



- Monitoring mit kontinuierlichen faseroptischen Sensoren
- Rissbreitenmessung mittels faseroptischer Sensorik
- Verankerungssystem für quer vorgespannte Fahrbahnplatten
- Ertüchtigung der Rheinbrücke Maxau
- Verstärkung von Betonbrücken
- Dauerhaftigkeit bei alternativen Bindemitteln
- Fertigteile aus vorgespanntem Carbonbeton

Zur Ertüchtigung der Rheinbrücke Maxau mit hochfestem Beton

Das Bauwerk B 10 Rheinbrücke Maxau ist eine 1966 fertiggestellte Stahlbrücke mit orthotroper Fahrbahnplatte, welche über die Jahre sukzessive instand gesetzt wurde. Durch die stark gestiegene Verkehrsbelastung und damit einhergehender Ermüdungsschäden wurde die Brücke jedoch stark beschädigt, weshalb eine Ertüchtigung aktuell unerlässlich war. Hierbei wird die Fahrbahn erstmalig in Deutschland durch das Aufbringen einer bewehrten stahlfaserverstärkten Platte aus hochfestem Beton (HFB) verstärkt. Der HFB wurde hierbei in einer Schichtdicke von nur ca. 7 cm und einer Mindestbetondeckung von 2 cm ohne zusätzliche Abdichtung an der befahrenen Oberseite maschinell eingebracht. Im vorliegenden Beitrag wird auf das Einbau- und Qualitätssicherungskonzept des verwendeten HFB näher eingegangen und der Ablauf der Ertüchtigungsmaßnahme detailliert beschrieben. Hierbei werden insbesondere die durchgeführten Frisch- und Festbetonuntersuchungen erläutert und die an einer Probeplatte ermittelten Ergebnisse sowie die der beiden Betonierabschnitte eingehend diskutiert. Die gesammelten Erfahrungen zeigen, dass unter Einhaltung der entsprechenden Qualitätssicherungsmaßnahmen der hochfeste Beton erfolgreich und ohne nennenswerte Schwankungen hergestellt und eingebaut werden konnte. Zukünftig ist hierbei eine Regelbauweise denkbar, die unter funktionaler Ausschreibung der Betoneigenschaften eine zielsichere und wirtschaftliche Ertüchtigung orthotroper Fahrbahnplatten ermöglichen kann.

Stichworte Ertüchtigung; hochfester Beton; HFB; Karlsruhe; Maxau; Rheinbrücke; orthotrope Fahrbahnplatte; Brücke; Betonfahrbahn

1 Einleitung

1.1 Notwendigkeit der Ertüchtigung der B 10 Rheinbrücke Maxau

Die Bundesstraße B 10 überquert zwischen Karlsruhe-Maxau und Wörth-Maximiliansau den Rhein und verbindet die beiden Bundesländer Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg. Die B 10 ist hierbei eine der wichtigsten Verkehrsverbindungen im überregionalen Fernverkehr, wobei die B 10 Rheinbrücke Maxau die einzige Rheinquerung im Radius von 25 km ist.

Zur Überführung der B 10 wurden eine linksrheinische, 162 m lange Vorlandbrücke und eine 292 m lange Strombrücke aus Stahl (Rheinbrücke Maxau) errichtet, die im Jahre 1966 fertiggestellt wurde. Die Fahrbahn des Überbaus wurde als orthotrope Platte mit Flachstahlsteifen ausgebildet. Weitere Informationen zum Bestand des

Retrofitting of the Karlsruhe-Maxau Rhine-bridge with high performance concrete

The Karlsruhe-Maxau Rhine-bridge is a steel bridge with orthotropic deck that was completed in 1966. Over the course of the years the bridge has been continuously repaired and maintained. Due to the highly increased traffic load and the accompanying fatigue damage, the bridge was recently in indispensable need of repair and retrofitting. The bridge deck was hereby retrofitted with a thin layer of reinforced high performance concrete (HPC), a first in Germany. Furthermore, the HPC layer is only 7 cm thin, with a minimum concrete cover of 2 cm, and is placed with no additional sealing layer. The following article describes the concrete placement and quality assurance concept used for the HPC and reports on the retrofitting operations. The performed fresh and hardened concrete tests on the test and bridge deck's concrete are hereby discussed in detail. In the light of experience gathered, and with strict compliance to the defined quality assurance measures, the high performance concrete can be produced and placed successfully without significant fluctuation in concrete performance. In future, a standard construction procedure is conceivable which, with functional tendering of concrete properties, can enable an efficient and economical retrofitting of orthotropic bridge decks.

Keywords retrofitting; high performance concrete; HPC; Karlsruhe; Maxau; Rhine-bridge; orthotropic steel bridge deck; concrete overlay; bridge

Brückenbauwerks sind in [1] und zur Nachrechnung bzw. statischen Berechnung in [2, 3] ausführlicher beschrieben. Eine Ansicht der Brücke ist in Bild 1 dargestellt ist.

Die Brücke wurde zum Zeitpunkt des Baus für eine Verkehrsbelastung von 18.000 Kfz/d und eine prognostizierte Verkehrsbelastung von ca. 33.000 Kfz/d ausgelegt. Im Jahre 2019 betrug die Verkehrsbelastung mehr als 80.000 Kfz/d mit einem Schwerlastanteil von ca. 13%. Durch die überproportionale Zunahme des Schwerverkehrs haben sich insbesondere die ermüdungsrelevanten Beanspruchungen stark erhöht.

Bereits Ende 1994 wurden erste Risse an den Anschlüssen der senkrechten Stegblechsteifen am oberen Querträger festgestellt, die 1997 nach einer weiteren Fortschreitung und Zunahme der Risse instand gesetzt wurden. Ein zu dem Zeitpunkt veranlasstes Gutachten zum Zustand der Brücke [4] zeigt hierbei auf, dass die Längsrippen der



Bild 1 Ansicht der B 10 Rheinbrücke Maxau mit Schutzzelt
Overview of the B 10 Karlsruhe Maxau Rhine-bridge with protective tent

Fahrbahn gefährdet waren und die Restlebensdauer der Fahrbahnplatte bis zur größeren Sanierung unter Teil- bzw. Vollsperrung mit 15–20 Jahren angegeben wurde.

Bei der Bauwerksprüfung im Jahre 2007 [5] wurden erneut zahlreiche Risse an der Fahrbahnunterseite festgestellt. Die Risse befanden sich ausschließlich unterhalb der Lkw-Spur (äußerster Fahrstreifen, Fahrtrichtung Karlsruhe – Wörth) am oberen Rand der Querträgerstege an den Ausnehmungen im Bereich der Längssteifen. Hierbei wurden die Risse als Ermüdungsrisse der Kategorie I eingestuft. Zudem gab es in immer kürzeren Zeitabständen Probleme mit dem Fahrbahnbelag, der als Verschleißteil eingesetzt wird, jedoch durch die hohen Achslasten des Schwerverkehrs stark beansprucht wird. Dies hat zu einer verstärkten Bildung von Mulden (Spurrinnen) im Bereich der Lkw-Spur geführt, was neben einer Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit und des Fahrkomforts zu einer signifikanten Verringerung der Lastverteilung durch den Fahrbahnbelag und somit zu einer starken Erhöhung der Belastung der Fahrbahnplatte führte.

Bedingt durch die Ermüdungsschäden an der orthotropen Fahrbahn der Rheinbrücke Maxau war eine Ertüchtigung der Fahrbahn und Brücke unerlässlich. Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie vom Nov. 2011 [6] wurden verschiedene Varianten für eine Verstärkung der Fahrbahn untersucht. In den Variantenuntersuchungen wurden unter anderem die Baukosten, die verkehrlichen Einschränkungen, die Mehrbelastung des Bauwerks und der Entwicklungsstand der verschiedenen Verstärkungsvarianten in der Entscheidungsfindung berücksichtigt. Als geeignetste Lösung stellte sich hierbei das Aufbringen einer bewehrten, stahlfaserverstärkten Platte aus hochfestem Beton heraus. Zusätzlich sind innerhalb des Hohlkastens Beulsteifen in den Kastenwänden und im Bodenblech einzubauen (vgl. [3]). Mithilfe dieser Ertüchtigung sollte die Nutzungsdauer der Fahrbahn und Brücke um Jahrzehnte verlängert werden und man wollte auch den neuesten Anforderungen der Verkehrssicherheit sowie Tragfähigkeit der Brücke gemäß Nachrechnungsrichtlinie gerecht werden (vgl. [2]).

Für die Verstärkung der Fahrbahn der Rheinbrücke Maxau durch das Aufbringen einer bewehrten stahlfaserverstärkten Platte aus hochfestem Beton orientierte sich das Regierungspräsidium Karlsruhe (Referat 43, Ingenieurbau) eng an den bereits erfolgreich umgesetzten Projekten in den Niederlanden hinsichtlich des Materials und der Bauweise. Die Wirksamkeit der Verstärkungsmaßnahme und die erwiesene Praxistauglichkeit wurden in den Niederlanden durch mehrere Bauvorhaben (Großbrücken, vgl. z. B. [7–9] einschließlich wissenschaftlicher Untersuchungen) nachgewiesen. Daher sollte das erprobte Produkt Contec Ferroplan B 105 der Fa. Contec International zum Einsatz kommen. Dieses besitzt in Deutschland eine bauaufsichtliche Zulassung des DIBt mit der Nummer Z-74.1-71 [10] für „Contec Binder N als Bestandteil der Contec Ferroplan-Estrichdichtschicht“ nach Tabelle 2, Variante B [10] und darf für die Abdichtung von LAU-Anlagen und Tankstellen verwendet werden.

1.2 Nachweisverfahren für ZiE des hochfesten Betons

Der hochfeste Beton „Contec Ferroplan B105“ besitzt keine bauaufsichtliche Zulassung für den Straßenbrückenbau in Deutschland. Für den Einsatz des hochfesten Betons (HFB) ist eine bauaufsichtliche Zustimmung im Einzelfall (ZiE) für die Rheinbrücke Maxau durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) erforderlich gewesen, da bisher auf keiner großen Stahlbrücke in Deutschland eine Ertüchtigung mit hochfestem Beton ausgeführt wurde.

Das BMVI und die Straßenbauverwaltung Baden-Württemberg entschieden hierbei, dass die Anwendung des hochfesten Betons „Contec Ferroplan B105“ zuerst auf einer untergeordneten Stahlbrücke mit vergleichbarer Fahrbahn zu testen war, bevor die projektbezogene ZiE für die Rheinbrücke Maxau erteilt wurde. Dafür wurde eine Brücke bei Beimerstetten in der Nähe von Ulm aus gesucht. Für diese Brücke bei Beimerstetten wurde ebenfalls eine ZiE beantragt und genehmigt. Die „Beimerstettener Brücke“ diente hierbei als Pilotprojekt, um Erkenntnisse über das Material „Contec Ferroplan B 105“, Bauabschnitte, Bauzeiten, logistische Rahmenbedingungen, Verarbeitbarkeit des Materials und über eine Reduzierung der ermüdungswirksamen Beanspruchungen bei vollem Verbund zwischen Deckblech und hochfestem Beton [3, 11] zu gewinnen.

Die Betonarbeiten für das Pilotprojekt wurden wissenschaftlich durch die Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (MPA Karlsruhe) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) betreut. Die betontechnologischen Erfahrungen und Ergebnisse wurden hierbei in [12] zusammengefasst.

Nach erfolgreichem Abschluss des Pilotprojekts Beimerstetten Ende 2014 konnte mit der Planung zur Ertüchtigung der Rheinbrücke Maxau begonnen werden. Für die auch dort erwünschte Verstärkung der orthotropen Fahr-



Bild 2 Händische Betonage mit Rüttelbohle unter Schutzzelt beim Pilotprojekt Beimerstetten
Manual concreting with vibrating beam within a protective tent during Beimerstetten pilot project

bahnplatte mit hochfestem Beton Contec Ferroplan B105 wurde ebenfalls eine ZiE beim BMVI beantragt, die im September 2017 erteilt wurde.

1.3 Ausschreibungsanforderungen und Vergabe

Aufgrund des Bundescharakters der Rheinbrücke Maxau, als Teil der Bundesstraße 10, ist die Bundesrepublik Deutschland Bauherr der Brücke, vertreten durch das BMVI. Die Auftragsverwaltung erfolgte hierbei durch das Land Baden-Württemberg, vertreten durch das Regierungspräsidium Karlsruhe. Die Ausschreibung zur Ertüchtigung und zur Instandsetzung der Rheinbrücke Maxau erfolgte europaweit. Die Ausschreibung wurde in einem offenen Verfahren mit Mindestanforderungen durchgeführt. Für die Abgabe eines Angebots wurden zusätzliche Bedingungen vorgegeben. Das zum Zuge kommende Unternehmen musste besondere Qualitäten nachweisen, die in den Ausschreibungsunterlagen wie folgend angeführt wurden:

„Um eine qualitativ hochwertige Ausführung der Maßnahme zu garantieren, wird gefordert, dass das Unternehmen nachweisen muss, dass es den hochfesten Beton „Contec Ferroplan“ der Firma Contec auf einer Stahlbrücke mit einer Stahlfahrbahnplatte eingebaut hat. Des Weiteren muss das Unternehmen belegen, dass der Einbau des Betons auf einem Teilabschnitt einer Stahlbrücke von mindestens 1000 m² mit einem Betonstraßenfertiger erfolgte.“ Zudem wurden keine Varianten bzw. Alternativangebote zugelassen. In den Ausschreibungsunterlagen zur Ertüchtigung der Rheinbrücke Maxau waren die Anforderungen an die Frisch- und Festbetoneigenschaften des hochfesten Betons wie u. a. nachfolgend beschrieben:

- Die Frischbetonrohichte des Betons darf nicht größer als 2700 kg/m³ sein.
- Das Verdichtungsmaß muss zwischen 1,10 und 1,18 nach DIN EN 12350-4 liegen.

- Der Luftgehalt des Frischbetons darf nach DIN EN 12350-7 maximal 2,0% betragen.
- Zur Betonbereitung darf entsprechend DIN EN 1008 nur Trinkwasser verwendet werden und die Temperatur des Anmachwassers für den hochfesten Beton sollte $\leq 14^\circ\text{C}$ betragen.
- Die Frischbetontemperatur wurde auf Werte zwischen 15°C und 20°C vorgegeben.
- Die Gesteinskörnung muss widerstandsfähig gegen Alkali-Kieselsäure-Reaktion sein.
- Die Würfeldruckfestigkeit muss nach 56 Tagen mind. $f_{ck,cube} = 105 \text{ N/mm}^2$ betragen.
- Der E-Modul nach DIN EN 12390-13 muss nach 28 Tagen 49.000 N/mm^2 betragen mit einer Toleranz von $\pm 3000 \text{ N/mm}^2$.
- Die char. Biegezugfestigkeit geprüft nach DIN EN 12390-5 und nach der Richtlinie Stahlfaserbeton des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Fassung 2012, muss im Alter von 28 Tagen im Mittel $f_{ctm,BZ} \geq 10 \text{ N/mm}^2$ betragen.
- Der Abwitterungsbetrag beim Frost-Tausalz-Widerstandsversuch (CDF-Test nach DIN EN 12390-9) darf nach 28 FTW max. 750 g/m^2 betragen.
- Die Rissbreiten der ausgeführten Betonplatte dürfen max. 0,1 mm betragen, bevor die abschließende Verschleißschicht aufgetragen wird.

Vorgegeben wurde ebenfalls, dass der hochfeste Beton in einer stationären Mischanlage herzustellen ist und auf der Brücke unter einem klimatisierten Schutzzelt (über die gesamte Brückenlänge und Brückenhälfte) einzubauen ist. Damit können der Einbau und die Erhärtung des hochfesten Betons unabhängig von der äußeren Witterung erfolgen.

Anfang März 2018 konnte der Zuschlag an die Bietergemeinschaft Leonhard Weiss GmbH & Co. KG (Göppingen) und Strukton International B. V. (Utrecht, Niederlande) vergeben werden. Aufgrund der vorangegangenen Erfahrungen und Expertise im Bereich hochfester Betone sowie der Beteiligung am Pilotprojekt Beimerstetten wurde die MPA Karlsruhe bei Auftragsvergabe seitens des Regierungspräsidiums Karlsruhe mit der Beratung und Überwachung von betontechnologischen Fragestellungen während der gesamten Bauzeit beauftragt.

2 HFB CONTEC Ferroplan

2.1 System

Wie bereits in Abschn. 1.1 erläutert, besitzt das Produkt „Contec Ferroplan B 105“ der Fa. Contec ApS eine bauaufsichtliche Zulassung des DIBt mit der Nummer. Z-74.1-71 [10] für „Contec Binder N als Bestandteil der Contec Ferroplan-Estrichdichtschicht“ nach Tabelle 2, Variante B [10]. Durch eine Erweiterung des Verwendbarkeitsbereichs mittels einer ZiE durfte dieser hochfeste Beton für die Ertüchtigung der Rheinbrücke Maxau eingesetzt werden. Bei dem System CONTEC Ferroplan

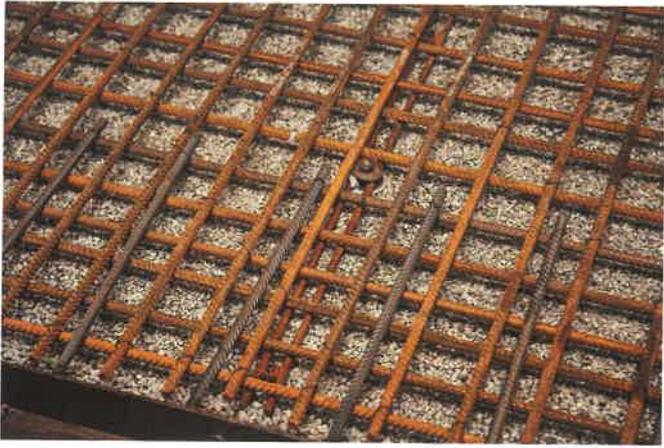


Bild 3 Übersicht der Bewehrungsführung auf der Bauxit-Haftschrift inklusive höhenverstellbarer Abstandhalter und Niederhalter sowie Randprofile
Overview of the reinforcement configuration on the bauxite bonding layer including height-adjustable spacers and downholders as well as edge profiles



Bild 5 Ausgangsstoffe für CONTEC Ferroplan, unten Hyperit (2/5 mm), mittig Feinsande (0,1/1,4 mm), oben Binder N und Stahlfasern
Source materials for CONTEC Ferroplan, bottom Hyperit (2/5 mm), centre fine sands (0.1/1.4 mm), top Binder N and steel fibres

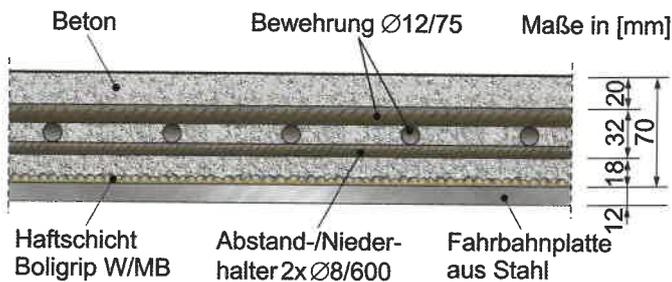


Bild 4 Schematischer Aufbau des Gesamtsystems CONTEC Ferroplan nach Erüchtigung der Fahrbahnplatte
Schematic design of the CONTEC Ferroplan system after retrofitting of the steel bridge deck

handelt es sich um einen speziellen faserbewehrten hochfesten Beton, der auf speziell vorbereitete orthotrope Stahl-Fahrbahnplatten, wie bei der Rheinbrücke Karlsruhe-Maxau, aufbetoniert werden kann. Hierfür muss die bestehende Deck- und Schutzschicht der Fahrbahn abgefräst werden, bevor unter einem auf voller Brückenlänge errichteten Schutzzelt die Stahloberfläche vorbereitet wird. Im Anschluss wird das Deckblech mit einem Primer grundbeschichtet und eine aus Epoxidharz in einer Stärke von 2,5–3 mm und kalziniertem Bauxit mit einer Korngröße von 4–6 mm bestehenden Haftschrift aufgebracht. Auf dem Bauxit werden anschließend die Montageeisen einschließlich Abstandhalter, Niederhalter und die Stabstahlbewehrung mit einem Durchmesser von 12 mm im Bewehrungsraster von 7,5 cm × 7,5 cm verlegt, was auf Erfahrungen aus den Niederlanden basiert. Erwähnenswert ist hierbei, dass im deutschen Brückenbau aufgrund des Schwingungsnachweises von Schweißnähten keine Verlegung mit geschweißten Stabstahlmatten zulässig ist, weswegen die Stäbe einzeln verlegt wurden. Die verlegten Bewehrungsstäbe wurden durch Bindedraht und die Niederhalter in der Lage gesichert. In Bild 3 ist eine Übersicht der Bewehrungsführung mit Abstands- und Niederhaltern auf der vorbereiteten Haftschrift dargestellt. Auf

den vorbereiteten und bewehrten Untergrund wird dann der hochfeste Beton betoniert, der in einer Schichtdicke von nur ca. 7 cm ohne zusätzliche Abdichtung an der befahrenen Oberseite eingebracht wird. Ein schematischer Aufbau des Gesamtsystems kann Bild 4 entnommen werden.

2.2 Ausgangsstoffe

Der hochfeste Beton Contec Ferroplan besteht hierbei aus fünf Komponenten, die im definierten Verhältnis gemischt werden müssen. Zum ersten ist der Binder „Contec Binder N“ zu nennen. Dieses Bindemittelgemisch enthält, neben hochwertigem Weißzement, ebenfalls weitere Bestandteile, u. a. Silikastaub, pulverförmige Zusatzmittel (Fließmittel, Schwindreduzierer), Kunststofffasern und ggf. auch Glasfasern. Wie bereits zuvor erläutert, ist der „Contec Binder N“ markenrechtlich geschützt, weshalb die genaue Aufschlüsselung des Gemischs nur dem Hersteller sowie dem Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) vorliegt. Als weitere Bestandteile kommen ein dänischer Feinsand „Contec B9“, der für die Rheinbrücke Maxau in Big Bags in den Fraktionen 0,1/0,8 mm und 0,8/1,4 mm geliefert wurde, sowie der basaltische Splitt Hyperit als „Contec B7“ in der Fraktion 2/5 mm zum Einsatz. Zuletzt werden, neben Wasser, gerade Stahldrahtfasern mit einem Durchmesser von 0,40 mm und einer Länge von 12,5 mm hinzugegeben.

Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass die abZ [10] keinen auf 1 m³ skalierten Mischungsentwurf vorgibt, sondern lediglich ein Massenverhältnis der Bestandteile beschreibt. Das Wasserbindemittelverhältnis ist hierbei mit

$w/b = 0,352$ gewählt. In Bild 5 sind alle Ausgangsstoffe (außer Wasser) im später gewählten Dosierverhältnis (vgl. Abschn. 2.3) dargestellt.

2.3 Erstprüfung und Mischungszusammensetzung

In der Ausschreibung wurde seitens des Bauherren auf Grundlage der Erfahrungen aus dem Pilotprojekt Beimerstetten eine erweiterte Erstprüfung gefordert. Die erweiterte Erstprüfung zielte hierbei auf die Überprüfung der in Abschn. 1.3 geforderten Frisch- und Festbetoneigenschaften der einzusetzenden Betonrezeptur ab. Ein Schwerpunkt der Erstprüfung lag auf der Ermittlung und Einhaltung der Frischbetoneigenschaften (Verdichtungsmaß, Luftgehalt, Rohdichte, Temperatur) in Abhängigkeit von der gewählten Temperatur der Ausgangsstoffe (einheitlich 10°C, 15°C, 20°C, 25°C sowie bei variierender Temperatur des Anmachwassers), weshalb ein Großteil der Versuche sich hierauf konzentrierte. Zudem wurden am Festbeton die Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit (nach 1, 2, 7, 14, 28, 56 und 90 Tagen) und der E-Modul (nach 28, 56 und 90 Tagen) bestimmt. Auch die Schwind-eigenschaften des Betons sowie die Überprüfung der Frost-Tausalzbeständigkeit wurden getestet.

Die Erstprüfung wurde in zwei Einrichtungen durchgeführt. Ein Teil der Versuche wurde an der Öffentlichen Baustoffprüfstelle der HTW Stuttgart, ein anderer Teil an der MPA Stuttgart durchgeführt. Die schlussendlich für die Ertüchtigung der Rheinbrücke Maxau gewählte und erstgeprüfte Betonrezeptur ist in Tab. 1 dargestellt.

3 Einbau- und Qualitätssicherungskonzept des hochfesten Betons

3.1 Einbaukonzept

Die Bauausführung erfolgte in zwei Bauabschnitten, wobei die Ertüchtigung der orthotropen Fahrbahnplatte des nördlichen Überbaus (1. Bauabschnitt) und des südlichen Überbaus (2. Bauabschnitt) nacheinander realisiert

Tab. 1 Mischungszusammensetzung des HFB CONTEC Ferroplan für die Ertüchtigung der Rheinbrücke Maxau
Mix Design of high performance concrete CONTEC Ferroplan for the retrofitting of Maxau Rhine-bridge

Ausgangsstoff	Einwaagemenge
CONTEC Binder N	475 kg/m ³
CONTEC B9, Feinsand (0,1/0,8 mm)	468 kg/m ³
CONTEC B9, Grobsand (0,8/1,4mm)	281 kg/m ³
CONTEC B7, Splitt (2/5 mm)	1132 kg/m ³
Stahlfasern (0,4 × 12,5 mm)	75 kg/m ³
Wasser	150 kg/m ³
	$\Sigma = 2581 \text{ kg/m}^3$

wurde, um während der Arbeiten eines Bauabschnitts auf den jeweils anderen Bauabschnitt einen 4+0 Verkehr einzurichten. Die Betonage eines Bauabschnitts wurde hierbei in zwei Unterabschnitte geteilt (a und b), die jeweils unter Vollsperrung der Rheinbrücke Maxau von ca. Freitag 24:00 Uhr bis Montag 05:00 Uhr erfolgten, um potenziell schädliche, durch den Verkehr erzeugte Schwingungen auszuschließen. Jeder Unterabschnitt hatte eine Länge von 146 m und eine Einbaubreite von ca. 11 m. Das Quergefälle der Fahrbahnplatte beträgt ca. 2,0%.

Der Beton wurde hierbei in einer eigens errichteten Mischanlage (vgl. Abschn. 3.2) hergestellt und mittels Betonfahrmischer an die ca. 1,6 km entfernte Brücke befördert. Entgegen der Ausschreibungsanforderung eines Fließbands zum Transport des Betons auf der Brücke (im Geh- und Radwegbereich) entschied sich die ARGE nach Zustimmung des Bauherrn für ein Konzept mit mobilen Betonkübeln. Maßgebend für die geforderte Ausschreibung eines Fließbands war die zumutbare Tragfähigkeit der Brücke, weshalb neben dem gewichtsoptimierten Einbaufertiger auch kein Betonfahrmischer auf die Brücke fahren durfte. Zudem war die verfügbare Verkehrsfläche im Zelt auf der Brücke auch sehr schmal, weshalb nur kleinere Fahrzeuge (z.B. Klein-Traktoren) auf der Brücke verkehren konnten. Die gewählten mobilen Betonkübel, die sog. Kubixx der Fa. Staring B.V., sind ca. 1,5 m³ Kübel, die mit einer elektrisch betriebenen rotierenden Welle ausgestattet sind, die einen Weitertransport des Betons unter konstanter Durchmischung ermöglichen. Bei Ankunft der Betonfahrmischer am Brückenwiderlager wurde der hochfeste Beton mithilfe eines Fließbands in die Betonkübel, die auf einem Anhänger für Klein-Traktoren montiert waren, umgefüllt und bis zur Einbauposition des Fertigers transportiert. An der jeweiligen Einbauposition wurde der hochfeste Beton dann vom Betonkübel zum Einbaufertiger übergeben. In Bild 6 ist diese Übergabe abgelichtet.

Der Einbau erfolgte maschinell mit einem Betonfertiger. Der für die Rheinbrücke Maxau eingesetzte Betonfertiger wurde im Vorfeld der Betonage der Probeplatte (vgl. Abschn. 4) durch die ARGE fortlaufend anhand von Musterplatten hinsichtlich der Einstellungen und Aufbauten optimiert. Es wurden unter anderem am Einbaufertiger selbst (z.B. Anzahl und Ausführung der Rüttelfinger) wie auch am Bauablauf Änderungen vorgenommen. Durch die gewonnenen Erkenntnisse konnte ein Einbaufertiger entwickelt werden, der mithilfe von Rüttelfingern und einer nachgehängten pneumatischen Rüttelbohle ausreichend Verdichtungsenergie in den hochfesten Beton einbringen konnte, um einen lunkerfreien Einbau zu ermöglichen. Dies konnte sowohl bei den Untersuchungen an der Probeplatte (Sägeschnitte und Bohrkern) sowie an der Brücke (Bohrkerne) bestätigt werden. In Bild 7 ist eine Detailaufnahme der Rüttelfinger im hochfesten Beton dargestellt. Auf die fertig betonierte Fläche wurde ein Nachbehandlungsmittel aufgebracht und die Fläche mit Flügelglättern geglättet. Anschließend wurde auf der Oberfläche eine Folie verlegt,



Bild 6 Übergabe des Betons aus Kubixx an das Förderband des Einbau-fertigers
Transfer of concrete from Kubixx to conveyor belt of concrete paver



Bild 7 Detailaufnahme der Rüttelfinger des Einbau-fertigers im hochfesten Beton
Close up of vibrating rods of concrete paver within the high performance concrete

um diese vor Verdunstung zu schützen. Einige Tage nach dem Aushärten des Betons und bei Erreichen einer Mindestbetondruckfestigkeit von 35 N/mm^2 wurde abschließend eine Verschleißschicht (Dünnschicht Boligrifp W24414/4) auf die Betonfläche aufgebracht, um die Verkehrstauglichkeit der Fahrbahn sicherzustellen, da die HFB-Oberfläche selbst hinsichtlich Griffbarkeit und Helligkeit nicht ausreichend ist.

3.2 Qualitätssicherung bei der Betonbereitstellung

Zur Sicherstellung der Einhaltung der geforderten Eigenschaften des hochfesten Betons gemäß Ausschreibung (vgl. Abschn. 1.3), insbesondere hinsichtlich der Frischbetoneigenschaften, wurde auf der Baustelleneinrichtungsfläche eine eigens errichtete Mischanlage aufgebaut. Diese beinhaltete zur Dosierung der Ausgangsstoffe einen 3-Kammern-Reihendoseur, zwei Silos, eine automatische Stahlfaserdosieranlage sowie einen temperierbaren Wasserbunker. Zur Sicherstellung der Betontemperatur wur-



Bild 8 Übersicht der Mischanlage und Lagerungsfläche der Ausgangsstoffe während der Ertüchtigung der Rheinbrücke Maxau
Overview of the mixing plant and storage area for source materials during the retrofitting of the Karlsruhe-Maxau Rhine-bridge

den daher das Wasser und die granularen Ausgangsstoffe gekühlt gelagert. Der in BigBags gelieferte Sand und Splitt wurden hierbei ca. 7 Tage vor der Betonage im Kühlcontainer bei 2°C gelagert und erst unmittelbar vor Verwendung in den Reihendoseur umgefüllt. Das Wasser wurde in einem 25 m^3 Bunker ebenfalls auf 2°C herabgekühlt. Die hierbei gewählten Kühltemperaturen waren zwar sehr gering, ermöglichten aber eine Frischbetontemperatur unter 16°C .

Der eingebaute Mischer war ein 1 m^3 Zwangsmischer der Fa. Liebherr, der insbesondere für die Herstellung von hochfestem Beton geeignet ist. Zur Sicherstellung einer ausreichenden Verarbeitungsenergie des Mixers wurden zusätzlich die Chargengrößen auf $0,80 \text{ m}^3$ begrenzt. Die Mischzeit nach Wasserzugabe betrug insgesamt 3 Minuten. In Bild 8 ist eine Übersicht der Baustelleneinrichtungsfläche, inklusive Mischanlage und Kühlcontainer, während der Betonage abgelichtet.

3.3 Qualitätssicherung am Frischbeton

Zur Sicherstellung der Eigenschaften des hochfesten Betons wurde durch den Auftraggeber die Überprüfung jedes Betonfahrmixers hinsichtlich Frischbetontemperatur, Verdichtungsmaß [13], Rohdichte [14] und Luftgehalt [15] gefordert. Hierbei sollte in Anlehnung an die Ausschreibung das Verdichtungsmaß zwischen 1,10 und 1,18 liegen, der LP-Gehalt maximal 2,0% betragen, die Frischbetonrohichte Werte zwischen 2550 und 2700 kg/m^3 aufweisen und die Temperatur maximal 20°C betragen.

Das mit dem Bauherrn abgestimmte Qualitätssicherungskonzept der ARGE sah hierbei vor, dass eine Abweichung hinsichtlich des Verdichtungsmaßes zu einer Ablehnung des gelieferten Betons führen sollte. Bei einer Abweichung der Frischbetonrohichte oder des Luftgehalts sollte eine annehmbare Qualitätsgrenzlage (AQL)

von 4% nach DIN-FB 100 [16] angewendet werden. Zudem wurde die maximale Verarbeitungszeit bis zum Einbau zu 120 Minuten festgesetzt.

4 Probestplatte

4.1 Konzept

Der Einbau des hochfesten Betons erfolgte zuerst ausschreibungsgemäß auf einer Probestplatte, die der Erfolgs- und Qualitätskontrolle diente. Die Probestplatte war so auszuführen, dass alle erforderlichen Konstruktionsdetails und Einbaubedingungen für die späteren Betonierarbeiten auf der Brücke berücksichtigt wurden. Die Probestplatte hatte eine Größe von ca. 20 m Länge und 11 m Breite.

4.2 Erkenntnisse zum Betoneinbau und den Frischbetoneigenschaften

Bei der Herstellung der Probestplatte wurden die in der Ausschreibung geforderten Werte weitestgehend eingehalten. Der Beton war mit einem Verdichtungsmaß zwischen 1,09 und 1,13 jedoch etwas flüssig. Dies war auf den erhöhten Wassergehalt der Mischung zurückzuführen, der im Darr-Versuch bestätigt wurde. Für die Betonage der Rheinbrücke Maxau wurde daher die Zugabewassermenge leicht reduziert und die Restwassermenge in den Betonfahrern verstärkt kontrolliert und berücksichtigt. Im Gegensatz zur Betonage der Musterplatten lagen die Luftgehalte und die Frischbetontemperaturen innerhalb der in der Ausschreibung geforderten Werte (LP-Gehalt $\leq 2,0\%$ und Frischbetontemperatur $\leq 20^\circ\text{C}$). Auch die Frischbetonrohichte erfüllte die Anforderungen.

Die Betonage der Probestplatte zeigte auch, dass die Abläufe zur Betonage der Rheinbrücke Maxau prinzipiell funktionieren würden, allerdings kleine Anpassungen noch vorgenommen werden müssten. Beispielsweise war die Vornässwassermenge der Bauxitschicht verstärkt zu kontrollieren und die Unterseite des Fließbands zum Fertiger abzudecken, um eine Verschmutzung der Bauxitschicht zu vermeiden.

4.3 Ergebnisse der Festbetoneigenschaften

Im Rahmen der Untersuchungen der Probestplatte wurden begleitende Prüfkörper gemäß DIN EN 12390-2 [17] hergestellt und an die MPA Karlsruhe angeliefert. Diese wurden im Alter von 1, 2, 3, 7, 28, 56 und 90 Tagen auf Druckfestigkeit untersucht. Wie in Bild 9 dargestellt, nimmt die Druckfestigkeit stetig mit dem Alter zu, wobei die mittlere Druckfestigkeit nach einem bzw. zwei Tagen $43,3\text{ N/mm}^2$ bzw. $72,5\text{ N/mm}^2$ beträgt. Die Festigkeit nach 28 Tagen beträgt $119,3\text{ N/mm}^2$, womit dieser Beton als schnell erhärtend eingestuft werden kann (r -Wert $\geq 0,50$).

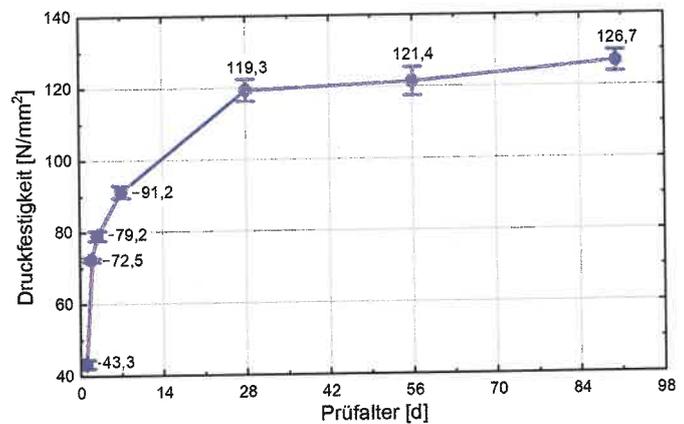


Bild 9 Entwicklung der mittleren Druckfestigkeit des hochfesten Betons der Probestplatte der Rheinbrücke Maxau in Abhängigkeit von der Zeit
Time-development of the high performance concrete's mean compressive strength from the Karlsruhe-Maxau Rhine-bridge test deck

Mit der zuvor genannten charakteristischen Druckfestigkeit kann dieser Beton in die Druckfestigkeitsklasse C90/105 eingestuft werden. Es ist zudem zu erkennen, dass kein nennenswerter Anstieg der Druckfestigkeit ab dem Alter von 28 Tagen stattfindet. Zusätzlich zur Ermittlung der Druckfestigkeit wurde im Alter von 28 Tagen die Haftzugfestigkeit des Betons an der Probestplatte bestimmt. Aufgrund des Aufbaus des Systems (vgl. Bild 4) ist der Verbund zwischen dem hochfesten Beton und der Haftsicht die schwächste Stelle, weswegen ein Versagen auf Haftzug in diesem Bereich zu erwarten ist. Daher wurden 40 Ringbohrungen mit 50 mm Außendurchmesser bis zur Höhe des Stahlblechs durchgeführt. Auf der Oberfläche der Bohrkerne wurden Stahlstempel mit einem Durchmesser von 50 mm verklebt. Diese wurden dann, nach entsprechender Wartezeit, gezogen.

Wie in Bild 10 dargestellt, übersteigt die Haftzugfestigkeit mit Ausnahme eines Bohrkerne die geforderte Haftzugfestigkeit von $3,0\text{ N/mm}^2$ nach 28 Tagen. Zudem ist zu erkennen, dass die Haftzugfestigkeit annähernd normalverteilt ist, wobei der Mittel- und Medianwert bei $4,01\text{ N/mm}^2$ liegt. Auf Basis der gemessenen Ergebnisse ist zudem zu erkennen, dass die Haftzugfestigkeiten über die Gesamtfläche der Probestplatte gleichmäßig verteilt sind. Des Weiteren trat das Versagen erwartungsgemäß überwiegend im Bereich der Kontaktfläche Epoxidharz-Haftsicht zu HFB ein. Das Versagensbild ist hierbei eine Mischung aus Adhäsions- und Kohäsionsversagen in diesem Bereich.

Die im Rahmen der Haftzugprüfungen gewonnenen Bohrkerne wurden vermessen und in Abhängigkeit von ihrer Position auf der Probestplatte aufgetragen. Das Ergebnis ist in Bild 11 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Bohrkernlängen, die der Einbaustärke der Betonschicht vom 7 cm gleichgesetzt werden können, ungleichmäßig über die Probestplatte verteilt sind. Hierbei ist insbesondere zu erkennen, dass in der oberen Ecke

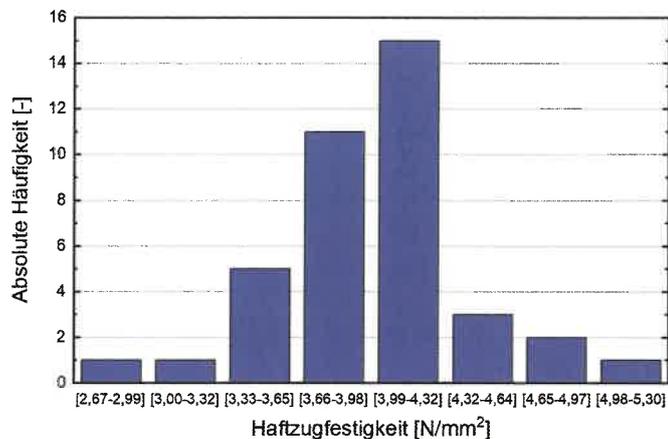


Bild 10 Statistische Verteilung der Haftzugfestigkeiten der Bohrkern aus der Probeplatte der Rheinbrücke Maxau
Statistical distribution of the adhesive tensile strength of concrete drill cores from the Karlsruhe-Maxau Rhine-bridge test deck

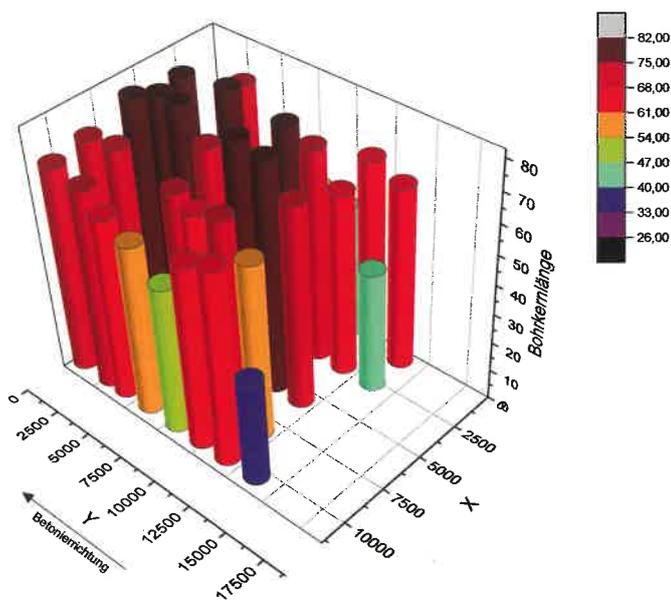


Bild 11 Übersicht der Bohrkernlänge der gezogenen Betonproben in Abhängigkeit von der Position in der Probeplatte der Rheinbrücke Maxau
Overview of the drill core lengths of the pulled out concrete samples depending on their position within the Karlsruhe-Maxau Rhine-bridge test deck

der Probeplatte die Einbaustärke offensichtlich zu hoch war. Diesem Verhalten wurde vor der Betonage der Rheinbrücke Maxau durch eine Anpassung der Höhenjustierungsvorrichtung seitens der ARGE entgegengewirkt, da ansonsten sowohl ein Überverbrauch an Beton wie auch eine ungleichmäßige Oberflächenausbildung der Betonplatte drohte.

Die vorgenommenen Anpassungen sowie gewonnenen Erfahrungen stellten erneut unter Beweis, dass die Herstellung und Beprobung einer Probeplatte zwar kosten- und zeitintensiv, jedoch ebenfalls unabdingbar sind, um eine erfolgreiche Betonage der Fahrbahnplatte sicherzustellen, und sie sollten daher auch bei zukünftigen Projekten stets eingeplant werden.

5 Bauabschnitte I und II

5.1 Prüfung des Betons

Zur Prüfung des hochfesten Betons wurde seitens der ARGE und auf Anforderung der Ausschreibung ein eigenständiges Baustellenprüflabor errichtet, welches durch geschultes Personal der Fa. Dyckerhoff GmbH während der Betonagen der Probeplatte und für die beiden Bauabschnitte auf der Brücke durchgehend besetzt war. Für die Bauabschnitte I und II wurde der Beton von insgesamt 112 Betonfahrern beseitigt und eingebaut. Der Beton wurde hierbei bei jedem dieser Fahrzeuge auf Frischbetontemperatur, Verdichtungsmaß [13], Rohdichte [14] und Luftgehalt [15] geprüft und nach erfolgreicher Überprüfung freigegeben. Zudem wurden würfelförmige Prüfkörper nach [17] zur Bestimmung der Druckfestigkeit hergestellt. Im Nachfolgenden sind die Ergebnisse der Frisch- und Festbetonuntersuchungen beider Bauabschnitte zusammengefasst.

5.2 Ergebnisse der Frischbetoneigenschaften

In Bild 12 sind die Ergebnisse der Frischbetondichte über den Luftgehalt dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Frischbetonrohichte mit zunehmendem Luftgehalt abnimmt. Zudem halten die Werte sowohl des Luftgehalts (mit Ausnahme eines Wertes) als auch der Frischbetonrohichte die in der Ausschreibung geforderten Werte ein.

In Bild 13 sind die Ergebnisse der Prüfung des Verdichtungsmaßes in Abhängigkeit vom Luftgehalt dargestellt. Es ist zu erkennen, dass ein Zusammenhang zwischen dem Verdichtungsmaß und dem Luftgehalt vorliegt, wobei mit zunehmendem Luftgehalt das Verdichtungsmaß steigt. Dies würde ebenfalls den theoretischen Überlegungen zur Prüfung des Verdichtungsmaßes entsprechen. Zudem wird aus Bild 13 deutlich, dass ein Großteil der Ergebnisse innerhalb des zulässigen Bereichs gemäß QS-Handbuch liegt (schraffierte Fläche, vgl. Abschn. 3.3). Hierbei ist zu erkennen, dass insbesondere die Werte des Betonierabschnitts BA IIB stärker streuen und teilweise auch außerhalb des zulässigen Bereichs liegen. Dies war auf eine unsachgemäße Lagerung der BigBags zurückzuführen, bei denen durch vorangegangenen Regen Feuchtigkeit bzw. Wasser eingedrungen war, weswegen mehrere Fahrzeuge erneut geprüft und die Zugabewassermenge am Mischwerk angepasst werden musste.

In Bild 14 ist zudem das Verdichtungsmaß über die Frischbetontemperatur dargestellt. Hierbei ist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Frischbetontemperatur und dem Verdichtungsmaß zu erkennen. Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass durch die konsequente Vorkühlung der Ausgangsstoffe und die Wahl einer nächtlichen Betonage (bei der die Außentemperatur aller Betonagen zwischen 8°C und 16°C lag) die maximal zu-

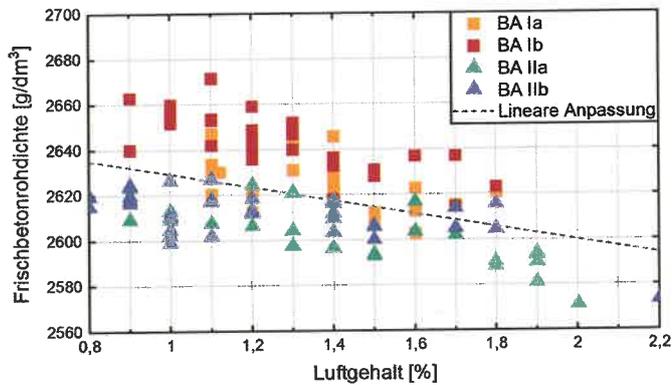


Bild 12 Ermittelte Frischbetondichte über den ermittelten Luftgehalt des HFB der Rheinbrücke Maxau
Results of fresh concrete density as a function of the HPC's air content from the Karlsruhe-Maxau Rhine-bridge

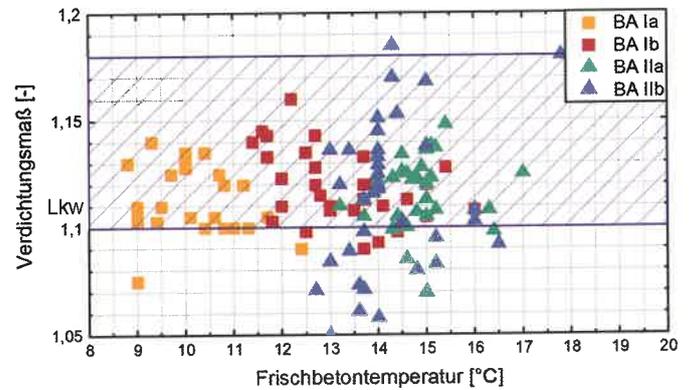


Bild 14 Ermitteltes Verdichtungsmaß über die Temperatur des HFB der Rheinbrücke Maxau: schraffiert ist der zulässige Bereich gemäß QS-Handbuch
Results of concrete degree of compactibility as a function of the HPC's temperature from the Karlsruhe-Maxau Rhine-bridge; cross-hatched is the permitted range according to the QA-handbook

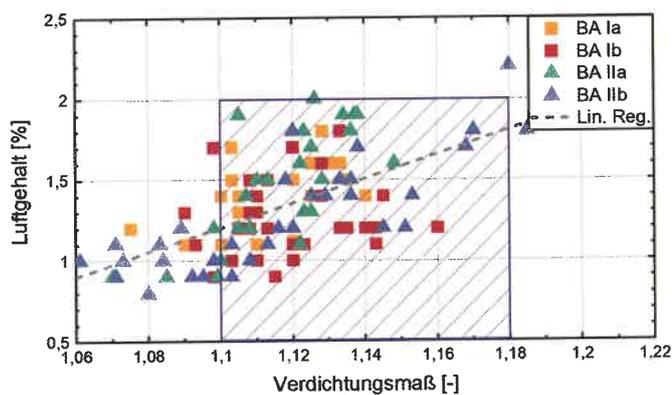


Bild 13 Ermittelter Luftgehalt über das Verdichtungsmaß des HFB der Rheinbrücke Maxau: schraffiert ist der zulässige Bereich gemäß QS-Handbuch
Results of concrete air density as a function of the HPC's degree of compactibility from the Karlsruhe-Maxau Rhine-bridge; cross-hatched is the permitted range according to the QA-handbook

Zusätzlich zur Ermittlung der Druckfestigkeit wurde im Alter von 30 bzw. 31 Tagen beim Betonierabschnitt BA II die Haftzugfestigkeit des Betons am Bauwerk bestimmt. Die Position der Bohrungen wurde im Vorfeld durch den Auftraggeber festgelegt und mit der ARGE abgestimmt, um eine Aussparung und Umlegung der Bewehrung an den entsprechenden Stellen im Vorfeld durchzuführen. Zur exakten Durchführung der Ringbohrungen wurde die zu bohrende Tiefe durch ein Flächennivellement mittels Laserscanner vor und nach der Betonage genau ermittelt, womit eine Anbohrung und Beschädigung der Fahrbahnplatte vermieden werden konnte. Bei der Prüfung wurde analog dem Vorgehen der Probeplatte vorgegangen.

lässige Frischbetontemperatur von 20°C zu keinem Zeitpunkt überschritten wurde.

Wie in Bild 16 zu erkennen ist, übersteigt die ermittelte Haftzugfestigkeit die geforderte Haftzugfestigkeit von 3,0 N/mm² nach 28 Tagen. Lediglich ein Bohrkern liegt darunter, was auf eine Beschädigung des Bohrkerns während des Bohrvorgangs zurückzuführen ist. Der Median- bzw. Mittelwert aller Haftzugfestigkeiten liegt

5.3 Ergebnisse der Druck- und Haftzugfestigkeiten

Im Rahmen der Betonagen auf der Rheinbrücke Maxau wurden ebenfalls begleitende Prüfkörper hergestellt und an die MPA Karlsruhe geliefert. Diese wurden dann im Alter von 1, 2, 3, 7, 28, 56, 90 und 180 Tagen auf Druckfestigkeit untersucht. Wie in Bild 15 dargestellt, verlaufen die Ergebnisse der Druckfestigkeit der Betonagen ähnlich denen der Probeplatte. Der Beton kann weiterhin als schnell erhärtend eingestuft werden (r -Wert $\geq 0,50$). Mit den dargestellten mittleren Druckfestigkeiten kann der hochfeste Beton in allen Abschnitten der Druckfestigkeitsklasse C90/105 zugeordnet werden. Zudem wird ersichtlich, dass die Hydratation des Binders nach 56 Tagen fast vollständig abgeschlossen ist und eine nur sehr geringfügige Veränderung bis zum Alter von 180 Tagen vorliegt.

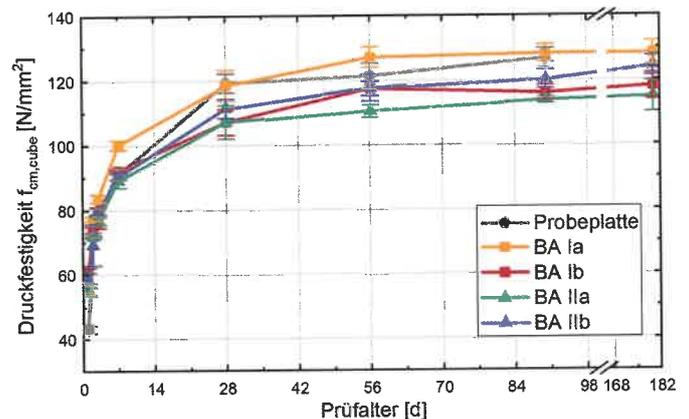


Bild 15 Entwicklung der mittleren Druckfestigkeit des hochfesten Betons der Rheinbrücke Maxau in Abhängigkeit von der Zeit
Time-development of the high performance concrete's mean compressive strength from the Karlsruhe-Maxau Rhine-bridge

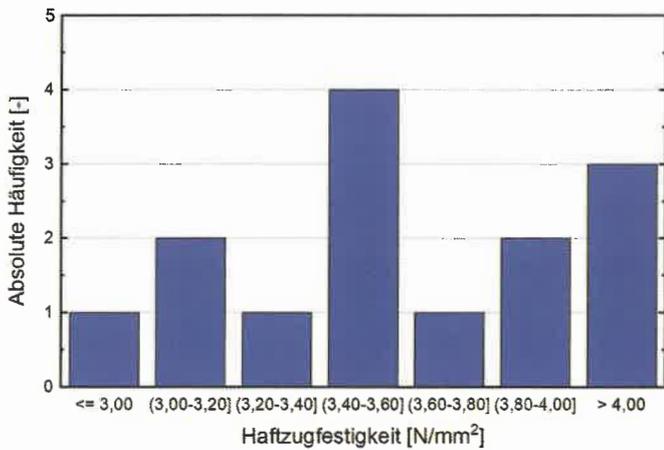


Bild 16 Statistische Verteilung der Haftzugfestigkeiten der Bohrkern aus den Betonierabschnitten IIa und IIb der Rheinbrücke Maxau
Statistical distribution of the adhesive tensile strength of concrete drill cores from the concreting sections IIa and IIb of the Karlsruhe-Maxau Rhine-bridge

bei 3,58 N/mm². Das Versagensmuster entspricht dem der vorangegangenen Versuche der Probeplatte (vgl. Abschn. 4.2).

6 Begleitende wissenschaftliche Untersuchungen

Im Zuge der Ertüchtigung der Rheinbrücke Maxau wurden mehrere begleitende Untersuchungen durchgeführt, auf die im Folgenden kurz eingegangen wird. Zum einen wird seitens der MPA Karlsruhe auf Wunsch des Bauherrn eine rechnerische Abschätzung des Potenzials einer chloridinduzierten Korrosion der Stabstahlbewehrung durchgeführt. Die Berechnung basiert hierbei auf einem zu parametrisierenden Schädigungs-Zeit-Gesetz bzw. Schädigungsmodell, welches auf vorangegangene mehrjährige Labor- und Bauwerksuntersuchungen zur Bestimmung des Chloridwiderstands von Beton bei einseitig gerichteter Diffusion zurückgeführt wird. Des Weiteren führt die MPA Karlsruhe großmaßstäbliche Untersuchungen an Probeplattenstreifen durch, die das real auftretende zyklische Verhalten der Rheinbrücke Maxau nachbilden und eine Schädigung infolge Last- und Temperatureinwirkungen nachbilden und quantifizieren sollen. Beide Untersuchungen dauern aktuell noch an und werden zu gegebener Zeit gesondert veröffentlicht.

Zuletzt entwickelt die Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine (VAKA) des KIT ein numerisches Tragwerksmodell zur rechnerischen Nachbildung des Tragverhaltens der Brücke nach der Ertüchtigung, um eine solide Grundlage für weitere Brückenertüchtigungen zu erreichen. Dieses Modell wird mit tatsächlichen Messwerten der Brücke validiert, welche mit entsprechender Sensorik im Bereich relevanter Bauteile und der Fahrbahn ermittelt wurden [17]. Die Modellierung dauert ebenfalls noch an.

Tab. 2 Projektbeteiligte
Project participants

Bauherr	Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das BMVI
Auftragsverwaltung:	Land Baden-Württemberg, vertreten durch das Regierungspräsidium Karlsruhe
Entwurfsaufsteller	Regierungspräsidium Karlsruhe, Referat 43 Ingenieurbau
Entwurfsbearbeitung und Ausführungsunterlagen	Ingenieurgruppe Bauen, Karlsruhe
Prüfingenieur	Prof. Dr.-Ing. K. Geißler, Dresden
Bauüberwachung	Regierungspräsidium Karlsruhe, Referat 47.2 Baureferat Mitte
Bauausführung	ARGE Leonhard Weiss, Strukton
Beratung und Überwachung (Beton)	Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Karlsruhe, KIT
Beratung und Überwachung (Brücke)	Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, KIT

7 Fazit

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Ertüchtigung der Rheinbrücke Maxau erfolgreich und ohne Verlängerung der Projektlaufzeit realisiert werden konnte (Tab. 2). Wie die vorangegangenen Abschnitte deutlich zeigen, konnte der hochfeste Beton ohne nennenswerte Schwankungen der Frisch- und Festbetoneigenschaften robust und mit einer gleichbleibenden Qualität hergestellt und eingebaut werden. Dies ist nicht zuletzt auf die stringent formulierten, aber durchaus erforderlichen Qualitätssicherungsmaßnahmen sowohl bei der Erstprüfung wie auch bei der Herstellung und beim Einbau des hochfesten Betons zurückzuführen.

Die gesammelten Erfahrungen bei der Ertüchtigung der Rheinbrücke Maxau zeigen auch, dass eine Ertüchtigung einer orthotropen Stahlfahrbahnplatte mittels eines hochfesten Betons erfolgreich umgesetzt werden kann und zukünftig als Regelbauweise etabliert werden könnte. Hierbei wäre jedoch eine Erweiterung der Tragwerksmodellierung und Bemessung erforderlich, um das genaue Tragverhalten der Brücke nachzubilden. Zukünftig ist hierbei eine Regelbauweise denkbar, die unter funktionaler Ausschreibung der Betoneigenschaften eine ziel-sichere und wirtschaftliche Ertüchtigung orthotroper Fahrbahnplatten ermöglichen kann.

Dank

Die MPA Karlsruhe möchte sich an dieser Stelle bei den Herren Professoren H. S. Müller und M. Haist für ihre Mitarbeit an diesem Projekt im Rahmen ihrer Tätigkeit an der MPA Karlsruhe bedanken.

Literatur

- [1] Schöttgen, J.; Wintergerst, L. (1968) *Die Straßenbrücke über den Rhein bei Maxau* in: Stahlbau 37, H. 1 bzw. 2, S. 1–9 bzw. 50–57.
- [2] Maier, D. H. et al. (2020) *Ertüchtigung der Rheinbrücke Maxau – Teil 1* in: Stahlbau 89, H. 2, S. 138–147. <https://doi.org/10.1002/stab.201900107>
- [3] Katzik, W. et al. (2020) *Ertüchtigung der Rheinbrücke Maxau – Teil 2* in: Stahlbau 89, H. 3, S. 193–202. <https://doi.org/10.1002/stab.201900115>
- [4] Regierungspräsidium Karlsruhe, Referat 43, Ingenieurbau; Ingenieurgruppe Bauen, K. (1997) *Bericht zur Rheinbrücke Maxau B10*.
- [5] Regierungspräsidium Karlsruhe, Referat 43, Ingenieurbau; Ingenieurgruppe Bauen, K. (2007) *Gutachterliche Stellungnahme zu den Rissen an der orthotropen Fahrbahn der Rheinbrücke Maxau B10*.
- [6] Regierungspräsidium Karlsruhe, Referat 43, Ingenieurbau; Ingenieurgruppe Bauen, K. (2011) *Machbarkeitsstudie zur Verstärkung der orthotropen Fahrbahn der Rheinbrücke Maxau B10*.
- [7] Buitelaar, P. (2010) *Heavy reinforced high performance concrete overlay on orthotropic steel bridges in the Netherlands*.
- [8] Jong, F. B. P. de (2007) *Renovation techniques for fatigue cracked orthotropic steel bridge decks* [Dissertation]. Technische Universität Delft.
- [9] Tuinstra, D.; Gabler, M. (2017) *Verstärkung von Stahlbrücken in den Niederlanden – Einsatz von hochfestem Beton und zielgerichtete Tragwerksverstärkung* in: Curbach, M. [Hrsg.] *Tagungsband 27. Dresdner Brückenbausymposium: 13. und 14. März 2017*. Dresden: Technische Universität Dresden, S. 151–158.
- [10] CONTEC ApS (2017) „CONTEC BINDER N“ als Bestandteil der „CONTEC FERROPLAN“-Estrichdichtschicht – Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung. Z-74.1-71.
- [11] Mansperger, T. et al. (2017) *Verstärkung von Stahlbrücken mit hochfestem Beton – BAST Heft B 137*. Bremen: Fachverlag NW.
- [12] Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Karlsruhe [Hrsg.] (2015) *Schlussbericht – Ertüchtigung der orthotropen Fahrbahnplatte einer Brücke über die Bahn bei 89179 Beimerstetten mit einer Schicht aus hochfestem Beton*. unveröffentlicht.
- [13] DIN EN 12350-4:2009-08 *Prüfung von Frischbeton – Teil 4: Verdichtungsmaß*. Berlin: Beuth Verlag.
- [14] DIN EN 12350-6:2011-03 *Prüfung von Frischbeton – Teil 6: Frischbetonrohichte*. Berlin: Beuth Verlag.
- [15] DIN EN 12350-7:2009-08 *Prüfung von Frischbeton – Teil 7: Luftgehalt – Druckverfahren*. Berlin: Beuth Verlag.
- [16] DIN-Fachbericht 100:2010-03 *Beton – Zusammenstellung von DIN EN 206-1 Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität und DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1*. Berlin: Beuth Verlag.
- [17] DIN EN 12390-2:2015-12/A20 *Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen; Änderung A20*. Berlin: Beuth Verlag.
- [18] Weidner, P. et al. (2018) *Messtechnische Begleitung der Ertüchtigungsmaßnahme an der Rheinbrücke Maxau* in: Ernst & Sohn [Hrsg.] *Special 2018 – Messtechnik im Bauwesen*. Ernst & Sohn.

Autoren



M.Sc. David Alós Shepherd (Korrespondenzautor)
david.alosshepherd@kit.edu
Karlsruher Institut für Technologie
Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
Karlsruhe (MPA Karlsruhe)
Gotthard-Franz-Straße 3
76131 Karlsruhe



Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn
frank.dehn@kit.edu
Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Massivbau und
Baustofftechnologie (IMB) und
Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
Karlsruhe (MPA Karlsruhe)
Gotthard-Franz-Straße 3
76131 Karlsruhe



Dipl.-Ing. Mathias Scherer
mathias.scherer@rpk.bwl.de
Regierungspräsidium Karlsruhe
Referat 43 Ingenieurbau
Schlossplatz 1–3
76131 Karlsruhe



Dipl.-Ing. Walter Katzik
walter.katzik@rpk.bwl.de
Regierungspräsidium Karlsruhe
Referat 43 Ingenieurbau
Schlossplatz 1–3
76131 Karlsruhe

Zitieren Sie diesen Beitrag

Alós Shepherd, D.; Scherer, M.; Katzik, W.; Dehn, F. (2021) *Zur Ertüchtigung der Rheinbrücke Maxau mit hochfestem Beton*. Beton- und Stahlbetonbau 116, H. 10, S. 754–764.
<https://doi.org/10.1002/best.202100040>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet.
Eingereicht: 3. Mai 2021; angenommen: 10. Juni 2021.