

Fügen von Bauteilen aus UHPC durch Kleben

Voruntersuchungen und Anwendung bei der Gärtnerplatzbrücke in Kassel

Die 136 m lange Gärtnerplatzbrücke über die Fulda in Kassel ist die erste größere Fußgänger- und Radbrücke in Deutschland, bei der im größeren Umfang Ultrahochfester Beton (UHPC) verwendet wurde. Weltweit erstmals wurden die vorgefertigten konstruktiven Bauteile aus diesem stahlähnlich festen, sehr gefügedichten Werkstoff auf der Baustelle mit einem Epoxidharzklebstoff tragend miteinander verklebt. Für die Zustimmung im Einzelfall wurden an der Universität Kassel umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, um die für die Bemessung der Klebverbindungen notwendigen mechanischen Kennwerte zu ermitteln und um die Dauerhaftigkeit der Klebverbindung abschätzen zu können. Über die Ergebnisse dieser Untersuchungen und über die Ausführung der Baumaßnahme wird nachstehend berichtet. Das praktische Verhalten der hybriden Brückenkonstruktion mit den schubbeanspruchten Klebfugen wird durch ein umfangreiches Monitoringsystem über mehrere Jahre hin online erfasst.

Adhesive Assembling of Structural UHPC Elements Preliminary Investigations and Application at the Gaertnerplatz Bridge in Kassel

The Gaertnerplatz Bridge in Kassel with a length of 136 m is the first large pedestrian and cyclist bridge in Germany that was built from ultra high performance concrete (UHPC). For the first time in the world the precast constructional elements made from this steel-like concrete were supportingly glued by an epoxy resin. For the approval in this particular case extensive investigations were accomplished at the University of Kassel to get mechanical characteristic data. With these results it is possible to dimension the glued joints regarding mechanical strength and durability. The results of these investigations and process of building are presented in this article. The practical characteristics of the hybrid bridge construction with its shear stressed glued joints is being monitored by an extensive number of online sensors for several years.

1 Einleitung

Ultrahochfester Beton (UHPC) ist ein besonders gefügedichter, praktisch kapillarporenfreier fein- oder grobkörniger Beton mit einer stahlähnlichen Druckfestigkeit von rd. 180 bis 200 N/mm². Er ist auch an der Bauteiloberfläche sehr dicht und homogen. Seine Oberflächenzugfestigkeit von rd. 6 bis 8 N/mm² legt es nahe, Bauteile aus UHPC statt mit üblichen mechanischen Verbindungselementen durch Kleben zu fügen. Ein erstes praktisches Beispiel da-

für ist die Gärtnerplatzbrücke über die Fulda in Kassel. Sie ist mit rd. 136 m Länge die erste größere Fußgänger- und Radbrücke mit Ultrahochfestem Beton in Deutschland [1], [2]. Die Brücke besteht aus einem leichten, dreidimensionalen Stahlrohr-Fachwerk, das mit den beiden Obergurten aus UHPC mit hochfesten, vorgespannten Schraubverbindungen verbunden ist. Der Brückenquerschnitt ist in Bild 1 dargestellt. Die Obergurte bestehen aus 12 m bis 36 m langen, im Spannbett vorgespannten, sehr schlanken Fertigteilen, die mit durchlaufenden Spanngliedern nachträglich auf volle Länge vorgespannt wurden. Auf die Obergurte wurden die jeweils 5,0 m × 2,0 m großen, einaxial vorgespannten Fahrbahnplatten aus wärmebehandeltem, faserhaltigem Ultrahochfesten Beton mit einem Epoxidharzklebstoff aufgeklebt. Verklebt wurden auch die Stoßfugen der Fertigteilplatten, um ein dichtes, quasi monolithisches Brückendeck zu erhalten. Über die Klebfuge zwischen den Obergurten und den Deckenplatten wird ständig eine Schubspannung von bis zu max. 2 N/mm² übertragen. Dieser Spannungswert im Grenzzustand der Tragfähigkeit ergibt sich aus Last- und Zwangseinwirkungen, z. B. infolge wechselnder Umgebungstemperaturen und der nachträglichen Vorspannung in den Obergurten. Damit wurden weltweit erstmals tragende Bauteile ausschließlich durch Kleben dauerhaft lastübertragend gefügt.

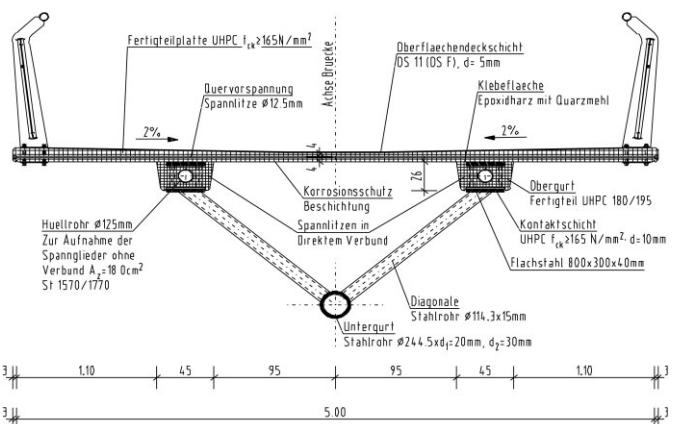


Bild 1. Querschnitt der Gärtnerplatzbrücke in Kassel mit Klebfugen zwischen Obergurten und Fahrbahnplatten
 Fig. 1. Cross section of the Gaertnerplatz Bridge with adhesive joints between upper girders and bridge deck slabs

2 Kleben im Betonbau

Im Automobilbau und beim Bau von Flugzeugen ist das Kleben statisch oder dynamisch beanspruchter Bauteile seit Jahren üblich und bewährt. Im Betonbau werden seit rd. 40 Jahren Bauteile verstärkt, indem auf die Oberfläche Stahllaschen aufgeklebt werden. Seit etwa 15 Jahren werden anstelle von Stahllaschen zunehmend CFK-Lamellen oder CFK-Gelege verwendet [3] bis [8]. Die Leistungsfähigkeit solcher Verstärkungen wird i. d. R. durch die relativ geringe Oberflächenfestigkeit des Betons begrenzt. Als Klebstoffe werden überwiegend mineralisch gefüllte, kalthärtende, zweikomponentige Epoxidharze verwendet. Solche Epoxidharze werden auch für die Fixierung von hoch beanspruchten Klebdübeln verwendet [9].

Klebverbindungen sind auch bei der so genannten Segmentbauweise üblich, bei der vorgefertigte Betonsegmente z. B. für Brücken im Bauzustand zusammengeklebt werden [10]. Die Segmente werden dann allerdings nachträglich zusammengespannt. Im Gebrauchszustand werden die Längszugbeanspruchungen durch die Vorspannung und eventuelle Scherbeanspruchungen in den vertikalen Segmentfugen durch eine nut- und federähnliche Profilierung der Bauteile aufgenommen. Der Klebstoff dient dann in erster Linie nur noch zur Abdichtung der Konstruktionsfugen. Die seit mehreren Jahrzehnten angewendete Bauweise lässt darauf schließen, dass Klebverbindungen bei Beton dauerhaft sind.

Die Zug- und Schubfestigkeit von Normalbeton ist im Vergleich zu seiner Druckfestigkeit klein. Die einaxiale Zugfestigkeit beträgt rd. 1,5 bis höchstens 3 N/mm². Die einige Millimeter dicke Randzone des Betonbauteils ist zudem i. d. R. poröser und weniger fest als der Beton im Innern des Bauteils. Deshalb wird sie vor dem Kleben z. B. durch Sandstrahlen abgetragen. Zudem wird vor dem Kleben eine niedrigviskose Grundierung aufgebracht, die in die Kapillarporen des Betons eindringt, diesen verfestigt und gleichzeitig als Haftvermittler dient. Bei Klebverbindungen von Normalbeton tritt immer ein Kohäsionsbruch im Beton ein. Beim Kleben von statisch beanspruchten Betonbauteilen sind außerdem folgende Besonderheiten zu berücksichtigen:

- Zum Ausgleich der Fertigungstoleranzen kann die Dicke der Klebfugen zwischen rd. 2 und rd. 10 mm schwanken.
- Die Klebfugen können horizontal, vertikal oder geneigt sein.
- Klebfugen von Außenbauteilen sind langwelligen (Sommer, Winter) und kurzwelligen (Tag, Nacht) Temperaturänderungen zwischen rd. -20 und rd. +40 °C unterworfen, kombiniert mit wechselnder rel. Luftfeuchtigkeit zwischen rd. 30 und 100% r. F. (Nebel, Regen).
- Brücken und andere Verkehrsbauwerke werden zudem mit Tausalz eisfrei gehalten. Dabei werden die Bauteile physikalisch hoch beansprucht und müssen zugleich widerstandsfähig gegen die Salzlösung sein.
- Geklebte Fugen von Verkehrsbauwerken werden im Gebrauchszustand zusätzlich zu den quasistatischen temperatur- und feuchtebedingten Spannungen und den planmäßigen Beanspruchung durch Vorspannung und Eigengewicht durch die Verkehrslasten dynamisch auf

Druck-, Schub und/oder Zug beansprucht. Dies bedeutet, dass sich unterschiedliche mehrachsige statische und dynamische Lastfälle überlagern.

- Bei Überbeanspruchung dürfen die Verbindungen nicht schlagartig versagen, wenn dies zu einem Verlust der Tragfähigkeit führt.
- Im Brandfall muss die Klebfuge ausreichend lange standhalten.

Allen diesen Besonderheiten müssen der Klebstoff, die Konstruktion und die Applikationstechnik Rechnung tragen.

3 Ultrahochfester Beton

Ultrahochfester Beton weist im Unterschied zu Normalbeton ein sehr dichtes, praktisch kapillarporenfreies Gefüge auf. Dies bedeutet u. a., dass keine betonschädigenden Gase oder Flüssigkeiten eindringen können – allerdings auch keine niedrigviskosen Harze oder Klebstoffe. Bild 2 zeigt die sehr dichte Gefügestruktur, Bild 3 die Porenverteilung des in Tabelle 1 aufgeführten UHPC-Feinkornbetons im Vergleich zu Normalbeton C30/37 und zu einem Hochfesten Beton [11], [12]. Die einaxiale Zugfestigkeit



Bild 2. REM-Aufnahme des sehr dichten UHPC-Gefüges
Fig. 2. SEM image of the dense UHPC microstructure

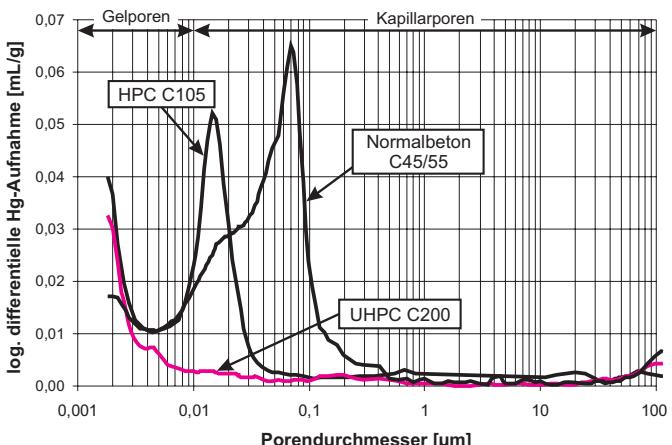


Bild 3. Porengrößenverteilung von UHPC im Vergleich zu Normalbeton und hochfestem Beton
Fig. 3. Pore size distribution of UHPC compared to ordinary and high performance concrete

Tabelle 1. Zusammensetzung und Eigenschaften des UHPC
Table 1. Composition and properties of the UHPC used

UHPC	Einheit	M1BS
Zement	kg/m ³	733
Basaltsand 0/2,5 mm	kg/m ³	1091
Silikastaub	kg/m ³	230
Stahlfasern (0,99 Vol.-%)	kg/m ³	78
Quarzmehl	kg/m ³	183
Fließmittel	kg/m ³	28,6
Wasser	l/m ³	161
Wasserzementwert (w/z)	-	0,24
Wasser-Feststoff-Verhältnis (w/f)		0,19
Druckfestigkeit nach 48h Wärmebehandlung mit 0,99 Vol.-% Stahlfasern	N/mm ²	179
Zugfestigkeit	N/mm ²	9
Biegezugfestigkeit	N/mm ²	19,6
Oberflächenzugfestigkeit	N/mm ²	6 bis 8

tigkeit erreicht ohne Fasern rd. 6 bis 8 N/mm², mit geeigneten Stahlfasern bis zu rd. 15 N/mm². Die Biegezugfestigkeit beträgt mit Stahlfasern bis zu rd. 35 N/mm². Die Fasern verleihen dem Beton zugleich die für eine sichere Bemessung und Konstruktion notwendige Duktilität im Bruch- und Nachbruchbereich. Die Randzone ist – zumindest bei den üblicherweise wärmebehandelten UHPC-Bauteilen – ebenso fest und homogen wie der Kern, und die Oberfläche ist glatt oder nahezu beliebig profilierbar. Wesentliche Vorarbeiten zur stofflichen Zusammensetzung und zu den mechanischen Eigenschaften wurden an der Universität Kassel geleistet [13], [14].

Zum Kleben von UHPC wurden erste orientierende Untersuchungen an torsionsbeanspruchten Kleinprüfköpfen veröffentlicht [15]. Sie zeigten einerseits, dass es prinzipiell möglich ist, UHPC-Bauteile tragend miteinander zu verkleben. Andererseits wurde festgestellt, dass hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der Verbindungen bei hohen Temperaturen und hoher Luftfeuchtigkeit noch Forschungsbedarf besteht, weil sich bei einigen wenigen bei höherer Temperatur und Feuchtigkeit gelagerten Proben der Klebstoff vom Beton löste.

Bei den Voruntersuchungen für die Zustimmung im Einzelfall der Gärtnerplatzbrücke wurden deshalb nicht nur die statischen und dynamischen Gebrauchsbeanspruchungen berücksichtigt, sondern auch die Dauerhaftigkeit der Klebverbindung bei den für die Gärtnerplatzbrücke denkbar ungünstigsten Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen. Im Rahmen eines Schwerpunktprogramms der DFG (SPP 1182) zur Weiterentwicklung der UHPC-Bauweise wird ebenfalls das Fügen von UHPC-Bauteilen durch Kleben untersucht, überwiegend an druck- und schubbeanspruchten Prüfkörpern [16].

4 Grundlagen zum Kleben

Zwischen UHPC und dem quarzgefüllten Epoxidharz besteht ein inniger Kontakt. Die Verbindung zwischen Be-

ton und Klebstoff kann prinzipiell auf vier Mechanismen beruhen:

- Dringen der Klebstoff und/oder die Grundierung in größere Poren des Substrates ein, so führt dies zu einer mechanischen Verankerung (mechanische Adhäsion) zwischen beiden Stoffen. Daneben spielt die Rauheit (Textur) der Oberfläche eine Rolle. Bei grob rauen Oberflächen ist die Kontaktfläche, die zur Ausbildung von physikalischen Bindungskräften zur Verfügung steht, größer.
- Die Autoadhäsion ist eine mechanische Verzahnung auf molekularer Ebene: Die Adhäsion wird nach dieser Theorie durch die Anzahl der in beiden Richtungen – Fügeteil und Klebstoff – diffundierenden Moleküle und deren Eindringtiefe in das Fügeteil bestimmt. Erreicht die Eindringtiefe einen bestimmten Wert, werden die zwischenmolekularen Kräfte so groß, dass die Klebstoffmoleküle nicht mehr aus dem Fügeteil herausgezogen werden können. Dann ist die Haftkraft gleich der Kohäsion des Klebstoffs oder des Fügeteils.
- Zwischen den Molekülen der Fügeteiloberflächen und des Klebstoffs kommt es zudem zur Ausbildung physikalischer Bindungen. Dabei handelt es sich um elektrostatische Wechselwirkungen polarer Gruppen aufgrund entgegen gesetzter elektrischer Ladungen oder temporärer Ladungsverteilungen. Die auftretenden Kräfte sind *van-der-Waals*-, Dipol- und Induktionskräfte. Bei stark polaren Gruppen, die Wasserstoffatome tragen, treten auch Wasserstoffbrückenbindungen auf.
- Betonoberflächen besitzen eine große Zahl reaktiver Endgruppen (silikatische OH-Gruppen), die auch für eine chemische Bindung mit dem Klebstoff infrage kommen. Übliche Epoxidharze können jedoch nicht mit diesen funktionellen Gruppen reagieren. Hier können u. U. Haftvermittler das Bindeglied bilden, die gleichzeitig eine Bindung zur Betonoberfläche und zum Klebstoff eingehen.

5 Untersuchungen

5.1 Beton und Klebstoff

Die Zusammensetzung und die wesentlichen Kenndaten des für die Gärtnerplatzbrücke verwendeten UHPC sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Er wurde an der Universität Kassel entwickelt und entspricht der in [13] ausführlich dargestellten Rezeptur M1BS.

Als Klebstoff wurde Sikadur-30 eingesetzt, ein lösungsmittelfreier, thixotroper zweikomponentiger Epoxidharzmörtel, der u. a. zum kraftschlüssigen Verbinden von Stahl- und CFK-Lamellen mit Beton verwendet wird. Er besteht aus rd. 20 bis 25 M.-% Harz und rd. 75 bis 80 M.-% Quarzmehl. Seine wesentlichen Kenndaten enthält Tabelle 2.

5.2 Untersuchungen an Prüfkörpern

Untersucht wurde das Verhalten von Klebfugen unter verschiedenen Last- und Klimabedingungen an unterschiedlichen Prüfkörpern sowie bei Schub-Druckbeanspruchung an maßstäblichen Bauteilen [13], [17], [18].

Tabelle 2. Eigenschaften des Klebstoffs Sikadur-30 (Herstellerangaben)
Table 2. Properties of the epoxy mortar Sikadur-30 (manufacturer information)

Art des Klebstoffs		Epoxidharz, zweikomponentig
Anteil Füllstoff ¹⁾	M.-%	75 bis 80
Farbe		hellgrau
Dichte	kg/dm ³	1,65
Glasübergangstemperatur	°C	53
Zugfestigkeit (DIN 43455)	N/mm ²	33 (Haftung auf Stahl)
Druckfestigkeit (DIN 1164-7) nach 24 h	N/mm ²	
bei 35 °C		ca. 95
bei 10 °C		ca. 55
Scherzugfestigkeit ²⁾	N/mm ²	ca. 20
statischer E-Modul	N/mm ²	12800
thermischer Ausdehnungs-koeffizient	K ⁻¹	9 · 10 ⁻⁵ (-10 °C bis +40 °C)
Schwinden	%	0,04

¹⁾ ermittelt im Laborversuch

²⁾ geprüft an Kleinzylinern, Durchmesser 20 mm („Scherzugversuch nach Sika“)

5.2.1 Prüfkörper

Aus dem in Tabelle 1 angegebenen faserhaltigen UHPC wurden Prismen 40 mm × 40 mm × 160 mm, 150 mm Würfel und – in Anlehnung an die Fahrbahnplatten der Brücke – 80 mm dicke Platten hergestellt. Aus den Platten wurden 700 mm × 150 mm × 80 mm große Plattenstreifen herausgesägt. Die Prüfkörper wurden zunächst 48 Stunden in der Schalung konservierend vorgelagert und danach überwiegend bei rd. 90 °C 24 Stunden lang wärmebehandelt. Sie hatten danach ihre Endfestigkeit erreicht. Bis zum Verkleben im Alter von zehn Tagen lagerten sie anschließend an Laborluft bei 20 °C/65% r. F. Einige Prüfkörper wurden ohne Wärmebehandlung 28 Tage unter Wasser und anschließend vor dem Verkleben 24 Stunden bei 20 °C an Laborluft getrocknet, um eine lang anhaltende Befeuchtung des Betons vor dem Verkleben zu simulieren.

Die Prismen und die Plattenstreifen („Balken“) wurden in der Mitte durchgesägt und mit den geschalten Stirnseiten wieder zusammengeklebt (Prüfkörper Typ A). Damit wurde auch der Fall simuliert, dass die Platten des Brückendecks mit ihren Stoßfugen stumpf zusammengeklebt werden. Die Prüfkörper wurden anschließend überwiegend bei 20 °C und 65% r. F. aufrecht stehend gelagert, d. h. der Klebstoff erhärtete unter dem Eigengewicht der oberen Balken- oder Prismenhälften. Bei den in Tabelle 3 angegebenen Versuchsreihen wurden die Fugendicke zwischen 3 und 6 mm variiert, die Temperatur der Prüfkörper beim Kleben betrug 10, 20 oder 30 °C, und die Oberfläche der Prüfkörper war alternativ naturbelassen glatt oder sie wurde vor dem Kleben durch Sandstrahlen oder Bürsten aufgeraut.

Tabelle 3. Ergebnisse der Prüfungen an Prismen und Balken

Table 3. Results of tests of prisms and beams

	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Zugfestigkeit [N/mm ²]
Prüfanordnung (schematisch)	Prüfkörper A	Prüfkörper A
Größe der Prüfkörper [mm]	Prismen 160 × 40 × 40 Balken 700 × 150 × 80	Prismen 160 × 40 × 40
Nachbehandlung UHPC (90 °C/Wasser)	10,0/10,3	6,6/5,9
Oberflächenrauigkeit (glatt, gesandstrahlt, gebürstet)	10,0/10,1/10,2	6,6/7,1/6,1
Klebtemperatur (10/20/30 °C)	11,0/10,0/11,1	6,0/6,1/5,8
Dicke der Klebschicht (3/6 mm)	10,0/10,1	6,9/6,5
14 FTW in NaCl-Lsg. (CDF)	13,1	–
Balken (10/20/30 °C)	11,3/11,0/12,1	–

Nach fünf, sieben oder zehn Tagen wurden die Prismen in Anlehnung an DIN EN 12390-5 verformungssteuert mit einer Verformungszunahme von 0,01 mm/s statisch auf Biegezug oder in Anlehnung an [19] im direkten Zugversuch einaxial auf Zug geprüft. Die Biegezugfestigkeit der Balken wurde nach [20] geprüft, das dynamische Verhalten bei 1 Mio. Lastwechseln mit einer sinusförmigen Biegezug-Schwellbelastung (Oberspannung 5 N/mm² – etwa 45% der statischen Biegezugfestigkeit – Unterspannung 1,4 N/mm², Frequenz 5 Hz) in Anlehnung daran. Die Ergebnisse sind in [13] sowie in Tabelle 3 und in Bild 6 dargestellt.

Das Verhalten des Klebstoffs in der Nähe oder jenseits der Glasübergangstemperatur wurde orientierend an Prismen bestimmt, die vor der Biegezugprüfung 24 h bei 50 °C oder 70 °C gelagert wurden.

Zur praxisnahen Untersuchung der Schubzugfestigkeit wurden aus jeweils einem ganzen und zwei mittig durchgesägten Würfeln die in Tabelle 4 dargestellten Prüfkörper hergestellt (Prüfkörper Typ B). Verklebt wurden geschalte Außenseiten. Die Klebefläche entsprach einmal 50% (112,0 cm²) und einmal 75% (168,8 cm²) der Schnittflächen. Die Last wurde – wie in Tabelle 4 gezeigt – einmal flächig auf die Stirnflächen und einmal über Stahlprofile mit einem Querschnitt von 10 mm × 10 mm und einem Hebelarm zur Klebfuge von 70 mm bewusst ausmittig auf

die geklebten Seitenteile aufgebracht, um realitätsnah die Schub-Zugbeanspruchung der Bauwerksfuge zu simulieren.

5.2.2 Statische und dynamische Festigkeit

Die Einzelwerte der Zugfestigkeit der geklebten Prismen lagen unabhängig von der Größe der Klebfläche, der Dicke der Klebschicht und von der Temperatur immer zwischen rd. 6 und rd. 7 N/mm², die Einzelwerte für die statische Biegezugfestigkeit insgesamt zwischen rd. 7 und rd. 13 N/mm², weit überwiegend aber zwischen rd. 10 und

rd. 12 N/mm². Nach einer Erhärtungszeit von zehn Tagen versagten die Prüfkörper immer durch einen Kohäsionsbruch im Beton unmittelbar neben der Klebfuge.

Bild 4 zeigt Bruchbilder von Biegebalken bei statischer Belastung. Bei den meisten Balken riss der Beton unter allmählicher Aktivierung der Fasern einige Zentimeter neben der Fuge, d. h. die Klebverbindung war hier fester als der faserhaltige UHPC. Die Balken zeigten das gleiche duktile Bruch- und Nachbruchverhalten wie homogene Prüfkörper. Nur einzelne Balken versagten – wie Bild 4 ebenfalls zeigt – schlagartig durch einen Kohäsionsbruch im Beton neben der Klebfuge. Das Ergebnis lässt erwarten, dass das für die Sicherheit von geklebten Bauteilen sehr günstige, duktile Verhalten gefügter Teile bei weiterer klebgerechter Verbesserung der Betonrandzone und der Oberfläche gezielt und sicher erreicht werden kann.

Bei den auf den Stirnflächen flächig belasteten Prüfkörpern vom Typ B trat der Bruch bei einer auf die Klebfläche bezogenen Spannung von im Mittel rd. 13,5 N/mm² überwiegend in einiger Entfernung von der Klebfuge im Beton ein. Bei den mit größerer Ausmitte beanspruchten Körpern wurden zwar für den faserhaltigen UHPC größere Spannungen von im Mittel rd. 17 N/mm² erreicht und der Kohäsionsbruch verlief in der Betonrandzone parallel zur Klebfläche, die dabei – wie in Bild 5 dargestellt – mehrfach durchtrennt wurde. Die Nachrechnung des in der Fuge tatsächlich vorhandenen Spannungszustandes mit einem FE-Programm ergab aber auch hier eine niedrigere Bruchspannung. Ein zum Vergleich geprüfter faserfreier UHPC versagte dagegen bei Erreichen der Matrixzugfestigkeit des Betons von rd. 9 N/mm² durch einen mittig im Betonwürfel verlaufenden Riss.

Bild 6 zeigt, dass sich bei der dynamischen Schwellbeanspruchung der Balken die vertikale Einsenkung während des gesamten Versuches nicht änderte. Bis zu einer Mio. Lastwechseln deutete demnach nichts auf ein beginnendes Ermüdungsversagen der Fuge hin.

Tabelle 4. Ergebnisse der Prüfungen an Schubzugprüfkörpern

Table 4. Results of the combined tensile-shear tests

	Schubzugfestigkeit, ausmittig [N/mm ²], Art des Versagens	Scherfestigkeit (zentrisch) [N/mm ²], Art des Versagens
Prüfanordnung (schematisch)	Prüfkörper B	Prüfkörper B
Größe der Prüfkörper [mm]	Mitte Würfel 150, Außenteile 150 × 150 × 75	Mitte Würfel 150, Außenteile 150 × 150 × 75
UHPC, faserhaltig (0,99 Vol-% Stahlfasern)	16,9 Kohäsion Beton	13,5 Kohäsion Beton
UHPC, faserfrei	9,1 Bruch im Beton	-

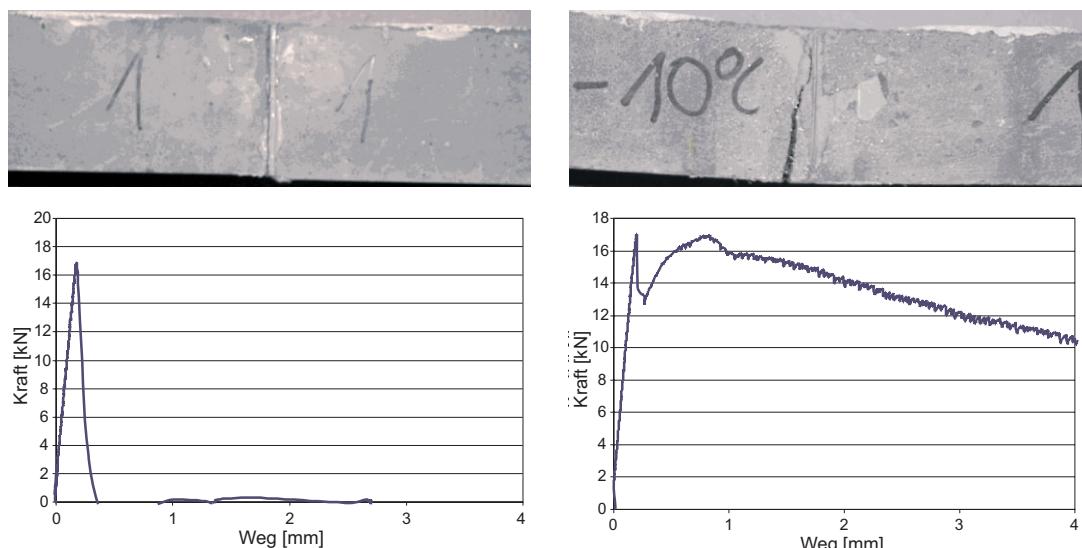


Bild 4. Mittig geklebte Biegebalken mit schlagartigem Versagen an der Fuge (links) und duktilem Versagen mit Aktivierung der Stahlfasern (rechts)

Fig. 4. Glued bending beams with sudden failure at the joint (left) and ductile failure with activation of the steel fibres (right)

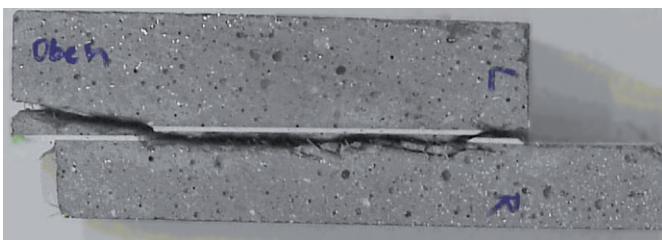


Bild 5. Schubzugprüfung, Prüfkörper Typ B nach Tabelle 4, Lasteinleitung exzentrisch. Rissverlauf entlang der Klebfuge, Abriss in der Betonmatrix

Fig. 5. Combined tensile-shear test, specimen of type B as shown in table 4, eccentric loading. Crack configuration along the joint, fracture within the concrete

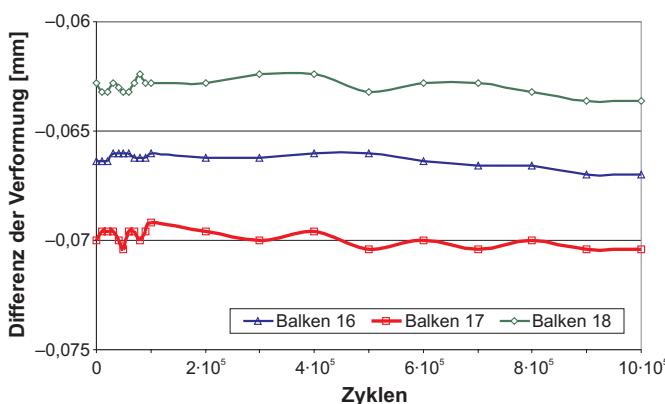


Bild 6. Durchbiegung der Balken mit 3 mm Klebfuge bei bis zu 1 Mio. Lastwechseln (Oberspannung ca. 50 % der statischen Biegezugfestigkeit, Frequenz 5 Hz)

Fig. 6. Bending deformation of glued beams with a joint width of 3 mm at up to 1 million load cycles (max. load equivalent to 50 % of the static flexural strength, frequency 5 Hz)

5.2.3 Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit der Klebverbindungen bei Tausalzangriff wurde geprüft, indem geklebte Prismen im CDF-Test innerhalb von 14 Tagen 28 Frost-Tauwechseln in 3%iger NaCl-Lösung ausgesetzt wurden. Danach wurden sie auf Biegezug geprüft, und zwar mit der der Tausalzlösung ausgesetzten Seite als zugbeanspruchte Unterseite. Die Biegezugfestigkeit von sechs Prüfkörpern lag zwischen 9,5 und 15,7 N/mm², der Mittelwert betrug 13,1 N/mm². Die niedrigeren Werte lagen etwa in der Größenordnung der bei 20 °C/65% r. F. gelagerten Referenzprüfkörper. Worauf die z. T. deutlich höheren Werte und die größere Streuung der befrostenen Prüfkörper zurückzuführen sind, kann aus den wenigen Prüfungen nicht abgeleitet werden. Festzuhalten ist, dass die starke physikalische Beanspruchung im CDF-Versuch die Festigkeit offenbar nicht verringert hat.

Der Einfluss einer höheren Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf die Dauerhaftigkeit wurde realitätsnah an kleineren Prüfkörpern des Typs B mit Klebeflächen von 2 × 75 mm × 65 mm bzw. 2 × 48 mm × 60 mm geprüft. Sie wurden 56 Tage lang bei einer für die Prüfung von Klebstoffen üblichen Temperatur von 35 °C und einer Luftfeuchtigkeit von über 95% r. F. und danach weitere 28 Tage im Freien gelagert. Während der Prüfung wurden die Körper in der



Bild 7. Prüfeinrichtung für die Dauerstandversuche nach Tabelle 5

Fig. 7. Testing facility for creep tests as shown in table 5



Bild 8. Versagen der Grenzfläche Beton/Klebstoff, nur teilweise Versagen im Beton (Prüfkörper H 3) (Sandstrahlen, EP-Grundierung, 2 N/mm², 20/65)

Fig. 8. Failure of the interface zone between concrete and epoxy mortar (specimen H 3)

in Bild 7 gezeigten mechanischen Belastungsapparatur dauernd durch eine Schubzugsspannung von 2,0 (entsprechend rd. 15 % der statischen Festigkeit und etwa die Höchstspannung im Bauwerk) oder – als zusätzliche Sicherheit – 3,5 N/mm² beansprucht. Anschließend wurde ihre Zug-Schubfestigkeit verformungsgesteuert gemessen. Als Referenz wurden gleiche Körper unbelastet bei 20 °C/65% r. F. gelagert. Die Klebeflächen wurden vor dem Verkleben alle mit Schlackengranulat gestrahlt und aufgeraut. Bei einem Teil der Prüfkörper wurden zusätzlich mit einem Nadelgerät die oberflächlichen Fasern freigelegt (Tabelle 5). Andere wurden mit einem niedrigviskosen Epoxidharz vorgestrichen. Der Klebmörtel wurde nach rd. 40 Minuten aufgebracht.

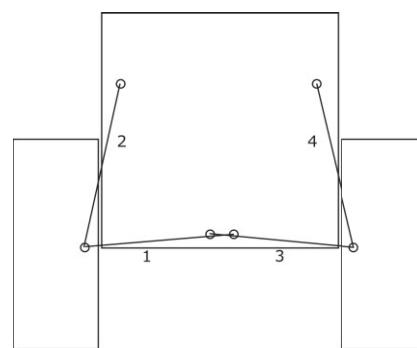
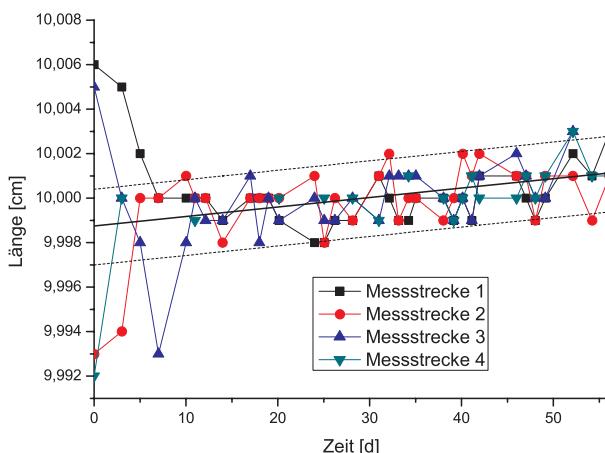
Die Ergebnisse sind zusammen mit den Prüfbedingungen und der Art des Versagens in Tabelle 5 zusammengestellt. In Bild 10 ist ein typisches Versagensbild dargestellt.

Die Schubzugfestigkeit der bei 35 °C an feuchter Luft gelagerten Prüfkörper war mit 12,4 bis 14,9 N/mm² teilweise etwas niedriger als bei Normlagerung. Ein signifikanter Unterschied kann daraus wegen der wenigen Prüf-

Tabelle 5. Einfluss der Vorbehandlung der Oberflächen und der hygrisch-thermischen Bedingungen auf die Schubzugfestigkeit

Table 5. Influence of surface pretreatment and of hydrothermal conditions on the tensile-shear strength

Prüfkörper Nr.	Klebfläche [mm ²]	Oberflächen-vorbehandlung	Klima [°C/% r. F.]	Dauerlast-spannung [N/mm ²]	Festigkeit nach 56 d [N/mm ²]	Bruch	
H 1	2 × 4875	Sandstrahlen, EP-Grundierung	35/95	2,0	12,4	Kohäsion Beton	
H 2					14,7		
H 3			20/65		16,1	Adhäsion (Bild 8)	
H 4					14,5		
H 5	2 × 2880	Sandstrahlen, Nadeln; Fasern freigelegt	35/95	3,5	14,9	Kohäsion Beton	
H 6					13,3		
H 7					14,0		

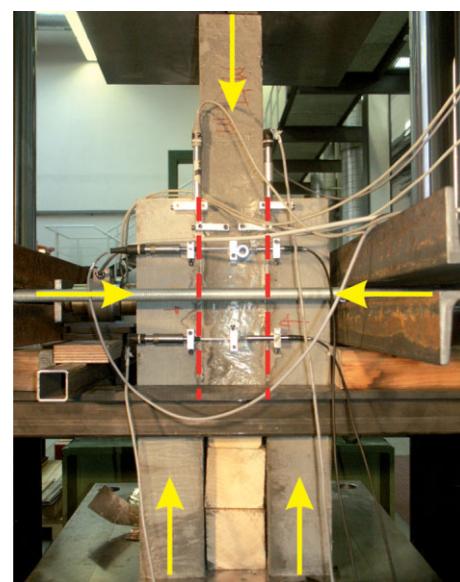
Bild 9. Links: Kriechen eines Prüfkörpers im Dauerstandversuch nach Tabelle 5; rechts: Messstrecken
Fig. 9. Left: creep deformation acc. to table 5; right: configuration

körper nicht abgeleitet werden. Bild 9 zeigt die mit einem Setzdehnungsmesser während eines Dauerstandversuchs bei 35 °C und einer Spannung von 2 N/mm² ermittelte lastabhängige Kriechverformung. Sie betrug etwa 0,2 %.

5.3 Untersuchungen zur Schubkraftübertragung bei Adhäsionsversagen der Klebfuge

Für den Fall, dass sich wider Erwarten einzelne Fahrbahnplatten der Gärtnerplatzbrücke von den Obergurten lösen sollten, wurden experimentell die Auswirkungen eines Adhäsionsversagens der schubbeanspruchten Klebfuge bei gleichzeitiger Wirkung einer für diesen Fall vorgesehnen zusätzlichen Dübelverbindung untersucht.

Der Versuchsaufbau ist in Bild 10 dargestellt. Drei 10 cm dicke Platten aus dem Ultrahochfesten Beton nach Tabelle 1 wurden, wie in Bild 10 gezeigt, miteinander verklebt. Die Klebflächen waren jeweils 40 cm × 30 cm groß. Die Schubbeanspruchung in der Klebfuge wurde durch Druck auf die mittlere Platte erzeugt. Die verdübelte Klebverbindung wurde durch das Aufbringen einer Druckkraft in Querrichtung von 50 bis 266 kN entsprechend einer Druckspannung von 0,4 bis 2,2 N/mm² simuliert, wobei die Druckkraft im Laufe eines Versuchs variiert wurde. Mit induktiven Wegaufnehmern wurden die Verformungen längs und quer zur Klebfuge gemessen. Das im Versuch unterstellte Adhäsionsversagen wurde durch die Verwendung eines Trennmittels simuliert, welches auf jeweils

Bild 10. Versuchsaufbau zur Prüfung von maßstäblichen Bauteilen
Fig. 10. Experimental devices for the testing of structural elements

einer der beiden zu verklebenden Flächen aufgetragen wurde.

In Tabelle 6 sind die untersuchten Varianten aufgeführt. Variiert wurden die Vorbereitung der Klebflächen

(sandgestrahlt oder mit einem Riffelblech in der Schalung profiliert), der verwendete Klebstoff (Sikadur-30 nach Tabelle 2 und UHPC nach Tabelle 1) sowie der Trennmittel-einsatz.

Bei den Versuchen mit Sikadur-30 und Trennmittel (Variante 1 und 2) trat das (für das Experiment) gewünschte Adhäsionsversagen schon bei geringer Schubbeanspruchung ein. Nach Überwindung der anfänglichen Scherfestigkeit konnte noch eine Schubkraft durch Reibung übertragen werden, die nahezu unabhängig von der Oberflächenbeschaffenheit (eben und sandgestrahlt oder profiliert) war. Die aufnehmbare Schubbeanspruchung war im weiteren Verlauf – wie Bild 11 zeigt – direkt abhängig von der in Querrichtung aufgebrachten Druckspannung. Eine zunehmende Fugenöffnung bei steigender Relativverschiebung zeigt, dass ein ggf. angeordneter Dübel aktiviert werden kann.

Tabelle 6. Varianten der Schub-Druck-Versuche
Table 6. Variations of the combined compressive-shear tests

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Klebfläche	sandgestrahlt	profiliert	sandgestrahlt	glatt
Klebstoff	Sikadur-30	Sikadur-30	UHPC	Sikadur-30
Trennmittel	Sika Trennmittel	Sika Trennmittel	ohne Trennmittel	ohne Trennmittel

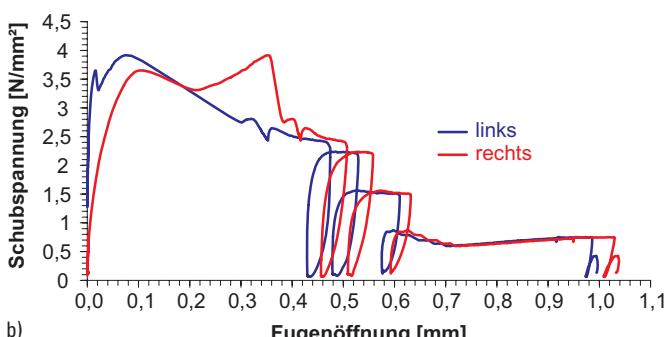
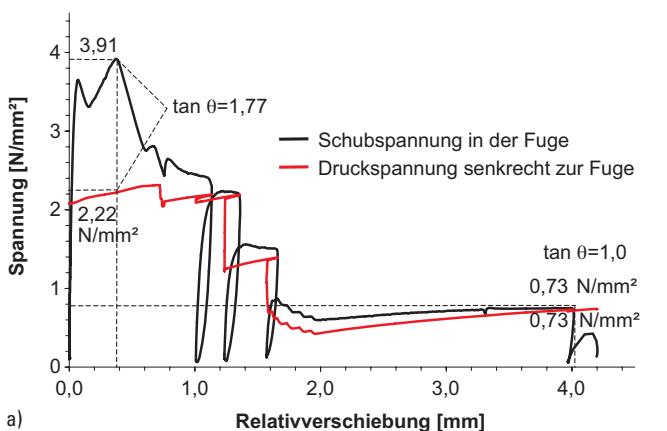


Bild 11. Versuchsergebnisse der Variante 2 (profilierte Klebfläche, Sikadur-30/Trennmittel)

a) Spannungs-Schlupf-Diagramm, b) Schubspannungs-Fugenöffnungs-Diagramm

Fig. 11. Results of variation 2 (structured surface, Sikadur-30/debonding agent)

a) tension-slip diagram, b) shear-stress/gap-width diagram

Hiermit stehen Bemessungswerte zum Nachweis der Schubfuge zur Verfügung. Konservativ kann der charakteristische Reibbeiwert mit $\mu = 1,0$ angenommen werden.

6 Anwendung der Klebtechnik bei der Gärtnerplatzbrücke

Die Gärtnerplatzbrücke in Kassel wurde im Juli 2007 fertig gestellt. Bild 12 zeigt sie kurz vor der Vollendung. Das in Bild 1 im Querschnitt dargestellte Tragwerk besteht aus einem räumlichen Fachwerk aus miteinander verschweißten Stahlrohren (Stahlgüte S355J2G3). Die filigranen Fertigteile der Obergurte (Länge 12 bis 36 m, Querschnitt 30 × 45 cm) aus vorgespanntem UHPC wurden mit hochfesten vorgespannten Schrauben und untergossenen Kopfplatten stahlbaumäßig an das Fachwerk angeschraubt. Dabei wurde der eben betonierte Obergurt des Mittelteils gebogen, um ihn an die Krümmung des Fachwerksegments anzupassen. Die so vormontierten, zwischen 12 und 36 m langen Brückensegmente wurden in die Brückenlager eingehoben. Anschließend wurden die Obergurte über die ganze Länge mit je einem innen liegenden Spannglied (SUSPA EX 6-12) ohne Verbund vorgespannt. Die 5,00 × 2,00 m großen Fahrbahnplatten wurden zunächst lose auf die Obergurte aufgelegt. Danach wurden sie mit einem mobilen Verlegegerät angehoben. Die bereits im Fertigteilwerk gestrahlten Klebflächen wurden mit einem Hand-Nadelgerät zusätzlich aufgeraut und sorgfältig mit ölfreier Druckluft gesäubert. Danach wurde der Klebmörtel im Überschuss auf die rd. 40 cm breiten Obergurte sowie auf die Kleb- und die Stirnflächen der Platten aufgebracht. Anschließend wurden die Platten aufgelegt und mit einer handgeföhrten Rüttelplatte so lange überfahren, bis die zuvor mit Abstandshaltern festgelegte Solldicke der Fuge erreicht war. Bild 13 zeigt die Unterseite der Konstruktion. Als zusätzliche Kriterien für die ausreichend vollflächige und gleichmäßige Verklebung wurde überprüft, ob der zäh-plastische Klebmörtel aus der Fuge zwischen Obergurt und Platte gleichmäßig austrat. Von der Oberseite der Fahrbahnplatten her wurden die Homogenität der Klebflächen und der vollständige Verbund zwischen Klebstoff und Beton mit Ultraschall überprüft. Dabei wurden lediglich kleinere Lufteinschlüsse festgestellt.

Die Brücke wird in den nächsten Jahren mit Hilfe eines umfassenden Monitoringsystems online überwacht. Auch die Klebfugen wurden mit Dehnungsmessstreifen



Bild 12. Die Gärtnerplatzbrücke kurz vor ihrer Vollendung

Fig. 12. The Gaertnerplatz Bridge shortly before its completion



Bild 13. Blick auf die frische Klebfuge zwischen Obergurt und Deckenplatte

Fig. 13. Joint between girder and bridge deck slabs with fresh epoxy mortar

und Setzdehnungsmessern ausgerüstet und mit Lichtleitern überbrückt. Thermische oder belastungsbedingte Verformungen und jede Veränderung des Fugenzustands können so gemessen und verfolgt werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Gärtnerplatzbrücke in Kassel wurden erstmals Fertigteile aus gefügedichtetem Ultrahochfestem Beton ausschließlich durch Kleben gefügt. Verwendet wurde ein zweikomponentiger Epoxidharzmörtel, mit dem seit einigen Jahrzehnten Laschen und Kohlefaserlamellen zur Verstärkung von Bauteilen auf Beton geklebt werden und der auch bei der Segmentbauweise verwendet wird.

Für die Zustimmung im Einzelfall wurden an der Universität Kassel umfangreiche Laborversuche durchgeführt, um die Zug-, Biegezug- und Schubfestigkeit sowie das Verformungsverhalten der Klebfugen bei quasi-statischer und bei schwelender Beanspruchung festzustellen. Die Dauerhaftigkeit wurde durch Frost-Tau-Wechsel-Versuche und durch die hygrisch-thermische Lagerung von dauerbeanspruchten Prüfkörpern bei den im Brückenbauwerk zu erwartenden ungünstigen Umgebungsbedingungen überprüft. Bei den Versuchen wurden zudem die Feuchte- und Temperaturbedingungen während des Klebens und Aushärtens, die Dicke der Mörtelschicht und die Art der Oberflächenvorbehandlung variiert. Zudem wurde festgestellt, welche Schubkräfte zwischen den Betonteilen noch übertragen werden, wenn sich die Klebverbindung unerwartet wieder löst und wenn dann – wie für diesen Fall vorgesehen – zusätzlich Dübel eingebaut werden.

Die Untersuchungen ergaben zusammenfassend folgende Ergebnisse:

- Die Zugfestigkeit der Klebverbindungen entsprach weitgehend der Zugfestigkeit der UHPC-Matrix, d. h. sie lag etwa zwischen 6 und 9 N/mm². Die Prüfkörper versagten weit überwiegend durch einen Kohäsionsbruch im fugennahen Beton.

- Bei der statischen Biegezugprüfung versagten die meisten Balken ebenfalls im Beton, allerdings in einiger Entfernung von der Klebfuge mit Aktivierung der vorhandenen Stahlfasern. Diese Balken versagten dadurch ebenso duktil und sicher wie homogene Vergleichsprüfkörper aus faserhaltigem UHPC.
- Um dieses für das sichere Tragverhalten und die wirtschaftliche Bemessung von klebgefügten UHPC-Bauteilen günstige Verhalten immer zielsicher zu erreichen, sind allerdings noch weitere Untersuchungen erforderlich.
- Temperaturen von bis zu 35 °C bei gleichzeitig hoher Luftfeuchtigkeit über 95% r. F. führten bei schubbeanspruchten Prüfkörpern innerhalb von rd. 90 Tagen ebenso wenig zu einer signifikanten Veränderung der Festigkeit wie die Beanspruchung geklebter Prüfkörper durch wiederholte Frost-Tau-Wechsel mit Tausalzeinwirkung.
- Eine Variation der Fugendicke zwischen 3 und 6 mm und die Änderung der Temperaturbedingungen zwischen 10 und 30 °C während des Klebens und während der Erhärtung des Klebstoffs wirkten sich nicht aus.
- Die bei Normalbeton übliche Grundierung mit einem niedrigviskosen Harz war bei UHPC weitgehend wirkungslos. Für eine optimale Adhäsion zwischen UHPC und Klebstoff sollte die Betonoberfläche profiliert und/oder aufgeraut werden, um die wirksame Kontaktfläche zu vergrößern.
- Falls sich die Klebverbindung zwischen Obergurt und Fahrbahnplatten durch ein Adhäsionsversagen lösen sollte, kann die erforderliche Schubkraftübertragung durch Reibung sichergestellt werden, wenn die Dübel das Abheben der Platten verhindern.
- Die praktische Anwendung der Klebtechnik erwies sich beim Bau der Gärtnerplatzbrücke in Kassel als unproblematisch. Nachteilig war lediglich die Feuchte- und Temperaturempfindlichkeit des Harzes. Dadurch mussten die Arbeiten an der Brücke während des Winters unterbrochen werden. Weniger witterungsempfindliche Klebstoffe wären von Vorteil.

Die Klebtechnik kann eine besonders wirtschaftliche und sichere Fügetechnik für vorgefertigte Bauteile aus Ultrahochfestem Beton werden, wenn sich die positiven Ergebnisse der Vorversuche für die Gärtnerplatzbrücke in der Praxis bestätigen.

Dank

Die Autoren danken den Firmen ELO Elementbau Osthessen, Beck-Bau in Eschwege, der Firma Sika in Stuttgart und dem Ingenieurbüro Fehling + Jungmann, Kassel für ihre Unterstützung bei der Durchführung und Auswertung der Untersuchungen.

Literatur

- [1] Ultrahochfester Beton – Planung und Bau der ersten Brücke mit UHPC in Europa. Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Schmidt, M., Fehling, E. (Hrsg.). Bd. Heft 2, Universität Kassel 2003.
- [2] Schmidt, M., Bunje, K., Fehling, E. und Teichmann, T.: Brückenfamilie aus Ultrahochfestem Beton in Niestetal und Kas-

- sel. Beton- und Stahlbetonbau 101 (2006), Heft 3, S. 198–204.
- [3] *Stöcklin, I. und Meier, U.:* Strengthening of concrete structures with prestressed and gradually anchored CFRP strips. 5th conference on fibre-reinforced plastics for reinforced concrete structures (FRPRCS-5), Cambridge, UK 2001.
- [4] *De Hesselle, J.:* Bauwerksverstärkung mit CFK-Lamellen. beton 48 (1998), S. 406–408.
- [5] *Bergmeister, K.:* Verstärkung mit Kohlenstofffaser-Lamellen – Teil 1: Verstärkung von Biegeträgern. Beton- und Stahlbetonbau 100 Spezial (2005), S. 62–68.
- [6] *Bergmeister, K.:* Verstärkung mit Kohlenstofffaser-Lamellen – Teil 2: Verstärkung von Stützen. Beton- und Stahlbetonbau 100 Spezial (2005), S. 69–73.
- [7] *Letsch, R.:* Kleben von Beton. Straßen- und Tiefbau 33 (1979), S. 17–18.
- [8] *Ranisch, E.-H.:* Verstärken von Traggliedern aus Stahlbeton mit angeklebter Bewehrung. Sorgfältiges Vorbehandeln der Flächen. Maschinenmarkt 88 (1982), S. 1664–1666.
- [9] *Eligehausen, R. and Simons, I.:* Fastening with bonded anchors and connections with post-installed rebars. 21st International Symposium on Bonding Technology, München 2003.
- [10] *Rombach, G.:* Brücken in Segmentbauweise. Internationale Beispiele und Anwendungsbereiche in Deutschland. 50. Betontage, Neu-Ulm 2006.
- [11] *Schmidt, M., Fehling, E., Teichmann, T., Bunje, K. und Bornemann, R.:* Ultrahochfester Beton: Perspektive für die Betonfertigteilindustrie. Beton- und Fertigteiltechnik (BFT) 68 (2003), S. 16–28.
- [12] *Fehling, E., Schmidt, M., Teichmann, T., Bunje, K., Bornemann, R. und Middendorf, B.:* Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC): Forschungsbericht. Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Bd. 1, Universität Kassel 2005.
- [13] *Schmidt, M. und Teichmann, T.:* Dauerhaftigkeit von Klebfugen bei Bauteilen aus Ultrahochfesten Betonen für den Neubau der Gärtnerplatzbrücke über die Fulda in Kassel. Versuchsbericht, Werkstoffe des Bauwesens, Universität Kassel 2005.
- [14] *Schmidt, M., Fehling, E. und Geisenhanslücke, C.:* Ultra High Performance Concrete (UHPC). International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Schmidt, M., Fehling, E., Geisenhanslücke, C. (Hrsg.). Bd. 3. Kassel, Kassel University Press 2004.
- [15] *Bicker, C.:* Methodenentwicklung zur Bestimmung des hydrothermomechanischen Langzeitverhaltens von strukturellen Klebverbindungen mit metallischen und mineralischen Untergründen. Dissertation, Universität Kassel 2005.
- [16] *Zilch, K.:* Fügen von Bauteilen aus ultrahochfestem Beton (UHPC) durch Verkleben. DFG SPP 1182, ZI 134/22-1.
- [17] *Schmidt, M. und Teichmann, T.:* New Developments in Ultra High Performance Concrete – non corrosive PVA-fibres and glueing of structural elements. 2nd fib-Congress, Neapel 2006.
- [18] *Tue, N. und Schneider, H.:* Besonderheiten bei der Bemesung und der konstruktiven Ausbildung von Bauteilen aus UHPC im Rahmen der Zulassung im Einzelfall. In Ultrahochfester Beton – Planung und Bau der ersten Brücke mit UHPC in Europa, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 2, Universität Kassel 2003. S. 95–116.
- [19] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.): Prüfung von Beton, Empfehlungen und Hinweise zu DIN 1048, Teil 3.3.
- [20] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.): Richtlinie Stahlfaserbeton (22. Entwurf), 2005.



Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt
baustk@uni-kassel.de



Dr. rer. nat. Ralf Krelaus
r.krelaus@uni-kassel.de



Dipl.-Ing. Thomas Teichmann
teichma@uni-kassel.de

Universität Kassel
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Fachgebiet Werkstoffe
des Bauwesens und Bauchemie
Mönchebergstraße 7
34125 Kassel



Dipl.-Ing. Torsten Leutbecher
Fehling + Jungmann GmbH
Ingenieurbüro für Bauwesen
Friedrich-Naumann-Straße 23
34131 Kassel
torsten.leutbecher@fehling-jungmann.de



Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Fehling
Universität Kassel
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Fachgebiet Massivbau
Kurt-Wolters-Straße 3
34125 Kassel
bauing.massivbau@uni-kassel.de