

Schlussbericht

Betreff: Ertüchtigung der orthotropen Fahrbahnplatte einer Brücke
über die Bahn bei 89179 Beimerstetten mit einer Schicht
aus hochfestem Beton

Auftraggeber: Regierungspräsidium Karlsruhe
Abteilung 4
76247 Karlsruhe

Berichtsnummer: 13 50 69 0257.15 **Berichtsdatum:** 23.11.2015
Textseiten: 27
Anlagen: -

Bearbeiter: Dr.-Ing. Michael Haist, Dipl.-Ing. Raphael Breiner
Durchwahl: +49 (0) 721 608-44884, +49 (0) 721 608-47781
E-Mail: michael.haist@kit.edu, raphael.breiner@kit.edu

Ausfertigungen: 1fach: Regierungspräsidium Karlsruhe
1fach: MPA Karlsruhe

Notifizierte Stelle 0754 nach EU-BauPVO
Anerkannte Stelle BWU01 nach LBO
Die Akkreditierungen gelten für die in den Urkunden aufgeführten Prüf- und Zertifizierungsverfahren.



Postanschrift: Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, MPA Karlsruhe
KIT-Campus Süd, 76128 Karlsruhe

Telefon: +49 (0) 721 608-46504
Telefax: +49 (0) 721 608-47796

Lieferanschrift: Gotthard-Franz-Straße 2 - 76131 Karlsruhe, Gebäude 50.32

Internet: www.mpa-karlsruhe.de

Der Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Veröffentlichung und auszugsweise Wiedergabe bedarf der schriftlichen Genehmigung der MPA.

Inhalt

1	Vorgang	3
2	Verwendete Unterlagen und Normen	3
3	Ausgangssituation und Beschreibung des Systems	6
4	Festlegung der Anforderungen an den Beton	8
5	Eigenschaften des verwendeten Betons	9
5.1	Verwendeter Beton	9
5.2	Ausgangsstoffe und Zusammensetzung des Betons	10
5.3	Erstprüfung und Eignungsuntersuchungen (Probepplatten)	11
5.4	Betonherstellung	12
5.5	Frischbetoneigenschaften und Betonverarbeitung	13
5.6	Betondruckfestigkeit und Biegezugfestigkeit	16
5.7	Verformungsverhalten	18
5.8	Dauerhaftigkeit	18
5.9	Qualitätssicherung	20
6	Eigenschaften des Verbundsystems	20
6.1	Verbundverhalten des Betons zum Untergrund	21
6.2	Tragverhalten des Verbundsystems	21
6.2.1	Gewinnung der Proben	21
6.2.2	Versuchsbeschreibung	22
6.2.3	Ergebnisse der Biegezugversuch	23
6.2.4	Bewertung	25
6.3	Durchführung nachträglicher Schweißarbeiten am Stahlblech einer mit Beton verstärkten orthotropen Stahlplatte	25
7	Zusammenfassung und Bewertung	26

1 Vorgang

Am 25.04.2013 wurde die Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, MPA Karlsruhe, des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) von Herrn Dipl.-Ing. Mathias Scherer, Regierungspräsidium Karlsruhe, mit der Beratung des Regierungspräsidiums bei der Durchführung eines Pilotprojekts in Beimerstetten bei Ulm zur Sanierung einer orthotropen Stahl-Fahrbahnplatte mit einer Schicht aus faserbewehrtem, hochfestem Beton beauftragt.

Aufgabe der Unterzeichner war es, die technischen Randbedingungen beim Einsatz des hochfesten Betons festzulegen, die Bauausführung durch eine betontechnologische Beratung zu begleiten und den Ausführungserfolg zu bewerten. Die Ausführungen der Unterzeichner behandeln daher ausschließlich betontechnologische Aspekte. Hinsichtlich des Schichtaufbaus der Platte, der Bewehrungsführung, des Tragverhaltens und weiterer konstruktiver Aspekte wird auf die Arbeiten des verantwortlichen Tragwerkplaners, der Ingenieurgruppe Bauen Karlsruhe, sowie auf die durch die niederländische Straßenbaubehörde Rijkswaterstaat bereitgestellten Unterlagen verwiesen.

Die Ergebnisse der Überprüfungen sowie die zugehörigen Hinweise und Empfehlungen sind in insgesamt 14 Stellungnahmen (Nr. 13 50 69 0257.1 bis Nr. 13 50 69 0257.14; siehe [1-14]) sowie in einer Vielzahl von Briefen und E-Mails dokumentiert.

Der hier vorliegende Schlussbericht stellt die 15. Stellungnahme der Unterzeichner zum oben genannten Projekt dar und fasst die Ergebnisse und Erfahrungen des Pilotprojekts zusammen. Darauf aufbauend werden Empfehlungen für etwaige Folgeprojekte gegeben.

2 Verwendete Unterlagen und Normen

Hinweis: Insgesamt wurden im Rahmen des Begutachtungsprozesses über 285 Unterlagen gesichtet und bewertet. Zur Ausarbeitung der vorliegenden Stellungnahme kamen jedoch nur die im Dokument zitierten Quellen zum Einsatz.

Übergebene Unterlagen:

- [1] Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, MPA Karlsruhe: 1. Stellungnahme Nr. 13 50 69 0257.1 vom 06.05.2013 mit Betreff: Ertüchtigung der orthotropen Fahrbahnplatte einer Brücke über die Bahn bei 89179 Beimerstetten mit einer Schicht aus hochfestem Beton.
- [2] Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, MPA Karlsruhe: 2. Stellungnahme Nr. 13 50 69 0257.2 vom 29.11.2013 mit Betreff: Ertüchtigung der orthotropen Fahrbahnplatte einer Brücke über die Bahn bei 89179 Beimerstetten mit einer Schicht aus hochfestem Beton; Prüfplan für den hochfesten Beton CONTEC.
- [3] Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, MPA Karlsruhe: 3. Stellungnahme Nr. 13 50 69 0257.3 vom 17.01.2014 mit Betreff: Ertüchtigung der orthotropen Fahrbahnplatte einer Brücke über die Bahn bei 89179 Beimerstetten mit einer Schicht aus hochfestem Beton; Hinweise zum Leistungsverzeichnis sowie zu den Vorbemerkungen incl. Qualitätsplan.

- [4] Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, MPA Karlsruhe: 4. Stellungnahme Nr. 13 50 69 0257.4 vom 24.06.2014 mit Betreff: Ertüchtigung der orthotropen Fahrbahnplatte einer Brücke über die Bahn bei 89179 Beimerstetten mit einer Schicht aus hochfestem Beton; Bewertung der von der Fa. CONTEC vorgelegten Ergebnisse der Erstprüfung am hochfesten Beton.
- [5] Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, MPA Karlsruhe: 5. Stellungnahme Nr. 13 50 69 0257.5 vom 04.07.2014 mit Betreff: Ertüchtigung der orthotropen Fahrbahnplatte einer Brücke über die Bahn bei 89179 Beimerstetten mit einer Schicht aus hochfestem Beton; Bewertung der Verdichtung und des Verbunds des hochfesten Betons auf der Probeplatte.
- [6] Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, MPA Karlsruhe: 6. Stellungnahme Nr. 13 50 69 0257.6a vom 29.07.2014 mit Betreff: Ertüchtigung der orthotropen Fahrbahnplatte einer Brücke über die Bahn bei 89179 Beimerstetten mit einer Schicht aus hochfestem Beton; Bewertung des von der Fa. Leonhard Weiss vorgelegten Qualitätssicherungsplans (Rev. 1).
- [7] Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, MPA Karlsruhe: 7. Stellungnahme Nr. 13 50 69 0257.7 vom 08.08.2014 mit Betreff: Ertüchtigung der orthotropen Fahrbahnplatte einer Brücke über die Bahn bei 89179 Beimerstetten mit einer Schicht aus hochfestem Beton; Materialuntersuchungen und -prüfungen des hochfesten Betons.
- [8] Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, MPA Karlsruhe: 8. Stellungnahme Nr. 13 50 69 0257.8 vom 29.07.2014 mit Betreff: Ertüchtigung der orthotropen Fahrbahnplatte einer Brücke über die Bahn bei 89179 Beimerstetten mit einer Schicht aus hochfestem Beton; Technische Stellungnahme zum Schreiben der Fa. Leonhard Weiss GmbH & Co. KG an das Regierungspräsidium Tübingen vom 17.07.2014.
- [9] Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, MPA Karlsruhe: 9. Stellungnahme Nr. 13 50 69 0257.9 vom 15.08.2014 mit Betreff: Ertüchtigung der orthotropen Fahrbahnplatte einer Brücke über die Bahn bei 89179 Beimerstetten mit einer Schicht aus hochfestem Beton; Bewertung der Wärmeausbreitung in der Stahlplatte während der Verstärkung der Platte durch Anschweißen zusätzlicher Steifen an der Plattenunterseite.
- [10] Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, MPA Karlsruhe: 10. Stellungnahme Nr. 13 50 69 0257.10 vom 25.08.2014 mit Betreff: Ertüchtigung der orthotropen Fahrbahnplatte einer Brücke über die Bahn bei 89179 Beimerstetten mit einer Schicht aus hochfestem Beton; Ergebnisse der Betonage der 2. Probeplatte.
- [11] Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, MPA Karlsruhe: 11. Stellungnahme Nr. 13 50 69 0257.11 vom 03.09.2014 mit Betreff: Ertüchtigung der orthotropen Fahrbahnplatte einer Brücke über die Bahn bei 89179 Beimerstetten mit einer Schicht aus hochfestem Beton; Bewertung des von der Fa. Leonhard Weiss vorgelegten Qualitätssicherungsplans in der Fassung vom 21.08.2014.
- [12] Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, MPA Karlsruhe: 12. Stellungnahme Nr. 13 50 69 0257.12 vom 24.10.2014 mit Betreff: Ertüchtigung der orthotropen Fahrbahnplatte einer Brücke über die Bahn bei 89179 Beimerstetten mit einer Schicht aus hochfestem Beton; Ergebnisse der Betonage der 3. Probeplatte.
- [13] Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, MPA Karlsruhe: 13. Stellungnahme Nr. 13 50 69 0257.13 vom 29.10.2014 mit Betreff: Ertüchtigung der orthotropen Fahrbahnplatte einer Brücke über die Bahn bei 89179 Beimerstetten mit einer Schicht aus hochfestem Beton; Betonage 1. Bauabschnitt.

- [14] Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, MPA Karlsruhe: 14. Stellungnahme Nr. 13 50 69 0257.14 vom 22.06.2015 mit Betreff: Ertüchtigung der orthotropen Fahrbahnplatte einer Brücke über die Bahn bei 89179 Beimerstetten mit einer Schicht aus hochfestem Beton; Betonage 2. Bauabschnitt.
- [15] Adviesbureau ir. J. G. Hageman B.V. (Niederlande): HSB-Betonoverlagingen op stalen bruggen. Dossier 6742, Rapport 6742-1-5, December 1, 2009; Deutsche Übersetzung: Adviesbureau ir. J. G. Hageman B.V.: Dossier 6742, Fahrbahnverstärkungen aus hochfestem Beton auf Stahlbrücken. Bericht 6742-1-5, Wissensdokument (endgültige Fassung), 01.12.2009 (108 Seiten).
- [16] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbrücken unter Berücksichtigung des Belagssystems. BASt-Bericht B 76, Ingenieurbüro Prof. Sedlacek & Partner, Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau und Institut für Straßenwesen, RWTH Aachen, 2011
- [17] Ingenieurgruppe Bauen, Karlsruhe: Machbarkeitsstudie zur Verstärkung der orthotropen Fahrbahnplatte für die Rheinbrücke Maxau (B10). Auftragsnummer 011 / 0032, 2011
- [18] Müller, H. S.; Haist, M.; Günter, M.: Schreiben vom 20.03.2013 an das Regierungspräsidium Karlsruhe, Referat 43, mit Betreff: Beratung und wissenschaftliche Begleitung bei der geplanten Ertüchtigung der Rheinbrücke Maxau unter Verwendung des Systems Contec Ferroplan.
- [19] Regierungspräsidium Tübingen: Baubeschreibung für die Instandsetzung der Brücke über die DB bei Beimerstetten, Bauwerks-Nr. (ASB) 7525 553, Baumaßnahme Teilinstandsetzung der Brücke und Pilotprojekt HFB; Stand: März 2014. inkl. zugehörigem Leistungsverzeichnis.
- [20] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-74.1-71 vom 08.05.2012 für „Contec BINDER N“ als Bestandteil der „Contec FERROPLAN“-Estrichdichtschicht.
- [21] Leonhard Weiss GmbH & Co. KG: Qualitätssicherungsplan zum Bauvorhaben „Beimerstetten, L1239, Instandsetzung Bahnbrücke, Bauwerks-Nr. 7525 553. Stand: 19.09.2014
- [22] Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, MPA Karlsruhe: Anlage "Erstprüfung" zur Baubeschreibung. Stand: 17.01.2014
- [23] Öffentliche Baustoffprüfstelle der Hochschule für Technik Stuttgart, ÖBP: Zwischenbericht 106-1/2014 zur Auftrags-Nr. 106/2014; Auftraggeber: Contec International GmbH; Bauprodukt: Contec Ferroplan; Stand: 19.05.2014
- [24] Öffentliche Baustoffprüfstelle der Hochschule für Technik Stuttgart, ÖBP: Zwischenbericht 106-2/2014 zur Auftrags-Nr. 106/2014; Auftraggeber: Contec International GmbH; Bauprodukt: Contec Ferroplan; Stand: 30.05.2014
- [25] Öffentliche Baustoffprüfstelle der Hochschule für Technik Stuttgart, ÖBP: Zwischenbericht 106-3/2014 zur Auftrags-Nr. 106/2014; Auftraggeber: Contec International GmbH; Bauprodukt: Contec Ferroplan; Stand: 17.06.2014
- [26] Öffentliche Baustoffprüfstelle der Hochschule für Technik Stuttgart, ÖBP: Zwischenbericht 106-4/2014 zur Auftrags-Nr. 106/2014; Auftraggeber: Contec International GmbH; Bauprodukt: Contec Ferroplan; Stand: 07.08.2014
- [27] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton. Beuth Verlag, Berlin, 2012
- [28] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie Betonbau beim Umgang mit wassergefährdeten Stoffen. Beuth Verlag, Berlin, 2011

- [29] Wissbau Beratende Ingenieure GmbH, Essen: Prüfzeugnis zum Auftrag Nr. 2014-051, Gegenstand: Bestimmung des Chlorid-Migrationskoeffizienten an angelieferten Prüfkörpern nach der Nordtest Methode gemäß NT Build 492; geprüfetes Produkt: System Contec Ferroplan; Stand: 18.08.2014

Normen:

- DIN 1045-3:2012-03: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 3: Bauausführung, Anwendungsregeln zu DIN EN 13670.
- DIN EN 1992-1-1:2011-01: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1-1, Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010
- DIN EN 12350-4:2009-08: Prüfung von Frischbeton, Teil 4, Verdichtungsmaß.
- DIN EN 12350-5:2009-08: Prüfung von Frischbeton, Teil 5, Ausbreitmaß.
- DIN EN 12350-6:2009-08: Prüfung von Frischbeton, Teil 6, Frischbetonrohddichte.
- DIN EN 12350-7:2009-08: Prüfung von Frischbeton, Teil 7, Luftgehalt, Druckverfahren.
- DIN EN 12390-3:2009-07: Prüfung von Festbeton, Teil 3, Druckfestigkeit von Probekörpern.
- DIN EN 12390-5:2009-07: Prüfung von Festbeton, Teil 5, Biegezugfestigkeit von Probekörpern.
- DIN CEN/TS 12390-9:2006-08: Prüfung von Festbeton, Teil 9, Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand, Abwitterung.
- DIN 1048-5:1991-06: Prüfverfahren für Beton, Teil 5, Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper.
- DIN EN ISO 7500-1:2014-05: Metallische Werkstoffe, Prüfung von statischen einachsigen Prüfmaschinen, Teil 1, Zug- und Druckprüfmaschinen, Prüfung und Kalibrierung der Kraftmesseinrichtung.

3 Ausgangssituation und Beschreibung des Systems

Zielsetzung des nachfolgend kurz vorgestellten Pilotprojekts Beimerstetten war es, die Fahrbahnplatte einer orthotropen Stahlbrücke durch Aufbringung einer Schicht aus hochfestem Beton zu verstärken und dadurch die Restlebensdauer der Brücke zu verlängern. In ähnlichen Baumaßnahmen in den Niederlanden wird dabei mit einer Verlängerung der Nutzungsdauer um bis zu 30 Jahre gerechnet [15]. Das beschriebene Pilotprojekt ist dabei unmittelbar vor dem Hintergrund eines akuten Ertüchtigungsbedarfs verschiedener orthotroper Stahlbrücken in Deutschland zu sehen. Es diente dazu, die Übertragbarkeit dieser, in den Niederlanden bereits etablierten Technologie, auf deutsche Brücken zu überprüfen.

Ein wesentlicher Schädigungsmechanismus bei Stahlbrücken – und hier insbesondere bei Brücken mit orthotroper Fahrbahnplatte – stellt eine Ermüdungsbeanspruchung der einzelnen Bleche und der Schweißnähte zwischen den Blechen dar [16]. Zielsetzung aller Ertüchtigungsmaßnahmen muss es daher sein, die kritischen Schwingungszahlen signifikant, beispielsweise durch die Erhöhung der Steifigkeit der Fahrbahnplatte, zu reduzieren. Hierzu liegen in der Literatur mehrere Variantenvergleiche vor, in denen die Vor- und Nachteile einzelner Ertüchtigungsprinzipien gegenübergestellt und bewertet werden (siehe z. B. [16]). In [17] wurde die Anwendbarkeit dieses Prinzips zur Sanierung der Rheinbrücke Maxau betrachtet. Das Gutachten kommt zur Schlussfolgerung, dass durch die Aufbringung einer dünnen Schicht aus hochbewehrtem, hochfestem und hochduktilen Faserbeton eine erhebliche Verbesserung des dynamischen Verhaltens der orthotropen Stahlplatte bei gleichzeitig vertretbarer Gewichtssteigerung erzielt werden kann. Im

Feldbereich wird der Beton dabei als Druckgurt herangezogen, der mit der darunterliegenden Stahlplatte allein durch Haftverbund verbunden ist. Im Auflagerbereich wird der Beton zur Abtragung von Biegezugkräften herangezogen und muss daher durch Einbringung einer schlaffen Mattenbewehrung sowie einer Faserbewehrung entsprechend hoch bewehrt werden. Bild 1 zeigt schematisch den Aufbau einer entsprechend ertüchtigten Platte.

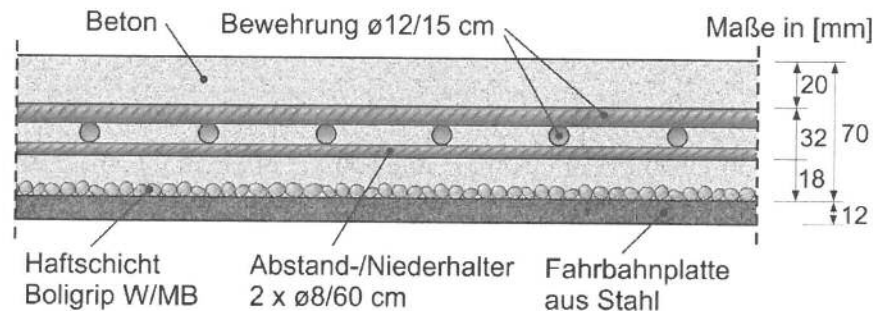


Bild 1 Schematische Darstellung des Aufbaus einer mit hochfestem Beton ertüchtigten orthotropen Fahrbahnplatte aus Stahl [15]

Die Besonderheit des in Bild 1 dargestellten Aufbaus ist im Vergleich zu üblichen Bauformen des Stahl-Beton-Verbundbaus sowohl in der Verwendung eines hochfesten Faserbetons als auch im Verzicht auf eine Verdübelung der Verbundfuge, z. B. durch Einsatz von Kopfbolzendübeln, zu sehen. Die Bauform sieht dabei vor, dass zunächst die ggf. durch Risse geschädigte orthotrope Stahlplatte stahlbautechnisch instandgesetzt wird. Auf das gestrahlte und anschließend gereinigte Stahlblech wird eine hoch leistungsfähige Schicht aus Epoxidharz aufgebracht, die noch im flüssigen Zustand mit einem hochfesten, calcinierten Bauxit-Splitt definierter Korngröße und Kornform abgestreut wird. An den Verbund dieser Schicht aus Epoxidharz und Bauxit zur unterliegenden Stahlplatte sind hohe Anforderungen zu stellen, deren Einhaltung durch Haftzugversuche am Bauwerk geprüft werden muss.

Auf die Verbundschicht wird nach abgeschlossener Erhärtung im definierten Abstand zur Stahlplatte eine Stahl-Mattenbewehrung fixiert und anschließend der faserbewehrte, hochfeste Beton aufgebracht. Die Höhe des Gesamtaufbaus aller Schichten beträgt im vorliegenden Fall ca. 70 mm. Aus der geringen Schichtdicke, dem hohen Bewehrungsgrad und der einzustellenden Oberflächenneigung resultieren extrem hohe Anforderungen an die Einbautechnik und die Verarbeitbarkeit des frischen Betons.

Nach der Erhärtung könnte der Beton prinzipiell auch als Fahrbahnbelag herangezogen werden, jedoch zeigen Untersuchungen aus den Niederlanden, dass die geforderte Griffigkeit unter Umständen nicht erreicht wird [15]. Daher wird im vorliegenden Projekt eine Verschleißschicht auf die Betonplatte aufgebracht, die als Fahrbahnbelag dient.

Die oben beschriebene Technologie der Ertüchtigung von orthotropen Stahlbrücken mit hochfestem Faserbeton wurde Ende der 1990er Jahre in den Niederlanden entwickelt und inzwischen bei mehreren sehr großen und hoch belasteten Stahlbrücken erfolgreich eingesetzt. Einen guten Überblick über die in den Niederlanden erzielten Forschungsergebnisse und die gewonnenen Erfahrungen gibt [15], das im Auftrag der Unterzeichner durch eine Fachübersetzerin ins Deutsche übersetzt wurde und als wesentliche Grundlage für die Begutachtung diente. Die Mehrzahl der in den Niederlanden ausgeführten Brücken wurde dabei unter Verwendung eines hochfesten Betons des dänischen Herstellers Fa. Contec ApS verstärkt.

4 Festlegung der Anforderungen an den Beton

In Vorbereitung der Ausschreibung des Pilotprojekts wurde durch die Unterzeichner ein Fragenkatalog zu den zu erwartenden Anforderungen an den Beton ausgearbeitet [18]. Dieser Fragenkatalog diente u. a. als Grundlage für eine Besprechung des Regierungspräsidiums Karlsruhe, der Ingenieurgruppe Bauen und des Unterzeichners Haist mit Vertretern der niederländischen Straßenbaubehörde Rijkswaterstaat sowie mit niederländischen Baufirmen.

Durch die niederländischen Partner wurde dabei erläutert, dass in den Niederlanden im Rahmen der Planungsarbeiten von Sanierungsmaßnahmen mit dem in Rede stehenden Verfahren eine Finite-Elemente-Berechnung der zu ertüchtigenden Brücken vorgenommen wird. Hierbei werden die Betoneigenschaften jedoch im Wesentlichen als gegeben angenommen, und es wird durch die Berechnungen lediglich überprüft, ob in den kritischen Stahlquerschnitten und Schweißnähten bei dynamischer Belastung eine ausreichende Reduktion der Mittel- und Oberspannungen sowie der Lastspielzahlen im Stahl der orthotropen Fahrbahnplatte bzw. den Steifen gewährleistet ist. Nach Kenntnis der Unterzeichner wird jedoch keine Bemessung des Grenzzustands der Tragfähigkeit für den Beton vorgenommen. Dieser Sachverhalt sollte im Hinblick auf zukünftige Projekte nochmals kritisch diskutiert werden. Aus Sicht der Unterzeichner erscheint eine derartige Bemessung sinnvoll und sollte insbesondere bei großen Bauwerken durchgeführt werden.

Im vorliegenden Pilotprojekt wird der verwendete Beton als Beschichtung betrachtet, die nicht zur Lastabtragung – mit Ausnahme von Radlasten – herangezogen wird. Die Tragwirkung der Brücke wird ausschließlich durch die bestehende Stahlkonstruktion gewährleistet. Eine wichtige Bedeutung kommt dem Beton jedoch im Hinblick auf den Korrosionsschutz sowohl der in den Beton eingebetteten Bewehrung als auch der darunterliegenden Stahlkonstruktion zu. Auch dieser Sachverhalt wurde mit den niederländischen Experten eingehend diskutiert. Die Langzeiterfahrungen über einen Zeitraum von ca. 10 Jahren von Rijkswaterstaat an mit hochfestem Beton ertüchtigten Brücken belegen derzeit keine gravierenden Korrosionsschäden. Ausdrücklich wurde in diesem Zusammenhang jedoch auf die Notwendigkeit einer lunker- und porenfreien Ausführung hingewiesen. Weiterhin führten die niederländischen Kollegen aus, dass das Verfahren dazu diene, die Nutzungsdauer von Bauwerken zu verlängern, die die planmäßige Nutzungsdauer bereits erreicht haben und somit reduzierte Anforderungen an die Dauerhaftigkeitsschutzziele zu richten seien.

Die in den Niederlanden üblichen Anforderungen an den Beton sind nachstehend aufgeführt (siehe [15]). Leider macht die genannte Quelle teilweise keine Angaben, nach welchen Normen und Methoden die einzelnen Eigenschaften geprüft wurden.

- Betondruckfestigkeitsklasse geprüft gemäß NEN 6720 (28 Tage): C90/105
- E-Modul (ohne Angabe Prüfverfahren): $50.000 \text{ N/mm}^2 \pm 5.000 \text{ N/mm}^2$
- Biegezugfestigkeit (ohne Angabe Prüfverfahren): $10 \text{ N/mm}^2 \pm 2,5 \text{ N/mm}^2$
- Grundschrundverformung nach 90 Tagen (ohne Angabe Prüfverfahren und Streumaß): 0,30 ‰
- Trocknungsschrundverformung nach 90 Tagen (ohne Angabe Prüfverfahren und Streumaß): 0,45 ‰
- Wärmedehnzahl im Temperaturbereich 10 °C bis 20 °C im Alter von 28 Tagen: $10 \cdot 10^{-6} \pm 1 \cdot 10^{-6} [-]$
- Masseverlust durch Abwitterung im Frost-Tausalz-Wechselversuch
(ohne Angabe von Prüfverfahren und Streumaß) < 10 g/m²
- Chlorideindringwiderstand (RCM-Methode): $2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
- Gewässerschutzanforderungen (spezifische Anforderungen für die Niederlande)

Neben den mechanischen Eigenschaften und der Dauerhaftigkeit werden auch Anforderungen an die Betonausgangsstoffe, die Betonzusammensetzung, die Frischbetoneigenschaften und die Nachbehandlung festgelegt [15]:

- Stahlfasergehalt (Faserart: l = 12,5 mm; d = 0,4 mm): 75 kg/m³
- Grobe Gesteinskörnung (gemäß NEN-EN 12620): Korngruppe 2/5
- AKR-Beständigkeit der Gesteinskörnung (CUR-Empfehlung 89): AKR beständig
- LP-Gehalt des Betons (ohne Angabe Prüfverfahren): 2 Vol.-%
- Rohdichte (ohne Angabe Prüfverfahren): 2.500 kg/m³ bis 2.625 kg/m³
- Frischbetoneigenschaften: auf Geometrie und Bewehrungsgehalt abgestimmt
- Nachbehandlung: Schutz vor Temperaturschwankungen, Kälte, Austrocknung bis Druckfestigkeit > 50 N/mm²

Weitere Anforderungen werden an die Auslegung der Bewehrung, die Eigenschaften der Haftverbundschicht, bestehend aus Epoxidharz und Bauxit, sowie die Ausbildung von Rändern und Arbeitsfugen gestellt.

5 Eigenschaften des verwendeten Betons

Basierend auf den Empfehlungen der niederländischen Straßenbaubehörde Rijkswaterstaat sowie den Ausführungen in [15] (siehe Abschnitt 4) wurde durch das Regierungspräsidium Karlsruhe, unterstützt durch die Ingenieurgruppe Bauen und die Unterzeichner, ein Ausschreibungstext in Form einer Baubeschreibung für das Pilotprojekt Beimerstetten entwickelt [19]. Nachfolgend wird auf die wichtigsten Festlegungen der Baubeschreibung eingegangen. Hierbei werden ausschließlich jene Arbeiten beleuchtet, die im direkten Zusammenhang mit der Ausführung der Schicht aus hochfestem Beton stehen. Aufgrund der Bedeutung des Verbunds zwischen dem hochfesten Beton und der darunterliegenden Schicht aus Epoxidharz werden weiterhin die Anforderungen an die mechanischen Verbundeigenschaften kurz erläutert.

Eine Besonderheit des Projekts stellte die Forderung nach dem Einsatz konkreter Produkte einzelner Hersteller dar. Dies war erforderlich, um eine möglichst enge Ankoppelung an die niederländischen Erfahrungen zu gewährleisten. Die Notwendigkeit dieser Regelung für zukünftige Projekte sollte nach Ansicht der Unterzeichner überprüft werden.

5.1 Verwendeter Beton

Bei dem hier eingesetzten hochfesten Beton handelt es sich um das Produkt Contec Ferroplan B105 der Fa. Contec International GmbH, Bad Waldsee. Für dieses Produkt liegt eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) des Deutschen Instituts für Bautechnik, Nr. Z-74.1-71 vom 08.05.2012 vor [20]. Gegenstand der Zulassung ist ein Bindemittelgemisch mit der Bezeichnung Contec Binder N, das zur Herstellung einer Estrichdichtschicht eingesetzt werden kann. Der Anwendungsbereich des Produkts wird durch die bauaufsichtliche Zulassung auf Anlagen zum Lagern, Abfüllen und Umschlagen von wassergefährdenden Flüssigkeiten (LAU-Anlagen) sowie auf Tankstellen beschränkt. Einen Einsatz des Betons zur Herstellung tragender Bauteile im Sinne von DIN EN 1992-1-1:2004 (Eurocode 2) schließt die vorliegende Zulassung aus. Weiterhin macht die Zulassung Einschränkungen hinsichtlich der zulässigen Untergründe, auf die das System aufgebracht werden darf. In der Ausschreibung wurde der Zulassungsbereich daher auf den hier vorliegenden Anwendungsbereich durch eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) vom 19.03.2014 erweitert. Für einen Regeleinsatz im Brückenbau bzw. zur Herstellung oder Verstärkung tragender Bauteile nach

DIN EN 1992-1-1:2004 sollte eine Erweiterung des Zulassungsgegenstands der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung auf tragende Bauteile gefordert werden.

5.2 Ausgangsstoffe und Zusammensetzung des Betons

Zur Ausführung wurde auf Empfehlung des Herstellers, der Fa. Contec International GmbH, die in Tabelle 2 (Variante B) der Zulassung beschriebene Zusammensetzung des Betons festgelegt [20]. Folgende Ausgangsstoffe wurden eingesetzt:

- Contec Binder N gemäß abZ Nr. Z-74.1-71 vom 08.05.2012
- Contec Quarz B9, Korngröße 0,1 mm bis 1,5 mm, gemäß abZ Nr. Z-74.1-71 vom 08.05.2012
- Contec Hyperit B7, Korngröße 2,0 mm bis 5,0 mm, gemäß abZ Nr. Z-74.1-71 vom 08.05.2012
- Weidacon Stahldrahtfasern Typ FG 12,5/0,4, Dicke 0,4 mm, Länge 12,5 mm, gemäß abZ Nr. Z-3.71-1834
- Wasser

Hinsichtlich der verwendeten Gesteinskörnungen wurde in der Baubeschreibung zum Pilotprojekt Beimerstetten, in Ergänzung zur vorliegenden allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung, ein Nachweis der Unbedenklichkeit gegenüber einer Alkali-Silika-Reaktion gefordert. Die hier festgelegte Einstufung in die Klasse E1 erscheint angemessen, sollte jedoch individuell bei jeder neuen Ausschreibung geprüft werden. Weiterhin wurde ein sog. NA-Zement mit niedrigem Na_2O -Äquivalent gefordert. Auch diese Festlegung sollte in zukünftigen Ausschreibungen beibehalten werden.

Von allen Ausgangsstoffen sollte eine jeweils ausreichend große Menge an Rückstellproben entnommen werden, um im Zweifelsfall Nachprüfungen an den Stoffen bzw. daraus hergestellten Mischungen vornehmen zu können. Die in der vorliegenden Baubeschreibung angegebenen Mengen von 50 kg Trockenmischung und 10 kg Stahlfasern haben sich als geeignet erwiesen.

Eine Offenlegung der Eigenschaften der Ausgangsstoffe und der genauen Zusammensetzung des eingesetzten Binders wurde durch die Herstellerfirma abgelehnt. Die Einhaltung der beim Deutschen Institut für Bautechnik, DIBt, hinterlegten und in abZ Nr. Z-74.1-71 festgelegten Zusammensetzung des Binders und der Eigenschaften der Ausgangsstoffe wurde jedoch durch die Öffentliche Baustoffprüfstelle (ÖBP) Stuttgart überwacht und durch das Übereinstimmungszertifikat Nr. 05/2007 vom 07.08.2007 sowie durch die laufende werkseigene Produktionskontrolle bestätigt.

Hinsichtlich der Zusammensetzung des Betons wurde von der Fa. Contec die in Tabelle 1 angegebene Rezeptur empfohlen. Wie aus Tabelle 1 deutlich wird, wurde die in der Ausschreibung geforderte Zusammensetzung durch die ausführende Firma als Soll-Zusammensetzung im QS-Handbuch zur Maßnahme [21] festgelegt und unter Berücksichtigung der zulässigen Toleranzen sowohl beim ersten als auch beim zweiten Bauabschnitt eingehalten. Der Vergleich der mittleren theoretischen Frischbetonrohddichte (Summe der Einwaagen pro 1 m^3) mit der mittleren, experimentell ermittelten Rohddichte lässt eine systematisch zu geringe Ergiebigkeit erkennen. Diese betrug im ersten Bauabschnitt $0,969 \text{ m}^3$ und im zweiten Bauabschnitt $0,962 \text{ m}^3$ anstatt des geforderten Volumens von $1,0 \text{ m}^3$. Hierauf wurde auch in der 4. Stellungnahme der Unterzeichner hingewiesen (siehe [4]). Im Hinblick auf zukünftige Baumaßnahmen sollten die Sollwertangaben um die tatsächliche Ergiebigkeit der Mischung korrigiert werden. Hierdurch ergeben sich erhöhte Soll-Einwaagen (siehe Tabelle 1).

Tab. 1 Zusammensetzung, theoretische und experimentell ermittelte Frischbetonrohddichte sowie Ergiebigkeit des in der Ausschreibung empfohlenen Systems Contec Ferroplan im Vergleich zu den Festlegungen des QS-Handbuchs sowie den Untersuchungsergebnissen aus dem 1. und 2. Bauabschnitt (BA)

Zeile	Ausgangsstoff	Dimension	Dosierempfehlung für 1 m ³ Frischbeton		Frischbetonzusammensetzung Mittelwerte (Standardabweichung)			
					gemäß Einwaage		um Ergiebigkeit korrigiert	
			Ausschreibung	QS-Handbuch	1. BA	2. BA	1. BA	2. BA
1	Contec Binder N	[kg]	416	416 ± 8 ^{*)}	1.088 (9)	1.082 (6)	1.123	1.125
2	Contec Quarz B9	[kg]	666	666 ± 13 ^{*)}				
3	Contec Hyperit B7	[kg]	1.248	1.248 ± 25	1.242 (11)	1.233 (14)	1.282	1.282
4	Stahldrahtfasern	[kg]	80	80 ± k.A.	80 (0)	80 (0)	83	83
5	Wasser	[kg]	138	138 ÷ 145 ^{**)}	142 (2,8)	141 (2,5)	146	147
6	mittlere theoretische Frischbetonrohddichte	[kg/m ³]	2.548	2.552	2.552	2.536	2.633	2.637
7	mittlere tatsächliche Frischbetonrohddichte	[kg/m ³]	-	-	2.633 (10)	2.637 (20)	2.633	2.637
8	mittlere Ergiebigkeit der Mischung	[m ³]	-	-	0,969	0,962	1,0	1,0

*) gemeinsame Dosierung

**) zulässiger Bereich zur Konsistenzsteuerung der Mischung

Da es sich bei dem verwendeten Binder N um ein Gemisch aus verschiedenen Bindemitteln, Fasern und Betonzusatzmitteln handelt, war eine nachträgliche Dosierung eines Betonverflüssigers zur Konsistenzsteuerung nicht möglich. Deswegen wurde in der vorliegenden Maßnahme der Wassergehalt zur Konsistenzsteuerung variiert. Um negative Auswirkungen auf die Festbetoneigenschaften und die Dauerhaftigkeit des Betons auszuschließen, wurde durch die Unterzeichner gefordert, dass die Erstprüfung der Mischung mit dem höchsten zulässigen Wassergehalt durchgeführt werden sollte (siehe Abschnitt 5.3). Dieses Vorgehen hat sich als zielführend erwiesen und sollte bei zukünftigen Ausschreibungen beibehalten werden. In Ergänzung zum vorliegenden Ausschreibungstext sollten zukünftig zusätzliche Voruntersuchungen zur Festlegung der zulässigen Spannweite des Wassergehalts gefordert werden.

5.3 Erstprüfung und Eignungsuntersuchungen (Probepplatten)

Im Rahmen der Ausschreibung wurde festgelegt, dass der Betonhersteller vor Beginn der Eignungsuntersuchungen (Herstellung von Probepplatten) eine Erstprüfung für ausgewählte Betoneigenschaften vorlegen muss. Die durchzuführenden Prüfungen wurden von den Unterzeichnern in Abstimmung mit dem Regierungspräsidium Karlsruhe und der Ingenieurgruppe Bauen in Form der Anlage „Erstprüfung“ zur Baubeschreibung festgelegt (siehe [22]). Grundlage für die darin aufgeführten Prüfungen bildeten die in den Niederlanden gemachten Erfahrungen und die dort geltenden Bestimmungen (siehe Abschnitt 4). Bei der Festlegung der einzelnen Untersuchungen und des Untersuchungsumfangs wurde auftragsgemäß davon ausgegangen, dass sich das Ziel der Baumaßnahme – nämlich die dauerhafte Instandsetzung einer orthotropen Fahrbahnplatte – mit dem System Contec Ferroplan, so denn es die in Abschnitt 4 aufgeführten Eigenschaften aufweist, realisieren lässt.

Die Anlage „Erstprüfung“ der Baubeschreibung ist in zwei Abschnitte gegliedert und legt Untersuchungen zu den Frischbetoneigenschaften sowie zu den Festbetoneigenschaften und der Dauerhaftigkeit fest (siehe [22]). Hinsichtlich der Frischbetoneigenschaften werden Untersuchungen über einen Zeitraum von bis zu 120 min nach Wasserzugabe gefordert. Diese Untersuchungen sollten auch in zukünftigen Projekten im vorliegenden Umfang gefordert werden, da sie eine Bewertung der Frischbetoneigenschaften inklusive deren zeitlicher Entwicklung gestatten. Die langen Untersuchungszeiträume von max. 120 min sind erforderlich, um das Frischbetonverhalten im eingebauten Zustand richtig einschätzen und den zulässigen Verarbeitungszeitraum festlegen zu können. Auf die Durchführung des BAS-UHPC-Tests musste im vorliegenden Projekt verzichtet werden, da trotz wiederholter Nachfrage bei den niederländischen Projektpartnern keine vollständige Beschreibung des Versuchsaufbaus und -ablaufs beschafft werden konnte. Im Hinblick auf die Prüfung der Frischbetoneigenschaften hat sich der Verdichtungsmaßversuch gemäß DIN EN 12350-4 als geeignet erwiesen.

Der in Anlage „Erstprüfung“ spezifizierte Prüfumfang sollte bezüglich der vorgesehenen Frischbetonuntersuchungen in zukünftigen Ausschreibungen zwingend um Untersuchungen zum Einfluss der Frischbeton-temperatur auf die Verarbeitungseigenschaften ergänzt werden. Hierbei sollten folgende Szenarien untersucht werden:

- Einfluss unterschiedlicher Temperaturen des Anmachwassers (z. B. in den Stufen 3 °C, 8 °C, 13 °C, 20 °C) bei sonst konstanter Temperatur der granularen Ausgangsstoffe (z. B. in den Stufen 15 °C und 20 °C) auf die Frischbetonkonsistenz
- Einfluss unterschiedlicher Frischbetontemperaturen bei gleichzeitiger Temperierung aller Ausgangsstoffe auf ein einheitliches Temperaturniveau (z. B. in den Stufen 10 °C, 15 °C, 20 °C und 25 °C) auf die Frischbetonkonsistenz.

Im Hinblick auf die in der Anlage „Erstprüfung“ festgelegten Untersuchungen zu den Festbetoneigenschaften und der Dauerhaftigkeit sollte angesichts des ausgeprägten Nacherhärtungsverhaltens des Betons der Sekanten-E-Modul in zukünftigen Projekten zusätzlich im Alter von 56 Tagen und 90 Tagen ermittelt werden.

Ein Blick auf die Ergebnisse der von der ÖBP Stuttgart durchgeführten Erstprüfung zeigt, dass diese nur sehr bedingt das tatsächliche, bei der Bauausführung ermittelte Verhalten des Betons widerspiegeln. Die Ursachen hierfür sind nicht klar. Nach Angaben der Ausführenden (der ÖBP Stuttgart) ist dies auf Probleme beim Mischen des Betons zurückzuführen.

5.4 Betonherstellung

Die Baubeschreibung sah eine Dosierung aller Ausgangsstoffe in getrennter Form als Sackware vor. Diese Festlegung ging auf die Angabe des Herstellers Contec zurück, dass man eine Anlieferung nur als Sackware realisieren könne. Im Rahmen der Herstellung der verschiedenen Probepplatten wurde jedoch festgestellt, dass der Dosiervorgang aus einzelnen Säcken extrem zeitaufwändig und fehleranfällig ist und zudem aufgrund der starken Staubentwicklung zu einer Gesundheitsgefährdung des damit betrauten Personals führt. Vor diesem Hintergrund wurde für die Ausführung der 3. Probepplatte sowie des 1. und 2. Bauabschnitts die Anlieferung der Stoffe in sogenannten Big-Bags mit definierter und kontrollierter Einwaage vereinbart. Die gesamte, für eine Mischercharge benötigte Menge der einzelnen Ausgangsstoffe wurde jeweils

in einzelnen Big-Bags vorgehalten und vollständig in den Mischer dosiert. Diese Änderung sollte bei zukünftigen Ausschreibungen beibehalten werden. Für größere Baumaßnahmen erscheint der Einsatz von Silos und automatischen Wägeeinrichtungen angebracht.

Für die Betonherstellung wurde in der Baubeschreibung die Vorhaltung von mindestens drei baugleichen Mixchern gefordert, um eine unterbrechungsfreie Versorgung der Baustelle mit Beton sicherzustellen. Diese Forderung ist von zentraler Bedeutung und sollte auch in zukünftigen Ausschreibungen beibehalten werden. Weiterhin wird in der Baubeschreibung ein Mischvolumen von 500 dm³ empfohlen. Für zukünftige Maßnahmen erscheint es hier angebracht, dass Mischvolumen (d. h. die Mengen an verdichtetem Beton pro Mischercharge) von 500 dm³ auf 750 dm³ bis 1000 dm³ zu erhöhen, da hierdurch eine höhere Gleichmäßigkeit der Betoneigenschaften sichergestellt werden kann. Im Hinblick auf die Qualitätssicherung des Betons hat es sich als äußerst wichtig erwiesen, durch Voruntersuchungen eine geeignete Dosierreihenfolge der Ausgangsstoffe festzulegen und die entsprechenden Dosier- und Mischzeiten exakt einzuhalten. Entsprechende Untersuchungen sollten bereits in der Ausschreibung gefordert werden. Die durchschnittliche Mischdauer des Betons betrug beim 1. Bauabschnitt 8,8 min ± 2,1 min und beim 2. Bauabschnitt 11,9 min ± 1,9 min. Die geforderte Mindestmischdauer von 15 min wurde somit bei beiden Bauabschnitten unterschritten. Dies hatte jedoch scheinbar keine negativen Auswirkungen auf die Frischbetoneigenschaften.

Eine wichtige Erkenntnis aus den Arbeiten zur Herstellung von Probplatten als auch aus der Herstellung der Bauabschnitte 1 und 2 stellt der Einfluss der Frischbeton- und der Umgebungstemperatur auf die Betoneigenschaften dar. Im Rahmen des vorliegenden Projekts konnte nur durch Verwendung von Brucheis bzw. gekühltem Wasser (Temperatur 3 °C bis 5 °C) eine ausreichende Verarbeitbarkeit des Betons erzielt werden. Die Frischbetontemperatur sollte auf Werte zwischen 15 °C und 20 °C begrenzt werden. Der im QS-Handbuch der ausführenden Firma festgelegte Grenzwert der Frischbetontemperatur von 25 °C hat sich als nicht zielführend erwiesen, da bei dieser Temperatur keine ausreichende Verarbeitung des Betons gegeben war. Der Grenzwert musste daher im Rahmen des Projekts angepasst werden. Im Hinblick auf die Ausschreibung zukünftiger Projekte sollte die Vorhaltung geeigneter Kühlanlagen gefordert und ggf. im Leistungsverzeichnis verankert werden. Aus der hohen Temperaturempfindlichkeit des Betons ergeben sich weiterhin signifikante Einschränkungen hinsichtlich der Jahreszeit der Bauausführung, die bei der Planung zwingend berücksichtigt werden müssen. Inwieweit diese Einschränkungen durch eine Einhausung und Klimatisierung der Baustelle kompensiert werden können, ist unklar.

5.5 Frischbetoneigenschaften und Betonverarbeitung

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die im Rahmen der Erstprüfung sowie bei der Ausführung der Bauabschnitte 1 und 2 ermittelten Frischbetoneigenschaften.

Für die Frischbetonrohichte des Betons, geprüft gemäß DIN EN 12350-6, wurde aufgrund der Angaben der Fa. Contec in der Baubeschreibung ein Maximalwert von 2.700 kg/m³ festgelegt. In zukünftigen Ausschreibungen sollte hier zwingend auch ein Mindestwert oder ein Soll-Wert inkl. zulässiger Abweichung vorgeschrieben werden. Das zulässige Streuband sollte aus Gründen der Qualitätssicherung möglichst eng gefasst werden. Die im vorliegenden Projekt ermittelten Ergebnisse können dabei zur Orientierung herangezogen werden: Bei der Herstellung des ersten Bauabschnitts wies der Beton eine mittlere Frischbetonrohichte von 2.633 kg/m³ bei einer Standardabweichung von 20 kg/m³ auf.

Tab. 2 Frischbetoneigenschaften des Betons, ermittelt im Rahmen der Erstprüfung sowie während der Betonage des ersten und zweiten Bauabschnitts

Nr.	Kennwert	Dimen- sion	Erstprüfung	Mittelwert (Standardabweichung)	
				1. BA	2. BA
1	Frischbetonrohddichte (DIN EN 12350-6)	[kg/m ³]	2.680	2.633 (20)	2.637 (10)
2	LP-Gehalt (DIN EN 12350-7)	[Vol.-%]	1,13	1,53 (0,3)	1,28 (0,2)
3	Ausbreitmaß (DIN EN 12350-5)	[mm]	360	k. A. *)	k. A. *)
4	Konsistenzklasse	[-]	F1	k. A. *)	k. A. *)
5	Verdichtungsmaß nach Mischende (DIN EN 12350-4)	[-]	1,13	1,13 (0,03)	1,12 (0,03)
6	Verdichtungsmaßklasse	[-]	C2	C2	C2
7	Frischbetontemperatur	[°C]	27,0	17,7 (0,8)	15,4 (1,0)
8	Temperatur Anmachwasser	[°C]	-	8,7 (1,0)	10,8 (0,8)

*) Prüfung nicht möglich, da keine ausreichende Konsistenz

Der Luftporengehalt des Betons wurde in der Ausschreibung mit einem Maximalwert von 2,0 Vol.-% angegeben. Im Rahmen der Erstprüfung sowie der ausführungsbegleitenden Untersuchungen zeigte sich, dass der Luftgehalt – wie zu erwarten – sehr eng mit der Frischbetonrohddichte und der Betondruckfestigkeit korreliert (siehe Bild 2). Vor diesem Hintergrund sollte auch in zukünftigen Ausschreibungen zwingend eine Begrenzung des LP-Gehalts auf Werte kleiner 1,5 Vol.-% bis 2,0 Vol.-% gefordert werden.

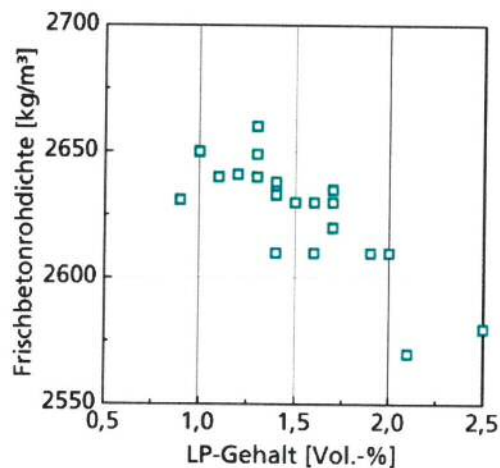


Bild 2 Zusammenhang zwischen der Frischbetonrohddichte und dem LP-Gehalt der Betone der Bauabschnitte 1 und 2

Im Rahmen der Ausschreibung zum Projekt Beimerstetten wurden lediglich die Methoden zur Prüfung der Frischbetonkonsistenz festgelegt, jedoch keine Angaben zu Soll-Werten und zulässigen Abweichungen gemacht. Diese Vorgehensweise sollte auch bei zukünftigen Ausschreibungen beibehalten werden, da die

Konsistenzanforderungen in hohem Maße von der gewählten Einbautechnik abhängig sind. Im Pilotprojekt Beimerstetten kam zur Frischbetonprüfung lediglich das Verdichtungsmaß gemäß DIN EN 12350-4 zum Einsatz. Als günstig erwiesen sich Verdichtungsmaße zwischen 1,10 und 1,15, entsprechend der Verdichtungsmaßklasse C2 (siehe Tabelle 2). Für zu geringe Verdichtungsmaße zeigten die Betone eine verstärkte Neigung zum Bluten. Für zu hohe Verdichtungsmaße erwies sich hingegen der Betoneinbau als problematisch. An dieser Stelle wird jedoch darauf hingewiesen, dass beispielsweise durch Verwendung eines Fertigers ggf. auch Betone mit höherem Verdichtungsmaß eingesetzt werden können oder sogar müssen. Dies muss jeweils im Einzelfall geprüft werden. Bild 3 zeigt, dass mit abnehmendem Verdichtungsmaß und damit zunehmender Frischbetonkonsistenz eine verbesserte Verdichtung einhergeht und der LP-Gehalt abnimmt. Gleichzeitig nimmt die Frischbetonrohddichte durch die verbesserte Verarbeitbarkeit zu.

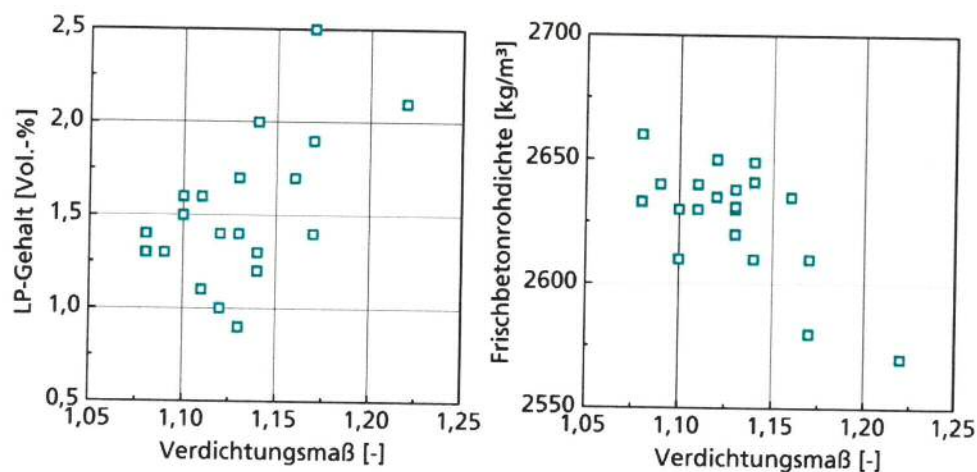


Bild 3 Einfluss der Frischbetonkonsistenz (Verdichtungsmaß) auf den LP-Gehalt und die Frischbetonrohddichte der im Rahmen der Herstellung der Bauabschnitte 1 und 2 geprüften Betone

Die Verarbeitungsdauer des Betons wurde in der vorliegenden Ausschreibung auf 60 min begrenzt. Weiterhin wurden deutlich kürzere Verarbeitungszeiten gefordert. Die Notwendigkeit für beide Forderungen muss auf Grundlage der gemachten Erfahrungen betont werden. Insbesondere stellen die zunehmende Erwärmung des Betons sowie der mit der Alterung verbundene Konsistenzrückgang ein Problem dar. Im QS-Handbuch zu jeder Maßnahme sollten daher konkrete Regelungen aufgeführt werden, ab welchem Alter der Beton nicht mehr eingebaut werden darf.

Der Einbau des Betons erfolgte in Beimerstetten händisch. Hierzu wurde Beton zunächst mittels Schubkarren in kleinen Chargen zur Einbaustelle transportiert. Während dem Transport sollte dabei auf eine Minimierung von Erschütterungen geachtet werden, da der Beton sonst bereits verdichtet wird und sich die Verarbeitbarkeit verschlechtert.

Untersuchungen an der ersten und zweiten Probepalette zeigten, dass durch eine direkte Schüttung des Betons auf die unvorbehandelte, trockene Schicht aus abgestreutem Epoxidharz keine ausreichende Verbundfestigkeit gewährleistet werden kann. Vor diesem Hintergrund wurde die Schüttfläche, bestehend aus erhärtetem Epoxidharz mit darin eingebetteten Körnern aus calciniertem Bauxit, mittels eines feinen Sprühnebels aus Wasser in sehr geringem Umfang vorgehässelt. Unmittelbar im Anschluss wurde der Beton dann

auf die vorbehandelte Fläche geschüttet und – soweit infolge der dichten Bewehrung möglich – mittels Schiebern verteilt.

Eine wichtige Erkenntnis aus diesem Pilotprojekt ist weiterhin, dass während des Verteilvorgangs zwingend darauf geachtet werden muss, den Beton zeitnah nach der Schüttung (im Abstand von wenigen Minuten) zu verdichten. Weiterhin muss sichergestellt werden, dass keine Betonreste auf Bereiche fallen, die erst deutlich später betoniert werden. Derartige Verschmutzungen – obwohl prinzipiell aus dem gleichen Beton – trocknen innerhalb kürzester Zeit an und stören dann den Verbund zum Untergrund.

Wie bereits erläutert, ist die Verdichtung des Betons bei der hier gewählten Einbauart als besonders anspruchsvoll zu bewerten. Im Rahmen der Herstellung der ersten, zweiten und dritten Probeplatte zeigte sich, dass eine alleinige Verdichtung mittels einer Rüttelbohle nicht ausreicht. Stattdessen muss das frische Material mittels einer parallel zur Betonoberfläche geführten Rüttelflasche zunächst lagenweise vorverdichtet werden. Im Anschluss daran kann dann die Verdichtung mittels einer Rüttelbohle erfolgen. Hierbei sollte eine Bohle mit möglichst hoher Leistung gewählt werden. Bei den Arbeiten zeigte sich, dass die Leistung einer elektrisch betriebenen Rüttelbohle nicht ausreichte, um den Beton zu verdichten. Vor diesem Hintergrund wurde eine druckluftbetriebene Rüttelbohle eingesetzt, die eine ausreichende Verdichtungsqualität gewährleistete.

Die oben beschriebenen Probleme waren aufgrund des eingehenden Studiums der durch die niederländische Straßenbauverwaltung Rijkswaterstaat bereitgestellten Unterlagen weitgehend vorhergesehen und bereits durch entsprechende Hinweise, Empfehlungen und Forderungen in der Baubeschreibung berücksichtigt worden. Lediglich das Vornässen des Untergrunds stellt eine wichtige neue Forderung dar, die in der Ausschreibung berücksichtigt werden sollte. Die gemachten Erfahrungen belegen jedoch auch, dass der hier beschriebene Einbauvorgang handwerklich hoch anspruchsvoll ist und erfahrenes und auf die Besonderheiten dieses Betons geschultes Fachpersonal erfordert. Auf die Bedeutung einer hohen Personalintensität während des Einbaus wird hingewiesen.

Neben dem Einbau und der Verdichtung erfordern auch die Nachbehandlung und das Glätten des vorliegenden Betons große Erfahrung und Sachkenntnis. Im vorliegenden Fall wurden die Arbeiten von einer mit dem System Contec Ferroplan vertrauten Fachfirma ausgeführt. Die Unterzeichner empfehlen, in zukünftigen Ausschreibungen einen Erfahrungsnachweis des eingesetzten Personals beim Glätten von Ferroplan zu fordern. Die sonstigen Festlegungen der Ausschreibung zur Nachbehandlung des Betons haben sich als zielführend erwiesen und sollten so beibehalten werden. Gleiches gilt für die Regelungen zum Zeitpunkt des Beginns des Kugelstrahlvorgangs sowie der Dünnschichtbelagsbeschichtung. An dieser Stelle wird nochmals ausdrücklich auf die ausgeprägte Temperaturabhängigkeit der Festigkeitsentwicklung hingewiesen, die bei der Festlegung des Strahlbeginns unbedingt beachtet werden muss.

5.6 Betondruckfestigkeit und Biegezugfestigkeit

Hinsichtlich der Festbetoneigenschaften wurde in der Baubeschreibung ein Mindestwert der charakteristischen Betondruckfestigkeit (Würfel; Kantenlänge 150 mm) von $f_{ck,cube} = 105 \text{ N/mm}^2$ in Verbindung mit einer schnellen Festigkeitsentwicklung gefordert. Hierbei wurde bewusst von der in der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung zum Produkt getroffenen Festlegung von prismatischen Probekörpern ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$) als Nachweisformat abgewichen, da diese Probengeometrie nach Ansicht der Unterzeichner nicht als Grundlage für Baustellenprüfungen geeignet ist. Diese Entscheidung hat sich im Rahmen des Projekts als richtig erwiesen und sollte auch in zukünftigen Ausschreibungen so umgesetzt werden.

Die geforderte charakteristische Druckfestigkeit konnte im Rahmen der Erstprüfung nicht zielsicher im Bemessungsalter von 28 Tagen erreicht werden (siehe Tabelle 3 und [4]). Gleiches gilt für den Beton in Bauabschnitt 2. Unter Berücksichtigung der Nacherhärtung des Betons und des zu erwartenden Belastungsalters erscheint im vorliegenden Fall eine Erhöhung des Nachweisalters möglich, so dass bei beiden Bauabschnitten die geforderte charakteristische Druckfestigkeit spätestens ab einem Betonalter von 56 Tagen erreicht war. Auf die Möglichkeit einer Anpassung des Bemessungsalters war in der Ausschreibung hingewiesen worden. In zukünftigen Ausschreibungen sollte die Bedeutung des Bemessungsalters nochmals betont werden. Bei der Herstellung der dritten Probeplatte [12] und dem ersten Bauabschnitt [13] wurde die geforderte charakteristische Druckfestigkeit hingegen im Alter von 28 Tagen erreicht.

Tab. 3 Festbetoneigenschaften des in der Erstprüfung untersuchten und des bei der Ausführung der Bauabschnitte 1 und 2 verwendeten Betons

Nr.	Kennwert	Prüfalter	Dimension	Mittelwerte (Standardabweichung)		
				Erstprüfung ¹⁾	1. BA ²⁾	2. BA ³⁾
1	Betondruckfestigkeit Würfel $f_{cm,cube}$ (DIN EN 12390-3)	1	[N/mm ²]	51,2 (2,3)	k. A.	k. A.
2		2		76,1 (0,7)	67,3 (6,8)	63,2 (5,0)
3		3		75,7 (7,6)	78,6 (3,9)	70,4 (6,7)
4		7		89,7 (0,4)	94,4 (1,8)	84,7 (3,8)
5		28		107,0 (3,8)	112,3 (7,2)	102,0 (0,4)
6		56		122,9 (0,7)	k. P.	109,6 (3,1)
7		180		k. P.	k. P.	121,0 (-)
8	Betondruckfestigkeit Zylinder f_{cm} (DIN EN 12390-3)	28	[N/mm ²]	k. P.	107,2 (8,3)	94,6 (1,2)
9	Festigkeitsklasse gemäß Erstprüfung bzw. Identitätsprüfung (BA 1 und 2) ^{*)}	28	[-]	C80/95	C90/105	C80/95
10	Biegezugfestigkeit (DIN EN 12390-5)	1	[N/mm ²]	5,0 (0,3)	k. P.	k. P.
2		7,2 (0,6)				
3		7,8 (0,3)				
7		9,6 (0,5)				
28		9,8 (0,7)				
56		k. P.				
11	E-Modul (DIN 1048-5; Wasserlagerung)	28	[N/mm ²]	49.000 (2000)	49.800 (1000)	48.000 (800)

k. A. – keine Angaben; k. P. – keine Prüfung vorgesehen

*) Unterschiedliche Einstufungen in den Festigkeitsklassen zwischen Erstprüfung und Bauausführung resultieren u.a. aus unterschiedlichen Sicherheitsniveaus der Erstprüfung und der Identitätsprüfung (siehe DIN 1045-3:2012-03).

1) siehe [23-26]

2) siehe [13]

3) siehe [14]

Für die Biegezugfestigkeit des Betons wird in der vorliegenden Ausschreibung ein Mindestwert von $f_{ctm,BZ} \geq 10 \text{ N/mm}^2 \pm 2,5 \text{ N/mm}^2$, geprüft nach DIN EN 12390-5 und der Richtlinie Stahlfaserbeton des DAfStb [27], festgelegt. Hierzu wurden den Unterzeichnern von der Fa. Contec bzw. der Öffentlichen Baustoffprüfstelle Stuttgart (ÖBP) Ergebnisse von Untersuchungen an Biegebalken vorgelegt, die zeigen, dass die geforderte Biegezugfestigkeit leicht unterschritten, aber unter Berücksichtigung der zulässigen Toleranzen erreicht wurde (siehe Tab. 3 sowie [26]). Im Hinblick auf zukünftige Maßnahmen sollte die Ausschreibung um einen Nachweis des erhöhten Dehnvermögens von 2 ‰ gemäß der DAfStb-Richtlinie „Beton beim Umgang mit wassergefährdeten Stoffen“ [28] ergänzt werden (siehe [20]).

5.7 Verformungsverhalten

Für den E-Modul (Sekantenmodul) wurde aufbauend auf die Erfahrungen in den Niederlanden im Rahmen der Ausschreibung ein Soll-Wert von $55.000 \text{ N/mm}^2 \pm 5.500 \text{ N/mm}^2$ festgelegt. Aus den durchgeführten Materialuntersuchungen wird deutlich, dass der Sollwert – auch unter Ausschöpfung des Toleranzbereichs – geringfügig unterschritten wird (siehe Tabelle 3). Für die dritte Probeplatte wurde der erforderliche E-Modul unter Berücksichtigung des zulässigen Streubandes eingehalten [12]. Da die Untersuchungsergebnisse jedoch systematisch geringere Werte als der Soll-Wert zeigen, sollte in zukünftigen Ausschreibungen die Bedeutung des E-Moduls für das Tragverhalten der Struktur kritisch geprüft und bei Unbedenklichkeit der Soll-Wert entsprechend angepasst werden. Für den im Rahmen des Projekts verwendeten Beton geprüft gemäß DIN 1048-5:1991-06 erscheinen Werte von $E_{cm} = 49.000 \text{ N/mm}^2 \pm 3.000 \text{ N/mm}^2$ im Alter von 28 Tagen realistisch.

Für die Grund- und Trocknungsschwindverformung des Betons im Schwindrinnenversuch wurde in der Baubeschreibung ein Maximalwert von 0,30 ‰ bzw. 0,45 ‰ festgelegt (siehe [19]). Die durch den Betonhersteller vorgelegten Erstprüfergebnisse zeigen, dass diese Werte signifikant (bis zu Faktor 2) überschritten werden (siehe [24]). Leider sind die von der ÖBP Stuttgart vorgelegten Untersuchungsergebnisse nur bedingt nachvollziehbar, da wichtige Angaben fehlen. Hierauf wurde hingewiesen (siehe [4]). Im Vorfeld zukünftiger Ausschreibungen sollte untersucht werden, wie sich das stark erhöhte Verformungsbestreben des Betons auf den Aufbau von Zwangsspannungen im Beton, auf dessen Rissneigung und auf den Verbund zur Epoxidharzschicht auswirkt. Entsprechend sind dann ggf. angepasste Kennwerte festzulegen. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass der reduzierte E-Modul des Betons eine reduzierende und damit günstige Wirkung auf den Aufbau von Zwangsspannungen zur Folge hat. Die Konsequenzen des reduzierten E-Moduls für die Mittel- und Oberspannungen im darunterliegenden Stahlblech können hier jedoch nicht bewertet werden.

Für das Wärmedehnverhalten des Betons wurde eine maximale Wärmedehnung von $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ festgelegt. Hierzu liegen keine Untersuchungsergebnisse vor.

5.8 Dauerhaftigkeit

Bei der Sicherstellung der Dauerhaftigkeit des ertüchtigten Bauwerks kommt der Dichtheit und Dauerhaftigkeit der Schicht aus hochfestem Beton eine zentrale Bedeutung zu. Diese Fragestellung kann noch nicht abschließend bewertet werden, da nur vereinzelte Prüfergebnisse zur Dauerhaftigkeit der Betoneigenschaften, nicht jedoch zum Verbundsystem Beton-Bewehrungsstahl-Verbundschicht-Stahlplatte vorliegen. Insbesondere die hoch dynamische Belastung des Betons und die walkende Einwirkung von Reifen machen Dauerhaftigkeitsuntersuchungen am Verbundsystem erforderlich, die jedoch nicht Gegenstand des vorliegenden Auftrags waren.

Im Rahmen der Ausschreibung wurde zum Nachweis der Frostbeständigkeit eine Prüfung mittels des CDF-Verfahrens gemäß DIN CEN/TS 12390-9 gefordert. Aufgrund der erheblich schärferen Frostbeanspruchung in Beimerstetten im Vergleich zu den Niederlanden wurde ein Maximalwert der Abwitterung von 750 g/m^2 gefordert, der auch problemlos eingehalten wurde. Gemäß den Untersuchungen der Öffentlichen Baustoffprüfstelle Stuttgart (ÖBP) betrug die mittlere Abwitterung nach 28 Frost-Tauwechseln $34,6 \text{ g/m}^2$ (siehe [26]). Auffallend war jedoch eine signifikante Veränderung des dynamischen E-Moduls des Betons infolge der Befrostung. Bild 4 zeigt, dass der dynamische E-Modul, insbesondere zwischen dem 14. und 28. Frost-Tauwechsel, stark abnimmt. Dies deutet auf eine zunehmende innere Schädigung des Betons hin. Mit einem Abfall des dynamischen E-Moduls von 16,5 % im Alter nach 28 Frost-Tauwechseln erfüllt der Beton die in der Ausschreibung genannte Anforderung. Im Hinblick auf zukünftige Ausschreibungen wird jedoch dringend empfohlen, den Beton einer erhöhten Anzahl von Frost-Tauwechseln (z. B. 90 FTW) zu unterziehen, um das Langzeitverhalten des Materials besser beurteilen zu können.

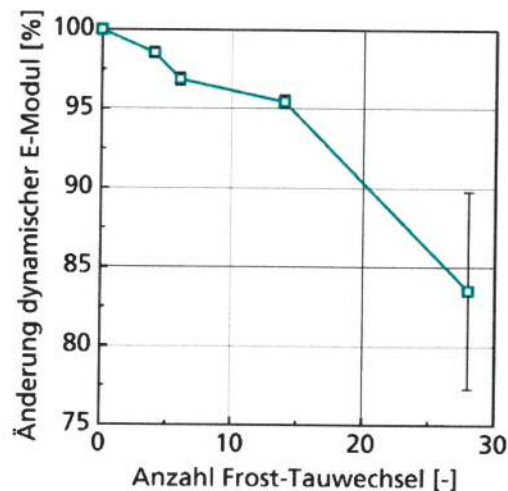


Bild 4 Änderung des dynamischen E-Moduls des Betons im CDF-Versuch in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tauwechsel (FTW) inkl. Standardabweichung [26]

Zur Beschreibung des Widerstands gegen Chlorideindringung wurde der Nachweis des Chloridmigrationskoeffizienten gefordert. Dieser sollte $D_{Rcm} \leq 2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ entsprechen. Die von der ÖBP Stuttgart vorgelegten Untersuchungsergebnisse zeigen, dass dieser Grenzwert eingehalten wurde [29]. Der Chloridmigrationskoeffizient betrug $D_{Rcm} = 9,9 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$. Im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit des Verbundsystems unter einer dynamischen Belastung sollte untersucht werden, wie sich eine ggf. auftretende Rissbildung auf das Chloridmigrationsverhalten auswirkt.

Im Hinblick auf die Sicherstellung der Dauerhaftigkeit des gesamten Verbundsystems sieht die Baubeschreibung eine Rissbreitenbegrenzung auf max. 0,1 mm und eine systematische Verpressung größerer Risse vor. Diese Vorgehensweise scheint den Unterzeichnern zielführend und sollte auch in zukünftigen Ausschreibungen zwingend beibehalten werden. Dies ist von besonders hoher Relevanz, da die Mindestbetondeckung zu nur 20 mm festgelegt wird, was jedoch den Erfahrungen in den Niederlanden entspricht.

5.9 Qualitätssicherung

In der Bauausschreibung zum vorliegenden Pilotprojekt Beimerstetten wird die Zuordnung des Betons zur Überwachungsklasse 3 sowie die ständige Anwesenheit geschulten und nachweislich qualifizierten Personals gefordert. Diese Forderung hat sich im vorliegenden Projekt als zwingend notwendig erwiesen und sollte auch in zukünftigen Ausschreibungen beibehalten werden. Weiterhin sollte auch immer ein Qualitätssicherungshandbuch für die Betonarbeiten erstellt und im Vorfeld der Arbeiten durch einen Sachverständigen geprüft werden. Die Einhaltung der QS-Regeln sollte durch einen vom Bauherrn gestellten Sonderüberwacher kontrolliert werden.

Aufgrund der noch ungeklärten Dauerhaftigkeit des Verbundsystems empfehlen die Unterzeichner, das Bauwerk in regelmäßigen Abständen einer Bauwerksprüfung und hier insbesondere einer Untersuchung der Schicht aus hochfestem Beton auf Risse zu unterziehen.

6 Eigenschaften des Verbundsystems

Im Vorfeld der Betonagen des ersten und zweiten Bauabschnitts wurden insgesamt drei Probeplatten sowie eine sogenannte Musterplatte hergestellt. Die Herstellung der Musterplatte diente der Schulung der mit der Bauausführung beauftragten Firma Leonhard Weiss durch den Betonhersteller, Fa. Contec International. An der Musterplatte wurden keine weiteren Untersuchungen durchgeführt.

Im Anschluss an die Herstellung der Musterplatte wurden Probeplatten mit repräsentativen Abmessungen und realistischer Bewehrungsanordnung hergestellt. In der Ausschreibung war hierbei nur die Herstellung einer Probeplatte vorgesehen gewesen. Die bei der Ausführung aufgetretenen Probleme und die resultierenden Qualitätsmängel an der so hergestellten Platte machten jedoch insgesamt zwei weitere Betonagen erforderlich. Eine detaillierte Beschreibung der aufgetretenen Mängel und deren Ursachen geben die Stellungnahmen 7, 10 und 12 der Unterzeichner [7, 10, 12].

Die einzelnen Mängel konnten im Wesentlichen auf folgende Ursachen zurückgeführt werden:

▪ **Unzureichende Verdichtung:**

Wie bereits in Abschnitt 5 ausgeführt, erfordert die sachgerechte Verdichtung des Betons große Erfahrung und technisches Geschick. Eine unzureichende Verdichtung äußerte sich u. a. in der Bildung von Lunkern und vor allem in einer Störung des Haftverbunds zum Untergrund. Die Methodik der Betonverdichtung wurde im Rahmen der Herstellung der einzelnen Probeplatten schrittweise verbessert. Die notwendigen Arbeitsschritte für eine erfolgreiche Verdichtung wurden im QS-Handbuch zur Maßnahme dokumentiert (siehe [21]).

▪ **Austrocknung des Frischbetons durch Benetzung und Wassersaugen des Untergrunds:**

Neben der Methodik der Verdichtung wurde der Haftverbund des Betons zur mit Bauxit abgestreuten Epoxidharzschicht stark durch die Oberflächenfeuchte des Untergrunds beeinflusst. Bei einer Betonage auf eine vollständig trockene Oberfläche wurde offensichtlich die Hydratation des Betons in der unmittelbaren Verbundzone gestört. Die Folge war ein teilweise flächiger Verlust des Haftverbundes. Diese Störungen konnten durch eine Benetzung der mit Bauxit abgestreuten Epoxidharzschicht durch einen feinen Sprühnebel aus Wasser beseitigt werden (siehe Abschnitt 5).

6.1 Verbundverhalten des Betons zum Untergrund

An allen Probeplatten sowie am ersten Bauabschnitt wurden Haftzuguntersuchungen zur Ermittlung des Verbunds zwischen dem hochfesten Beton und der darunterliegenden Verbundschicht vorgenommen. Aus der ersten Probeplatte wurden hierzu Bohrkerne, bestehend aus der Betonschicht sowie der darunterliegenden Stahlplatte, entnommen und an diesen Zugversuche mit einer Zugprüfmaschine an der MPA Karlsruhe durchgeführt. Bei der zweiten und dritten Probeplatte sowie am ersten Bauabschnitt wurde der Beton mit einer Bohrkronen bis zum Erreichen der Stahlplatte überbohrt und der so entstandene zylindrische Stempel auf Zug geprüft (siehe [7, 10, 12]). Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass durch die verfahrenstechnischen Verbesserungen bei der Betonage zwischen der zweiten und dritten Probeplatte eine erhebliche Verbesserung des Haftverbundes erzielt werden konnte. Insbesondere konnte durch die getroffenen Maßnahmen das gewünschte und in der Ausschreibung geforderte Versagensschema, nämlich ein Zugversagen im hochfesten Beton, erzielt werden. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Untersuchungsergebnisse.

Tab. 4 Haftzugfestigkeit und Versagensart

Nr.	Kennwert	Dimen- sion	Mittelwerte (Standardabweichung)			
			Probeplatte			Bauabschnitt
			1	2	3	1
1	Haftzugfestigkeit	[N/mm ²]	3,7 (2,2) ^{*)}	1,4 (1,2)	3,5 (0,6)	3,4 (1,0)
2	Versagensart	[-]	Verbundversagen	Verbundversagen	Betonversagen	Betonversagen
3	Prüfalter	[d]	42	11	10	35

*) Stellenweise keine Haftzugprüfung durchführbar da kein Verbund gegeben

6.2 Tragverhalten des Verbundsystems

Zur Untersuchung des Tragverhaltens des Verbundsystems, bestehend aus der Schicht aus faserbewehrtem, hochfestem Beton, der darunterliegenden mit Bauxit abgestreuten Epoxidharzschicht und der Stahlplatte, wurden 3-Punkt-Biegezugversuche an Plattenstreifen durchgeführt, die aus der 3. Probeplatte entnommen worden waren. Eine umfassende Beschreibung des Herstellverfahrens und der Ausgangsstoffe bei der Betonage der 3. Probeplatte ist der 12. Stellungnahme der Unterzeichner [12] zu entnehmen. Die Platte war am Dienstag, den 09.09.2014, durch die Fa. Leonhard Weiss GmbH & Co. KG auf der Brückenbaustelle in Beimerstetten hergestellt worden und somit zum Zeitpunkt der hier beschriebenen Untersuchungen ca. 5 Monate alt.

6.2.1 Gewinnung der Proben

Nach Abschluss der Betonagearbeiten wurden an der 3. Probeplatte, an 25 vom Regierungspräsidium Karlsruhe festgelegten Stellen, Haftzugversuche durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in der 12. Stellungnahme der Unterzeichner dokumentiert und entsprachen den Anforderungen (siehe Tab. 4 und [12]).

In Vorbereitung der hier geplanten Biegezugversuche am Bauteil war vorgesehen gewesen, Streifen definierter Breite und Länge aus der Probeplatte durch Sägen zu entnehmen. Hierbei musste durch die genaue Anordnung der Haftzugbohrungen und die Führung der Sägeschnitte sichergestellt werden, dass die auf Biegezug zur prüfenden Plattenstreifen frei von Bohrungen waren und in allen Streifen die gleiche Menge an Bewehrung enthalten war. Die Bohrkernentnahme und die Zerteilung der Platte wurden entsprechend

aufwändig durch das Regierungspräsidium Karlsruhe geplant. Trotz eindeutiger Markierungen zur Lage der auszuführenden Sägeschnitte an der Platte und entsprechende Planzeichnungen wurden die Sägearbeiten durch die ausführende Firma an den falschen Stellen ausgeführt, so dass insgesamt nur zwei ungestörte Plattenstreifen mit unterschiedlichen Breiten (35 cm und 40 cm) entnommen werden konnten. Die Plattenstreifen wurden am 25. November 2014 an der MPA Karlsruhe angeliefert und werden im Folgenden entsprechend ihrer Breite als Platte 35 (Breite 35 cm) und Platte 40 (Breite 40 cm) bezeichnet. Bis zur Anlieferung der Plattenstreifen an der MPA Karlsruhe war die 3. Probeplatte (und damit auch die daraus entnommenen Streifen) der freien Witterung auf der Baustelle in Beimerstetten ausgesetzt.

6.2.2 Versuchsbeschreibung

Das Last-Verformungsverhalten der beiden Plattenstreifen mit den Abmessungen $l \times b \times h = 2,5 \times 0,4 \times 0,1 \text{ m}^3$ (Platte 40) bzw. $2,5 \times 0,35 \times 0,1 \text{ m}^3$ (Platte 35) wurde im Alter von 5 Monaten im Rahmen von 3-Punkt-Biegezugversuchen bestimmt. Bei der Festlegung des Versuchsaufbaus wurde davon ausgegangen, dass die Plattenstreifen über ihre gesamte Länge ein gleichförmiges Materialverhalten aufweisen. Als Versuchsaufbau wurde daher ein 3-Punkt-Biegezugversuch gewählt.

Vor der Versuchsdurchführung lagerten die Betonplatten in der Versuchshalle der MPA Karlsruhe bei einer Raumtemperatur von ca. 20 °C und einer relativen Umgebungfeuchte von ca. 50 % bis 60 %. Der Einbau der Plattenstreifen erfolgte in Analogie zu ihrem Einsatz auf der Brücke mit der Stahlseite nach unten. Die Stützweite betrug 2,0 m. Die Tragrichtung der Plattenstreifen wurde normal zur Betonagerichtung gewählt. Die Belastung der Platten durch eine Linienlast erfolgte in Laststufen zu 5 kN mittels einer hydraulischen Prüfmaschine der Prüfklasse 1 gemäß DIN EN ISO 7500-1:2014-05. Die Laststeigerung zwischen den einzelnen Belastungsstufen erfolgte jeweils über einen Zeitraum von ca. 30 s. Dies entspricht einer Laststeigerungsrate von 10 kN/min. Während des Versuchs wurde die Durchbiegung f der Platten an jeweils zwei Stellen in Plattenmitte mittels induktiver Wegaufnehmer erfasst. Bild 5 zeigt den Versuchsaufbau und die Lage der Messpunkte.

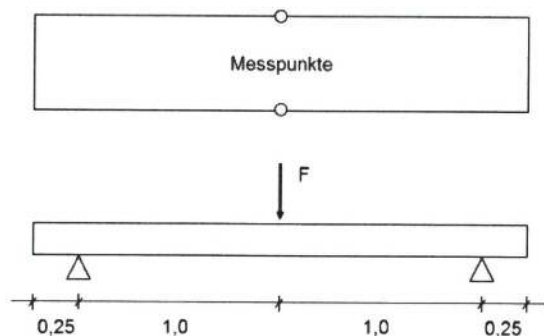


Bild 5 Versuchsaufbau zur Bestimmung des Last-Verformungsverhaltens (Maße in [m]) und die Lage der induktiven Wegaufnehmer zur Erfassung der Durchbiegung in Plattenmitte

Zusätzlich zu den punktuellen Verformungsmessungen mittels induktiver Wegaufnehmer wurden zur Erfassung der Biegelinie des Plattenstreifens bildoptische Verformungsmessungen durchgeführt. Das verwendete Messsystem (hier: PONTOS-System der Fa. GOM, Braunschweig) gestattete eine Verschie-

bungsmessung in allen drei Raumrichtungen an einer nahezu unbegrenzten Anzahl von zuvor durch Markierungen auf den Plattenstreifen aufgeklebten Messmarken. Die Messmarken wurden dabei so platziert, dass eine getrennte Erfassung der Verformungen der Stahlplatte, der Zugzone des Betons knapp oberhalb der Stahlplatte, des Betons auf Höhe der Bewehrungslage und in der Druckzone des Betons möglich war (siehe Bild 6). Prinzipiell wäre es durch diese Anordnung somit möglich gewesen, Relativverschiebungen zwischen der Stahlplatte und dem Beton mit hoher Genauigkeit zu erfassen und so lokale Ablösungserscheinungen zwischen beiden Werkstoffen festzustellen, die hier jedoch nicht beobachtet werden konnten (siehe Abschnitt 6.2.3).



Bild 6 Anordnung der Messmarken zur Erfassung der Verformungen mit dem bildoptischen PONTOS-System in Plattenmitte (links) und in der Übersicht (rechts)

6.2.3 Ergebnisse der Biegezugversuche

In Tabelle 5 sind die Bruchlasten und die maximalen Durchbiegungen der beiden geprüften Platten dargestellt. Platte 35 versagte bei einer Belastung von $150 \text{ kN} \pm 1 \text{ kN}$ und einer Durchbiegung in Plattenmitte von $15,5 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$. Platte 40 hielt aufgrund der größeren Querschnittsbreite bei etwas kleinerer Durchbiegung von $15,1 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ einer höheren Kraft von $162 \text{ kN} \pm 1 \text{ kN}$ stand.

Tab. 5 Bruchlast, Durchbiegung in Feldmitte und auf Streifenbreite normierte Bruchlast der geprüften Plattenstreifen

Zeile	Plattenbreite [cm]	Bruchlast F [kN]	mittlere Durchbiegung bei Erreichen der Bruchlast [mm]	Bruchlast pro lfd. m Streifenbreite [kN/m]	Versagensart
1	35	150,0	15,5	428,6	Versagen infolge Ablösen der Epoxidharzschicht von der Stahlplatte
2	40	162,0	15,1	405,0	

Bild 7 zeigt das Last-Verformungsverhalten der beiden Platten. Dieses ist durch eine nahezu linear-elastische Beziehung gekennzeichnet. Auch der Versagensmechanismus sowie das Bruchbild der beiden Platten waren identisch und durch ein plötzliches Schubversagen infolge des Ablösens der Epoxidharzschicht von der Stahlplatte gekennzeichnet. Bis zu diesem Zeitpunkt war keinerlei makroskopische Rissbildung im Beton festzustellen.

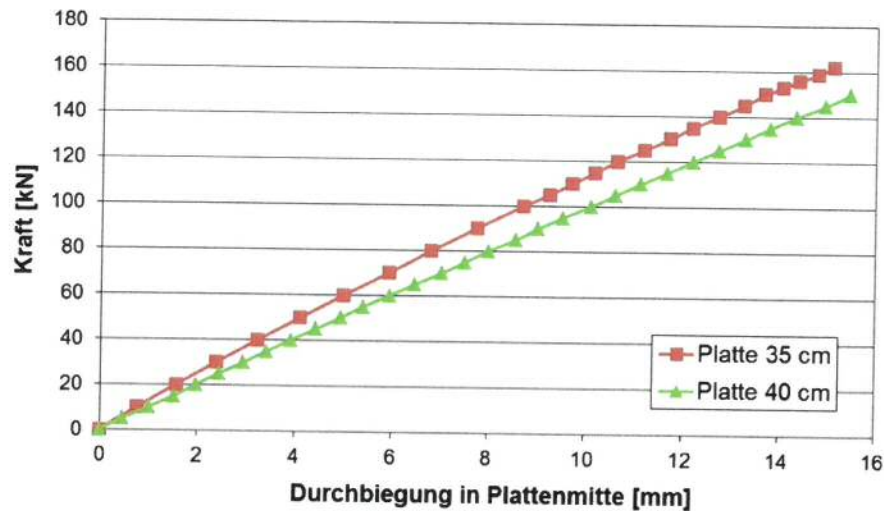


Bild 7 Zusammenhang zwischen der Kraft und der mittleren Durchbiegung in Plattenmitte für die Platten mit einer Breite von 35 cm und 40 cm



Bild 8 Ansicht der Platte 35 nach dem Versagen infolge der Ablösung der Epoxidharzschicht von der Stahlplatte (links) und Draufsicht auf die Stahlplatte nach Ausführung eines Sägeschnitts durch den Beton in Feldmitte (rechts)

Bild 8 (links) zeigt eine Ansicht der Platte 35 nach dem Versagen. Man erkennt, dass ausgehend von der Lasteinleitungsstelle in Plattenmitte ein großflächiges Ablösen der Epoxidharzschicht von der Stahlplatte stattgefunden hat. Nach Abschluss der Versuche wurde in Feldmitte ein Sägeschnitt senkrecht zur Tragrichtung der Platte durch den Beton ausgeführt (siehe Bild 8, rechts; linke Bildseite) und die abgelöste

Betonplatte abgehoben. Es zeigte sich, dass durch den Bruchvorgang sowohl die Epoxidharzschicht als auch das darin eingestreute Bauxit nahezu vollständig von der unterliegenden Stahlplatte abgelöst worden waren.

Bild 9 zeigt die Durchbiegung der Platte 40 (links; linke Seite der Platte) und der Platte 35 (rechts; rechte Seite der Platte) für verschiedene Laststufen, aufgenommen mit dem optischen Messsystem. Die so ermittelten Werte für die Gesamtdurchbiegung der einzelnen Platten stimmten mit den aufgezeichneten Werten der induktiven Wegaufnehmer gut überein.

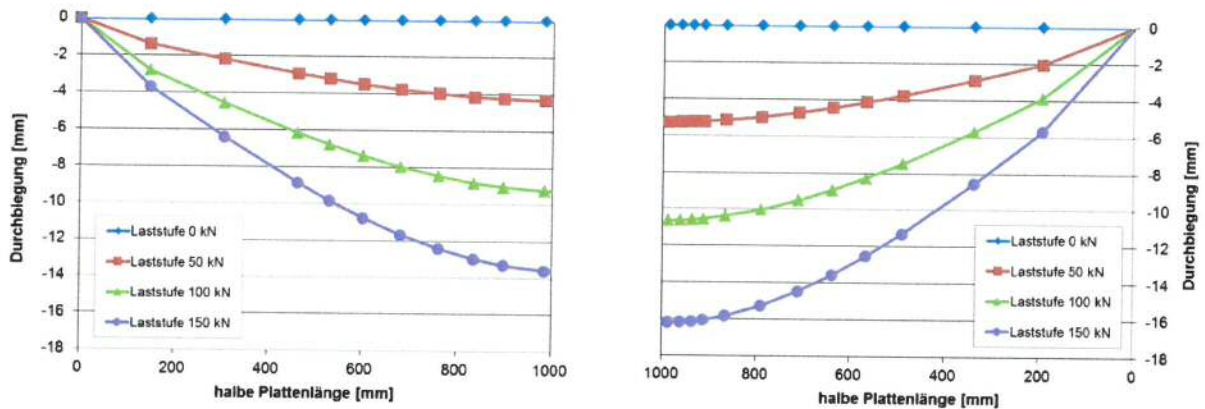


Bild 9 Durchbiegung der Platte 40 (linke Seite) und der Platte 35 (rechte Seite) bei verschiedenen Laststufen, aufgenommen mit dem PONTOS 3D-Messsystem (Messmarken jeweils auf der Stahlplatte)

Eine Vorhersage des Versagens der Platten infolge abweichender Verformungswerte in den einzelnen Lagen der Platte war aufgrund des extrem spröden Versagens des Gesamtsystems nicht möglich. Die Unterschiede in den aufgezeichneten Verformungswerten waren bis zum Versagenszeitpunkt zu gering und müssen der Messgenauigkeit des Systems zugeordnet werden.

6.2.4 Bewertung

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Plattenstreifen im Mittel eine Bruchlast von 417 kN/m laufender Plattenbreite aufwiesen. Das Versagen des Systems war durch einen Sprödbbruch in der Verbundfuge zwischen der Stahlplatte und der daraufliegenden Epoxidharzschicht gekennzeichnet. Im Beton konnte vor dem Versagenseintritt keine Rissbildung festgestellt werden.

6.3 Durchführung nachträglicher Schweißarbeiten am Stahlblech einer mit Beton verstärkten orthotropen Stahlplatte

Im Rahmen der Untersuchungen an der Probeplatte 1 wurde u. a. auch untersucht, inwieweit nach Abschluss der Sanierungsarbeiten mit dem System Contec nachträgliche Reparaturarbeiten durch Schweißen an der Unterseite der orthotropen Fahrbahnplatte vorgenommen werden können. Hierzu wurde die Wärmeausbreitung in der Stahlplatte infolge des nachträglichen Anschweißens von Steifen an die Unterseite der Probeplatte mittels einer Wärmebildkamera untersucht. Einen detaillierten Einblick in die durchgeführten Untersuchungen gibt die 9. Stellungnahme der Unterzeichner (siehe [9]).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass infolge der durchgeführten Schweißarbeiten mit einer starken, jedoch örtlich begrenzten Erwärmung der Platte zu rechnen ist, welche mit zunehmendem Abstand von der Schweißnaht schnell abklingt. Die Untersuchungen zeigten, dass durch den Schweißvorgang eine lokal begrenzte Schädigung des Schichtenaufbaus, jedoch nicht ein großflächiger Ablösevorgang infolge der Erwärmung induziert wurde. Die Möglichkeit, nachträgliche Schweißarbeiten an der Unterseite der verstärkten Stahlplatte vorzunehmen ist somit eingeschränkt.

7 Zusammenfassung und Bewertung

Im Rahmen der Baumaßnahme Pilotprojekt Beimerstetten haben die Unterzeichner im Auftrag des Regierungspräsidiums Karlsruhe die betontechnologischen Arbeiten begleitet sowie die betontechnologische Machbarkeit des Projekts überprüft und bewertet. Zielsetzung des Pilotprojekts war es, die orthotrope Stahlplatte einer Brücke über die Bahn in Beimerstetten bei Ulm durch Aufbringung einer dünnen, hoch durch Betonstahl und Fasern bewehrten Betonschicht zu verstärken und dabei die Übertragbarkeit dieses bereits in den Niederlanden erprobten Verfahrens auf deutsche Stahlbrücken zu überprüfen.

Die Ergebnisse der Überprüfungen sowie die zugehörigen Hinweise und Empfehlungen sind in insgesamt 14 Stellungnahmen (Nr. 13 50 69 0257.1 bis Nr. 13 50 69 0257.14; [1-14]) sowie in einer Vielzahl von Briefen und E-Mails dokumentiert. Die hier vorliegende 15. Stellungnahme fasst die Erfahrungen aus dem Pilotprojekt Beimerstetten zusammen und gibt Hinweise für zukünftige Bauprojekte, bei denen die hier erprobte Technologie eingesetzt werden soll. Weiterhin werden die Eigenschaften des Betons dokumentiert. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass die Unterzeichner im Rahmen des Projekts nur im geringen Umfang selbst prüfend tätig waren. Die gesamte Erstprüfung des Betons wurde nicht durch die MPA Karlsruhe, sondern durch die Öffentliche Baustoffprüfstelle Stuttgart (ÖBP) vorgenommen. Auch wurde nur eine Auswahl der wichtigsten Materialkennwerte überprüft. Nicht betrachtet wurde insbesondere die Dauerhaftigkeit des Verbundsystems, bestehend aus Stahlplatte, Verbundschicht und Beton. Diese wurde auftragsgemäß, aufbauend auf den Erfahrungen in den Niederlanden, als gegeben angenommen.

Die Zusammensetzung des von der Fa. Contec International GmbH, Bad Waldsee, angelieferten und durch die Fa. Leonhard Weiss GmbH & Co. KG eingebauten Betons entsprach unter Berücksichtigung der zulässigen Toleranzen den Forderungen der Ausschreibung. Eine Überprüfung der Einhaltung des geforderten maximalen w/z-Werts von 0,48 war im Rahmen der Prüfungen nicht möglich, da die Zusammensetzung des Bindemittels (dieses enthält neben Zement noch Betonzusatzstoffe sowie verschiedene Faserarten) nicht vom Hersteller offengelegt wurde. Entsprechend konnten auch die Anforderungen an die verwendete Zementart nicht überprüft werden.

Der geforderte Maximalwert der Frischbetonrohddichte wurde in allen Fällen eingehalten. Zusätzlich wurde im Rahmen der Maßnahme ein Minimalwert der Frischbetonrohddichte vereinbart, der ebenfalls eingehalten wurde. Die Frischbetoneigenschaften des Betons erwiesen sich als extrem stark von der Wasserdosierung sowie von der Frischbetontemperatur abhängig. Zur Gewährleistung guter Frischbetoneigenschaften mussten im Projekt gesonderte Regelungen in das QS-Handbuch zur Maßnahme aufgenommen werden.

Im Hinblick auf die geforderte Festigkeit des Betons zeigte sich, dass diese bei der Herstellung der 3. Probelatte sowie beim ersten Bauabschnitt unmittelbar im Bemessungsalter von 28 Tagen erreicht wurde. Beim zweiten Bauabschnitt wurde die geforderte Druckfestigkeit im Bemessungsalter von 28 Tagen geringfügig unterschritten. Statt der geforderten charakteristischen Festigkeit von $f_{ck,cube,soll} = 105 \text{ N/mm}^2$ wurden $f_{ck,cube,ist} = 97 \text{ N/mm}^2$ erreicht, was jedoch auf die sehr kalten Witterungsbedingungen während

der Bauphase zurückgeführt werden kann. Unter Berücksichtigung der Nacherhärtung des Betons waren auch hier die Festigkeitsanforderungen im erhöhten Betonalter (55 Tage) eingehalten. Gleiches gilt für den in der Ausschreibung geforderten E-Modul, der sowohl im ersten als auch im zweiten Bauabschnitt im Bemessungsalter unterschritten, jedoch im erhöhten Betonalter unter Berücksichtigung der zulässigen Toleranzen eingehalten wurde.

Die in der Ausschreibung geforderte maximal zulässige Trocknungsschwindverformung wurde im Rahmen der Erstprüfung signifikant überschritten. Dieser Sachverhalt muss bei zukünftigen Projekten im Rahmen der Bemessung berücksichtigt werden. Die Dauerhaftigkeit des Betons wurde im Rahmen der Erstprüfung durch die ÖBP Stuttgart geprüft. Die in der Ausschreibung geforderten Grenzwerte der Frost-Tausalzbeständigkeit sowie des Chloridmigrationswiderstands wurden eingehalten. Im Hinblick auf die Frost-Tausalzbeständigkeit sollte jedoch beachtet werden, dass der Beton mit zunehmender Anzahl der Frost-Tauwechsel eine signifikante Zunahme der inneren Schädigung aufweist. Im Vorfeld zukünftiger Maßnahmen sollte dieser Sachverhalt nochmals gesondert untersucht werden.

Da der Erfolg der konzipierten Ertüchtigungsmaßnahme mit dem hochfesten Beton der Fa. Contec International GmbH im besonderen Maße von der Ausführungsmethodik abhängig ist, war es das zentrale Ziel des vorliegenden Pilotprojekts, die Machbarkeit zu untersuchen und Erfahrungen im Umgang mit dieser neuartigen Technik zu sammeln. Dieses Ziel wurde vollständig erreicht. So konnten zentrale Einflussgrößen auf die Verarbeitbarkeit des Betons identifiziert und ein geeignetes Qualitätssicherungskonzept entwickelt werden. Aufbauend auf den Erfahrungen mit verschiedenen Probesteilen (sog. Probeplatten), die im Projekt hergestellt wurden, konnte ein reibungsfreier und qualitativ hochwertiger Betoneinbau gewährleistet werden. Die durchgeführten Haftzugversuche weisen nach, dass die in der Ausschreibung geforderten Werte eingehalten wurden.

Die durchgeführten Untersuchungen, deren wesentliche Ergebnisse oben zusammengefasst sind, zeigen auch, dass bisher nicht alle geforderten Betoneigenschaften durch die ausführenden Firmen sichergestellt werden konnten. Diese Abweichungen sind bei der Bemessung zu berücksichtigen, soweit eine Weiterentwicklung des Betons nicht zu den gewünschten Ergebnissen führen sollte. Die durch die Unterzeichner durchgeführten Bauteilversuche (Biegezugversuche an Probeplatten) belegen jedoch, dass die hier erprobte Technik eine deutliche Aussteifung der orthotropen Stahlplatte bewirkt. Im Hinblick auf mögliche Folgeprojekte sollte eine gezielte Eignungsprüfung des Materials in Form einer erweiterten Erstprüfung sowie eine gezielte Bemessung der benötigten Betoneigenschaften im Rahmen einer Bauteilbemessung gemäß den einschlägigen Richtlinien vorgesehen werden.

Der Direktor

Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller

Der Leiter der Abteilung Betonbau und Bauphysik

Dr.-Ing. Michael Haist

Der Bearbeiter

Dipl.-Ing. Raphael Breiner