenseite. Für die Nordseite stellen der Mittelpylon und die Schrägseile wegen ihrer Süd-Lage gewisse ‚Sichthindernisse‘ dar. Bei der nachfolgenden Auswertung traten die genannten Probleme kurzzeitig bei der Auswertung der Messungen auf den Rover-Stationen R8-R15 auf. Die 15 Rover-Positionen (r1-r7 und R8-R15) wurden jeweils für 10 Minuten besetzt und lieferten pro Standpunkt 12.000 Datensätze. Die beiden permanenten Rover-Positionen (r0 und HR=Handrail) erfassten die Beobachtungsdaten über rund 5 Stunden und lieferten bis zu 360.000 Datensätze.



Abb. 12: GPS-Rover-Station R8 am nördlichen Fahrbahnrand

### 3.3 Auswertung der GPS-Messungen

Die Auswerte-Ergebnisse für die beiden stationären Messpunkte und die 15 mobilen Messpunkte werden in Tabelle 1 gemeinsam mit den Ergebnissen der Accelerometer-Messung aufgelistet, welche von der Politechnika Opolska ausgeführt und ausgewertet wurden.

Tabelle 1: Vergleich der Frequenz-Bestimmung für die Eigenschwingung aus der Höhenkomponente mittels GPS- und Accelerometer-Messungen [11]

**Rhine Bridge Karlsruhe 16.06.2016 Vibration Monitoring - Hight Component**

GPS-Measurements - Baseline Postprocessing in Kinematic Mode							Accelerometer		
GPS Equipment Leica Geosystems							MEMS PCB 3711E112G		
Reference GS15, Rover GPS1200							Observations		
Rover	Rata Rate	Date	Time [hh:mm:ss]	Time Interval	Data Sets	Height Compon. Frequency [Hz]	Time [hh:mm:ss]	Length	Frequency [Hz]
Rover r0	2 sps	16.06.2016	12:51	55m 38s	6.677	0,523			0,513
Rover r0	20 sps	16.06.2016	13:46	3h 39m	262.897	0,523		6h 28m	÷
Rover HR	20 sps	16.06.2016	12:37	4h 52m	351.461	0,522			0.531
				[sec]				[sec]	
r1	20 sps	16.06.2016	14:38:17	604	12.009	0,549	18:08:29	867,8	0,513
r2	20 sps	16.06.2016	14:24:26	603	12.070	0,521	17:16:41	775,0	0,517
r3	20 sps	16.06.2016	14:09:37	609	12.198	0,515	10:39:43	634,8	0,525
r4	20 sps	16.06.2016	13:55:00	603	12.065	0,523	16:42:29	879,3	0,519
r5	2 sps	16.06.2016	13:03:24	636	1.274	0,523	15:54:37	919,6	0,518
r6	2 sps	16.06.2016	13:17:50	602	1.206	0,522	15:15:36	900,4	0,519
r7	20 sps	16.06.2016	13:33:43	605	12.103	0,510	13:40:30	896,0	0,513
R08	20 sps	16.06.2016	16:59:12	608	12.160	0,519	14:37:11	972,1	0,519
R09	20 sps	16.06.2016	16:44:31	607	12.142	0,520	14:57:34	945,9	0,525
R10	20 sps	16.06.2016	16:31:34	605	12.116	0,523	15:35:07	903,6	0,519
R11	20 sps	16.06.2016	16:21:19	399	7.985	0,510	11:15:47	905,1	0,525
R12	20 sps	16.06.2016	16:03:27	371	6.585	0,513	16:25:27	849,9	0,525
R13	20 sps	16.06.2016	15:50:16	606	12.135	0,507	16:59:46	860,8	0,531
R14	20 sps	16.06.2016	15:35:43	615	12.300	0,515	17:32:23	817,2	0,519
R15	20 sps	16.06.2016	15:22:38	607	12.147	0,509	17:49:20	951,0	0,519
						0,519	← Mean Value →		0,520
						0,009	Standard Deviation		0,005

Die Tabelle enthält die Zusammenstellung aller Frequenzbestimmungen für die natürliche Grundschwingung (Eigenschwingung) aus der Höhenkomponente. Die Ergebnisse beider Messmethoden, der GPS- und der Accelerometer-Messung werden verglichen. Die Positionen der Mess-Stellen sind den Abbildungen 9 und 10 zu entnehmen. Die Accelerometer-Sensoren wurden innerhalb des Brückenkastens, die GPS-Antennen an identischen Grundrisspositionen oberhalb dieser Sensoren auf der Oberfläche der Brücke positioniert. Beide Messverfahren liefen am selben Tag ab, jedoch in unabhängiger zeitlicher Reihenfolge. Die drei GPS-Langzeitmessungen im oberen Teil von Tabelle 1 stimmen sehr gut überein (Mittel 0.523 Hz). Im unteren Tabellenteil wurden die 10-Min-GPS-Sessions den 15-Min-Intervallen der Accelerometer-Messung gegenübergestellt. Über die 15 Messungen jeder Serie

wurden das arithmetische Mittel und die Standardabweichung der Stichproben errechnet. Die Mittelwerte aus den beiden voneinander unabhängigen Mess-Verfahren stimmen sehr gut überein ( $f=0.519$  Hz und  $f=0.520$  Hz). Die errechneten Standardabweichungen der Stichproben unterscheiden sich stärker (GPS  $\pm 0.009$  Hz, Accelerometer  $\pm 0.005$  Hz), betragen jedoch nur 2% bzw. 1% der gemessenen Größe. Die größere Unschärfe der GPS-Messung erklärt sich aus der bekannten schwächeren Bestimmung der GPS-Höhenkomponente. Beiden Messreihen ist gemeinsam, dass sich die Frequenz der Brückenschwingung unabhängig zeigt von der Position der Mess-Stelle. Zu Beginn der Messreihe wurde versehentlich bei den drei 10-min-Sessions die Daten nicht mit 20 Hz (20 sps=samples per second), sondern nur mit 2 Hz (2 sps) aufgezeichnet. In Tabelle 1 ist abzulesen, dass diese 10-fach geringere Dichte der Registrierungen

die Ergebnisse der Frequenzanalyse offensichtlich nicht beeinflusst. Hieraus kann geschlossen werden, dass mit einer Steigerung der GPS-Registrierungsrate, beispielsweise auf 50 sps, vermutlich keine Genauigkeitssteigerung bei der Bestimmung der Schwingungsfrequenz erreichbar ist. Bei der Accelerometer-Messung wurden neben der Grundschwingung eine Reihe von harmonische Oberschwingungen (annähernd ganzzahlige Vielfache der natürlichen Grundschwingung) nachgewiesen.

### 3.4 Ergebnisse

An der 292 m langen Schrägseilbrücke der B10, die bei Karlsruhe den Rhein überquert, wurden an 17 Positionen des westlichen Brückenfeldes die von der Verkehrsbelastung verursachten vertikalen Schwingungen mittels GPS und Accelerometer gemessen. Bei der GPS-Messung kam das Basislinien-Verfahren mit Dual-Frequenz-Empfängern und einer Aufzeichnungsrate von 20 Hz (20 sps) zur Anwendung. Obwohl die Genauigkeit von GPS in Bezug auf die Höhenkomponente etwa um den Faktor 2 geringer ist als die Positionierungsgenauigkeit in der Horizontal-Ebene, wurden bei der Bestimmung der vertikalen Eigenschwingung der Brücke signifikante Ergebnisse erzielt. Verformungen der Brücke durch globale Strahlung oder durch Windlast waren während der Messkampagne nicht nachweisbar. Die Mittelwerte aller Frequenzbestimmung aus GPS- und Accelerometer-Anwendung stimmen überein ( $f=0.519$  Hz und  $f=0.520$  Hz). Die Standardabweichung der Bestimmung sind bei GPS etwa doppelt so groß ( $SA=\pm 0.009$  Hz) wie bei der Accelerometer-Messung ( $SA=\pm 0.005$  Hz). Oberschwingungen zur Eigenschwingung der Brücke waren nur mittels des Accelerometers signifikant nachweisbar. Aus den 17 Positionen der GPS-Messungen auf dem Brückenfeld wurden ein Längs- und ein Querprofil zusammengestellt und die Schwingungsparameter verglichen. Die Frequenzen zeigten sich konstant und unabhängig von der Position im Brückenfeld. Gegenläufige Schwingungen an gegenüberliegenden Fahrbahnrändern waren nicht nachweisbar. Es wurde bestätigt, dass GPS-Methoden für die Messung der Eigenschwingung eines Brückenbauwerkes geeignet sind

### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Die wirtschaftliche und praktische Verwendung von Hochfesten bzw. Ultrahochfesten Betonen für die Ertüchtigung von Stahlbrücken wurde auf mehreren Baustellen in den Niederlanden und auf zwei Stahlbrücken in Deutschland erfolgreich bestätigt. Die zuvor in Kapitel 3 beschriebenen Verfahren zur Bestimmung der Frequenz der Eigenschwingung der Brücke sollen dazu dienen, eine eventuelle Veränderung der dynamischen Eigenschaften des Bauwerks im Laufe seiner Lebenszeit zu erkennen. Hierbei wird davon ausgegangen, dass sich Schäden am Bauwerk, Umbauten und Renovierungsarbeiten oder Al-

terungsprozesse auf die dynamischen Eigenschaften der Brücke auswirken.

Bei der Rheinbrücke Karlsruhe-Maxau wurden die Eigenschwingungen des Bauwerks vor Beginn der Sanierungsarbeiten durch zwei unabhängige Messmethoden signifikant und übereinstimmend erfasst. Weitere Messungen wurden während der Bauzeit ausgeführt. Nach Abschluss der Bauarbeiten sollten weitere Messungen folgen, die jedoch wegen der Corona-Virus-Pandemie nicht stattfinden konnten. Der Vergleich der ersten Messung mit den Folgemessungen wird mit Spannung erwartet.

### Literatur

- [1] Braam, R., Research Contec Ferroplan, Various reports, Delft University of Technology, 2002 – 2005, Delft
- [2] Braam, R., Buitelaar, P., Kaptijn, N., HPC as bridge deck overlay. Technological-, structural- and durability aspects, Nr. 3, Cement 2003
- [3] Denkinger, M., Buitelaar, P., Ertüchtigung orthotroper Fahrbahnplatten von Stahlbrücken, Stahlbau, Heft 7, ISSN 0038-9145
- [4] Friedrich, H., Quaas, B., Stahlbrücken. Bestandanalyse Erhaltung und Erweiterung, Tagungsband, 27.09.2017, Fachgespräch Stahlbrückenbau, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach
- [5] Marzahn, G., Brückenbau und Brückenerhaltung im Bundesfernstraßennetz, Tagungsband, 27.09.2017, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach
- [6] König, G., Grimm, R., Mayer, J., Erläuterungen zur Richtlinie Hochfester Beton, Bautechnik 74 (1997), Heft 4
- [7] Zembrot, M., Ertüchtigung der Rheinbrücke Maxau, Tagungsband, 27.09.2017, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach
- [8] Kämpf/Stadelmayer, Erprobung kinematischer GPS-Methoden zur Bestimmung kurz und lang periodischer Bauwerksbewegungen an der Kochertal-Autobahnbrücke A6, unveröffentlichte Diplomarbeit 1999, HFT Stuttgart
- [9] Breuer, P., Konopka, E., Messung der Auslenkung von Türmen und Kaminen mittels GPS-Methoden. Monitoring displacements of towers and chimneys applying GPS methods. Monitoring przemieszczeń wysokich obiektów budowlanych metodą GPS, Forschungsberichte der HFT Stuttgart Band 98 (2008) ISBN 978-3-940670-09-3
- [10] Held, S., Schwingungsanalyse eines Brückenbauwerkes mittels verschiedener geodätischer Verfahren – unveröffentlichte Masterarbeit, HFT Stuttgart 2017
- [11] Breuer, P., Konopka, E., Messung der Auslenkung von Türmen und Kaminen mittels GPS-Methoden. Monitoring displacements of towers and chimneys applying GPS methods. Monitoring przemieszczeń

wysokich obiektów budowlanych metodą GPS, Forschungsberichte der HFT Stuttgart Band 110 (2019) ISBN 978-3-940670-20-5

- [12] P., Górski, Breuer, P., Konopka, E., Napieraj, M., Effectivness of GPS technology in monitoring of traffic induced response of highway steel bridge, 9. International Symposium on Steel Bridges 2018, Tagungsband, Prag
- [13] Breuer, P., Chmielewski, T., Górski, P., Konopka, E., Application of GPS technology to measure-

ments of displacements of high-rise structures due to weak winds, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 90, 2002

- [14] Górski, P., Dynamic characteristic of tall industrial chimney estimated from GPS measurement and frequency domain decomposition, Engineering Structures, 148, 2017