



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Institut für Massivbau <http://massivbau.tu-dresden.de>

SILKE SCHEERER, MANFRED CURBACH (HRSG.)

LEICHT BAUEN MIT BETON

**FORSCHUNG IM
SCHWERPUNKTPROGRAMM 1542
FÖRDERPHASE 1**

Klebsverbindungen für Platten- und Scheibenbauteile aus hochfestem Beton

Christian Kohlmeier
Sebastian Oster

Fachgebiet
Massivbau und
Baukonstruktion,
Technische
Universität
Kaiserslautern

Zum kraft- und formschlüssigen Fügen von dünnwandigen, filigranen Betonfertigteilen eignen sich besonders kontinuierliche, flächige Verbindungen, wie sie durch Verkleben erzielt werden können. Deshalb wurden im Rahmen dieses Vorhabens Klebsverbindungen für Platten- und Scheibenbauteile konstruiert und optimiert. Die Verbindungen sind so ausgelegt, dass sie sowohl Beanspruchungen aus einzelnen Schnittgrößen als auch aus Schnittgrößenkombinationen übertragen können. Die wesentlichen Parameter, die dabei untersucht wurden, sind die Klebfugegeometrie sowie die Oberflächenbeschaffenheit und die Bewehrung der zu verklebenden Bauteile. Als Klebstoff diente ein hochfester mineralischer Mörtel. Die Optimierung der Klebfugegeometrie erfolgt durch den Mitantragsteller bei diesem Projekt, das Fraunhofer ITWM in Kaiserslautern.

Auf der Basis der experimentellen Untersuchungen wurde für die Klebfuge ein zweiaxiales Bruchkriterium abgeleitet. Weiterhin sollen Entscheidungshilfen zur Fugengestaltung und ein ingenieurmäßiges Bemessungsmodell erarbeitet werden.

1 Einleitung

Hochleistungsbetone und neuartige Bewehrungsformen wie Glas- oder Kohlefasergerlege ermutigen dazu, möglichst dünnwandige und filigrane Bauteile herzustellen oder ganze Tragwerke daraus zu errichten. Jedoch ist die Herstellung und Verarbeitung von hochfestem oder ultrahochfestem Beton (HPC oder UHPC) aufwändig und erfordert ein hohes Maß an Sorgfalt. Deshalb beschränkt sich die Anwendung von Hochleistungsbetonen fast ausschließlich auf werkmäßig hergestellte Fertigteile. Um aus den einzelnen Fertigteilen größere Tragstrukturen zu errichten, stellt sich die Frage nach einer entsprechenden Fügetechnik. Bei dünnen Bauteilen stoßen die herkömmlichen Ansätze wie das Verbinden mit Ankern oder Schlaufen schnell an ihre Grenzen. Das Verkleben von Bauteilen kann hier eine tragfähige Alternative sein, die zahlreiche Vorteile mit sich bringt.

Als Klebstoff wurde ein hochfester mineralischer Mörtel verwendet, der vor allem den Vorteil hat, dass er weitgehend unempfindlich gegenüber Umwelteinflüssen ist. Erste Erfahrungen mit dem Verkleben von Fertigteilen aus Hochleistungsbeton mit diesem Mörtel konnten beim Bau eines 2011 fertig gestellten Weinberghauses gesammelt werden, [1] und Bild 1. Ein Schwachpunkt solcher Klebsverbindungen ist dabei die geringe Oberflächenhaftzugfestigkeit des Betons. Dementsprechend lag ein Schwerpunkt des Forschungsprojekts auf der Optimierung der Fugegeometrie mit dem Ziel, die Zugspannungen in der Klebfuge zu minimieren. Die numerische Strukturoptimierung erfolgte durch das Fraunhofer ITWM Kaiserslautern mit Hilfe eines integrierten Shape- und Topologie-Optimierungsverfahrens.

Geklebt wird im Betonbau bisher hauptsächlich beim nachträglichen Verstärken von Bauteilen durch Stahl- oder CFK-Lamellen. Als Klebstoffe werden in der Regel Epoxidharzklebstoffe eingesetzt. Weiterhin wird die Klebwirkung bei Verbunddübeln und nachträglich eingemörtelten Bewehrungsanschlüssen genutzt. Hier kommen Vinylesterharz- oder Polyesterharzklebstoffe zum Einsatz. Beim Neubau spielt Kleben bislang nur eine untergeordnete Rolle. Als ein Beispiel kann hier die Gärtnerplatzbrücke in

Kassel genannt werden, bei der die Fahrbahnplatte aus UHPC mit dem UHPC-Obergurt einer hybriden Fachwerkonterkonstruktion aus UHPC und Stahlrohren verklebt wurde [2]. Als Klebstoff wurde ein Epoxidharz verwendet.

Kleberverbindungen mit Epoxid- und Polyesterharzklebstoffen wurden ausführlich erforscht und es stehen entsprechende Bruchkriterien zur Verfügung, [3] und [4]. Neuere Forschungsarbeiten befassen sich mit Kleberverbindungen, bei denen ein hochfester mineralischer Mörtel als Klebstoff Verwendung findet, z. B. [5] und [6]. Hierfür wurde auf Basis experimenteller Untersuchungen ein lineares Bruchkriterium für eine Schub-Druckbeanspruchung formuliert. Für Schub-Zugbeanspruchungen steht bislang kein Bruchkriterium zur Verfügung.

2 Ziele und Vorgehensweise

Ziel des Projekts war es, möglichst einfache, praxistaugliche Kleberverbindungen für dünne Bauteile aus hochfestem Beton zu entwickeln. Bewehrt werden sollten die Bauteile in erster Linie mit Drahtmatten, einer sog. Mikrobewehrung, oder entsprechend gebogenem Stabstahl. Dabei sollte die Kleberverbindung in der Lage sein, Normalkräfte, Querkkräfte und Biegemomente sowie Kombinationen daraus zu übertragen.

Demnach wurden in einer ersten Bearbeitungsphase sowohl für mikrobewehrte Bauteile als auch für Bauteile mit Stabstahlbewehrung Tastversuche und erste numerische Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Beanspruchungen und unterschiedliche Fugenvarianten untersucht.

Mit den Ergebnissen dieser Voruntersuchungen sowie vor dem Hintergrund baupraktischer Überlegungen wurden einzelne Fugenvarianten aussortiert. An den vielversprechenden wurden weitere umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt und das Trag- und Verformungsverhalten für unterschiedliche Beanspruchungszustände analysiert.

Im Hinblick auf die Bemessung sowie auf die numerische Optimierung wurde ein Bruchkriterium formuliert, das sowohl für eine Schub-Druckbeanspruchung als auch für eine Schub-Zugbeanspruchung gilt und mit dem sich die Tragfähigkeit der Kleberverbindung für die jeweils in der Fuge auftretenden Beanspruchungszustände beschreiben lässt. Dazu war eine Vielzahl kleinformatiger Versuche mit einer einzelnen ebenen Kleberfläche erforderlich. Versuche an Fugenabschnitten bildeten einen weiteren Schwerpunkt.

In einem letzten Schritt sollen auf der Basis der experimentellen und numerischen Untersuchungen Entscheidungshilfen zur Fugengestaltung formuliert und ein ingenieurmäßiges Bemessungsmodell abgeleitet werden.



Bild 1: Weinberghaus aus UHPC-Fertigteilen

[Foto: Sven Paustian]

Im Weiteren werden die durchgeführten sowie die geplanten Versuchsserien kurz vorgestellt und die wichtigsten vorliegenden Ergebnisse präsentiert.

3 Werkstoffe

3.1 Beton

Für die Versuchskörper wurde ein selbstverdichtender, hochfester Beton (HPC) mit einem Größtkorn von 0,5 mm verwendet. Die Rezeptur ist in [7] angegeben. Die Werkstoffkennwerte des verwendeten Betons und der Klebstoffe sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Werkstoffkennwerte des verwendeten Betons und der Klebstoffe (jeweils Mittelwert aus mindestens drei Versuchen)

Materialeigenschaft in [N/mm ²]		Probekörperform Maße in [mm]	Alter [d]	Beton HPC	Klebstoff	
					HPM	Pagel-HFL
Würfeldruckfestigkeit	$f_{cm,cube}$	150er Würfel	28	139–150	141	–
Druckfestigkeit	$f_{cm,pr}$	40 × 40 × 160	– ¹⁾	120–135	110	120
Biegezugfestigkeit	$f_{ctm,fl}$	40 × 40 × 160	– ¹⁾	14,3–16,6	15,5	19,8
Spaltzugfestigkeit	$f_{ctm,sp}$	150er Zylinder	28	6,8–7,1	–	–
Zentrische Zugfestigkeit	f_{ctm}	Zugprobekörper	28	10,9	–	–
Elastizitätsmodul	E_{cm}	150er Zylinder	28	39.000	38.000	≥ 25.000 ²⁾

¹⁾ am Versuchstag, ²⁾ nach Herstellerangaben

3.2 Klebstoffe

Für die Versuche wurden zwei unterschiedliche mineralische Mörtel verwendet. Zum einen ein selbst entwickelter, hochfester Mörtel mit einem Größtkorn von 0,3 mm, der an eine von MÜHLBAUER und ZILCH an der TU München ([8], [3]) entwickelten Rezeptur angelehnt ist. Die verwendete Rezeptur ist in [7] aufgeführt. Der Mörtel wird im Weiteren als High Performance Mortar, kurz HPM, bezeichnet.

Der HPM reagiert jedoch sehr empfindlich selbst auf geringste Veränderungen in den Mischungsbestandteilen, was sich stark auf die Konsistenz und die Verarbeitungseigenschaften auswirkt. Um immer die gleichen Eigenschaften zu erreichen, ist deshalb bei der Herstellung ein hohes Maß an Sorgfalt erforderlich. Als praxistauglichere Alternative zu dem HPM wurde zusätzlich ein Vergussmörtel als Werk trockenmörtel der Firma Pagel untersucht. Er ist ebenfalls zementgebunden und hoch fließfähig. Das Größtkorn beträgt 0,25 mm. Die Werkstoffkennwerte beider Klebstoffe sind in Tabelle 1 aufgeführt.

3.3 Bewehrung

Es wurden zwei unterschiedliche Bewehrungsarten untersucht. Zum einen eine sogenannte Mikrobewehrung. Dabei handelt es sich um Stahldrahtmatten mit einer Maschenweite von 12,6 mm und einem Drahtdurchmesser von 1,0 mm. Die Zugfestigkeit des Drahts beträgt rund 400 N/mm² und der Elastizitätsmodul ca. 210.000 N/mm². Zum anderen wurde Stabstahlbewehrung mit Durchmessern von 4 und 6 mm aus Betonstahl B500 eingesetzt sowie Gewindestäbe der Festigkeitsklasse 4.6 mit einem Durchmesser von 6 mm.

4 Experimentelle Untersuchungen

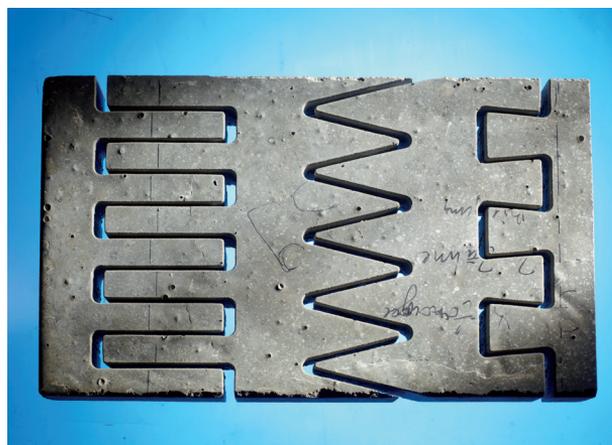
4.1 Überblick über das Versuchsprogramm und Tastversuche

Tabelle 2 enthält eine Übersicht der geplanten und durchgeführten Versuchsserien.

Tabelle 2: Tabellarische Übersicht der geplanten und durchgeführten Versuchsserien

Versuchsserie bzw. Untersuchungsgegenstand	Versuchsart(en)	Versuchsparameter	Anzahl Versuche
Tastversuche			
Tragverhalten Klebfuge	Zugversuche, 4-Pkt.-Biegeversuche, Querkraftversuche	Fugengeometrie, Bewehrungsart, Belastung	24
Hauptversuche			
Optimierung Klebvorgang	Zugversuche (Kleinteilversuche)	Klebtechnik, Vorbehandlung, Nachbehandlung	42
Bruchkriterium Klebfuge	Zug- und Schub-Zugversuche, Schub-Druckversuche (Kleinteilversuche)	Klebstoff/Mörtel, Fu- genwinkel, Art der Kleb- flächenvorbereitung	ca. 240
Fugentragfähigkeit Keilzinkenverbindung und Übertragbarkeit Kleinteilversuche	Zugversuche, 4-Pkt.-Biegeversuche, 3-Pkt.-Biegeversuche	Flankenneigungswinkel, Belastung	42
Bewehrungstragfähigkeit Keilzinkenverbindung	Zugversuche	Flankenneigungswinkel, Zahnlänge	12
Klebfuge mit diskreter Beweh- rung und Übergreifungsstoß	Zugversuche, 4-Pkt.-Biegeversuche	Fugenform, Bewehrung, Übergreifungslänge	42

In [9] und [7] wurden die Tastversuche der ersten Arbeitsschritte vorgestellt. Es wurden unterschiedliche Fugenvarianten untersucht. Neben in erster Linie Zugversuchen wurden auch Vierpunktbiegeversuche und Querkraftversuche durchgeführt. Untersucht wurden mikrobewehrte Platten mit einer Dicke von 30 mm und zehn Lagen Mikrobewehrung, in die mittels Hochdruckwasserstrahlschneidtechnik unterschiedliche Fugengeometrien geschnitten wurden (siehe Bild 2), und zwar eine Rechteckgeometrie, eine Keilgeometrie und eine Hinterschnittgeometrie. Als Referenzversuche wurden Versuche an mikrobewehrten Platten ohne Fuge durchgeführt. Weiterhin wurden Probekörper mit Mikrobewehrung und geschalter Fugengeometrie getestet sowie Probekörper mit 4 mm Stabstahlbewehrung (siehe [7]).



Durch das Schneiden mittels Hochdruckwasserstrahlschneidtechnik lassen sich nahezu beliebige Fugengeometrien erzeugen. Ein weiterer Vorteil ist die raue, saubere Schnittfläche.

Bild 2: Unterschiedliche Fugengeometrien, mittels Hochdruckwasserstrahl geschnitten

[Foto: Thomas Brenner]

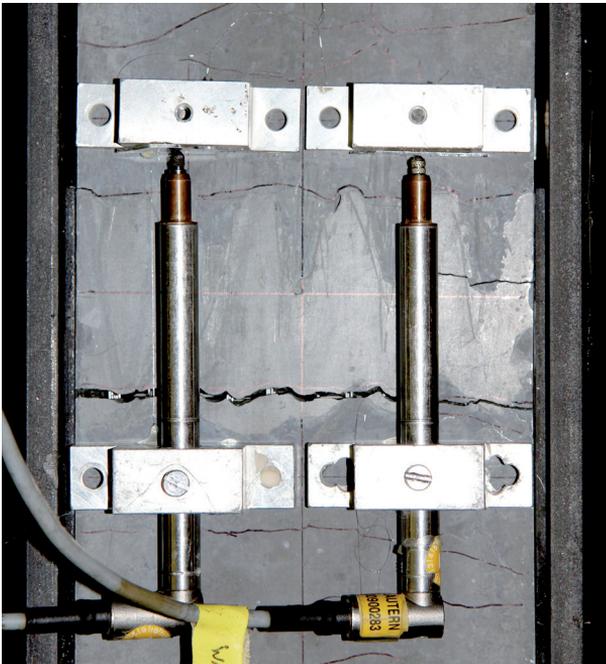


Bild 3: Versagensriss am Rande der Klebverbindung im Zugversuch an einem mikrobewehrten Probekörper mit Keilzinkenverbindung

[Foto: Sebastian Oster]

In den Zugversuchen an den in [9] und [7] gezeigten Fugengeometrien trat das Versagen nicht in der Klebfuge, sondern in den angrenzenden Bereichen ein (siehe Bild 3). Der Versagensriss verlief rechtwinklig zur Belastungsrichtung durch die Fuge an den Zahnspitzen und durch den bewehrten Betonquerschnitt der „Zahnwurzeln“. Die Traglast wird durch die Tragfähigkeit der Bewehrung begrenzt, die den Schnitt kreuzt und ausreichend verankert ist. Dadurch kann das Tragverhalten als weitgehend duktil charakterisiert werden.

In den Klebfugen der Zahnspitzen, durch die der Riss verläuft, ist die Bewehrung in Belastungsrichtung unterbrochen. Demnach ist in dem Versagensriss der Bewehrungsquerschnitt – bezogen auf den ungestörten Querschnitt – entsprechend reduziert. Im Vergleich zur Rechteckgeometrie und zur Hinterschnittgeometrie kreuzen bei der Keilgeometrie die meisten Bewehrungsstäbe den zum Versagen führenden Riss, wodurch sich für diese Geometrie die größten Traglasten

ergeben. In den weiteren Untersuchungen wurde deshalb der Schwerpunkt auf die Keilgeometrie gelegt. Im Folgenden wird diese als Keilzinkenverbindung bezeichnet, wie auch im Holzbau.

Außerdem wurden stabstahlbewehrte Verzahnungen untersucht. Hierbei versagte die Klebung.

4.2 Versuchsserie zur Optimierung des Klebvorgangs

Die Tragfähigkeit der Klebverbindung ist, neben den Festigkeiten der Bauteile, von der Festigkeit des Klebstoffs (Kohäsion) und der Tragfähigkeit der Grenzschichten (Adhäsion) abhängig. Die Oberflächenbeschaffenheit und -profilierung der zu verklebenden Flächen (z. B. rau oder glatt), die Konsistenz und der Luftporengehalt des Klebstoffs sowie der Vornässgrad und die Nachbehandlung haben dabei Einfluss auf die Tragfähigkeit. Der Einfluss der beiden letzten Parameter wurde in einer eigenen Versuchsserie ermittelt. Dazu wurden Haftzugversuche durchgeführt und der Vornässgrad sowie die Art der Nachbehandlung variiert.

Das Fazit ist, dass die besten Ergebnisse erzielt werden, wenn die zu verklebenden Teile unmittelbar nach dem Ausschalen bis kurz vor dem Verkleben in einem Wasserbad gelagert werden. Beim Aufbringen des Klebstoffs sollen die Klebflächen mattfeucht sein. Es empfiehlt sich, den Mörtel nach dem Anmischen in einen anderen Behälter umzutopfen und vor dem Verarbeiten zehn Minuten in Ruhe entlüften zu lassen. Die Klebflächen werden dann mit Mörtel bestrichen und die Fügeteile anschließend zusammengesprengt. Die Haftzugfestigkeiten lassen sich durch eine Nachbehandlung der Klebung nicht nennenswert verbessern.

4.3 Untersuchungen zur Formulierung eines zweiaxialen Bruchkriteriums für Klebfugen

Die Parameter, von denen die Tragfähigkeit der Klebung hauptsächlich abhängt, wurden in Abschnitt 4.2 bereits genannt. Die übertragbaren Adhäsionskräfte sind wiederum abhängig von den herrschenden Spannungszuständen, die aus der Belastung des Bauteils und der Fugengeometrie resultieren. In der Klebfuge treten Schubspannungen, Zugspannungen oder Druckspannungen auf, die beliebig kombiniert sein können. Während für eine Schub-Druckbeanspruchung von ZILCH und MÜHLBAUER ein Bruchkriterium hergeleitet wurde ([5] und [6]), steht für Schub-Zugbeanspruchungen zurzeit noch kein Bruchkriterium zur Verfügung. In einer umfangreichen Versuchsserie wurden daher Untersuchungen an kleinformatigen Schub-Druck-, Schub-Zug- und Zugprobekörpern durchgeführt (siehe Bilder 4), um ein zweiaxiales Bruchkriterium ableiten zu können. Die Versuchskörper weisen dabei eine einzelne, ebene Klebfläche auf. Dabei wurden sowohl der Pagel HFL als auch der HPM verwendet sowie unterschiedliche Arten der Klebflächenvorbereitung untersucht. Die Versuche sind in [8] und [10] ausführlich beschrieben.

In den allermeisten Versuchen war ein adhäsives Versagen in der Grenzschicht zwischen Klebstoff und Betonbauteil zu beobachten. Die Auswertung der Versuche erfolgte durch das Eintragen der beim Versagen in der Fuge herrschenden Spannungskomponenten in ein Schubspannungs-Normalspannungsdiagramm. In Bild 5 ist dies exemplarisch für eine durch Wasserstrahlschneiden erzeugte Klebfläche und Pagel HFL zu sehen. Dabei wurden sowohl die Einzelwerte als auch die Mittelwerte aus den Versuchen aufgetragen. Weiterhin sind auch die MOHR'schen Spannungskreise der einaxialen Druck- und Zugfestigkeit des Mörtels und des Betons dargestellt.

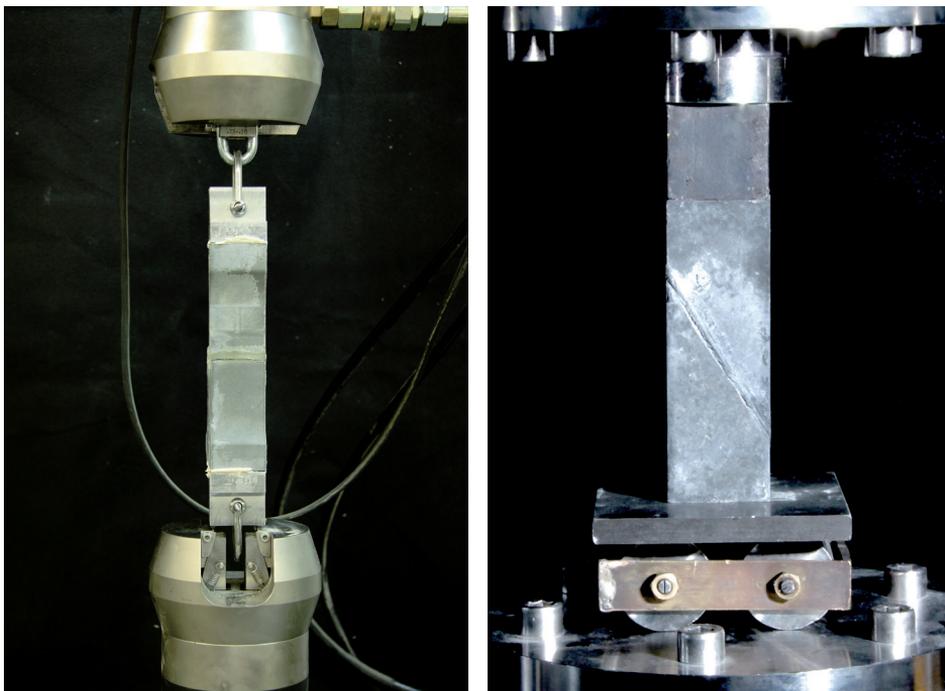


Bild 4: Versuchsaufbau für die Zug- und Schub-Zugversuche (links)
Versuchsaufbau für die Schub-Druckversuche (rechts) [Fotos: Sebastian Oster]

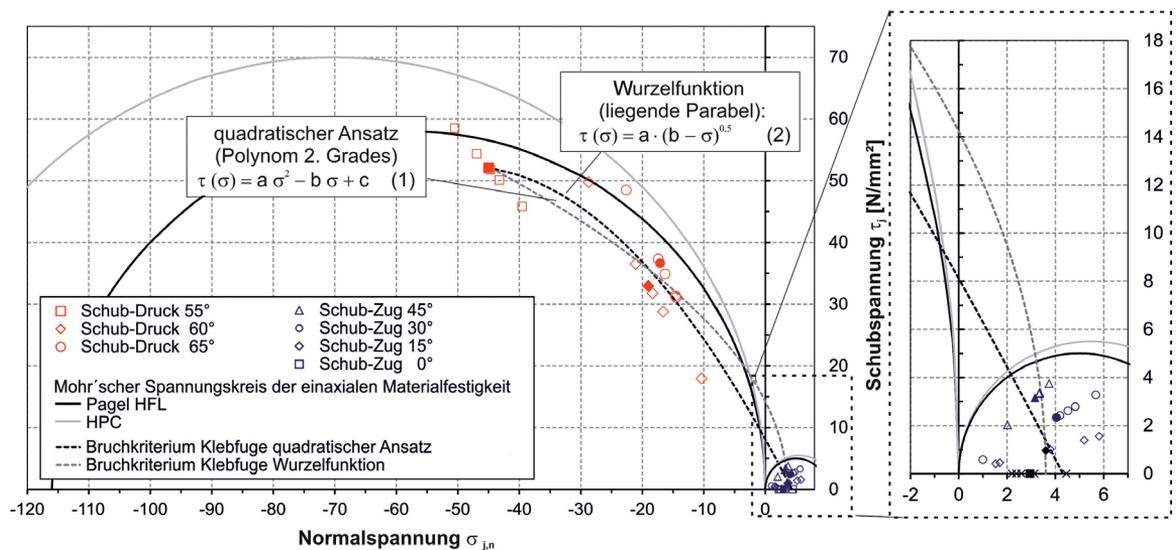


Bild 5: Auswertung der Schub-Druck- und Schub-Zugversuche im Schubspannungs-Normalspannungsdiagramm, exemplarisch für eine durch Wasserstrahlschneiden erzeugte Kleblfläche und Pagel HFL [Sebastian Oster]

In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze, um das Versagen von Klebfugen im Betonbau zu beschreiben. Je nach verwendetem Klebstoff treffen unterschiedliche Funktionstypen zu. BERGMEISTER verwendet in [3] einen quadratischen Ansatz (siehe Gleichung (1) in Bild 5) für Klebverbindungen unter Schub-Druck- und Schub-Zugbeanspruchung. Als Klebstoff verwendete er einen Vinylesterharzklebstoff. HANKERS [11] verwendet bei seinen Untersuchungen an Klebverbindungen mit einem Epoxidharzklebstoff ein Bruchkriterium in Form einer Wurzelfunktion (bzw. liegende Parabel, siehe Gleichung (2) im Diagramm in Bild 5).

Die eigenen Versuchsergebnisse lassen sich am besten durch ein Bruchkriterium in Form einer liegenden Parabel abbilden, insbesondere für den Zugbereich. Die Festigkeit der Klebverbindung unter reiner Zugbeanspruchung wird durch ein Polynom 2. Grades deutlich überschätzt. Die reine Scherfestigkeit beträgt im Falle des Wurzelansatzes 14 N/mm² und liegt damit deutlich höher als im Falle des quadratischen Ansatzes mit rund 8 N/mm².

4.4 Versuchsserie zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen

4.4.1 Zugversuche

Nachdem auf die oben beschriebene Weise aus den Versuchen mit einer einzelnen, geneigten Kleblfläche ein Bruchkriterium abgeleitet wurde, sollte dieses durch Versuche an Keilzinkenverbindungen mit sechs Kleblflächen, wie sie in Bild 6 zu sehen sind, verifiziert werden. Dazu wurden in Zugversuchen Tragfähigkeiten von Keilzinkenverbindungen mit unterschiedlichen Flankenneigungswinkeln ermittelt und diese mit den an den bereits beschriebenen Schub-Zugprobekörpern bestimmten Werten sowie der auf Basis des Bruchkriteriums berechneten Fugentragfähigkeit verglichen. Die Flankenneigungswinkel wurden so flach gewählt, dass sich ein adhäsives Versa-

gen in den Grenzschichten einstellen sollte. Die Querschnittsflächen der Versuchskörper mit Keilzinkenverbindung entsprachen genau dem Sechsfachen der Schub-Zugprobekörper zur Bestimmung des Bruchkriteriums.

Wie beabsichtigt trat bei den Versuchen durchweg ein adhäsives Versagen in den Grenzschichten auf. Die Versuchsergebnisse weisen generell große Streuungen auf. In Bild 7 ist die Festigkeit (maximale im Bauteil vorhandene Normalspannung) der Klebverbindung unter Zugbeanspruchung für beide Probekörpertypen in Abhängigkeit des Flankeneneigungswinkels aufgetragen. In dem Diagramm sind die Mittelwerte dargestellt. Außerdem ist die aus dem Bruchkriterium berechnete Fugentragfähigkeit in Abhängigkeit des Flankeneneigungswinkels abgebildet, zum einen für den parabolischen Ansatz und zum anderen für einen linearen Ansatz, wobei die mit dem zuerst genannten Ansatz berechneten Werte tendenziell besser mit den Ergebnissen der kleinformatigen Probekörper übereinstimmen.

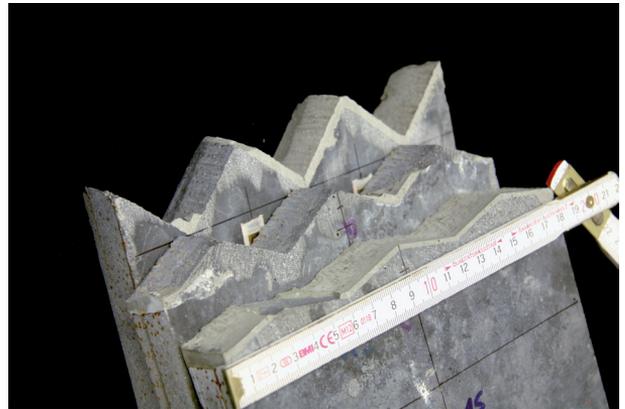
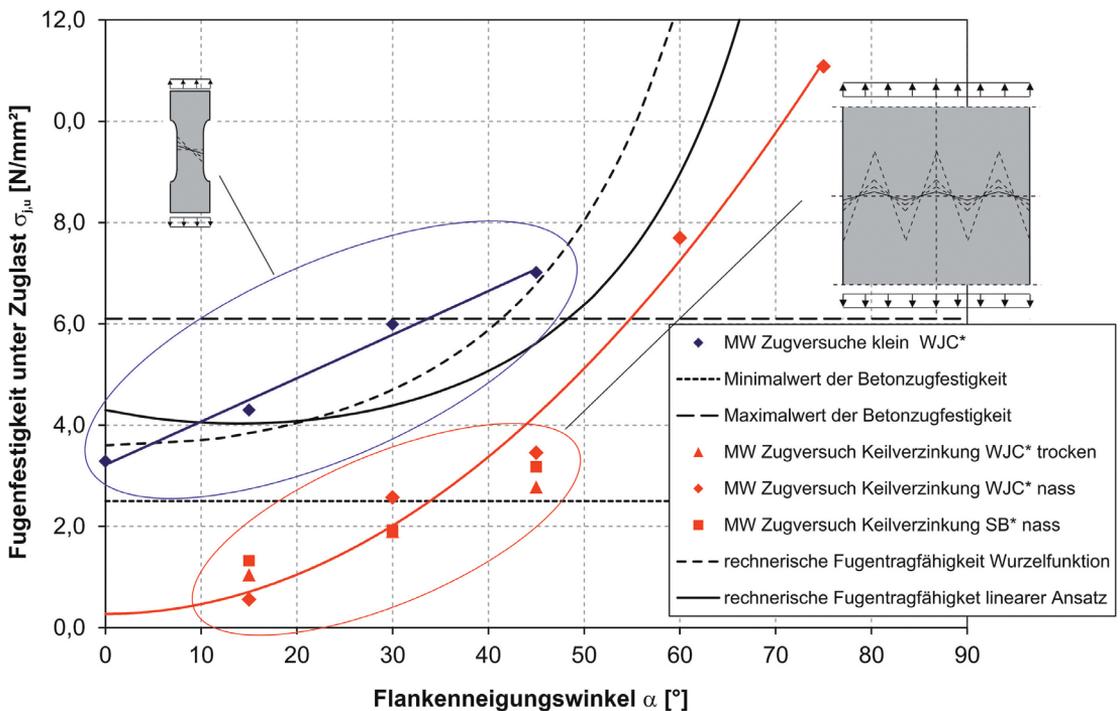


Bild 6: Zugprobekörper mit Keilzinkengeometrie und sechs Klebflächen. Die Flankeneneigungen der Zinken betragen 15°, 30° und 45°.

[Foto: Sebastian Oster]

Die Festigkeiten der Keilzinkenverbindungen sind jedoch deutlich geringer als die der kleinformatigen Probekörper mit einer Klebfläche, die in Abschnitt 4.3 vorgestellt wurden. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass sich in den relativ breiten



* WJC = wasserstrahlgeschnitten; SB = sandgestrahlt

Bild 7: Festigkeit der Keilzinkenverbindungen unter Zugbeanspruchung in Abhängigkeit des Flankeneneigungswinkels

[Sebastian Oster].

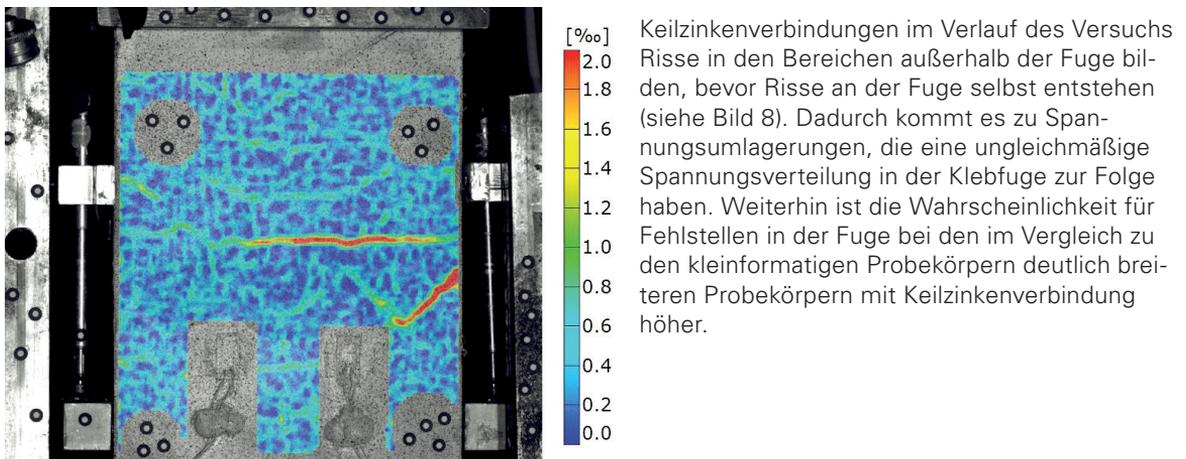


Bild 8: Dehnungsverteilung bei einem Zugversuch an einer Keilzinkenverbindung, gemessen mit Hilfe der Photogrammetrie [Foto: Sebastian Oster]

4.4.2 Vierpunkt- und Dreipunktbiegeversuche

Eine Versuchsserie, in der die Fugentragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen unter Biegebeanspruchung sowie unter einer Kombination aus Biege- und Querkraftbeanspruchung untersucht werden soll, steht zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch aus. Im Rahmen der Versuchsserie sind Dreipunktbiegeversuche sowie Vierpunktbiegeversuche geplant. Dabei wird – wie auch bei den Zugversuchen – der Flankenneigungswinkel variiert. Um ein adhäsives Versagen zu erreichen, werden diese wiederum relativ flach gewählt.

4.5 Versuchsserie zur Untersuchung der Bewehrungstragfähigkeit mikrobewehrter Keilzinkenverbindungen

Wie eingangs erläutert, tritt das Versagen in mikrobewehrten Bauteilen bei entsprechend steilen Flankenneigungswinkeln am Rand des Fugenbereichs ein, wobei letztendlich die Bewehrung versagt. In dem Bereich um die Zahnsitzen herum können dabei keine Zugkräfte durch die Bewehrung übertragen werden. Bezogen auf den ungestörten Querschnitt ist dort der Bewehrungsquerschnitt reduziert. Die Tragfähigkeit der Verbindung ist demnach abhängig von der Anzahl an Zahnsitzen bezogen auf eine bestimmte Fugenlänge, z. B. einen Meter. Die Anzahl an Spitzen bzw. Zähne pro laufenden Meter ist wiederum abhängig von der Zahnlänge und dem Flankenneigungswinkel. Auch ist eine gewisse Verankerungslänge der Mikrobewehrung erforderlich, um die Zugkraft von der Bewehrung in den Beton zu übertragen. Dabei spielt ebenfalls der Flankenneigungswinkel eine entscheidende Rolle. Unter diesen Gesichtspunkten wird derzeit in einer entsprechenden Versuchsserie die Tragfähigkeit der Mikrobewehrung für unterschiedliche Zahnlängen und Flankenneigungswinkel untersucht.

4.6 Klebverbindung mit Stabstahlbewehrung

In einer weiteren Versuchsserie wurde die Tragfähigkeit von Klebverbindungen mit Stabstahlbewehrung im Fugenbereich untersucht. Die Plattendicken betragen 3 und 6 cm. Als Bewehrung wurde zum einen Stabstahl mit einem Durchmesser von 6 mm

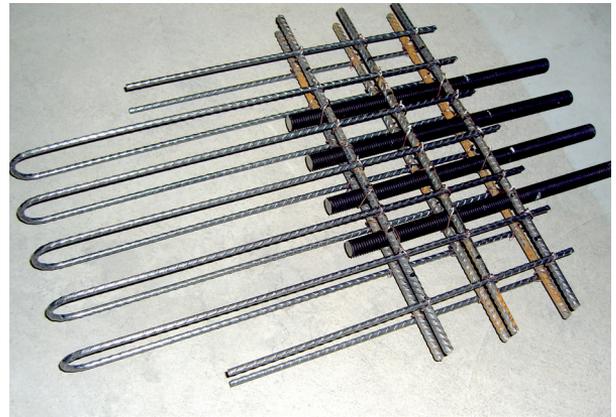


Bild 9: Schalung mit Stabstahlbewehrung für die Versuchskörper der Vierpunktbiegeversuche

Bild 10: Schlaufenförmige Stabstahlbewehrung (rechts)

[Fotos: Sebastian Oster]

und geradem Stabende untersucht, was vom Prinzip her einem Übergreifungsstoß entspricht. Dabei wurde die Übergreifungslänge variiert, wie in Bild 9 zu sehen ist. Als Referenzversuche wurden Versuche ohne Klebfuge durchgeführt. Des Weiteren wurden Bewehrungsstäbe mit einem Durchmesser von 4 mm untersucht, die zu Schlaufen gebogen waren (siehe Bild 10), sowie Gewindestäbe mit einem Durchmesser von 6 mm mit einer Mutter am Stabende. Es wurden Zugversuche sowie Vierpunktbiegeversuche durchgeführt. Diese werden derzeit ausgewertet.

Bei den Zugversuchen mit Stabstahlbewehrung und geradem Stabende kam es sowohl bei den 3 cm dicken Platten als auch bei den 6 cm dicken Platten unabhängig von der Übergreifungslänge zu einem Verbundversagen der Bewehrungsstäbe. Das schlagartige Versagen ging teilweise mit einem Absprengen der Betondeckung einher. Teilweise wurden die Bewehrungsstäbe aus dem Beton herausgezogen.

Bei den Versuchen mit Gewindestäben und Schlaufen aus Bewehrungsstahl kam es zu einer starken Rissbildung im Fugenbereich, was Bild 11 zeigt. Die Risse verliefen teilweise in der Fuge, teilweise entlang der Bewehrung sowie senkrecht zur Belastungsrichtung. In erster Linie kam es zu einem Versagen der Bewehrung. Teilweise kam es bei den Versuchen aber auch zu einem Versagen der Bewehrung an einem Zahn und zu einem Fugenversagen an einem anderen Zahn. Dabei war die Tragfähigkeit bei den Versuchen mit Klebfuge nur etwas geringer als bei den entsprechenden ungestörten Referenzversuchen.

In den Vierpunktbiegeversuchen mit Stabstahlbewehrung und geradem Stabende kam es bei einer Übergreifungslänge von 9 cm sowohl bei den Versuchen mit als auch bei denen ohne Klebfuge zu einem Bewehrungsversagen. Bei Versuchen mit Übergreifungslängen von 6 cm und 3 cm kam es zu einem Verbundversagen der Bewehrung im Beton.

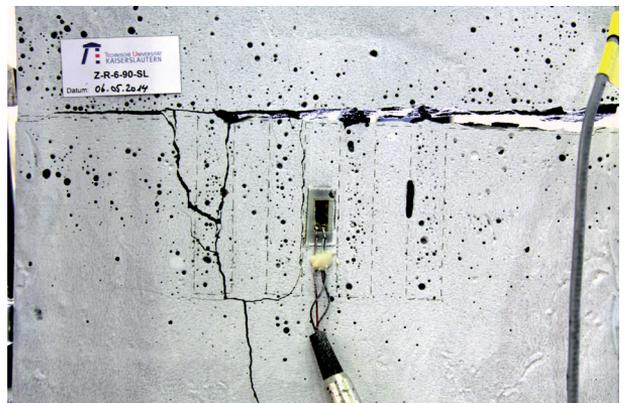


Bild 11: Nach einem Zugversuch: Versagensbild einer Klebverbindung mit schlaufenförmiger Stabstahlbewehrung. Die Übergreifungslänge betrug 9 cm.

[Foto: Sebastian Oster]

5 Zusammenfassung und Ausblick

Werden Klebfugen entsprechend geformt und bewehrt, sind sie in der Lage, erhebliche Kräfte und Momente zu übertragen, die an die der ungestörten Bauteile heranreichen.

Zum Herstellen nahezu beliebiger Fugengeometrien in mikrobewehrten Bauteilen hat sich das Hochdruckwasserstrahlschneiden als besonders geeignet herausgestellt. Die Keilzinkenverbindung, wie sie aus dem Holzbau bekannt ist, bringt neben einer entsprechend hohen Traglast weitere positive Eigenschaften mit sich: Wird der Flankenneigungswinkel steil genug gewählt, kommt es zu einem (duktilen) Versagen der Bewehrung im Fugenbereich. Dabei kann ein sprödes adhäsives Versagen der Grenzflächen durch eine entsprechende Bemessung ausgeschlossen werden. Der Einfluss der Zahnlänge und des Flankenneigungswinkels auf die Bewehrungstragfähigkeit ist jedoch weiterhin zu untersuchen.

Durch den geschickten Einsatz von Stabstahlbewehrung, insbesondere in Form von Schlaufen, lässt sich ebenfalls eine Tragfähigkeit der Klebverbindung erreichen, die an die ungestörter Bauteile heranreicht. Entsprechende Empfehlungen zur Konstruktion und ein Ingenieurmodell zur Bemessung sollen zeitnah erarbeitet werden.

Literatur

- [1] SCHNELL, J.; KOHLMAYER, C.; BAYER, D.; MÜLLER, F.: Werkstoffgerechtes Konstruieren mit Hochleistungsbetonen. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), Heft 6, S. 404–413.
- [2] SCHMITT, M.; KRELAUS, R.; TEICHMANN, T.; LEUTBECHER, T.; FEHLING, E.: Fügen von Bauteilen aus UHPC durch Kleben. Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007); Heft 10, S. 681–690.
- [3] BERGMEISTER, K.: Kleben im Betonbau: Theoretische Grundlagen und Bemessungsvorschläge. Beton- und Stahlbetonbau 96 (2001), Heft 10, S. 625–633.
- [4] FRANKE, L.; DECKELMANN, G.: Das Tragverhalten der Grenzflächen von Fugen. Bautechnik 66 (1989), Heft, S 7–12.
- [5] MÜHLBAUER, C.; ZILCH K.: Glued Joints of Ultra High Performance Concrete Structures. In: Proceedings of the 3rd fib International Congress, 29.05.–02.06.2010 in Washington D.C. (USA), Beitrag Nr. 41, 13 S. (published on CD)
- [6] MÜHLBAUER, C.: Fügen von Bauteilen aus ultrahochfestem Beton. Dissertation, TU München, 2012.
- [7] OSTER, S.; KOHLMAYER, C.: Zugbeanspruchte Klebverbindungen für Platten- und Scheibenbauteile aus hochfestem Beton. In: GEBEKKEN, N. ET AL. (Hrsg.): Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. MANFRED KEUSER. Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau 12/4, Universität der Bundeswehr München, 2012, S. 273–279.

- [8] OSTER, S.; KOHLMAYER, C.: Untersuchungen zur Formulierung eines zweiachialen Bruchkriteriums für Klebfugen zwischen Betonbauteilen. In: BREITENBÜCHER, R.; MARK, P. (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAfStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium in Bochum, 07.–08.11.2013, Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. 59–64.
- [9] OSTER, S.; SHKLYAR, I.; ANDRÄ, H.: Adhesive joints for structural elements of high performance concrete (HPC). In: MÜLLER, H. S.; HAIST, M.; ACOSTA, F. (Eds.): Proceedings of the 9th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 22.–25.07.2012 in Karlsruhe, Germany. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2012 S. 335–340.
- [10] OSTER, S.; KOHLMAYER, C.: Experimental investigations on a finger joint for structural elements of high performance concrete. In: BASTIEN, J.; ROULEAU, N.; FISET, M.; THOMASSIN, M. (Hrsg.): Proceedings of the 10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, 21.–23.07.2014 in Quebec (Canada), S. 315–320.
- [11] HANKERS, C.: Zum Verbundtragverhalten laschenverstärkter Betonbauteile unter nicht vorwiegend ruhender Beanspruchung. Heft 473 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Berlin: Beuth Verlag, 1997.
- [12] OETTEL, V.; EMPELMANN, M.: Feinprofilierter UHPFRC-Trockenfugen für Segmentbauteile. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), Heft 7, S. 487–496.

**Konstruktion und Optimierung von
Klebeverbindungen für Platten- und
Scheibenbauteile aus ultrahochfestem
Beton**

Projektleiter

Jun.-Prof. Dr.-Ing. Christian Kohlmeyer

Projektbearbeiter

Dipl.-Ing. Sebastian Oster

Projektlaufzeit

09/2011 – 10/2014

Partner

Priv.-Doz. Dr. Heiko Andrä,
Fraunhofer ITWM Kaiserslautern

Web

<http://www.bauing.uni-kl.de/massivbau>