

# **Keilzinkenverbindungen als Fügetechnik für dünne Bauteile aus mikrobewehrtem Hochleistungsbeton**

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Kaiserslautern  
zur Verleihung des akademischen Grades

**DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)**

genehmigte

**DISSERTATION**

von

**Dipl.-Ing. Sebastian Peter Oster**

aus Binningen Eifel

Dekan:	Prof. Dr. rer. nat. O. Kornadt
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. J. Schnell
2. Berichterstatter:	Dr.-Ing. C. Kohlmeyer
Tag der mündlichen Prüfung:	31.08.2017

Kaiserslautern 2017

(D 386)



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Massivbau und Baukonstruktion der TU Kaiserslautern. Hier war ich im Zeitraum von 2012 bis 2015 schwerpunktmäßig mit der Bearbeitung eines von der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) geförderten Forschungsvorhabens betraut, bei dem es eine Klebverbindung für dünne Bauteile aus Hochleistungsbeton zu entwickeln galt. Das in Kooperation mit dem Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM) in Kaiserslautern durchgeführte Forschungsprojekt war eingebettet in das DFG Schwerpunktprogramms 1542 "Leicht bauen mit Beton". Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Untersuchungen bilden den Kern dieser Arbeit. Der DFG sei an der Stelle für die finanzielle Unterstützung ganz herzlich gedankt.

Ein großer Dank gilt dem Initiator dieses Forschungsprojekts und zweiten Berichtstatter Herrn Dr.-Ing. Christian Kohlmeyer für seine fachliche Unterstützung und Diskussionsbereitschaft. Durch immer wieder gute Anregungen und Anmerkungen hat er die Arbeit ganz entscheidend beeinflusst und zum Gelingen der Arbeit maßgeblich beigetragen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell und ersten Berichtstatter dieser Arbeit für die Unterstützung und Förderung während meiner Zeit am Fachgebiet für Massivbau und Baukonstruktion. Mit seinem fundierten Fachwissen und Erfahrungsschatz hat er sich in die Arbeit eingebracht und ebenfalls großen Anteil am Gelingen der Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn danke ich sehr herzlich für die Bereitschaft zur Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Weiterhin sei der Firma Pagel für den fachliche Rat und die kostenlose Bereitstellung von Mörtel, welcher bei den Untersuchungen zum Einsatz kam, gedankt.

Ferner gilt meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen, den wissenschaftlichen Hilfskräften, den Bearbeitern von Studien- und Diplomarbeiten, die im Zusammenhang mit der Arbeit entstanden sind, sowie den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in der Versuchshalle ein ganz herzlicher Dank für die vielfältigen wertvollen fachlichen Anregungen, die Hilfe und die gute Zusammenarbeit.

Zu guter Letzt möchte ich mich ganz besonders bei meiner Familie, meinen Freunden und meiner Lebenspartnerin Kathrin, für die Unterstützung, für den Rückhalt und für den eingeräumten Freiraum, den die Erstellung einer solchen Arbeit fordert, bedanken.

Monsheim, im April 2017

Sebastian Oster





Dipl.-Ing. Sebastian Peter Oster

**Keilzinkenverbindungen  
als Fügechnik für dünne Bauteile aus  
mikrobewehrtem Hochleistungsbeton**



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsangabe.....</b>	<b>v</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>vi</b>
<b>Bezeichnungen.....</b>	<b>vii</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergrund und Motivation .....	1
1.2 Zielsetzung und Umfang der Arbeit .....	2
1.3 Vorgehensweise.....	3
<b>2 Zusammenstellung der Grundlagen .....</b>	<b>5</b>
2.1 Entwicklungen im Bereich des Hochleistungsbetons .....	5
2.1.1 Hochleistungsbeton (HPC).....	5
2.1.2 Mikrobewehrter Hochleistungsbeton .....	6
2.2 Kleben von Betonbauteilen mit zementgebundenen Klebstoffen .....	11
2.2.1 Allgemeine Grundlagen .....	11
2.2.2 Verbund zwischen zementgebundenen Schichten .....	14
2.2.3 Klebstoffe auf Zementbasis – Hochleistungsmörtel .....	23
2.2.4 Bruchkriterien für Klebfugen.....	27
2.2.5 Bemessungsansätze.....	51
<b>3 Verwendete Werkstoffe .....</b>	<b>59</b>
3.1 Hochleistungsbeton.....	59
3.1.1 Verwendete Betonrezepturen .....	59
3.1.2 Herstellung.....	60
3.1.3 Materialeigenschaften.....	60
3.2 Klebstoff auf Zementbasis.....	65
3.2.1 Allgemeines .....	65
3.2.2 Verwendete Klebstoffe .....	65
3.2.3 Herstellung.....	67
3.2.4 Materialeigenschaften.....	67
3.3 Bewehrung .....	70
3.3.1 Allgemeines .....	70
3.3.2 Mikrobewehrung .....	70
3.3.3 Stahlfaserbewehrung.....	71
3.3.4 Stabstahlbewehrung .....	71

<b>4</b>	<b>Voruntersuchungen</b>	<b>73</b>
4.1	Versuchsreihe zur Optimierung des Haftverbunds	73
4.1.1	Allgemeines	73
4.1.2	Versuchsprogramm	73
4.1.3	Probekörper	75
4.1.4	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	76
4.1.5	Versuchsergebnisse	76
4.1.6	Fazit	79
4.2	Charakterisierung der Klebflächen	80
4.2.1	Allgemeines	80
4.2.2	Vorgehen	81
4.2.3	Ergebnisse	83
4.3	Tastversuche an Klebverbindungsvarianten	87
4.3.1	Allgemeines	87
4.3.2	Versuchsprogramm	87
4.3.3	Probekörper	88
4.3.4	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	91
4.3.5	Ergebnisse der Zugversuche	93
4.3.6	Ergebnisse der Vierpunkt- sowie Dreipunktbiegeversuche	99
4.3.7	Fazit	100
4.4	Rechnerische Voruntersuchungen	101
4.4.1	Allgemeines	101
4.4.2	Modellbildung und Simulation	101
4.4.3	Auswertung – Postprocessing	102
<b>5</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen</b>	<b>105</b>
5.1	Untersuchungen zur Formulierung eines Bruchkriteriums für Klebfugen	105
5.1.1	Allgemeines	105
5.1.2	Zug- und Schub-Zugversuche SZ2	107
5.1.3	Zugversuche HZ3	110
5.1.4	Schub-Druckversuche	114
5.1.5	Auswertung der Versuche und Diskussion der Ergebnisse	120
5.1.6	Fazit	123
5.2	Untersuchungen an Keilzinkenverbindungen	124
5.2.1	Allgemeines	124
5.2.2	Versuchsprogramm	126
5.2.3	Probekörper	128
5.2.4	Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen unter Zugbeanspruchung	131

5.2.5	Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen unter Biegebeanspruchung sowie unter kombinierter Biege-Querkraftbeanspruchung .....	139
5.2.6	Untersuchungen zur Bewehrungstragfähigkeit bei Keilzinkenverbindungen im Zustand II .....	145
5.2.7	Auswertung der Versuche und Diskussion der Ergebnisse .....	149
5.2.8	Fazit .....	160
<b>6</b>	<b>Bemessungsansatz für Keilzinkenverbindung .....</b>	<b>163</b>
6.1	Allgemeines.....	163
6.2	Qualitätssicherung beim Kleben mit zementgebundenen Klebstoffen.....	164
6.2.1	Allgemeines .....	164
6.2.2	Vorbehandlung der Klebfläche.....	164
6.2.3	Klebearbeiten.....	165
6.3	Bemessung gegen Fugenversagen .....	166
6.3.1	Allgemeines .....	166
6.3.2	Reine Zugbeanspruchung.....	167
6.3.3	Biegebeanspruchung und kombinierte Biege-Querkraftbeanspruchung .....	168
6.4	Bemessung gegen Bewehrungsversagen.....	169
6.4.1	Allgemeines .....	169
6.4.2	Wirksamer effektiver Bewehrungsgehalt.....	170
6.4.3	Mindestbewehrung.....	171
6.5	Rechenbeispiel.....	172
6.5.1	Allgemeines - System und Abmessungen .....	172
6.5.2	Nachweis gegen Fugenversagen.....	173
6.5.3	Nachweis gegen Bewehrungsversagen.....	173
6.5.4	Überprüfung der Mindestbewehrung.....	175
6.6	Fazit....	175
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>177</b>
7.1	Zusammenfassung.....	177
7.2	Ausblick.....	179
<b>8</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>182</b>
<b>Anhang.....</b>		<b>191</b>
<b>A. Versuchsreihe zur Optimierung des Haftverbunds.....</b>		<b>191</b>
<b>B. Charakterisierung der Klebflächen.....</b>		<b>199</b>

<b>C. Tastversuche an Klebfugenvarianten.....</b>	<b>203</b>
<b>D. Untersuchungen zur Formulierung eines Bruchkriteriums für Klebverbindungen.....</b>	<b>211</b>
<b>E. Untersuchungen an Keilzinkenverbindungen.....</b>	<b>233</b>
<b>Lebenslauf.....</b>	<b>259</b>







## Inhaltsangabe

Auf Grundlage von in erster Linie experimentellen Untersuchungen wurden im Rahmen der Arbeit Keilzinkenverbindungen zum Fügen dünner Bauteile aus mikrobewehrtem Hochleistungsbeton erforscht. Als Klebstoff kam hierbei ein rein zementgebundener Hochleistungsmörtel zum Einsatz.

Die Entwicklung von Hochleistungsbetonen und neuartigen Bewehrungsformen, wie Glas- oder Kohlefasergelegen, ermöglicht die Realisierung von sehr filigranen Konstruktionen. Aus verschiedenen Gründen, beschränkt sich die Anwendung fast ausschließlich auf werksmäßig hergestellte Fertigteile. Um daraus größere Strukturen realisieren zu können, sind geeignete Fügeverfahren erforderlich. Einen vielversprechenden Ansatz stellen hier Klebverbindungen dar. Das Kleben als flächige Fügeverfahren zeichnet sich durch eine kontinuierliche Kraftübertragung und gleichmäßige Materialauslastung aus.

Der große Vorteil von Zement-Klebstoffen im Vergleich zu Reaktionsharzklebstoffen ist, dass sie weitestgehend unempfindlich gegenüber Umwelteinflüssen sind. Neben zwei Hochleistungsmörteln, welche auf einer von *Mühlbauer 2012* entwickelten Rezeptur basieren, wurde ein kommerzieller Hochleistungsmörtel eingesetzt.

In einem ersten Schritt wurden verschiedene Voruntersuchungen durchgeführt. Im Mittelpunkt standen dabei Tastversuche mit unterschiedlichen Fugenvarianten. Das Versuchsprogramm sah verschiedene Fugengeometrien und Beanspruchungsarten vor. Neben Mikrobewehrung kam hierbei auch Stabstahlbewehrung zum Einsatz. Als besonders vorteilhaft hat sich die Keilgeometrie oder Keilzinkenverbindung, wie aus dem Holzbau bekannt, herauskristallisiert. Neben einer hohen Traglast weist diese weitere positive Eigenschaften auf, wie z.B. ein duktileres Tragverhalten.

Auf Grundlage von Kleinteilversuchen wurden in einem nächsten Schritt Bruchkriterien entwickelt, die die Festigkeit der Klebfuge sowohl für eine kombinierte Schub-Druck- als auch für eine Schub-Zugbeanspruchung beschreiben.

In einer umfangreichen Versuchsserie wurde schließlich das Tragverhalten von Keilzinkenverbindungen detailliert untersucht. Neben Zugversuchen wurden dabei auch Drei- und Vierpunktbiegeversuche durchgeführt. Das Versagen lässt sich vereinfachend in ein Fugenversagen und ein Bewehrungsversagen unterteilen. Ziel einer fachgerechten Konstruktion und Ausführung von Keilzinkenverbindungen muss ein Bewehrungsversagen und damit ein duktileres Tragverhalten sein. Einflussfaktoren auf das Tragverhalten sind der Flankenneigungswinkel, die Zahnlänge, der Bewehrungsgrad des Bauteils sowie die Art der Klebflächenvorbereitung und der verwendete Klebstoff.

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurde in einem letzten Schritt ein praxistaugliches Bemessungskonzept für zugbeanspruchte, biegebeanspruchte sowie biege-querkraftbeanspruchte Keilzinkenverbindungen entwickelt.

## Abstract

As part of this thesis finger joints as a joining technology for thin structural elements of high performance concrete (HPC) were researched. The research was primarily based on experimental investigations. As adhesive pure cement bound high performance mortar was used.

By the development of HPC and new types of reinforcement, like glass or carbon fiber grid, new possibilities for the construction of innovative, filigree and materialsaving concrete structures have been opened up. Because of various reasons, structural elements of HPC are commonly prefabricated. To realize entire structures, suitable joining technologies are required. A promising approach for joining HPC members is the use of adhesive joints. Gluing as a continuous connection method is characterized by an evenly distributed load transfer.

A major advantage of cements-adhesives over reaction resin adhesives is the high resistance against environmental influences. Besides to two high performance mortars, which were based on a recipe of *Mühlbauer 2012*, a commercial premixed dry mortar was used.

As a first step, preliminary tension tests on specimens of HPC with different joint geometries and different types of reinforcement, i.e. micro steel mesh reinforcement as well as a steel bar reinforcement, were carried out. The wedge geometry, or so called finger joints, as it is known from timber construction, has been proved particularly advantageous. In addition to a high bearing capacity, it has many other positive characteristics, such as a ductile structural behavior.

In a further step, shear-compression and shear-tension tests were carried out. On the basis of these tests, failure criterions for the adhesive joint under shear-compression load as well as under shear-tension load were developed.

Finally, the structural behavior of concrete finger joints was examined in detail, in an extensive test series. Besides tension tests, three- and four-point bending tests were carried out. In general, two failure modes were determined: on the one hand, a failure of the adhesive joint, on the other hand, a failure of the reinforcement at the joint area. Aim of the finger joint design is that the first failure mode, a tensile failure of the reinforcement occurs, so that a ductile behavior is guaranteed.

Based on the gained findings, in a last step, a practical concept for the structural design of finger joints, exposed to tension load, bending load or combined bending shear load was developed.

## Bezeichnungen

### Große lateinische Buchstaben

<i>A</i>	Querschnittsfläche, Luftporengehalt
<i>E</i>	Elastizitätsmodul
<i>F</i>	Kraft, Last, Belastung
<i>I</i>	Flächenträgheitsmoment
<i>L</i>	Länge
<i>M</i>	Moment
<i>N</i>	Normalkraft
<i>P</i>	Last
<i>R</i>	Widerstand
<i>T</i>	Temperatur
<i>V</i>	Querkraft, Bewehrungsgehalt
<i>W</i>	Widerstandsmoment

### Kleine lateinische Buchstaben

<i>a</i>	Maschenweite, Abstand
<i>b</i>	Breite
<i>d</i>	Dicke, Durchmesser, statische Höhe
<i>f</i>	Festigkeit
<i>h</i>	Höhe
<i>k</i>	Faktor
<i>ℓ</i>	Zahnlänge
<i>n</i>	Anzahl
<i>r</i>	Ausrundungsradius
<i>t</i>	Zeit
<i>v</i>	Variationskoeffizient
<i>w</i>	Rissweite
<i>x</i>	Abstand, Betondruckzonenhöhe
<i>z</i>	Hebelarm, Lage der Schwerachse

### Griechische Buchstaben

$\alpha$	Fugenneigungswinkel, Winkel, Hilfswert
$\beta$	Faktor, Hilfswert
$\gamma$	Teilsicherheitsbeiwert
$\Delta$	Differenz
$\varepsilon$	Dehnung
$\kappa$	Maßstabsfaktor
$\lambda$	Hilfswert, Wärmeleitfähigkeit
$\mu$	Rauigkeitsbeiwert, Reibungskoeffizient
$\nu$	Querdehnzahl
$\phi$	Durchmesser
$\sigma$	Spannung
$\tau$	Schubspannung, Verbundspannung
$\psi$	Kombinationsbeiwert
$\rho$	Rohdichte
$\Sigma$	Summe

### Indizes

a	Klebstoff (engl. adhesive), außen
c	Beton
cr	Riss (engl. crack)
cont	Dauerstand
cube	Würfel
cyl	Zylinder
d	Bemessungswert (engl. design)
dyn	dynamisch
DUC	DUCON, duktil
e	im elastischen Bereich
eff	effektiv, wirksam
ext	außen
exp	experimentell ermittelter Wert
f	Reibung (engl. friction)

fl	Biegung (engl. flexural)
ges	gesamt
g	Klebstoff (engl. glue)
i	Index, innen
j	Fuge (engl. joint)
k	charakteristischer Wert
M	Material
max	Maximalwert
m, mean	Mittelwert
n	Normalspannung
pl	plastisch
pr	Prisma
red	reduziert
s	Mikrobewehrung, Sekantenmodul, Schwinden
sp	im Spaltzugversuch ermittelt
surf	Oberfläche (engl. surface)
t	Zugfestigkeit
w	Durchbiegung
zul	zulässig

### **Abkürzungen**

DMS	Dehnmessstreifen
FE	Finite Elemente
HPC	Hochleistungsbeton (engl. High Performance Concrete)
UHPC	Ultrahochleistungsbeton (engl. Ultra High Performance Concrete)
RPC	Reaktivpulverbeton (engl. Reactive Powder Concrete)
HFL	Hochfestleim
HPM	Hochleistungsmörtel (engl. High Performance Mortar)
EP	Epoxidharz
UP	Polyesterharz
PCE	Polycarboxylatester



# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund und Motivation

Die Entwicklung von Hochleistungsbetonen und neuartigen Bewehrungsformen wie Glas- oder Kohlefasergelegen ermöglichen die Realisierung von äußerst dünnwandigen Betonbauteilen und filigranen Konstruktionen. Die Herstellung und Verarbeitung von hochfestem oder ultrahochfestem Beton (HPC oder UHPC) unter Baustellenbedingungen ist schwierig und erfordert ein hohes Maß an Sorgfalt. Deshalb beschränkt sich die Anwendung von Hochleistungsbetonen fast ausschließlich auf werksmäßig hergestellte Fertigteile. Um aus den Fertigteilen größere Gebäude oder Ingenieurbauwerke errichten zu können, sind entsprechende Fügetechniken erforderlich. Bei dünnen Bauteilen sind herkömmliche Fügetechniken, wie der Einsatz von Ankern oder Schlaufen, weitestgehend ungeeignet. Im Bereich der Lasteinleitung kommt es bei diesen punktförmigen Verbindungen zu Spannungskonzentrationen, weshalb in der Regel eine Mindestbauteildicke gefordert wird.

Als eine Möglichkeit zum Fügen schlanker Bauteile haben *Sobek et al 2011* und *Kobler 2013* sogenannte Implantate entwickelt (siehe Abb. 1.1).



Abb. 1.1: Implantat zur Einleitung konzentrierter Lasten in schlanke Bauteile (*Kobler 2013*)



Abb. 1.2: Weinberghaus bei Wörrstadt (Rheinhausen) (*Schnell et al 2013*)

Eine vielversprechende, werkstoffgerechte Alternative stellt das Verkleben von Bauteilen dar. Bedingt durch die flächige Verbindung findet dabei ein kontinuierlicher Kraftfluss statt. Im Betonbau findet Kleben zum planmäßigen Übertragen von Lasten bisher hauptsächlich Anwendung beim nachträglichen Verstärken von Bauteilen durch Aufkleben bzw. Einkleben von Stahl- oder CFK-Lamellen sowie bei Verbunddübeln und nachträglich eingemörtelten Bewehrungsanschlüssen. Das Potential ist damit bei weitem nicht ausgeschöpft. Als planmäßige dauerhafte Fügetechnik spielt Kleben bislang nur vereinzelt eine Rolle. Als ein Beispiel kann hier die Gärtnerplatzbrücke in Kassel genannt werden (*Schmidt et al 2007*), bei der die Fahrbahnplatte aus UHPC mit dem UHPC-Obergurt einer ansonsten stahlbaummäßigen Fachwerkkonstruktion dauerhaft miteinander verklebt wurde. Insgesamt besteht jedoch noch

erheblicher Forschungsbedarf, will man die Technik für neue Anwendungsbereiche erschließen.

Am Fachgebiet für Massivbau und Baukonstruktion der TU Kaiserslautern konnten beim Bau des 2011 fertiggestellten „Weinberghauses“ (siehe Abb. 1.2) erste Erfahrungen mit dem Fügen von Fertigteilen aus Hochleistungsbeton durch Kleben gesammelt werden (*Schnell et al 2013*). Darauf aufbauend wurde in einem Forschungsvorhaben im Rahmen des DFG Schwerpunktprogramms 1542 „Leicht bauen mit Beton“ gemeinsam mit dem Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM) eine Klebverbindung für dünne Betonbauteile aus hochfestem Beton entwickelt. Die im Rahmen dieses Forschungsprojekts durchgeführten Untersuchungen bilden den Kern dieser Arbeit.

### 1.2 Zielsetzung und Umfang der Arbeit

Ziel war es, eine möglichst einfache, praxistaugliche Klebverbindung für dünne Bauteile aus hochfestem Beton zu entwickeln. Diese sollten in erster Linie mit Drahtmatten, sogenannte Mikrobewehrung, aber auch als Alternative mit Stabstahl mit unter Umständen speziellen Biegeformen im Fugenbereich, bewehrt werden. Dabei sollte die Klebverbindung in der Lage sein, Normalkräften, Querkräften und Biegemomenten sowie Kombinationen daraus zu übertragen. Als Klebstoff sollte ein zementgebundener Klebstoff dienen, der in erster Linie durch seine Unempfindlichkeit gegenüber Umwelteinflüssen besticht. Ausgangspunkt war dabei ein an der TU München entwickelter Klebstoff auf Zementbasis (RPC-Klebstoff). Als Alternative wurde weiterhin ein kommerzieller Hochleistungsmörtel der Fa. Pagel eingesetzt.

Eine Schwierigkeit beim Verkleben von Betonbauteilen stellt die geringe Oberflächenzugfestigkeit dar. Dem entsprechend lag ein Schwerpunkt auf der Optimierung der Fugengeometrie mit dem Ziel, die Zugspannungen in den Fügeflächen zu minimieren. Die numerische Struktur-optimierung erfolgte durch das Fraunhofer ITWM Kaiserslautern mit Hilfe eines integrierten Shape- und Topologie-Optimierungsverfahrens, worauf im Rahmen der Arbeit aber nicht näher eingegangen wird. Forschungsergebnisse dazu werden unter anderem in *Andrä et al 2014* vorgestellt.

Der Schwerpunkt der Arbeit lag auf der experimentellen Untersuchung des Tragverhaltens von Klebverbindungen. Ziel war es, neben einer möglichst hohen Tragfähigkeit, ein „gutmütiges“, duktileres Tragverhalten der Verbindung zu erreichen. Es galt die Verbindung so zu gestalten, dass das Versagen „mit Sicherheit“ nicht in der unbewehrten Fuge stattfindet, sondern im bewehrten Bauteil ein Bewehrungsversagen eintritt.

Letztendlich sollten Entscheidungshilfen und Empfehlungen zur Fugengestaltung erarbeitet werden sowie ein Bemessungskonzept für Klebverbindungen entwickelt werden.



### 1.3 Vorgehensweise

In Abb. 1.3 ist die Vorgehensweise zur Erforschung von Keilzinkenverbindung als Fügetechnik für dünne Bauteile aus Hochleistungsbeton und die Gliederung der Arbeit schematisch dargestellt.

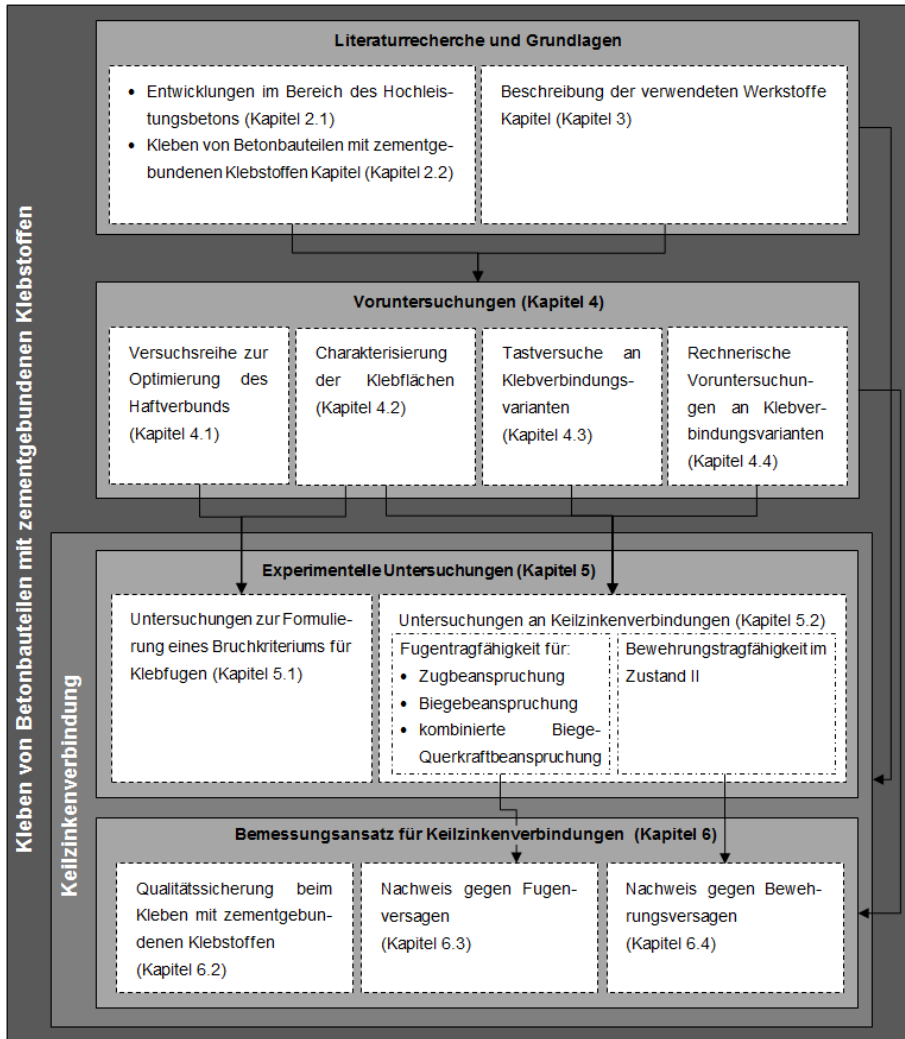


Abb. 1.3: Vorgehensweise zur Erforschung von Keilzinkenverbindung als Fügetechnik für dünne Bauteile aus Hochleistungsbeton und Gliederung der Arbeit

Im Vorfeld wurde zunächst ein umfassendes Literaturstudium zu den Themen „Konstruktives Kleben im Massivbau“, „Verbund zwischen zementgebundenen Schichten“, „Hochleistungsmörtel“ sowie „Entwicklungen im Bereich des Hochleistungsbetons“ vorgenommen und so die Grundlagen für die weiteren Arbeitsschritte gelegt (Kapitel 2).

In Kapitel 3 werden die in dieser Arbeit verwendeten Werkstoffe näher beschrieben. Neben den Mischungszusammensetzungen sind dort die Materialeigenschaften zusammengestellt.

In einem ersten Schritt wurden Tastversuche durchgeführt, sowohl an Fugen mit Mikrobewehrung als auch an Fugen mit Stabstahlbewehrung. Dabei wurden verschiedene Beanspruchungen und unterschiedliche Fugenvarianten untersucht. Weiterhin wurden Voruntersuchungen zur Optimierung des Mörtels und des Klebvorgangs durchgeführt. Zudem wurde die Rauigkeit von Klebflächen ermittelt, die in den weiteren Versuchen untersucht werden sollten. Diese Voruntersuchungen sind in Kapitel 4 zusammengefasst.

In Kapitel 5 werden die zentralen experimentellen Untersuchungen vorgestellt. Im Hinblick auf die Bemessung sowie auf die numerische Optimierung galt es, ein Bruchkriterium sowohl für eine Schub-Druckbeanspruchung als auch für eine Schub-Zugbeanspruchung zu entwickeln, mit dem sich das Versagen der Klebverbindung bei den in der Fuge vorherrschenden Beanspruchungszuständen zuverlässig beschreiben lässt. In einer umfangreichen Versuchsserie wurden daher Untersuchungen an kleinformatischen Schub-Druck-, Schub-Zug- und Zugprobekörpern durchgeführt, mit dem Ziel, ein zweiaxiales Bruchkriterium für die Klebfuge zu entwickeln. Dabei wurde sowohl der Pagel-Mörtel als auch der HPM verwendet sowie unterschiedliche Arten der Klebflächenvorbereitung untersucht.

Auf Basis der bei den Voruntersuchungen gewonnen Erkenntnisse sowie vor dem Hintergrund von baupraktischen Überlegungen konnten die Fugenvarianten eingegrenzt werden. Favorisiert wurde die Keilgeometrie, oder Keilzinkenverbindung wie sie im Holzbau bezeichnet wird. Im Rahmen von experimentellen Untersuchungen wurden das Trag- und Verformungsverhalten für unterschiedliche Beanspruchungszustände analysiert.

In Kapitel 6 wird schließlich ein praxisgerechter Bemessungsansatz präsentiert, welcher in einem letzten Schritt auf Basis der experimentellen Untersuchungen formuliert wurde. Bestandteil sind hierbei auch Vorgaben was Qualitätssicherungsmaßnahmen angeht.

## 2 Zusammenstellung der Grundlagen

### 2.1 Entwicklungen im Bereich des Hochleistungsbetons

#### 2.1.1 Hochleistungsbeton (HPC)

Seit Ende der achtziger Jahre wird an der Entwicklung von Hochleistungsbeton geforscht. In Kanada und Frankreich wurden mit der Entwicklung des sogenannte Reactive Powder Concrete (RPC) die Grundlagen gelegt. Hochleistungsbetone weisen im Allgemeinen höhere Materialfestigkeiten als Normalbeton auf. Betone ab einer Druckfestigkeit von  $150 \text{ N/mm}^2$  werden als Ultra-Hochleistungsbeton (UHPC) bezeichnet (vgl. *Schmidt 2008*). Es lassen sich zielsicher Druckfestigkeiten von bis zu  $250 \text{ N/mm}^2$  herstellen (vgl. *Schmidt 2008*). Außer durch höhere Festigkeiten zeichnet sich Hochleistungsbeton durch einen erhöhten Widerstand gegenüber chemischen und physikalischen Angriffen aus.

Das Grundprinzip ist die Minimierung von Gefügestörungen wie Poren oder Mikrorissen. Erreicht wird dies durch ein optimiertes Korngemisch und damit eine verbesserte Packungsdichte. Es werden reaktive und inerte Feinststoffe eingesetzt, wie z.B. Quarzmehl und Silikastaub, woraus sich auch der Name Reactive Powder Concrete, zu Deutsch Reaktivpulverbeton, ableitet. Das Größtkorn liegt deutlich unter einem Millimeter. Durch die Entwicklung von hochreaktiven Fließmitteln konnte außerdem der Wasserzementwert (w/z-Wert) reduziert werden, ohne dass die Verarbeitbarkeit beeinträchtigt ist. Letztendlich wird aus dem klassischen 3-Stoffsystem Beton ein komplexes hochentwickeltes 5-Stoffsystem. Neben Wasser, Zement, und Zuschlagstoffen kommen Zusatzstoffe und Zusatzmittel zum Einsatz.

Die dichte Gefügestruktur ermöglicht eine Reduzierung der Betondeckung im Hinblick auf den Schutz vor Bewehrungskorrosion. Beim Einsatz von herkömmlicher Stabstahlbewehrung ist jedoch eine Mindestbetondeckung zur Sicherstellung des Verbunds zwischen Beton und Bewehrungsstahl vorzusehen. Das Potential von Hochleistungsbeton lässt sich erst durch neue Bewehrungsarten wie beispielsweise Textilbewehrung in vollem Umfang ausschöpfen. Diese erfordern eine sehr geringe Betondeckung. Damit lassen sich deutlich dünnere Bauteile realisieren als dies mit Normalbeton der Fall ist.

Um die gewünschten Eigenschaften gleichbleibend und zielsicher gewährleisten zu können, bedarf die Herstellung und Verarbeitung von Hochleistungsbeton einer schlüssigen Qualitätssicherung (vgl. *Dehn 2005*). Konventionelle Mischeinrichtungen sind für die Herstellung von Hochleistungsbetonen meist ungeeignet (*Baumert und Garrecht 2010*). Um die gewünschten Frischbetoneigenschaften zu erzielen, sind Mischeinrichtungen erforderlich, die einen höheren Mischenergieeintrag ermöglichen. Durch den Einsatz von Hochleistungsmischern lassen sich neben den rheologischen Eigenschaften auch die Festbetoneigenschaften deutlich verbessern. Hochleistungsbetone weisen in der Regel eine starke Schwindneigung auf, was zu einer Rissbildung zu einem frühen Zeitpunkt führen kann. Der Nachbehandlung kommt daher eine große Bedeutung zu. Um das Potential des Werkstoffs auszuschöpfen, wird häufig beispielsweise eine Wärmebehandlung vorgenommen. Hierdurch lassen sich

hohe Festigkeiten zu einem frühen Zeitpunkt erreichen und gleichzeitig autogene Schwindvorgänge vorwegnehmen, so dass hier raus resultierende Spannungen im Bauteil kontrolliert abgebaut werden (vgl. *Schmidt 2008*). Die Qualitätssicherung bei der Herstellung und Verarbeitung von Hochleistungsbeton ist mit hohem Aufwand verbunden und lässt sich auf der Baustelle mitunter nur schwer umsetzen. Daher beschränkt sich die Anwendung bisher fast ausschließlich auf werksmäßig hergestellte Fertigteile.

### 2.1.2 Mikrobewehrter Hochleistungsbeton

#### 2.1.2.1 Allgemeines

Bei der sogenannten Mikrobewehrung handelt es sich um Stahldrahtmatten. Mit Drahtbewehrung begann die Geschichte des Werkstoffs Stahlbeton. Mitte des 19. Jahrhunderts fertigte Joseph Monier, der neben Louis Lambot als einer der Pioniere des Stahlbetonbaus gilt, Pflanzkübel aus Beton mit einer Einlage aus Drahtgewebe (*Kobler 2013; Ramm 2012*). Wohl aus Wirtschaftlichkeitsgründen wurde die Drahtbewehrung jedoch durch Stabstahl abgelöst. Die neuerliche Wiederentdeckung von Stahldrahtmatten als Bewehrung für Betonbauteile steht im Zusammenhang mit der Entwicklung von Hochleistungsbeton und der Suche nach neuen, dafür geeigneten Bewehrungsarten.

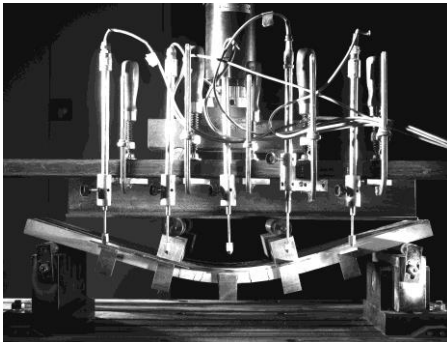


Abb. 2.1: Duktiles Tragverhalten von mikrobewehrtem Hochleistungsbeton im 4 Pkt.-Biegeversuch (TU Kaiserslautern 2011)

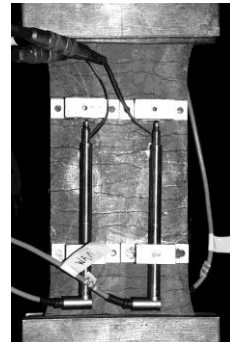


Abb. 2.2: Fein verteiltes Rissbild im Zugversuch

Mitte der neunziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts beschäftigten sich *Hauser und Wörner 1999a* erstmals mit mikrobewehrtem Hochleistungsbeton. Im Vergleich zu Faserbewehrung kann durch die Matten die Orientierung der Drähte an die Belastung angepasst werden. Der Verbundwerkstoff zeichnet sich neben einer hohen Druck- und Zugfestigkeit durch sein duktiler Tragverhalten aus. Die Risse sind fein verteilt und die Rissbreiten klein, wodurch das Material eine hohe Dichtheit und Dauerhaftigkeit aufweist. Wie Glas- oder Kohlefasergelege erfordert auch die stählerne Mikrobewehrung nur eine sehr geringe Betondeckung, was die Herstellung sehr dünner Bauteile möglich macht. Unter dem Markennamen **DUCON®** (DUctile CONcrete dt. duktiler Beton) wird die Entwicklung von der gleichnamigen Firma vertrie-

ben. Das Material findet in den unterschiedlichsten Bereichen Anwendung. Aufgrund seiner guten Dauerhaftigkeit und hohen Dichtheit wird DUCON® beispielsweise zur Instandsetzung von Behältern oder zur Herstellung von Industrieböden eingesetzt. Aufgrund des hohen Verformungsvermögens und der Schlagfestigkeit werden daraus schuss- und explosions sichere Wände und Fassadenelemente gefertigt. Außerdem wird DUCON® zur nachträglichen Verstärkung von Stützen und Decken eingesetzt. Daneben wurden daraus aber bereits auch tragende Bauteile wie beispielsweise filigrane Treppen, Rahmentragwerke und Vordächer hergestellt (vgl. *Hauser 1999*).

### 2.1.2.2 Stand der Wissenschaft

Der Werkstoff wurde grundlegend durch *Hauser 1999* erforscht und die mechanischen Eigenschaften ermittelt. Er untersuchte das Tragverhalten für Zug-, Druck- und Biegebeanspruchung. Von ihm wurden Druckversuche an zylindrischen Probekörpern mit horizontal und vertikal angeordneter Mikrobewehrung durchgeführt. Das Biegetragverhalten untersuchte er an plattenartigen Probekörpern sowohl mit einer 90°- als auch 45°-Anordnung der Gitter (zur Belastungsrichtung). Neben der Mattenorientierung wurden der Bewehrungsgehalt, der Mattentyp und die Stahlgüte variiert.

Weiterhin wurde mikrobewehrter Hochleistungsbeton von *Schnellenbach-Held und Prager 2011* untersucht. Dabei wurden zentrische Zugversuche, Druckversuche und Vierpunktbiegeversuche mit unterschiedlichen Bewehrungsgehalten und unterschiedlicher Mattenorientierung durchgeführt. Außerdem wurde in Ausziehversuchen das Verbundverhalten von Mikrobewehrung in Hochleistungsbeton erforscht. Zusätzlich wurde das Tragverhalten mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode numerisch untersucht.

Im Zusammenhang mit der Errichtung des Weinberghauses an der TU Kaiserslautern sind von *Keil und Schmitt 2010* ebenfalls Untersuchungen im Zusammenhang mit mikrobewehrtem Hochleistungsbeton durchgeführt worden. Mikrobewehrten Hochleistungsbeton verwendet auch *Müller 2015* als Deckschicht für Sandwichelemente. In dem Zusammenhang untersuchten *Joas und Weber 2012* das Lastverformungsverhalten von dünnwandigen Bauteilen aus mikrobewehrtem Hochleistungsbeton unter Zug- und Biegebeanspruchung.

### 2.1.2.3 Mikrobewehrung

Der Markt bietet Stahldrahtmatten in der Regel als Rollenware in unterschiedlichen Ausführungen und Stahlgüten für verschiedenste Anwendungen. Grundsätzlich muss man zwischen geflochtenen und punktgeschweißten Matten unterscheiden. Erhältlich sind Matten mit Drahtstärken zwischen 0,25 und 3 mm und Maschenweiten von 5 bis 50 mm.

Als Mikrobewehrung wurden von *Hauser 1999* aber auch *Schnellenbach-Held und Prager 2011* hauptsächlich punktgeschweißte Drahtmatten aus glattem Stahldraht mit einem Durchmesser von ca. 0,6 mm bis 2 mm verwendet. Neben Matten aus normalfestem Stahl mit einer Zugfestigkeit von 350 bis 400 N/mm<sup>2</sup> wurden Matten aus hochfestem Stahl mit einer Zugfestigkeit von 750 bis 850 N/mm<sup>2</sup>, sowie Matten

## 2 Zusammenstellung der Grundlagen

aus nichtrostendem Stahl eingesetzt. Die Maschenweite des üblicherweise als Vollriegelgitter eingesetzten Fabrikats betrug 10 bis 20 mm. Grundsätzlich ist aber auch der Einsatz von anderen Mattenarten wie z.B. Wellengitter (siehe Abb. 2.4) denkbar.

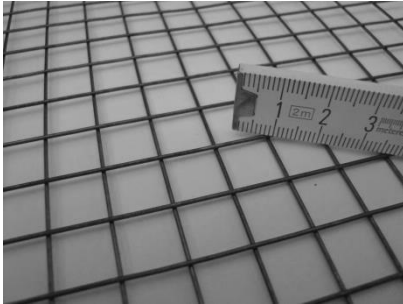


Abb. 2.3: Mikrobewehrung



Abb. 2.4: Wellengitter

### 2.1.2.4 Tragverhalten

Das Tragverhalten wird hier exemplarisch für mikrobewehrten Hochleistungsbeton im Zugversuch beschrieben. Grundsätzlich unterscheidet sich dieses nicht von konventionellem Stahlbeton.

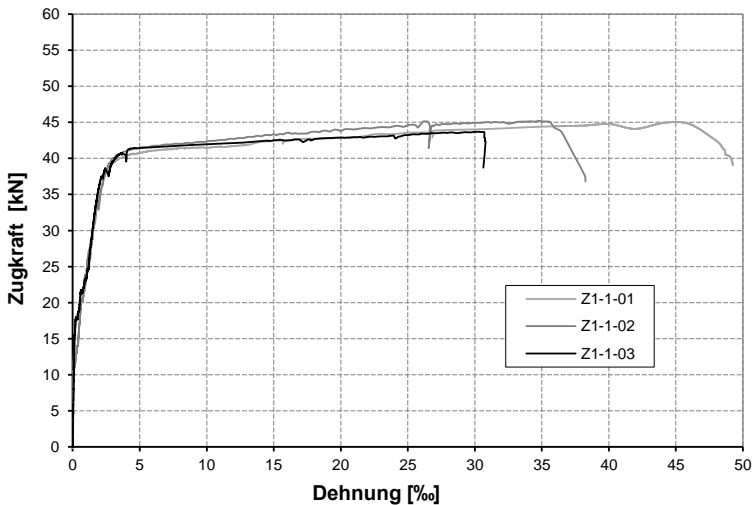


Abb. 2.5: Last-Dehnungskurven von mikrobewehrtem Hochleistungsbeton (10 Lagen,  $V_{eff} = 2,1\%$ ) im Zugversuch (Querschnittsfläche 30 x 144 mm) (Kohlmeyer und Oster 2012)

Am Anfang befindet sich das Bauteil im ungerissenen Zustand (Zustand I) und die Last steigt linear an (siehe Abb. 2.5). Wird die Zugfestigkeit des Betons überschritten, reißt der Beton. Ist der Querschnitt ausreichend bewehrt, kann die Last weiter gesteigert werden. Nach und nach entsteht eine Vielzahl feiner Risse. Der Rissabstand entspricht etwa der Maschenweite des Drahtgitters. Wie *Schnellenbach-Held und*

Prager 2011 in ihren Untersuchungen gezeigt haben, wird der Verbund zwischen Beton und Bewehrung durch die angeschweißten Querstäbe sichergestellt. Dieser kann als starr angenommen werden. Die Rissbreiten liegen nach Hauser 1999 deutlich unter 0,1 mm. Der Übergang von Zustand I in Zustand II ist von einem Steifigkeitsabfall gekennzeichnet. Mit Erreichen der Streckgrenze des Stahls kommt es zu einem weiteren Steifigkeitsabfall. Der Draht beginnt zu fließen und die Rissbreiten steigen an. Dabei ist nur noch eine geringe Laststeigerung möglich.

Unter Biegebeanspruchung ist das Tragverhalten ähnlich. Mit Erreichen des Fließplateaus beginnen die Bewehrungslagen nach und nach zu fließen und die Druckzone der Platte schnürt sich ein (Müller 2015). Je nach Betonfestigkeit und Bewehrungsgehalt kommt es schließlich entweder zu einem Versagen der Bewehrung oder der Druckzone.

Die Querkrafttragfähigkeit von mikrobewehrten Bauteilen ist bislang nur wenig erforscht. Bei den Untersuchungen von Hauser 1999 trat bei Vierpunktbiegeversuchen mit Mikrobewehrung aus hochfestem Stahl ein Schubversagen auf. In den Versuchen von Schnellenbach-Held und Prager 2011 kam es bei Biegebalken zu einem Biegeschubversagen. Es handelte sich in beiden Fällen um balkenartige Probekörper mit kleiner Schubschlankheit. Bei plattenartigen Bauteilen ist kein Schubversagen zu erwarten.

### 2.1.2.5 Bemessungsansatz

Ein Ansatz zur Biegebemessung von mikrobewehrten Bauteilen wurde von Hauser und Wörner 1999b entwickelt. Die Basis ist dabei eine bilineare Spannungsdehnungsbeziehung sowohl in der Zugzone als auch in der Druckzone (siehe Abb. 2.6). Über das Momenten- und Kräftegleichgewicht im Bemessungsschnitt lässt sich einer Beanspruchung eine Dehnungsebene zuordnen und letztendlich der erforderliche Bewehrungsquerschnitt berechnen. Dabei werden eine Reihe von Vereinfachungen und Annahmen getroffen, wie dies auch bei der Stahlbetonbemessung der Fall ist. Der Bemessungsansatz ist an das aus dem Stahlbetonbau bekannte  $k_d$ -Verfahren angelehnt.

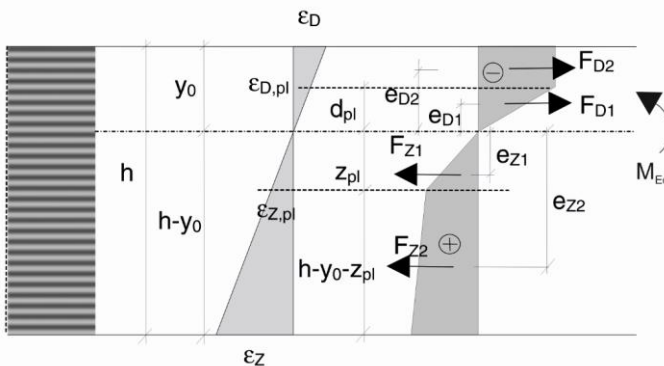


Abb. 2.6: Darstellung der Zusammenhänge bei der Biegebemessung – Dehnungsebene, Spannungsverteilung und innere Kräfte

Das aufnehmbare Moment  $M_R$  lässt sich danach folgendermaßen berechnen:

$$M_R = \frac{k \cdot b \cdot h^2}{2} \quad (2.1)$$

Dabei sind  $b$  die Bauteilbreite und  $h$  die Bauteilhöhe. Für einen gegebenen Bewehrungsgehalt lässt sich der Faktor  $k$  in Abhängigkeit der Dehnungsebene wie folgt berechnen:

$$k = f_{ck} \cdot \left( T_{D1}^2 - \frac{1}{3} T_{D2}^2 \right) + V_{f,eff} \cdot \frac{1}{2} (f_{yk} + f_{tk}) \cdot \left( T_{D1}^2 - \frac{1}{3} T_Z^2 - 2T_{D1} + 1 \right) \quad (2.2)$$

Mit den Hilfsternen:

$$T_{D1} = \frac{\varepsilon_D}{\varepsilon_z + \varepsilon_D} \quad (2.3)$$

$$T_{D2} = \frac{1}{\varepsilon_z + \varepsilon_D} \cdot \frac{f_{ck}}{E_{DUC}} \quad (2.4)$$

$$T_Z = \frac{1}{\varepsilon_z + \varepsilon_D} \cdot \frac{f_{yk}}{E_s} \quad (2.5)$$

Dabei ist:

- $f_{ck}$  die charakteristische Betondruckfestigkeit in N/mm<sup>2</sup>
- $f_{yk}$  die charakteristische Streckgrenze des Stahls in N/mm<sup>2</sup>
- $f_{tk}$  die charakteristische Stahlzugfestigkeit in N/mm<sup>2</sup>
- $E_{DUC}$  der Elastizitätsmodul des bewehrten Betons in N/mm<sup>2</sup> nach Gl. (2.6)
- $E_s$  der Elastizitätsmodul des Stahls in N/mm<sup>2</sup>

$E_{DUC}$  kann vereinfachend wie folgt berechnet werden:

$$E_{DUC} = (1 - V_f) \cdot E_c + V_f \cdot E_s \quad (2.6)$$

Mit:

- $V_f$  Gesamtbewehrungsgehalt mit  $V_f = 2 V_{eff}$
- $E_c$  Elastizitätsmodul des Stahls in N/mm<sup>2</sup>

Für eine entsprechende Dehnungsebene lässt sich der erforderliche Bewehrungsgehalt wie folgt berechnen:

$$V_{f,eff} = \frac{f_{ck} \cdot \left( \varepsilon_D - \frac{f_{ck}}{2 \cdot E_{DUC}} \right)}{\frac{1}{2} \cdot (f_{yk} + f_{tk}) \cdot \left( \varepsilon_z - \frac{f_{yk}}{2 \cdot E_s} \right)} \quad (2.7)$$



Durch Gleichsetzen des aufnehmbaren Moments mit dem einwirkenden Moment und Umformen der Gl. (2.1) ergibt sich:

$$M_R = M_{Ed} \quad (2.8)$$

$$k = \frac{2 \cdot M_{Ed}}{h^2 \cdot b} \quad (2.9)$$

Auf Grundlage der Gl. (2.2) und Gl. (2.7) wurde von *Hauser und Wörner 1999b* eine Bemessungstabelle erarbeitet, in der der Faktor  $k$  und die zugehörige Dehnungsebene in Abhängigkeit des Bewehrungsgehalts abgelesen werden können.

Für ein einwirkendes Moment und eine gegebene Bauteilgeometrie lässt sich der Faktor  $k$  mit Hilfe von Gl. (2.9) berechnen und aus der Bemessungstabelle der erforderliche Bewehrungsgehalt entnehmen. Die Gültigkeit der Tabelle beschränkt sich jedoch auf die von *Hauser und Wörner 1999b* verwendeten Materialien, das heißt Beton mit einer mittleren Druckfestigkeit von 90 N/mm<sup>2</sup> und Draht mit einer Festigkeit von 380 N/mm<sup>2</sup> sowie 800 N/mm<sup>2</sup>.

## 2.2 Kleben von Betonbauteilen mit zementgebundenen Klebstoffen

### 2.2.1 Allgemeine Grundlagen

#### 2.2.1.1 Grundlagen der Klebtechnik

Kleben bezeichnet eine Fügetechnik, bei der die Füge­teile unter Verwendung eines Klebstoffs - stoffschlüssig - miteinander verbunden werden. Es gibt heutzutage eine Vielzahl an Klebstoffen. Sie lassen sich in organische und anorganische Klebstoffe einteilen. Das Fügen mit metallischen Werkstoffen (Schweißen) wird nicht zum Kleben gezählt. Weiterhin unterscheidet man physikalisch abbindende Klebstoffe, wie beispielsweise Dispersionsklebstoffe, und chemisch härtende Klebstoffe, wie z.B. Epoxidharzklebstoffe, nach dem Verfestigungsmechanismus (vgl. *Habenicht 2006*).

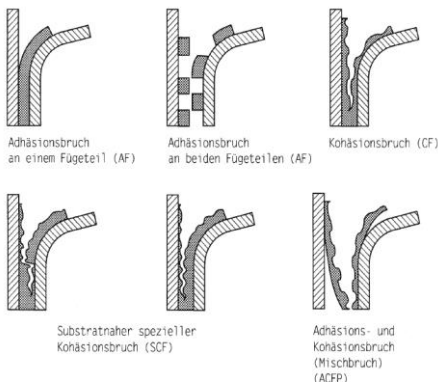


Abb. 2.7: Versagensarten bei Klebfugen (*Habenicht 2006*)

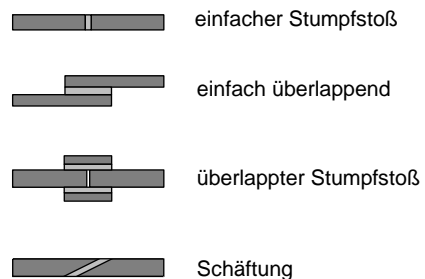


Abb. 2.8: Konstruktive Gestaltungsmöglichkeiten von Klebverbindungen

Die Tragfähigkeit einer Klebverbindung wird durch Adhäsionskräfte in der Grenzschicht zwischen Klebstoff und Füge­teil sowie durch die innere Festigkeit des Klebstoffs, auch Kohäsion genannt, bestimmt. Ein Versagen im Klebstoff wird daher als kohäsives Versagen oder Kohäsionsbruch bezeichnet, ein Versagen in der Grenzschicht als adhäsives Versagen (siehe Abb. 2.7). Die Adhäsion oder Haftverbund beruht einerseits auf molekularphysikalischer und chemischer Adsorption (Bindungskräften) und andererseits auf mikromechanischen Verzahnungseffekte (vgl. *Fiebrich 1994*). Mineralische und metallische Baustoffe sind reaktionsträge, weshalb hierbei im allgemeinen keine chemischen Bindungen entstehen (vgl. *Bucak und Hagl 2006*). Für den Haftverbund beim Kleben mit zementgebundenen Klebstoffen sind hauptsächlich mikromechanische Verzahnungseffekte sowie die molekularphysikalische Adsorption von Bedeutung. Bei der molekularphysikalischen Adsorption handelt es sich um Bindungskräfte, die auf elektrostatischen Wechselwirkungen polarer Gruppen basieren, sogenannte van der Waals Kräfte.

Die Spannungsverteilung in der Klebschicht hängt vom E-Modul der Füge­teile und des Klebstoffes, aber auch von der konstruktiven Ausbildung der Klebverbindung ab (vgl. *Habenicht 2006*). Durch die konstruktive Gestaltung der Klebverbindung (siehe Abb. 2.8) lässt sich die Tragfähigkeit und das Tragverhalten entscheidend beeinflussen. Die Ausbildung als Stumpfstoß ist ungünstig, da der Lastabtrag über eine vergleichsweise kleine Kontaktfläche erfolgt.

Besser sind überlappende Verbindungen, bei denen die Klebfläche größer ausgebildet werden kann. Außerdem wird die Klebschicht dabei in erster Linie auf Schub beansprucht, was in der Klebtechnik allgemein angestrebt wird. Eine günstige, klebegerechte Gestaltungsform ist außerdem die sogenannte Schäftung (siehe Abb. 2.8). Hierdurch wird eine gleichmäßige Schubspannungsverteilung in der Klebfuge und in den angrenzenden Füge­teilen erzielt (siehe Abb. 2.9).

Für die Bemessung von Klebverbindungen sind nicht alleine die Schubfestigkeit oder Zugfestigkeit von Bedeutung, sondern auch das Nachbruchverhalten und damit die Bruchenergie (siehe Abs. 2.2.4.6).

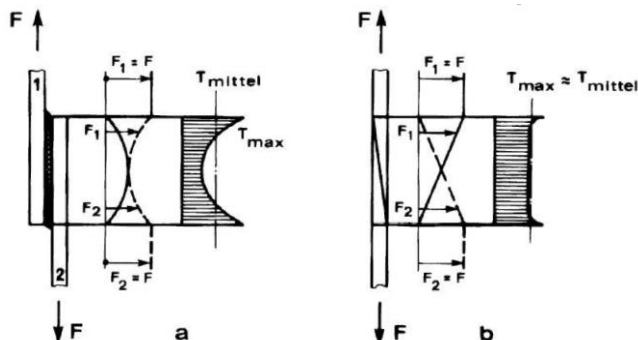


Abb. 2.9: Schubspannungsverteilung bei einer einfachen Überlappung (links) und einer geschäfteten Klebverbindung (rechts) (*Schikorr 2005*)

Kleben ist technisch anspruchsvoll und erfordert konsequente Qualitätssicherungsmaßnahmen. Dennoch wird heute beispielsweise im Automobilbau an vielen Stellen geklebt, wo früher geschweißt wurde. Ein Vorteil ist, dass dabei keine hohen Temperaturen entstehen, die unerwünschte Nebeneffekte verursachen. Als weiterer Vorteil sind die kontinuierliche Kraftübertragung und die effiziente gleichmäßige Materialauslastung zu nennen, die das Kleben als flächige Fügechnik allgemein mit sich bringt.

### 2.2.1.2 Kleben im konstruktiven Betonbau

In Deutschland findet Kleben als lastabtragende Komponente im Betonbau bisher hauptsächlich Anwendung beim nachträglichen Verstärken von Bauteilen durch Aufkleben oder Einkleben von Stahl- bzw. CFK-Lamellen. Als Klebstoff werden in der Regel kalterhärtende Epoxidharzklebstoffe eingesetzt (*DAfStb Heft 591*). 2012 wurde vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton eine Richtlinie herausgegeben, (*DAfStb - RiLi VBgB*) in der das Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung bauaufsichtlich geregelt ist. Hierin wird auf die Bemessung, auf dem Markt verfügbare Produkte und Systeme, die Ausführung sowie Konstruktionsregeln eingegangen.

Weiterhin wird die Klebwirkung bei Verbunddübeln und nachträglich eingemörtelten Bewehrungsanschlüssen genutzt. Hier kommen Vinylesterharz-, Polyesterharz- und Epoxidharzklebstoffe mit einem mineralischen Füller zum Einsatz. Diese werden allgemein als Verbundmörtel bezeichnet (vgl. *Spieth 2005* und *Randl und Gusella 2011*).

In Nordamerika wird das Kleben als „echte“ Fügechnik jedoch seit längerem bereits in der Praxis bei der Errichtung von Spannbetonbrücken in Segmentklebebauweise eingesetzt. Dabei werden einzelne Fertigteilelement auf der Baustelle mit Hilfe von Reaktionsharzklebstoffen verbunden. Im Bauzustand hat die Klebfuge dabei zeitweise eine lastabtragende Funktion. Auch in Deutschland wurde das Verfahren bereits bei einigen wenigen Brückenbauwerken eingesetzt.

Als dauerhafte Fügechnik mit lastabtragender Funktion spielt das Kleben nur vereinzelt eine Rolle. Als Beispiel aus Deutschland kann hier die Gärtnerplatzbrücke in Kassel genannt werden (*Schmidt et al 2007*), bei der die Fahrbahnplatte aus UHPC mit dem Obergurt einer Fachwerkunterkonstruktion aus UHPC dauerhaft miteinander verklebt wurde. Mit der Entwicklung einer Klebverbindung für dünne Textilbetonbauteile beschäftigten sich *Piegeler et al 2009*. In beiden Fällen wurde ein Epoxidharzklebstoff verwendet.

Im Zusammenhang mit der Entwicklung der Segmentklebebauweise in den USA und Kanada sind zahlreiche Forschungsarbeiten entstanden, in denen sich mit dem Kleben von Betonbauteilen mit Hilfe von Reaktionsharzklebstoffen beschäftigt wurde. Sehr umfassend haben Rehm und Franke (*DAfStb Heft 331*) das Tragverhalten und den Versagensmechanismus von Betonverklebungen untersucht. Bei ihren Untersuchungen verwendeten sie Epoxidharzklebstoffe und Polyesterharzklebstoffe.

Ein Grund, warum Kleben im konstruktiven Betonbau als dauerhafte Fügechnik nur vereinzelt eingesetzt wird, ist die allgemein niedrige Glasübergangstemperatur von Reaktionsharzklebstoffen und die damit verbundene Abnahme der Festigkeitseigenschaften bei höheren Temperaturen. In den Zulassungen von Verstärkungssystemen

wird der Einsatz daher meist auf eine gewisse maximale Bauteiltemperatur begrenzt. Darüber hinaus unterliegen organische Klebstoffe wie auch Kunststoffe einer Alterung, die mit einer Abnahme der mechanischen Eigenschaften einhergeht.

*Mühlbauer und Zilch 2007* verfolgten daher einen neuen Ansatz und verwendeten einen Klebstoff auf Zementbasis zum Verkleben von Betonbauteilen. Dieser ist temperatur- und alterungsbeständig. *Wingenfeld 2013* entwickelt aufbauend auf den Untersuchungen von *Mühlbauer 2012* fügetechnische Konstruktionslösungen für Bauteile aus UHPC.

### 2.2.2 Verbund zwischen zementgebundenen Schichten

#### 2.2.2.1 Allgemeines

Ein Verbund zwischen zementgebundenen Schichten existiert an verschiedenen Stellen im Massivbau. Bei Mauerwerk liegt z.B. ein Verbund zwischen Mörtel und Ziegeln vor. Dabei wird die Haftreibung zur Übertragung von Horizontalkräften in Scheibenebene im Grenzzustand der Tragfähigkeit herangezogen.

Baupraktisch spielen Fugen bei der Halbfertigteilbauweise eine wichtige Rolle. Über diese sogenannte Verbundfugen werden beispielsweise bei Elementdecken oder Plattenbalken mit nachträglicher Ortbetonergänzung Schubkräfte abgetragen. Nach *DIN EN 1992-1-1: 2011-01* wird dabei der Haftverbund zwischen Ortbeton und Fertigteil berücksichtigt. Für gering beanspruchte Fugen sind danach grundsätzlich unbewehrte Fugen möglich. Die derzeitigen normativen Regelungen gestatten nur eine reduzierte rechnerische Mitwirkung der Betonergänzung (vgl. *DAfStb Heft 528*). In jüngerer Zeit haben sich *Müller 2009* und *Lenz 2012*, intensiv mit dem Thema Beton-Betonverbund bei Verbundfugen beschäftigt und die Potentiale aufgezeigt.

Von Bedeutung ist der Verbund zwischen Altbeton und Neubeton bei der Instandsetzung und Verstärkung von Betonbauteilen durch eine nachträgliche Betonergänzung. Anders als für planmäßige Verbundfugen bei der Halbfertigteilbauweise existieren für unplanmäßige Verbundfugen bei einer nachträglicher Ortbetonergänzungen als Sanierungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen keine Richtlinien oder Normen zu statischen Bemessung. Untersuchungen zur Schubtragfähigkeit von Betonergänzungen an nachträglich aufgerauten Betonoberflächen bei Sanierungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen werden in *DAfStb Heft 528* vorgestellt.

Eine spezielle Art der Betonergänzung zur Verstärkung von Stahlbetonbauteilen ist die Verstärkung mit Spritzbeton. Im Gegensatz zu einer Ergänzung mit Normalbeton – als Aufbeton – ermöglicht die Spritzbetonbauweise eine Verstärkung von Bauteilen in der Biegezugzone. Die Bemessung von Spritzbetonverstärkungen ist in *DIN 18551: 2014-08* normativ geregelt. In jüngerer Vergangenheit hat sich *Ortlepp 2007* und *Ortlepp 2014* mit der Verbundtragfähigkeit zwischen Altbeton und dünnen Schichten aus Feinkornbeton im Zusammenhang mit der Sanierung und Verstärkung von Betonbauteilen beschäftigt.

2.2.2.2 Mechanismus der Kraftübertragung

Der Verbund von Klebstoffen auf Zementbasis und Beton unterscheidet sich teilweise grundlegend von dem bei Reaktionsharzklebstoffen und Beton. Wie allgemein beim Kleben wird auch hier die Tragfähigkeit der Verbindung durch die Adhäsionsfestigkeit des Klebstoffs auf der Betonoberfläche und die Kohäsionsfestigkeit des Klebstoffs bestimmt. Ist eine Druckkraft senkrecht zur Klebfuge vorhanden, können zusätzlich auch Kräfte durch Reibung übertragen werden.

Die Kohäsionsfestigkeit unterscheidet sich meist von der auf Grundlage von Prüfnormen ermittelten Materialfestigkeit (vgl. *Habenicht 2006*). Dies liegt zum einen daran, dass in der Klebfuge beim Aushärten andere Bedingungen vorherrschen als die bei der Materialprüfung nach Norm geforderten Bedingungen. Zum anderen herrschen in Klebfugen unter Beanspruchung komplexe mehraxiale Spannungszustände (siehe Abs. 2.2.4.2). Die im Rahmen von Normprüfungen ermittelte einaxiale Materialfestigkeit unterscheidet sich von der mehraxialen Materialfestigkeit (siehe Abs. 2.2.4.4). Allgemein hat die Klebschichtdicke Einfluss auf die Kohäsionsfestigkeit bei Klebverbindungen. Inwieweit dies auch für das Kleben mit Klebstoffen auf Zementbasis zutrifft, wurde bisher noch nicht untersucht. *Mühlbauer 2012* betrachtete bei seinen Untersuchungen ausschließlich eine Klebschichtdicke von einem Millimeter.

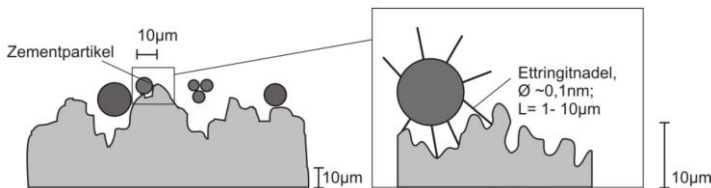


Abb. 2.10: mechanische „Verhakung“ von Zementpartikeln nach *Lenz 2012*;  
 Betonoberfläche: Topografie mikroskopische Rauheit (links) und submikroskopische Rauheit (rechts)

Die Adhäsion oder der Haftverbund zwischen zementgebundenen Schichten basiert in erster Linie auf mikromechanischen Verzahnungseffekten (vgl. *Juhart 2005*), weshalb häufig auch die Bezeichnung mechanische Adhäsion verwendet wird. Entscheidend ist hierbei die Topografie der Betonoberfläche auf Mikroebene (siehe hierzu Abs.2.2.2.4). Feinstbestandteile des Klebstoff - Zement- oder Zuschlagpartikeln - dringen in „Krater“ und „Täler“ auf der Altbetonoberfläche ein, und es entsteht ein Formschluss. Dabei spielt auch die Zusammensetzung des Klebstoffs eine Rolle. Wie *Müller 2009* bei seinen Untersuchungen zum Zug- und Schubtragverhalten von Betonfugen herausfand, kann durch die Zugabe von zusätzlichen Feinkornbestandteilen wie Mikrosilika der Verbund positiv beeinflusst werden. *Lenz 2012* konnte bei seinen Forschungen zum Beton-Betonverbund zeigen, dass durch kapillare Saugvorgänge Zementpartikel in Poren des Altbetons gelangen können und dort hydratisieren. Der Neubeton kann sich mikroskopisch im Altbeton verwurzeln. Eine Verzahnung durch Hydratationsprodukte z.B. Ettringit findet auf submikroskopischer Ebene statt (siehe Abb. 2.10) (vgl. *Lenz 2012*). „Saugende Oberflächen begünstigen eine mikromechanische Verzahnung des Neubetons mit dem Altbeton“ so *Lenz 2012*. Ob

## 2 Zusammenstellung der Grundlagen

und inwieweit dies auch für Hochleistungsbeton zutrifft, wurde bislang noch nicht untersucht.

Neben der Rauheit auf mikroskopischer oder submikroskopischer Ebene hat auch die Rauheit auf makroskopischer Ebene Einfluss auf den Haftverbund zwischen zementgebundenen Schichten. Die Struktur von Klebflächen lässt sich durch eine entsprechende Oberflächenbearbeitung gezielt beeinflussen, worauf in Abs. 2.2.2.3 näher eingegangen wird.

Großen Einfluss auf den Verbund hat die Viskosität oder Konsistenz des Klebstoffs (siehe Abb. 2.11). Entscheidend ist der Benetzungsgrad also die wirksame Kontaktfläche zwischen Klebstoff und Füge­teil. Die wirksame Oberfläche unterscheidet sich von der wahren Oberfläche wie auf Abb. 2.12 dargestellt ist. Je niedriger die Viskosität ist, desto besser ist die Verzahnung mit der Füge­teiloberfläche. Die Zusammenhänge bei der Benetzung von Festkörpern mit Flüssigkeiten sind auf Abb. 2.13 dargestellt. Dabei wirkt zum einen die Oberflächenspannung des Füge­teils und zum anderen die des Klebstoffs. Die Grenzflächenspannung zwischen Füge­teiloberfläche und dem flüssigen Klebstoff steht mit den Kohäsionskräften im Inneren der Flüssigkeit im Gleichgewicht. Der Benetzungswinkel oder Randwinkel ist dabei ein Maß für den Benetzungsgrad.



Abb. 2.11: Viskosität bei Benetzungsvorgängen von Oberflächen mit Klebstoffen (Habenicht 2006)

Abb. 2.12: Unterschied zwischen wahrer und wirksamer Oberfläche (Fiebrich 1994)

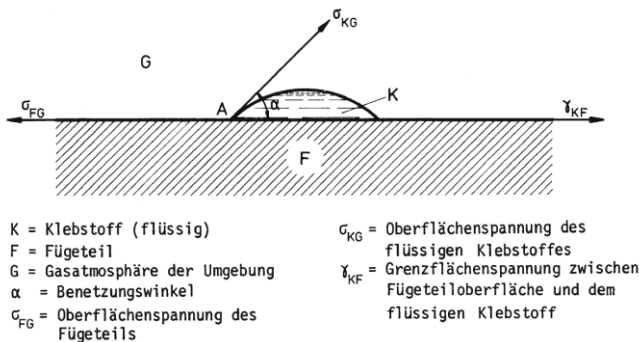


Abb. 2.13: Zusammenhänge bei Benetzungsvorgängen (Habenicht 2006)

Die verflüssigende Wirkung von PCE-Fließmitteln beruht darauf, dass sie die Oberflächenspannung des Zugabewassers herabsetzen. Dies wirkt sich auf das Benetzungsverhalten von Beton oder Mörtel aus. Wie Müller 2009 heraus gefunden hat, kann durch die Zugabe von „hochwirksamen“ Fließmitteln der Haftverbund verbessert werden. Bei den Untersuchungen von Lenz 2012 hat sich gezeigt, dass das verwendete Fließmittel in Kombination mit der Zementart den Beton-Beton-Verbund beeinflusst. Den Einfluss von Fließmittel und Zementart auf die „Klebrigkeit“ von Mörteln untersucht derzeit auch Breitenbücher 2014.

Die Mechanismen der Verbundwirkung sind abhängig von der Größe der Relativverschiebung der Verbundpartner zueinander. Zunächst ist lediglich der, als starr (vgl. Lehmann 2004) einzustufende Haftverbund  $\tau_{ad}$  wirksam. Dieser lässt sich in einen von der einwirkenden Normalspannung unabhängigen Anteil und einen davon abhängigen Anteil, die sogenannte Haftreibung, unterteilen (siehe Abs. 2.2.4.4).

Der Haftverbund versagt bereits bei geringen Relativverschiebungen. Wird die aufnehmbare Grenzdehnung überschritten, kommt es einhergehend mit der Rissöffnung zu einem schlagartigen Abfall des Adhäsionstraganteils (Lenz 2012). Erst mit zunehmender Relativverschiebung kann der Reibverbund  $\tau_{fric}$  aktiviert werden (siehe Abb. 2.14). Diese wird deshalb auch als Gleitreibung bezeichnet und ist ebenfalls von der senkrecht zur Fuge wirkenden Drucknormalspannung  $\sigma_n$  sowie der Fugenrauheit abhängig. Nach Reinecke 2004 spielt dabei in erster Linie die Rauheit auf makroskopischer Ebene eine Rolle. Ausschlaggebend ist jedoch nicht die Geometrie der Oberfläche vor dem Verkleben, sondern die Rauheit der Bruchfläche nachdem der Haftverbund versagt ist. Die Kraftübertragung erfolgt dabei durch Kornverzahnung.

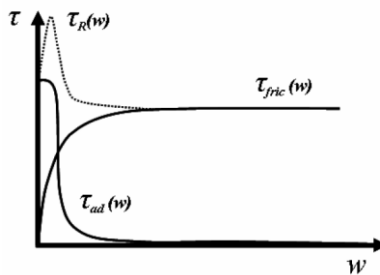


Abb. 2.14: Qualitative Schubspannungs-Schlupf-Beziehung für eine unbewehrte Schubfuge (Juhart 2005)

Zur Ermittlung der Gesamtschubfestigkeit einer unbewehrten Klebfuge können die beiden Anteile deshalb nicht einfach addiert werden (vgl. Juhart 2005 und Lenz 2012). Wie auf Abb. 2.14 schematisch dargestellt ist, ist die Gesamtschubfestigkeit abhängig von der Größe der Relativverschiebung  $w$  der Verbundpartner zueinander.

Die Zusammenhänge werden durch die nachfolgende Gleichung beschrieben.

$$\tau_R(w) = \tau_{ad}(w) + \tau_{fric}(w) \quad (2.10)$$

Mit:

$\tau_R(w)$	gesamte Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Relativverschiebung (Schlupf) in der Fuge in N/mm <sup>2</sup>
$\tau_{ad}(w)$	Verbundanteil des Haftverbundes (Adhäsion) in N/mm <sup>2</sup>
$\tau_{fric}(w)$	Verbundanteil der Reibung in N/mm <sup>2</sup>

Bei einer Klebfuge unter reiner Zugbeanspruchung sowie einer kombinierten Schub-Zugbeanspruchung kann kein Reibverbund aktiviert werden. Kräfte können demnach ausschließlich durch Adhäsion übertragen werden.

Der wesentliche Unterschied zum Kleben mit Reaktionsharzklebstoffen ist, dass beim Kleben mit Klebstoffen auf Zementbasis kein verschieblicher, sondern ein starrer Verbund vorliegt. Das Tragverhalten ist nach *Lenz 2012* dabei grundsätzlich als spröde einzustufen. Daher werden Schubfugen selten ohne zusätzliche Schubsicherung in Form von Bewehrung oder Verbundmitteln ausgeführt, durch die ein duktiler Bauteilversagen sichergestellt werden kann.

Eine Quantifizierung der einzelnen Einflussfaktoren auf den Haftverbund ist schwierig. Nach *Reinecke 2004* existiert derzeit kein mechanisches Modell, mit dem die Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Einflussfaktoren zuverlässig abgebildet wird.

Viele Faktoren, die Auswirkungen auf den Haftverbund haben, sind schwer steuerbar. Neben betontechnologischen Parametern können sich auch klimatische Randbedingungen zum Zeitpunkt der Betonergänzung auf die Qualität des Haftverbunds auswirken (vgl. *Randl und Gusella 2011*). Die in Versuchen ermittelten Haftzugfestigkeiten und Haftscherfestigkeiten weisen in der Regel große Streuungen auf. All dies sind Gründe dafür, warum der Haftverbund zwischen zementgebundenen Schichten im Massivbau in der Regel statisch nur bedingt berücksichtigt wird.

### 2.2.2.3 Oberflächenvor- und nachbehandlung

Neben den oben genannten Einflussfaktoren wird der Verbund zwischen zementgebundenen Schichten durch eine Vielzahl weiterer Faktoren beeinflusst (siehe Abb. 2.15). Durch eine gezielte, auf die werkstoffspezifischen Verbund und Aushärtemechanismen abgestimmte Vor- und Nachbehandlung lassen sich die Adhäsionsfestigkeit und die Kohäsionsfestigkeit positiv beeinflussen.

Für das Fügen von Betonbauteilen durch Verkleben ist eine gezielte Oberflächenvorbehandlung unerlässlich. Wie allgemein beim Kleben sollte die Klebfläche sauber und fettfrei sein. Großen Einfluss auf den Haftverbund hat die Festigkeit und Struktur des Betons im oberflächennahen Bereich (vgl. *Lüders 1988*). Um einen tragfähigen Untergrund zu schaffen, wird die oberste Betonschicht mit im Vergleich zum Kernbeton minderer Festigkeit, beispielsweise beim Verstärken von Betonbauteilen, mit aufgeklebter Bewehrung abgetragen (vgl. *DAfStb Heft 591*). Dabei sollten nach *Lenz 2012* der Grobzuschlag des Beton soweit wie möglich freigelegt werden, um ein



homogenes Korngerüst zu erreichen (siehe Abb. 2.16 und Abb. 2.17). Dies ist wahrscheinlich auf das Kleben mit Klebstoffen auf Zementbasis übertragbar.

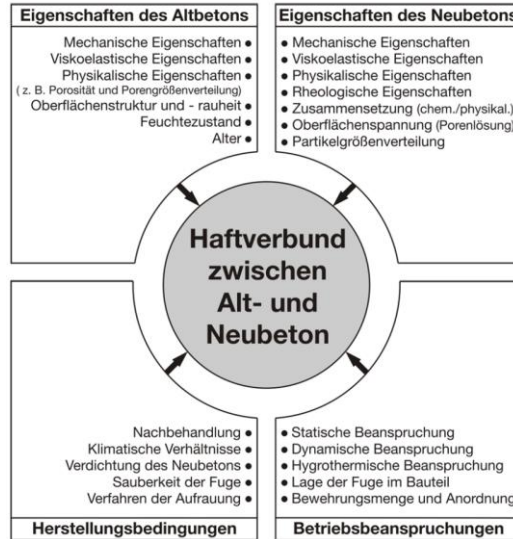


Abb. 2.15: Schematische Darstellung wichtiger Einflussgrößen auf den Haftverbund (Müller 2009)

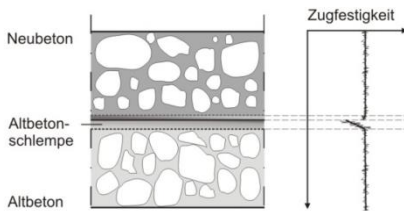


Abb. 2.16: Korngefüge bei glatten Altbetonoberflächen mit zugehöriger Verteilung der Zugfestigkeiten im Alt- und Neubeton (Lenz 2012)

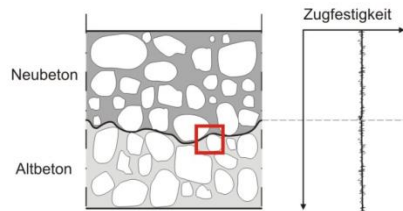


Abb. 2.17: Korngefüge bei aufgerauten Altbetonoberflächen mit zugehöriger Verteilung der Zugfestigkeit im Alt- und Neubeton (Lenz 2012)

Weiterhin kann durch eine Oberflächenvorbereitung die Oberflächenrauheit gesteigert werden, die Einfluss auf den Haftverbund hat (vgl. Schäfer et al 1996 und Reinecke 2005; Schäfer et al 1996). Es gibt unterschiedliche Verfahren, wie die Rauigkeit von Betonoberflächen gezielt verbessert werden kann. Für das Kleben im Betonbau werden Oberflächen im Allgemeinen durch Strahlen mit einem festem Strahlgut oder Höchstdruckwasserstrahlen bearbeitet. Schäfer et al 1996 und Santos et al 2007 weisen bei ihren Forschungen an Verbundfugen einen linearen Zusammenhang zwischen dem Rauheitsparameter „Profilkuppenhöhe“ (siehe Abs. 2.2.2.4) und der Haftzugfestigkeit nach. Einen linearen Zusammenhang zwischen dem Wenzel’schen Quotient (Rauheitsparameter, vgl. Abs. 2.2.2.4) und dem Haftverbund

konnte auch Müller 2009 in Spaltzugversuchen aufzeigen. Wie sich bei den Untersuchungen von Lenz 2012 aber auch Ortlepp 2014 gezeigt hat, kann jedoch durch die Steigerung der Rauheit über eine Grenzrauheit hinaus keine weitere Steigerung der Verbundfestigkeit erzielt werden. In den Versuchen von Randl und Wicke 2000 hat sich gezeigt, dass stärkeres Aufrauen nicht immer eine Verbesserung der Haftung bewirkt. Von Bedeutung für den Haftverbund ist nach Tschegg et al 2000 auch die Art und Größe des Zuschlags. Ein optimaler Haftverbund wird danach nur erreicht, wenn die Aufrauung in Abstimmung mit der Zuschlagsgröße erfolgt.

Allgemein bekannt ist, dass sich saugende Altbetonoberflächen negativ auf den Haftverbund auswirken können. In DIN 1045-1: 1988-07 wurde daher folgendes Vorgehen empfohlen: „Trockener, älterer Beton ist vor dem Anbetonieren mehrere Tage feucht zu halten, um das Schwindgefälle zwischen jungem und altem Beton gering zu halten und um weitgehend zu verhindern, dass dem jungen Beton Wasser entzogen wird. Zum Zeitpunkt des Anbetonierens muss die Oberfläche des älteren Betons abgetrocknet sein“. Lenz 2012 fand jedoch heraus, dass sich trockene saugende Altbetonoberflächen unter Umständen auch positiv auf den Beton-Betonverbund zwischen Fertigteilen und Ortbetoneergänzung bei der Halbfertigteilbauweise auswirken können. Halbfertigteile werden üblicherweise mit einer mehrere Zentimeter dicken Ortbetonschicht ergänzt. Lenz 2012 konnte zeigen, dass dabei der Anteil des durch den Altbeton aufgesogenen Wassers bezogen auf das gesamte im Frischbeton vorhandene Wasser unbedeutend ist und daher genügend Wasser für die Hydratation des Zements zur Verfügung steht. Bei sehr dünnen Schichten, wie beispielsweise beim Kleben mit Klebstoffen auf Zementbasis, besteht jedoch die Gefahr, dass nicht mehr genug Wasser für Hydratationsvorgänge zur Verfügung steht und der Klebstoff „verdurstet“. Dieses Phänomen tritt beim Bauen an verschiedenen Stellen auf und ist seit Langem bekannt. Die einfachste Lösung ist, saugende Untergründe vorzunässen. Beim Verputzen, beim Verlegen von Estrich oder auch bei der Instandsetzung von Beton wird in der Regel eine sogenannte Haftbrücke auf den Altbeton aufgetragen, die das Saugen des Untergrunds verhindern soll. Dabei wird zwischen zementgebundenen Haftbrücken, die in der Regel im „frisch in frisch“-Verfahren aufgetragen werden und zementgebundenen, polymermodifizierten Systemen, die zunächst trocknen müssen, bevor der Mörtel oder Beton aufgetragen werden kann, unterschieden.

### 2.2.2.4 Charakterisierung von Betonoberflächen

Die geometrische Gestalt einer Oberfläche versucht man mit dem Begriff „Rauheit“ zu beschreiben. Die Messmethoden und Parameter zur Quantifizierung der Rauheit unterscheiden sich in den verschiedenen technischen Bereichen. Einen Vergleich verschiedener Ansätze und Verfahren zur Bestimmung der Rauheit von Betonoberflächen führte Reinecke 2004 durch.

Die quantitative Beschreibung der Rauheit erfolgt in der Praxis häufig mit Hilfe von Senkrechtkegengrößen des Rauheitsprofils, deren Ermittlung normativ in DIN EN ISO 4287: 2013-4 geregelt ist. In erster Linie spielen dabei die maximale Profilhöhe  $R_z$  sowie die maximale Profilspitze oder Profilkuppenhöhe  $R_p$  eine Rolle (siehe Abb. 2.18).

Mit der Methode ist eine hinreichende Charakterisierung von Oberflächen jedoch nicht möglich, weil die Geometrie nur in einer Dimension erfasst wird.

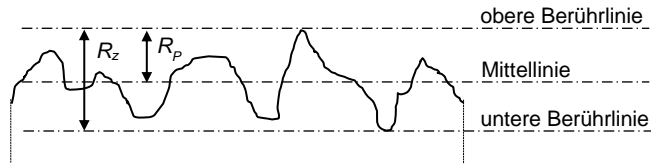


Abb. 2.18: Senkrechtkenngrößen des Rauheitsprofils nach *DIN EN ISO 4287: 2013-4*

Eine besser geeignete Kenngröße ist nach *Schäfer et al 1996 und Reinecke 2004* der sogenannte Wenzel'sche Quotient (siehe Gl. (2.15)). Dieser beschreibt für einen Profilschnitt das Verhältnis von tatsächlicher Länge zur Grundlänge (siehe Abb. 2.19).



Abb. 2.19: Prinzipische Skizze zur Ermittlung des Wenzel'schen Quotienten

$$W_x = \frac{1}{L_x} \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta z_i^2} \quad (2.11)$$

*Müller 2009* entwickelte den auf einen Profilschnitt bezogenen Ansatz von Wenzel weiter und überführte ihn in eine flächenbezogene Form. Der dimensionslose Wenzel'sche Quotient lässt Rückschlüsse auf die tatsächliche Größe einer Oberfläche zu (vgl. *Ortlepp 2014*), welche eine entscheidende Einflussgröße auf den Haftverbund von zementgebundenen Schichten darstellt. Der Kennwert vermag nicht den wahren Charakter einer Oberfläche, beispielsweise die Form von Zuschlagskörnern, (rund, scharfkantig) wiederzugeben. Für einen quantitativen Vergleich von rauen Oberflächen ist der Wenzel'sche Quotient jedoch nach *Reinecke 2004* und *Müller 2009* brauchbar, wenn die gewählte Basislänge  $\Delta x$  und das gewählte Messraster übereinstimmen.

Bei den Messverfahren zur Rauheitserfassung unterscheidet man grundsätzlich zwischen berührungslosen und berührenden Verfahren.

In der Baupraxis hat sich das Sandflächenverfahren nach Kaufmann etabliert, welches zu den berührenden Verfahren zählt. Damit kann sehr einfach auch auf der Baustelle die Rautiefe  $R_t$  bestimmt werden. Dieser Wert entspricht im Prinzip der Profilkuppenhöhe  $R_p$  (vgl. *Reinecke 2004*). Das Sandflächenverfahren liefert lediglich eine einzige Rauheitskenngröße als Mittelwert über die kreisförmige Messfläche mit einem Durchmesser zwischen 15 und 21 cm und vermag eine gegebene Oberflä-

chenstruktur kaum eindeutig zu quantifizieren (Reinecke 2004). Zur Beurteilung von Oberflächen im Hinblick auf das Kleben von Betonbauteilen ist das Verfahren ungeeignet.

Berührungslose Verfahren ermöglichen gegenüber berührenden Verfahren eine deutlich höhere Auflösung und sind nach Reinecke 2004 deshalb zu bevorzugen. Zu den berührungslosen Verfahren zählen optische Messverfahren. Diese lassen sich in drei Arten unterteilen: Laser-Tastverfahren, Laser-Triangulationsverfahren und Streulichtverfahren. Sie unterscheiden sich durch das Messprinzip, aber auch durch ihre Leistungsfähigkeit. Die einzelnen Verfahren werden unter anderem in den Arbeiten von Reinecke 2004 und Ortlepp 2014 genauer beschrieben.

So wie sich in den verschiedenen technischen Bereichen die Verfahren zur Ermittlung der Rauheit unterscheiden, gibt es auch unterschiedliche Ordnungssysteme zur Beschreibung von Oberflächenrauheiten. Für Betonoberflächen entwickelte Reinecke 2004 in Anlehnung an DIN EN ISO 4760: 1982-06 ein entsprechendes Ordnungssystem auf vier Ebenen (siehe Tab. 2.1).

Tab. 2.1: Ordnungssystem für die Gestaltabweichung nach Reinecke 2004

Gestaltabweichung	Art der Abweichung	Beispiele für die Entstehungsursache
0. Ordnung: Globale Rauheit	Großwellige Abweichung von der idealen Geometrie ( $\lambda^1 > 10 \text{ cm}$ und $R_t^2 < 3,5 \text{ mm}$ )	Ungenauigkeiten beim Betonieren oder bei Herstellung der Rauheit
1. Ordnung: Makrorauheit	Abweichungen variabler Geometrie (im Bereich $0,5 \text{ mm} < R_t^2 < 3,5 \text{ mm}$ )	Freigelegte Zuschlagkörner
2. Ordnung: Mikrorauheit	Abweichungen variabler Geometrie (im Bereich $10 \text{ }\mu\text{m} < R_t^2 < 500 \text{ }\mu\text{m}$ )	Oberflächenstruktur der Zuschläge, Verformung beim Sandstrahlen
3. Ordnung: Gefügestruktur	Abweichungen bei der Kristallbildung $R_t^2 < 10 \text{ }\mu\text{m}$	Kristallisationsvorgänge

<sup>1)</sup> Die Wellenlänge der Gestaltabweichung

<sup>2)</sup> Die rechnerische mittlere Rautiefe  $R_t$  als Amplitude der Gestaltsabweichung

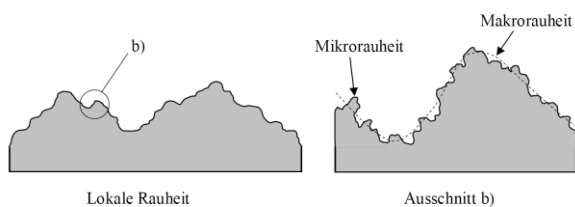


Abb. 2.20: Schematische Darstellung der Zusammenhänge bei der lokalen Rauheit (Reinecke 2004)

Die globale Rauheit oder Gestaltabweichung 0. Ordnung hat keinen Einfluss auf den Haftverbund beim Kleben von Betonbauteilen. Von Bedeutung ist die lokale Rauheit, welche sich nach Reinecke 2004 nochmal in eine Makrorauheit oder auch Rauheitsstruktur 1. Ordnung und eine Mikrorauheit, d.h. Rauheitsstruktur 2. Ordnung unterteilen lässt. Die Makrorauheit wird dabei von der feineren Mikrorauheit überlagert (siehe Abb. 2.20). Maßgebende Rauheitsstruktur für den Tragmechanismus der Adhäsion

ist nach *Reinecke 2004* die der 3. Ordnung. Rauheitsstrukturen höherer Ordnung ermöglichen bereits keine kristalline Verzahnung mehr und sind mit baupraktisch vertretbaren Messverfahren nicht mehr zu erfassen, weshalb *Reinecke 2004* eine Berücksichtigung von Rauheiten bis zur 3. Ordnung als ausreichend erachtet.

### 2.2.3 Klebstoffe auf Zementbasis – Hochleistungsmörtel

#### 2.2.3.1 Allgemeines

Die Idee, einen temperatur- und alterungsbeständigen Klebstoff auf Zementbasis zum Verkleben von Betonbauteilen zu verwenden, wurde erstmals von *Mühlbauer und Zilch 2007* verfolgt. Auf Grundlage einer UHPC-Mischung entwickelte *Mühlbauer 2012* seinen sogenannten *Reactiv Powder Concrete* Klebstoff, kurz *RPC-Klebstoff* (siehe Abs. 2.2.3.3).

Klebstoffe sind per Definition (siehe Abs. 2.2.1.1) nichtmetallische Werkstoffe, die über eine entsprechende Adhäsions- und Kohäsionsfestigkeit verfügen und mit denen es möglich ist, Bauteile durch Kleben zu verbinden. Grundsätzlich können daher alle Mörtel oder auch Betone als Klebstoffe bezeichnet werden.

Mörtel unterscheiden sich von Beton durch das Zuschlagsgrößtkorn. Sie sind mit einem Größtkorn kleiner als vier Millimeter definiert. Produkte von Mörtelherstellern mit extrem feinen Zuschlagskomponenten werden häufig auch als „Leim“ bezeichnet. Gemeinsam ist ihnen das Bindemittel Zement. Mörtel werden in vielen Bereichen im Bauwesen eingesetzt. Bei einigen Anwendungen erfüllen sie eine lastabtragende Funktion oder tragen zur Standsicherheit von Gebäuden bei. In vielen Fällen werden Fertigmörtel verwendet. Durch die Mörtelhersteller wurde einiges an Entwicklungsarbeit geleistet und es wurden immer wieder neue Produkte für Spezialanwendungen auf den Markt gebracht. Im Hinblick auf das Kleben können kommerzielle Hochleistungsmörtel eine vielversprechende Alternative zu dem *RPC-Klebstoff* darstellen. Sie zeichnen sich durch gute mechanische Eigenschaften und eine auf den jeweiligen Einsatz abgestimmte Verarbeitbarkeit aus. In einigen Bereichen sind die Mörtel durch Richtlinien und Normen bauaufsichtlich geregelt, in anderen Bereichen besitzen Produkte eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung.

#### 2.2.3.2 Kommerzielle Hochleistungsmörtel

Als zementgebundener Klebstoff kommen Vergussmörtel, Verpressmörtel und Injektionsleime sowie Instandsetzungsmörtel in Frage.

Vergussmörtel oder Vergussbetone werden bei der Montage von Stahlbauteilen und Betonfertigteilen verwendet. In der Praxis wird fast ausschließlich werksmäßig hergestellte Trockenware eingesetzt (vgl. *Breitenbücher et al 2008*). Sie weisen Druck- und Biegezugfestigkeiten auf, die vergleichbar mit denen von hochfestem Beton und denen des *RPC-Klebstoffs* sind. Daneben zeichnen sie sich durch eine fließfähige Konsistenz und eine hohe Formstabilität im erhärteten Zustand aus. Spezielle Zuschlagsstoffe bewirken, dass sie ein sehr geringes Schwindmaß besitzen oder sogar leicht quellende Eigenschaften aufweisen. Die Verarbeitungszeit liegt im Allgemeinen bei rund einer Stunde. Spezielle „Schnell-“ oder „Blitz-“ Vergussmörtel, die eine hohe

Frühfestigkeit aufweisen, haben deutlich kürzere Verarbeitungszeiten. Die Herstellung und Verwendung von zementgebundenem Vergussbeton und Vergussmörtel ist seit 2006 durch eine entsprechende, vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton herausgegebene Richtlinie (*DAfStb -RiLi VGM*) bauaufsichtlich geregelt.

Einpress- oder Verpressmörtel werden im Spannbetonbau zum Verpressen von Hüllrohren oder beispielsweise im Tunnelbau zum Verpressen von Ankern in Felsgestein eingesetzt. Teilweise wird auch die Bezeichnung Injektions- und Verpressleim verwendet. Sie bestehen aus Zement, Wasser, unter Umständen feinen Zuschlagstoffen sowie Zusatzmitteln, die zur Optimierung des Fließverhaltens dienen und ein geregelt Quellen des erstarrenden Mörtels bewirken (*Mühlbach 2011*). Im Spannbetonbau stellt das erhärtete Verpressmaterial den Korrosionsschutz der Spannritzten und den Verbund zwischen Spannstahl und Betonbauteil sicher. Einpressmörtel für Spannglieder und deren Verwendung sind normativ in *DIN EN 445: 2008-01*, *DIN EN 446: 2008-01* und *DIN EN 447: 2008-01* geregelt. In Bezug auf das Größtkorn sind Injektionsleime mit ihren feinen Zuschlagskomponenten am ehesten vergleichbar mit dem RPC-Klebstoff von *Mühlbauer 2012*. Mit rund 60 bis 70 N/mm<sup>2</sup> ist ihre Druckfestigkeit niedriger als die des RPC-Klebstoffes. Die Konsistenz von Verpressmörtel oder -leim variiert von hochfließfähig bis plastisch (Einteilung in Anlehnung an *DIN 1045-2:2008-08*), je nach Einsatzgebiet.

Instandsetzungsmörtel werden eingesetzt, um die Dauerhaftigkeit, die Verkehrssicherheit, die Gebrauchstauglichkeit oder auch die Tragfähigkeit von Betonbauteilen sicherzustellen. Systeme wie beispielsweise TUDALIT<sup>®</sup>-Textilbeton ermöglichen auch eine Steigerung der Tragfähigkeit bei Bestandsbauten. Dabei spricht man nicht von einer Instandsetzung sondern einer Verstärkung. Es gibt sowohl kunststoffvergütete als auch rein zementgebundene Instandsetzungsmörtel. Sie werden entweder im Nassspritzverfahren oder im Laminierverfahren (vgl. *Z-31.10-182 6/2014*) aufgetragen, worauf die Konsistenz abgestimmt ist (plastisch bis steif). Die Druckfestigkeit mit rund 50 bis 80 N/mm<sup>2</sup> und die Biegezugfestigkeit mit rund 5 bis 8 N/mm<sup>2</sup> sind niedriger als bei dem RPC-Klebstoff. Von großer Bedeutung ist bei Instandsetzungsmörtel - wie auch bei einem möglichen Klebstoff - die Haftfestigkeit auf dem Altbeton. Diese hängt von der Beschaffenheit der Altbetonoberfläche ab. Nach *DAfStb -RiLi SIB* ist die Haftzugfestigkeit des Mörtel daher für den konkreten Anwendungsfall zu prüfen. Durch die vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton herausgegebene sog Instandsetzungsrichtlinie (*DAfStb -RiLi SIB*) ist die Ausführung von Schutz- und Instandsetzungsmaßnahmen in Deutschland bauaufsichtlich geregelt. Danach dürfen nur Produkte mit allgemeinem bauaufsichtlichem Prüfzeugnis eingesetzt werden. Auf europäischer Ebene existiert die Norm EN 1504 (Teil 1-12), in der Produkte und Systeme zum Schutz und zur Instandsetzung von Betonbauteilen behandelt werden. Zur Zeit befindet sich die *DAfStb -RiLi SIB* in Überarbeitung (vgl. *Bastert et al 2011*), mit dem Ziel, diese an die Norm EN 1504 anzupassen.

Neben Vorschriften, was die Anwendung und Verarbeitung von Mörteln angeht, enthalten die oben genannten Richtlinien, Normen oder Zulassungen Regelungen zur Güteüberwachung. Es werden darin Maßnahmen wie eine werkseigene Produktionskontrolle, eine Fremdüberwachung, eine Konformitätsprüfungen oder eine Überprü-

fung der Materialeigenschaften auf der Baustelle gefordert. Eine gleichbleibende Mörtelgüte ist im Hinblick auf das Kleben von großer Bedeutung.

Bei Fliesenklebern und in der Befestigungstechnik verwendeten Verbundmörteln handelt es sich in der Regel nicht um zementgebundene Klebstoffe, sondern um kunstharzgebundene- oder kunstharzmodifizierte Klebstoffe.

### 2.2.3.3 RPC-Klebstoff

Bei dem RPC- Klebstoff handelt es sich im Grunde genommen um einen hochfesten Zementmörtel mit optimierten Hafteigenschaften zum Verkleben von UHPC-Bauteilen. Er besticht durch ein gutes mechanisches Dauerstandsverhalten und durch seine Leistungsfähigkeit unter erhöhten Temperaturbeanspruchungen (Mühlbauer 2012). Die Mischungszusammensetzung des von Mühlbauer 2012 entwickelten Klebstoffes (RPC-Nr.0) ist in Tab. 2.2 aufgeführt. Dieser besteht aus einem feinkörnigen Quarzsand, pulverförmigen Zusatzstoffen, Zement und Wasser. Von den pulverförmigen Bestandteilen leitet sich der Name Reactiv Powder Concrete Klebstoff - zu Deutsch „Reaktivpulverbeton“ - ab. Die Mischung weist eine abgestufte Kornverteilung der einzelnen Bestandteile bei einem Größtkorn von 0,2 mm auf. Um eine für das Verkleben geeignete Konsistenz sicherzustellen, wird ein Fließmittel eingesetzt. Der Wasserzementwert (W/Z-Wert) des Klebstoffes beträgt 0,24.

Tab. 2.2: Mischungszusammensetzung des RPC-Klebstoffes nach Mühlbauer 2012 und Wingenfeld 2013

Rohstoff	Bezeichnung	Zugabe in [kg/m <sup>3</sup> ]		
		RPC-Nr. 0	RPC-Nr. 1	RPC-Nr. 2
Zement	CEM I 42,5 R-HS (Schwenk)	730,0	730,0	-
	CEM I 42,5 R-HS (Dyckerhoff)	-	-	765,0
Wasser	Wasser	153,3	168,6	168,3
Zusatzstoff	Microsilica Grade 983	189,8	-	-
	Quarzmehl (QM1) W12	262,8	262,8	229,5
	Microsilica, Sika Silicol P	-	189,8	168,3
Zusatzmittel	Fließmittel FM 1254	36,5	-	-
	ViscoCrete 2810	-	40,2	36,0
Zuschlag	Quarzsand (0,06/0,2mm) BSC413	995,8	995,8	977,5

In Tab. 2.3 sind die Materialfestigkeiten des RPC-Klebstoffes Nr. 0 aufgeführt. Die Biegezugfestigkeit  $f_{gtm,fl}$  im Alter von 14 Tagen betrug 19,6 N/mm<sup>2</sup> und Druckfestigkeit  $f_{gcm,pr,40}$  139,12 N/mm<sup>2</sup>, ebenfalls im Alter von 14 Tagen. Die von Mühlbauer 2012 in speziellen Zugversuchen ermittelte mittlere Haftzugfestigkeit lag in Abhängigkeit der Art der Oberflächenvorbehandlung zwischen 5,9 und 9,3 N/mm<sup>2</sup>.

Mühlbauer 2012 untersuchte auch die Dauerstandfestigkeit unter statischer Belastung sowie die Dauerschwingfestigkeit unter einer Schub-Druckbelastung. Auf Basis der durchgeführten Versuche ermittelte er Abminderungsfaktoren, mit denen der festigkeitsmindernde Einfluss entsprechend erfasst wird. Der Abminderungsfaktor  $k_{cont}$  für Dauerbeanspruchung beträgt 0,6 und der Abminderungsfaktor  $k_{dyn}$  für eine zyklische Beanspruchung beträgt 0,631. Ein festigkeitsmindernder Einfluss von er-

höhten Temperaturen ebenso wie aus Feuchtebeanspruchung ist nach *Mühlbauer 2012* nicht zu erwarten und wurde daher nicht untersucht.

*Mühlbauer 2012* gibt als Verarbeitungszeit für seinen Klebstoff ca. 45 Minuten an. Die Frischmörtelrohddichte der Mischung Nr. 0 lag bei 2,33 kg/dm<sup>3</sup>, der Luftporengehalt bei 2,0 bis 5,5 % und das Ausbreitmaß betrug rund 225 mm (Frischmörteleigenschaften nach *DIN 18555-2: 1982-09*). Der Klebstoff fällt damit in die Konsistenzklasse „weich“ nach *DIN 18555-2: 1982-09*.

Tab. 2.3: Biegezug- und Druckfestigkeit der RPC-Klebstoffe nach *Mühlbauer 2012* und *Wingenfeld 2013*, ermittelt an Prismen in Anlehnung an *DIN EN 196-1: 2005-05*

Prüfalter	$f_{gtm,fl}$			$f_{gcm,pr,40}$		
	RPC-Nr. 0	RPC-Nr. 1	RPC-Nr. 2	RPC-Nr. 0	RPC-Nr. 1	RPC-Nr. 2
d	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
14	19,6	16,9	17,8	139,2	127,6	138,7
28	19,7	-	-	144,1	-	-

Aufgrund der Tatsache, dass das Silicapulver und das Fließmittel der RPC-Nr. 0-Mischung von *Mühlbauer 2012* nicht mehr erhältlich waren, musste *Wingenfeld 2013* diese durch andere ersetzen und die Mischung anpassen (siehe Tab. 2.2). Um die Verarbeitbarkeit sicherzustellen war es erforderlich, die Wassermenge sowie den Fließmittelgehalt zu erhöhen. Der Wasserzementwert, dieser von *Wingenfeld 2013* bei ersten Versuchen eingesetzten RPC-Mischung Nr. 1, betrug 0,27. Versuche zur Haftzugfestigkeit des Klebstoffes führte *Wingenfeld 2013* nicht durch.

Der erhöhte Wasserzementwert wirkt sich negativ auf die Festigkeitseigenschaften des Mörtels aus (siehe Tab. 2.3). Die Biegezugfestigkeit des RPC-Klebstoffes Nr. 1 im Alter von 14 Tagen betrug 16,9 N/mm<sup>2</sup> und die Druckfestigkeit im Alter von 14 Tagen 127,6 N/mm<sup>2</sup>.

Bei dem modifizierten RPC-Klebstoff Nr. 1 betrug das Ausbreitmaß 160 mm. Damit fällt dieser in die Konsistenzklasse „plastisch“ nach *DIN 18555-2: 1982-09*. Wie sich bei den Versuchen von *Wingenfeld 2013* herausstellte, ist die Verarbeitungszeit des modifizierten Klebstoffes (RPC-Nr. 1) zu kurz, weshalb dieser für ein großmaßstäbliches Verkleben ungeeignet ist.

*Wingenfeld 2013* tauschte daraufhin den Zement gegen einen anderen aus, der eine geringere spezifische Oberfläche aufwies und damit auch einen geringeren Wasseranspruch besaß. Dadurch konnte die Verarbeitbarkeit bei einem reduzierten Fließmittelgehalt verbessert werden ( $W/Z$ -Wert = 0,25). Das Ausbreitmaß betrug bei der Mischung Nr. 2 220 mm und lag damit in der Größenordnung des RPC-Klebstoffes Nr. 0. Auch die Festigkeitseigenschaften des Klebstoffes konnten gesteigert werden (siehe Tab. 2.3). Die Biegezugfestigkeit des RPC-Klebstoffes Nr. 2 im Alter von 14 Tagen betrug 17,8 N/mm<sup>2</sup> und die Druckfestigkeit im Alter von 14 Tagen 138,7 N/mm<sup>2</sup>.

Wie auch bei der Herstellung von UHPC haben der Mischprozess und die verwendete Mischeinrichtungen großen Einfluss auf die Klebstoffeigenschaften, insbesondere die Verarbeitbarkeit. *Mühlbauer 2012* verwendete ein Mischgerät mit einem Fassungsvermögen von drei Litern. Dafür optimierte er die Mischreihenfolge und Misch-



zeiten für die Herstellung eines Liters bei einer Mischgeschwindigkeit von 300 Umdrehungen pro Minute (siehe Tab. 2.4). Zur Herstellung einer Mörtelmenge von 15 Litern verwendete *Wingenfeld 2013* ein Mischgerät mit einem Fassungsvermögen von 50 Litern, wofür er die Mischzeiten entsprechend anpasste (siehe Tab. 2.4).

Tab. 2.4: Mischreihenfolge und beispielhafte Mischzeiten für den RPC-Klebstoff nach *Mühlbauer 2012* und *Wingenfeld 2013*

Nr.	Vorgang	Mischzeiten in [min]	
		1 / RPC-Nr. 0	15 / RPC-Nr. 2
1	Zement + Quarzmehl + Wasser + 50 % Fließmittel	1,5	6
2	Microsilica	1,5	3
3	Pause	1	1
4	50 % Fließmittel	1	1
5	Quarzsand	2	6

Die Verarbeitung des RPC-Klebstoff sah sowohl bei *Mühlbauer 2012* als auch bei *Wingenfeld 2013* so aus, dass die Füge­teile damit bestrichen wurden.

## 2.2.4 Bruchkriterien für Klebfugen

### 2.2.4.1 Allgemeines

Bruchkriterien oder Festigkeitshypothesen geben an, wann und unter welchen Umständen ein Festkörper versagt (vgl. *Gross und Seelig 2011*). Ein Bruchkriterium, mit dem sich das Versagen von Klebfugen bei den darin vorherrschenden Beanspruchungszuständen zuverlässig vorhersagen lässt, ist eine Grundvoraussetzung für die Bemessung von Klebverbindungen oder auch die Optimierung der Fugengeometrie. Hierbei wird das Bruchverhalten grundsätzlich durch die Adhäsionsfestigkeit in der Grenzschicht, durch die Kohäsionsfestigkeit des Klebstoffs sowie durch den Beanspruchungszustand bestimmt.

Das Tragverhalten von geklebter Bewehrung zur Verstärkung von Betonbauteilen wurde umfassend erforscht. Die Ergebnisse haben mittlerweile Eingang in Richtlinien und Normen gefunden. Hierbei steht die Bruchfestigkeit der Fuge oder Klebverbindung unter Schubbeanspruchung im Vordergrund.

Im Zusammenhang mit der Entwicklung der Segmentklebebauweise wurde intensiv an Betonverklebungen unter Verwendung von Epoxid- und Polyesterharzklebstoffen geforscht und entsprechende Bruchkriterien (*DAfStb Heft 331*) in erster Linie für eine Schub- sowie Schub-Druckbeanspruchung entwickelt. Das Bruchverhalten von Klebverbindungen mit einem Vinylesterharzklebstoff untersuchte *Bergmeister 2001*.

Der Haftverbund zwischen zementgebundenen Schichten weist einige Besonderheiten auf. Das Tragverhalten beispielsweise von Verbundfugen unterscheidet sich grundlegend von dem von Klebverbindungen mit Reaktionsharzklebstoffen. Ein Bruchkriterium für eine Klebverbindung, bei der ein rein zementgebundener Klebstoff zum Einsatz kommt, entwickelte *Mühlbauer 2012*.

In Abs. 2.2.4.5 wird der Stand der Forschung dargestellt.

2.2.4.2 Grundlagen der Festkörpermechanik

In Klebfugen liegen meist komplexe mehraxiale Spannungszustände vor. Unterscheiden sich die E-Moduli von Klebstoff und Füge teil, wie es üblicherweise beim Kleben der Fall ist, kommt es unter Belastung, bedingt durch das unterschiedliche Verformungsverhaltens von Klebstoff und Füge teil zu Querkzug- bzw. Querdrukspannungen in der Klebfuge (vgl. *DAfStb Heft 499*). Wie in Abs. 2.2.1.1 erläutert wurde, hat die konstruktive Gestaltung von Klebverbindungen Einfluss auf die Spannungsverteilung in Klebfugen (siehe Abb. 2.8 und Abb. 2.9). In vielen Fällen liegt eine veränderliche Spannungsverteilung vor. Teilweise kommt es auch zu extremen lokalen Spannungsspitzen.

Der in einem Punkt herrschende Spannungszustand lässt sich durch einen Spannungstensor  $S$  in einem kartesischen Koordinatensystem mit den Achsen  $x$ ,  $y$  und  $z$ , beschreiben.

$$S = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Ein dreidimensionaler Spannungszustand kann mit Hilfe der Mohrschen Spannungskreise grafisch veranschaulicht werden (siehe Abb. 2.22). In einem  $\sigma$ - $\tau$ -Diagramm werden dabei die in beliebigen Schnitten herrschenden Schub- und zugehörigen Normalspannungen durch Kreise dargestellt.  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , und  $\sigma_3$  sind dabei die üblicherweise nach ihrer Größe geordneten Hauptspannungen.

Spannungszustände in Klebfugen sind in vielen Fällen zweidimensionale Spannungszustände oder können näherungsweise als solche beschrieben werden. Im sogenannten ebenen Spannungszustand entfallen die Komponenten  $\sigma_z$ ,  $\tau_{zx}$ ,  $\tau_{zy}$  des Spannungstensors.

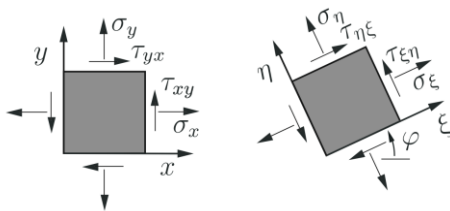


Abb. 2.21: Spannungstransformation für den ebenen Fall.

Sind die Spannungen in einem bestimmten Schnitt, wie beispielsweise einer um den Winkel  $\varphi$  zum  $x$ - $y$ -Koordinatensystem geneigten Klebfläche gesucht, können diese mit Hilfe der unten aufgeführten Transformationsgleichungen (Gl. (2.13) bis Gl. (2.15)) aus den bekannten Spannungen im  $x$ - $y$ -Koordinatensystem berechnet werden (vgl. *Gross et al 2014*). Der Spannungstensor wird in ein um den Winkel  $\varphi$  geneigtes  $\eta$ - $\xi$ -Koordinatensystem überführt (siehe Abb. 2.21). Auch hier lassen sich die Zusammenhänge am Mohrschen Spannungskreis veranschaulichen (siehe Abb. 2.23).

$$\sigma_{\xi} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\varphi + \tau_{xy} \sin 2\varphi \quad (2.13)$$

$$\sigma_{\eta} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\varphi - \tau_{xy} \sin 2\varphi \quad (2.14)$$

$$\tau_{\xi\eta} = -\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\varphi + \tau_{xy} \cos 2\varphi \quad (2.15)$$

Das  $\eta$ - $\xi$ -System, in welchem die Schubspannungen  $\tau_{\xi,\eta}$  zu null werden, wird als  $\sigma_1$ - $\sigma_2$ -Hauptspannungssystem bezeichnet. Die Hauptspannungen  $\sigma_1$   $\sigma_2$  lassen sich mit Hilfe der folgenden Gleichung ermitteln:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2.16)$$

Die Hauptspannungen treten in einem gegenüber dem x-y-Koordinatensystem um den Winkel  $\varphi^*$  gedrehten Koordinatensystem auf. Der Winkel  $\varphi^*$  lässt sich wie folgt berechnen:

$$\tan 2\varphi^* = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (2.17)$$

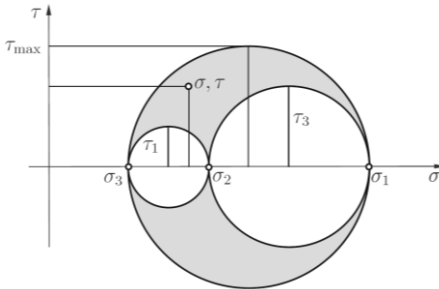


Abb. 2.22: Mohrsche Spannungskreise für den dreiaxialen Spannungszustand (Gross und Seelig 2011)

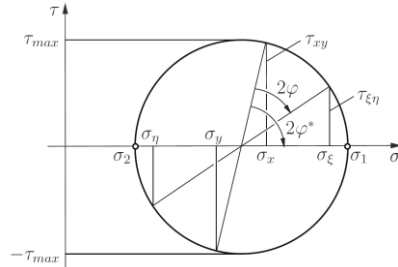


Abb. 2.23: Mohrscher Spannungskreis für den zweiaxialen Spannungszustand (Gross und Seelig 2011)

Eine Spannungstransformation ist nur bei isotropen Materialien möglich. Beim Verkleben von Betonbauteilen mit Hilfe eines Klebstoffs auf Zementbasis sind die E-Moduli von Klebstoff und den Füge­teilen annähernd gleich groß. Vereinfacht kann daher von einem isotropen Material ausgegangen werden.

Aufgrund der Tatsache, dass sich die E-Moduli von Klebstoff und Beton der Füge­teile nur geringfügig unterscheiden, tritt das oben beschriebene Phänomen der „Querzug- bzw. Querdruckspannungen“ in Klebfugen beim Kleben mit einem zementgebundenen Klebstoff nicht in dem Maße auf wie es beim Kleben mit Reaktionsharzklebstoffen der Fall ist (siehe hierzu Abs. 4.4).

2.2.4.3 Allgemeine bruchmechanische Grundlagen

Das Versagen von spröden Werkstoffen wird allgemein durch die Hauptspannungshypothese nach Rankin beschrieben. Hierbei kommt es zu einer Rissbildung rechtwinklig zur Hauptspannungsrichtung (siehe Abb. 2.24). Das Materialverhalten wird nach der Theorie durch die Zugfestigkeit und die Druckfestigkeit des Werkstoffes bestimmt (vgl. *Gross und Seelig 2011*).

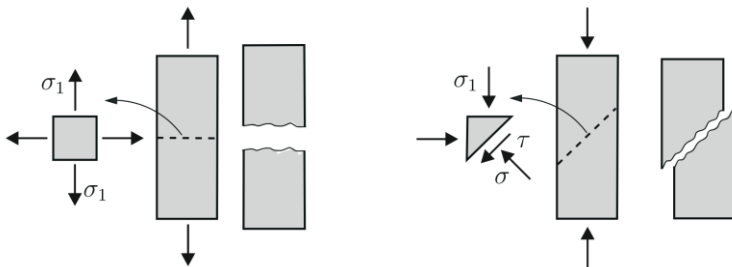


Abb. 2.24: Bruchfläche entsprechend der Hauptspannungshypothese (links), scherschlächiger Bruch (rechts) in Anlehnung an *Gross und Seelig 2011*

Bei einer Druckbeanspruchung kann das Versagen auch in einem Schnitt stattfinden, in dem die Schubspannung einen kritischen Wert annimmt (siehe Abb. 2.24). Bei diesem im Grundbau häufig eine Rolle spielenden Fall spricht man von einem scherschlächigen Bruch. Abhängig vom Spannungszustand und vom Materialverhalten treten auch Mischformen der beiden Brucharten auf (vgl. *Gross und Seelig 2011*).

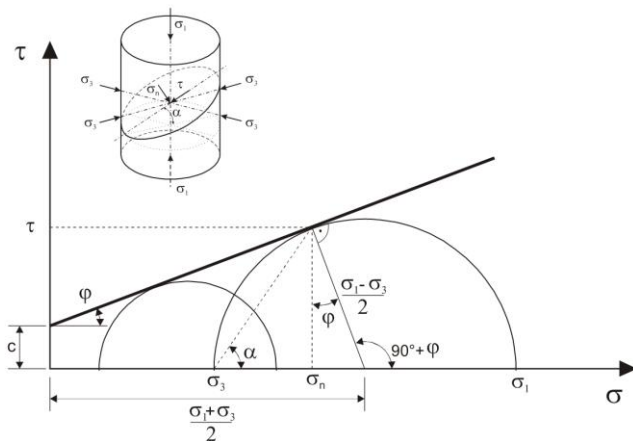


Abb. 2.25: Coulomb-Mohrsches Bruchkriterium (*Schubert 2007*)

Zur Beschreibung des Versagens von Böden, also Materialien, die keine oder nur eine geringe Zugfestigkeit besitzen, wurde das sogenannte Coulomb-Mohrsche-Bruchkriterium entwickelt. Der kritische Spannungszustand lässt sich danach durch die folgende lineare Gleichung abbilden:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \tag{2.18}$$

Die in einem beliebigen Schnitt übertragbare Schubspannung  $\tau$  ist danach abhängig von den Materialparametern: Kohäsionsfestigkeit  $c$ , dem Reibungswinkel  $\varphi$  und proportional zur wirkenden Normalspannung  $\sigma_n$ . Die Ermittlung der Materialparameter erfolgt auf Basis von Triaxialversuchen. Dabei werden Bodenproben unter mehraxialer Beanspruchung bis zum Bruch belastet.

Das Coulomb-Mohrsche-Bruchkriterium entspricht dabei der gemeinsamen Tangente an den Grenzspannungskreisen der Beanspruchungszustände in einem Schubspannungs-Druckspannungs-Diagramm (siehe Abb. 2.25). Der Bruch als Schubbruch tritt danach unter dem Winkel  $\alpha$  gegenüber der kleinsten Hauptspannung ein (Schubert 2007).

Aus Experimenten geht hervor, dass das Coulomb-Mohrsche-Bruchkriterium als linearer Ansatz das Verhalten verschiedener Materialien für den Druckbereich gut, jedoch im Zugbereich weniger gut abbildet. Dies ist darin begründet, dass es zu einer Änderung des Versagensmechanismus von einem Schubbruch hin zu einem Bruch entsprechend der Hauptspannungshypothese kommt (vgl. Gross und Seelig 2011).

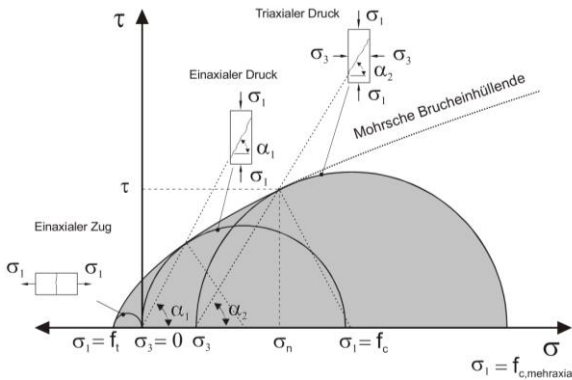


Abb. 2.26: Mohrsche Hüllkurve als nichtlineares Bruchkriterium zur Beschreibung der Materialfestigkeit unter zweiachialer Beanspruchung

Bei Materialien, die eine Zugfestigkeit aufweisen, ist die Einhüllende der Mohrschen Grenzspannungskreise keine Gerade, sondern eine Hüllkurve (siehe Abb. 2.26). Der Verlauf der Hüllkurve wird im Wesentlichen durch die Druck- und Zugfestigkeit eines Materials bestimmt. Spröde Materialien, wie Gestein oder auch Beton, weisen im Vergleich zur Druckfestigkeit häufig eine geringe Zugfestigkeit auf. Hierbei ist die Festigkeit unter reiner Schubbeanspruchung größer, als unter einaxialer Zugbeanspruchung. Dies erklärt letztendlich auch die Hauptspannungshypothese.

Bay 1943 verwendet für Beton eine Potenzfunktion zweiten Grades zur analytischen Beschreibung der Hüllkurve. Geschrieben in einer allgemeinen Form sieht diese wie folgt aus:

$$\tau^2 = p \cdot (\sigma_n + a) \tag{2.19}$$

Hierbei sind  $p$  und  $a$  Konstanten, die es in Versuchen zu ermitteln gilt.

Der kritische Spannungszustand in Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit  $f_c$  und der Betonzugfestigkeit  $f_t$  lässt sich nach Bay 1943 mit Hilfe der nachfolgenden Gleichung abbilden:

$$\tau = \sqrt{\left(2f_t - 2\sqrt{f_t^2 + f_c \cdot f_t + f_c}\right) (\sigma_n + f_t)} \quad (2.20)$$

Den Abschluss der Hüllkurve nach rechts in Abb. 2.26 bildet der Spannungskreis der mehraxialen Materialfestigkeit. Im Gegensatz zum linearen Bruchkriterium nach Coulomb-Mohr hängt der Neigungswinkel der Bruchfläche  $\alpha$  bei einem nichtlinearen Ansatz, wie dem von Bay 1943, vom Beanspruchungszustand ab.

Aufbauend auf dem Bruchkriterium von Coulomb-Mohr wurden Ansätze entwickelt, mit denen sich das Versagen von Materialien unter mehraxialer Beanspruchung beschreiben lässt. Das Modell von Drucker und Prager 1952 ist dabei wohl am bekanntesten. Es findet vorwiegend bei granularen und geologischen Materialien Anwendung. Die Versagensfläche im dreidimensionalen Raum der Hauptspannungen bildet dabei einen Kreiskegel um die hydrostatische Achse (siehe Abb. 2.27, links). Die Versagenskurve für den zweidimensionalen Fall ist eine Ellipse (siehe Abb. 2.27, rechts) (vgl. Gross und Seelig 2011).

Das Modell von Drucker und Prager 1952 bildet jedoch ebenso wie das Coulomb-Mohrsche-Bruchkriterium das Verhalten von Materialien, wie Gestein oder Beton, für den Zugbereich weniger gut ab. Während die Betondruckfestigkeit bei einer mehraxialen Druckbeanspruchung gegenüber der einaxialen Druckfestigkeit erhöht ist, liegt die Zugfestigkeit bei mehraxialer Zugbeanspruchung unter der einaxialen Zugfestigkeit (Ritter 2014).

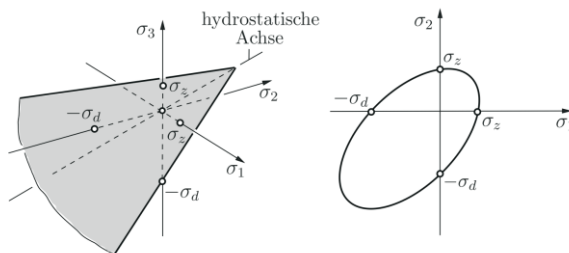


Abb. 2.27: Drucker-Prager-Hypothese für den dreiaxialen Spannungszustand (links) und für den zweiaxialen Spannungszustand (Gross und Seelig 2011)

Der Ansatzes von Drucker und Prager 1952 wurde von zahlreichen Forschern weiterentwickelt. Das Verhalten von Beton unter mehraxialer Beanspruchung wurde unter anderem von Kupfer (DAfStb Heft 229) untersucht. Für Betone bis zur Festigkeitsklasse C70/85 hat sich nach Curbach und Speck 2007 das Modell von Ottosen 1977 etabliert. Ritter 2014 untersuchte das Verformungsverhalten von Ultrahochleistungsbeton unter mehraxialer Beanspruchung. Auf Basis von eigenen und in der Literatur beschriebenen Versuchen entwickelte er ein Bruchkriterium, mit dem sich das mehraxiale Materialverhalten in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit bestimmen lässt.

Das Tragverhalten von zementgebundenen Klebstoffen unter mehraxialer Beanspruchung wurde bisher noch nicht erforscht. Aufgrund der Tatsache, dass der RPC-Klebstoff sowohl von der Zusammensetzung als auch von den einaxialen Materialeigenschaften her HPC und UHPC ähnelt, lassen sich Erkenntnisse, was deren Tragverhalten unter mehraxialer Beanspruchung angeht, auf Zementklebstoffe übertragen.

#### 2.2.4.4 Bruchmechanische Grundlagen im Zusammenhang mit Fugen

Grenzflächen bei Böden mit einem geschichteten Aufbau oder auch Klebfugen stellen in der Regel eine Schwächung des Bodens bzw. Bauteils dar. Das Bruchverhalten (siehe Abb. 2.24) wird dabei neben dem Beanspruchungszustand durch die Adhäsionsfestigkeit in der Grenzschicht sowie bei Klebfugen durch die Kohäsionsfestigkeit des Klebstoffs bestimmt. Auch hier wird versucht, das Versagen durch ein entsprechendes Bruchkriterium zu beschreiben. Grundlage dafür sind entsprechende Versuche. Es existiert eine Vielzahl an Versuchsvarianten (siehe Abb. 2.28), die zur Formulierung eines Bruchkriteriums jeweils unterschiedlich gut geeignet sind.

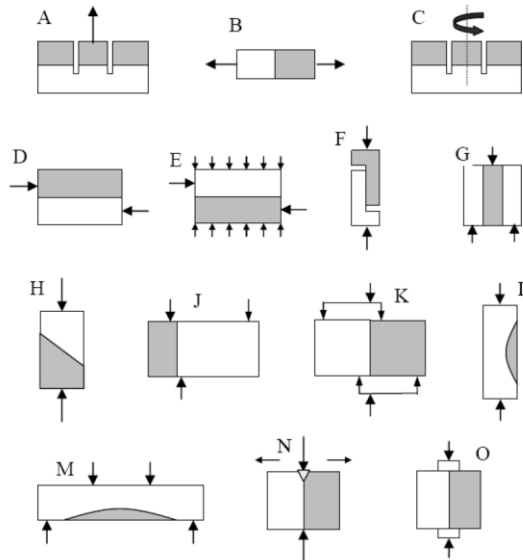


Abb. 2.28: Schematische Darstellung bisher verwendeter Versuchsaufbauten zur Bestimmung der Schubfestigkeit von Grenzflächen (Beushausen 2005)

Die Bestimmung der Schubfestigkeit ist zum einen mit Hilfe von Scherversuchen (Variante D, E, F, G, J, K nach Abb. 2.28) möglich. Hier kann zwischen einschnittigen Versuchsaufbauten (Variante D, E, F, J, K nach Abb. 2.28) und zweischnittigen Aufbauten (Variante G), sogenannte Push-Out-Versuchen, unterschieden werden. Es kommen auch Versuche mit Querbeanspruchung (Variante E nach Abb. 2.28) zum Einsatz. Allen gemeinsam ist, dass im Probekörper ein komplexer Spannungszustand vorliegt. Je nach Versuchsaufbau treten mehr oder weniger große planmäßige und unplanmäßige Exzentrizitäten auf, was die Beanspruchung der Fuge angeht. Die

Spannungsverteilung in der Schubfuge ist nicht konstant und abhängig vom verwendeten Versuchsaufbau. Die Konsequenz ist, dass der Probekörper Einfluss auf die Versuchsergebnisse hat. So wird in *Randl und Wicke 2000* darauf hingewiesen, dass bei Scherversuchen mit erheblichen Maßstabseffekten zu rechnen ist, da die Schubspannungen im Wesentlichen in den Randbereichen übertragen werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung der Schubfestigkeit von Grenzflächen oder Klebfugen sind Versuche an einaxial beanspruchten Probekörpern mit einer zur Belastungsrichtung geneigten Scherfläche, sogenannten Schub-Druckprobekörpern (Variante H nach Abb. 2.28). Diese zeichnen sich durch einen klar definierten Spannungszustand im Probekörper sowie eine konstante Spannungsverteilung in der Klebfuge aus.

Durch eine Variation des Neigungswinkels ergeben sich unterschiedliche Beanspruchungen für die Fuge (siehe Abb. 2.30). Mit Hilfe der Gleichungen (2.21) bis (2.23) nach *DAfStb Heft 331* lassen sich die in der Fuge wirkende Schub- und Normalspannung ( $\tau, \sigma_n$ ) sowie die Fugenlängsspannung  $\sigma_{\alpha+90}$  in Abhängigkeit des Fugenneigungswinkels ermitteln. Grundlage dafür sind die Gl. (2.13) bis Gl. (2.15), welche auf den einaxial belasteten Schubdruckprobekörper mit einer vom Neigungswinkel abhängigen Fugenfläche angewendet wurden.

$$\tau(\alpha) = \frac{F_u}{A_0} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha = \sigma_0 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \quad (2.21)$$

$$\sigma_n(\alpha) = \frac{F_u}{A_0} \cdot \cos^2 \alpha = \sigma_0 \cdot \cos^2 \alpha \quad (2.22)$$

$$\sigma_{\alpha+90}(\alpha) = \frac{F_u}{A_0} \cdot \sin^2 \alpha = \sigma_0 \cdot \sin^2 \alpha \quad (2.23)$$

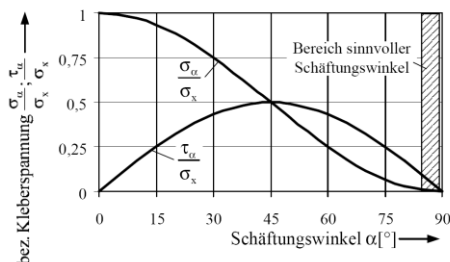


Abb. 2.29: Verlauf der Normal- und Schubspannungen in der Klebschicht einer Schäftung, bezogen auf die an der Fügung anliegende Schnitt-Zugspannung  $\sigma_x$  (entspricht  $\sigma_0$  nach Abb. 2.30) aus *Schürmann 2007*

Für den Fall einer Schäftung (siehe Abb. 2.8) sind die in der Klebschicht herrschenden Normal- und Schubspannungen bezogen auf die an der Fügung anliegende Schnitt-Zugspannung  $\sigma_x$  in Abhängigkeit des Schäftungswinkels  $\alpha$  auf Abb. 2.29 graphisch dargestellt. Dabei entsprechen die Schnitt-Zugspannung  $\sigma_x$  der Beanspruchung  $\sigma_0$  nach Abb. 2.30 und der Schäftungswinkel dem Fugenneigungswinkel. Der Hauptspannungszustand ist bekanntlich dadurch gekennzeichnet, dass keine



Schubspannungen vorhanden sind. Bei einem Neigungswinkel von null Grad verläuft die Fuge rechtwinklig zur Hauptspannungsrichtung und es liegt eine reine Zugbeanspruchung vor. Für steile Fugenneigungswinkel gehen sowohl die Schubspannungen als auch die Normalspannungen gegen Null.

Die Auswertung der Schub-Druckversuche erfolgt wiederum im Schubspannungs-Normalspannungs-Diagramm. In dieses werden die in Versuchen ermittelten kritischen Spannungszustände eingetragen (Spannungszustände  $S_A$ ,  $S_B$ ,  $S_C$  sowie  $S_Z$  siehe Abb. 2.30) und einer Regressionsanalyse unterzogen. Das Bruchkriterium stellt eine Ausgleichsfunktion der Versuchswerte dar und unterscheidet sich in dem Punkt von dem Bruchkriterium nach Mohr zur Beschreibung der Materialfestigkeit als Einhüllende der Grenzspannungskreise.

Anzumerken ist, dass bei den Versuchen in der Art keine beliebigen Schub-Normalspannungs-Kombinationen realisiert werden können. Die reine Schubfestigkeit lässt sich praktisch mit Schub-Druckversuchen bzw. Schub-Zugversuchen nicht bestimmen. Diese kann durch eine Extrapolation der Ergebnisse aus Schub-Druckversuchen oder eine Interpolation zwischen Ergebnissen aus Schub-Druckversuchen und Schub-Zugversuchen ermittelt werden.

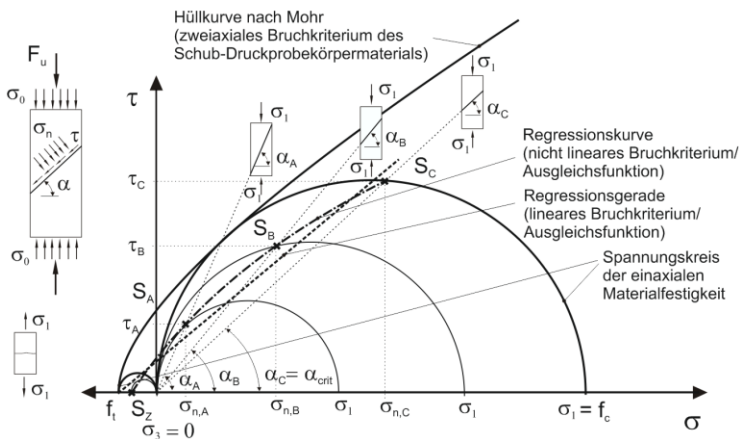


Abb. 2.30: Beschreibung des Tragverhaltens von Klebfugen in einachsig beanspruchten Betonprismen im Schubspannungs-Druckspannungs-Diagramm

Ein limitierender Faktor bei Schub-Druckversuchen ist die Festigkeit des Probekörpermaterials. Im Diagramm in Abb. 2.30 sind die Spannungskreise der einaxialen Festigkeit sowie die Hüllkurve nach Mohr für die zweiachsigale Festigkeit des Schub-Druckprobekörpermaterials abgebildet. Der Spannungskreis der einaxialen Beton-druckfestigkeit wird durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$\tau = \sqrt{f_c \cdot \sigma_n - \sigma_n^2} \quad (2.24)$$

Aus den Schnittpunkten der Ausgleichsfunktion (in Abb. 2.30 die Regressionskurve) mit den Mohrschen Spannungskreisen der einaxialen Materialfestigkeit (Zug- sowie Druckfestigkeit) ergeben sich Grenzwinkel  $\alpha_{crit}$ , zwischen denen sich ein Fugenver-

sagen einstellt (siehe Abb. 2.30). Für Fugeneigungswinkel darüber oder auch darunter kommt es zu einem Versagen des Probekörpers. Zur Ermittlung des Schubtragverhaltens von Fugen unter größerer Drucknormalspannung muss daher ein anderer Versuchsaufbau gewählt werden. Die Bestimmung der Festigkeit von Fugen unter Schub-Zugbeanspruchung lässt sich mit Hilfe von Schub-Zugprobekörpern ermitteln. Die Zusammenhänge beim Schub-Druckversuch sind prinzipiell auch auf den Schub-Zugversuch übertragbar.

Unabhängig davon, welcher Versuchsaufbau gewählt wurde, stellt das Bruchkriterium eine Ausgleichsfunktion von Versuchswerten dar. Der Charakter des Bruchkriteriums hängt grundsätzlich von der Qualität des Verbunds in der Fuge ab. In Abb. 2.31 ist das Spektrum möglicher Bruchkriterien dargestellt.

Für Trockenfugen, die keine Haftzugfestigkeit senkrecht zur Fuge aufweisen - also nur einen beschränkten Haftverbund - kann die Tragfähigkeit vereinfacht durch das nachfolgende Reibgesetz abgebildet werden:

$$\tau(\sigma_n) = \mu \cdot \sigma_n \quad (2.25)$$

Die übertragbare Schubspannung  $\tau$  hängt dabei proportional von der Normalspannung  $\sigma_n$  sowie dem Haftreibungskoeffizient  $\mu$ , durch den die Oberflächenbeschaffenheit erfasst wird, ab.

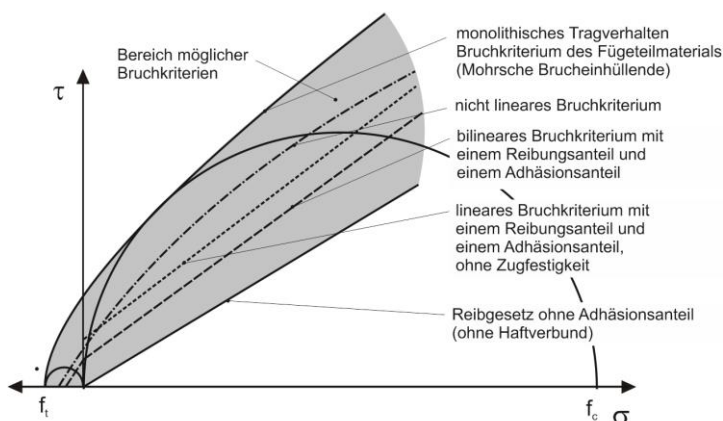


Abb. 2.31: Spektrum möglicher Bruchkriterien für Fugen

Das Versagen von druckbeanspruchten Fugen, in denen ein Haftverbund besteht, wird häufig mit Hilfe der folgenden Gleichung in Anlehnung an das Coulomb-Mohrsche-Bruchkriterium (vgl. Abs. 2.2.4.2; Gl. (2.18)) beschrieben:

$$\tau(\sigma_n) = \tau_0 + \mu \cdot \sigma_n \quad (2.26)$$

Die übertragbare Schubspannung  $\tau$  setzt sich aus einem proportional von der Normalspannung  $\sigma_n$  abhängigen Anteil sowie einem von der einwirkenden Normalspannung unabhängigen Anteil  $\tau_0$  zusammen. Der Proportionalitätsfaktor  $\mu$  wird hierbei als Adhäsionsbeiwert oder Reibungsbeiwert bezeichnet und ist vergleichbar mit dem

Reibungswinkel  $\varphi$  in Gl. (2.18). Mit dem Begriff „Reibung“ wird häufig ein Gleitvorgang assoziiert. Im Zusammenhang mit einem Bruchkriterium für Fugen wird jedoch unter der Voraussetzung eines intakten Verbundes davon ausgegangen, dass kein Gleiten stattfindet, weshalb der Begriff häufig falsch verstanden wird (vgl. *Trunk 1999* und *Mühlbauer 2012*). In der Physik wird zwischen Gleitreibung und Haftreibung unterschieden. Hier ist „Reibung“ im Sinne von „Haftreibung“ zu verstehen.

Um die Festigkeit von Fugen unter Zugbeanspruchung besser abbilden zu können, wurden bilineare Ansätze entwickelt (siehe Abb. 2.31). Das Versagen von Fugen, in denen ein „guter“ Verbund vorliegt, wie beispielweise beim Kleben mit Reaktionsharzklebstoffen (vgl. *Bergmeister 2001*), kann deutlich besser durch einen nichtlinearen Ansatz abgebildet werden.

Im Idealfall liegt ein optimaler Verbund vor und das Tragverhalten entspricht dem eines monolithischen Bauteils. Hierbei entspricht das Bruchkriterium dem Bruchkriterium des Fügeiteilmaterials. Das Bruchkriterium für eine Klebfugen liegt also zwischen dem Reibgesetz und dem Bruchkriterium des Fügeiteilmaterials. Ist der E-Modul des Klebstoffes höher als der des Fügeiteilmaterials, kann das Bruchkriterium theoretisch auch oberhalb des Fügeiteilbruchkriteriums liegen. Auf Bruchkriterien für Verbundfugen und Klebfugen im Bauwesen wird (im Folgenden) in Abs. 2.2.4.5 und Abs. 2.2.4.6 näher eingegangen.

Bei den gängigen Bruchkriterien werden lediglich die in der Fuge herrschende Normalspannung  $\sigma_n$  und Schubspannung  $\tau$  berücksichtigt. Unberücksichtigt bleiben Spannungen längs zur Fuge  $\sigma_l$  und Spannungen quer zur Fuge  $\sigma_q$ . Mit der Frage, ob diese Einfluss auf die Festigkeit von Grenzschichten haben, beschäftigten sich *Franke und Deckelmann 1989*.

Mit Hilfe von theoretischen Überlegungen sowie anhand von experimentellen Untersuchungen (siehe auch Abs. 2.2.4.6) konnten sie zeigen, das Versagen einer Grenzschicht nicht von Fugenlängs- und Querspannungen beeinflusst wird, sondern lediglich von der darin wirkende Normal- und Schubspannung. Bruchkriterien für Grenzschichten sind damit unabhängig vom einwirkenden Spannungszustand.

### 2.2.4.5 Bruchkriterien für Verbundfugen im Massivbau - Stand der Wissenschaft

Das Schubtragverhalten von Verbundfugen im Massivbau wurde umfangreich erforscht. Die dazu eingesetzten Versuchsaufbauten sind in Abb. 2.28 schematisch dargestellt. Hierbei muss grundsätzlich zwischen Fugen bei Bauteilen mit einer planmäßigen Ortbetonergänzung und bei Bauteilen mit einer unplanmäßigen nachträglichen Ortbetonergänzung als Verstärkungsmaßnahme unterscheiden werden.

Für den Fall einer planmäßigen Ergänzung von Betonbauteilen ist die Bemessung von Verbundfugen normativ in *DIN EN 1992-1-1: 2011-01* geregelt. Die Schubtragfähigkeit setzt sich dabei aus einem proportional von der Normalspannung  $\sigma_n$  abhängigen Reibanteil und einem von der einwirkenden Normalspannung unabhängigen Haftanteil - analog zu Gl. (26) - sowie einem Anteil aus Verbundbewehrung zusammen. Bei geringen Beanspruchungen und damit kleinen Relativverschiebungen in der Fuge erfolgt die Übertragung von Schubspannungen hauptsächlich über den Haftverbund. Wirkt eine Drucknormalspannung, kann auch Haftreibung aktiviert werden.

Das Tragverhalten wird demnach für geringe Verschiebungen durch ein lineares Bruchkriterium abgebildet. Wird die Fuge stärker beansprucht und die Grenzdehnung überschritten, versagt der Verbund schlagartig. Wie *Lenz 2012* nachweisen konnte, kommt es zunächst zu einem Abfall der Verbundkraft. Sowohl der Reibanteil - im Sinne von „Gleitreibung“ - als auch der Anteil aus Verbundbewehrung werden erst mit zunehmender Relativverschiebung in der Fuge aktiviert. Die Maxima der einzelnen Traganteile werden also bei unterschiedlichen Verformungszuständen erreicht (vgl. *Lenz 2012*).

In verkürzter Form, ohne den Anteil aus Verbundbewehrung, sieht die Bemessungsgleichung zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit  $V_{Rdi}$  nach *DIN EN 1992-1-1: 2011-01* wie folgt aus:

$$V_{Rdi} = c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n \leq 0,5 \cdot v \cdot f_{cd} \quad (2.27)$$

Einflussgrößen sind dabei zum einen die Betonzugfestigkeit  $f_{ctd}$  und zum anderen die Oberflächenrauigkeit, die über die Beiwerte  $c$  und  $\mu$  (siehe Tab. 2.5) berücksichtigt wird.

Weiterhin sind hierbei:

- $\sigma_n$  die Spannung infolge der minimalen Normalkraft rechtwinklig zur Fuge, die gleichzeitig mit der Querkraft wirken kann in N/mm<sup>2</sup> (positiv für Druck mit  $\sigma_n \leq 0,6 f_{cd}$  und negativ für Zug). Ist  $\sigma_n$  eine Zugspannung, ist in der Regel  $c \cdot f_{ctd}$  mit 0 anzusetzen
- $v$  der Festigkeitsabminderungsbeiwert für die Fugenrauheit nach Tab. 2.5 (der Reibungsanteil in Gl. (2.27) darf bis zur Grenze von  $\mu \cdot \sigma_n \leq 0,1 f_{cd}$  ausgenutzt werden)

Tab. 2.5: Rauigkeitsbeiwerte (*Fingerloos et al 2012*)

Fuge	c [-]	μ [-]	v [-]
verzahnt	0,50	0,9	0,7
rau	0,40 <sup>a)</sup>	0,7	0,5
glatt	0,24 <sup>a)</sup>	0,6	0,2
sehr glatt	0 <sup>b)</sup>	0,5	0

a) Zug rechtwinklig zur Fuge: c = 0

b) Höhere Beiwerte müssen durch entsprechende Nachweise begründet sein.

*Lenz 2012* verglich Versuchsergebnisse aus der Literatur mit der rechnerischen Schubtragfähigkeit nach *DIN EN 1992-1-1: 2011-01*. Dabei hat sich gezeigt, dass die in Versuchen ermittelte Schubtragfähigkeit stark streut und die rechnerische Fugentragfähigkeit in der Regel deutlich darunter liegt. Dies lässt sich zum einen dadurch erklären, dass die Versuchsaufbauten nicht identisch waren und diese bekanntlich erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse haben (siehe Abs. 2.2.2.1). Ein weiterer Grund ist, dass aus der Fülle der in Abs. 2.2.2.2 genannten Einflussfaktoren lediglich die Oberflächenrauheit und Betonfestigkeit des weniger festen Alt- oder Neubetons in der Gleichung berücksichtigt werden. Alleine damit lässt sich die Schubtragfähigkeit

offenbar nicht zielsicher abschätzen (vgl. Müller 2009). Dass die derzeitigen normativen Regelungen nur eine reduzierte rechnerische Mitwirkung der Betonergänzung gestatten, ist im Wesentlichen aber durch den dabei gewählten additiven Ansatz zu erklären, bei dem die Relativverschiebung in der Fuge nicht berücksichtigt wird. Aufgrund der Tatsache, dass die Maxima der einzelnen Traganteile bei unterschiedlichen Verformungszuständen erreicht werden, können nicht die Maxima superponiert werden, sondern lediglich Bruchteile davon.

Die Bemessung von Verbundfugen im Zusammenhang mit dem nachträglichen Verstärken von Betonbauteilen durch eine Betonergänzung ist bislang nicht normativ geregelt. Unterschiede ergeben sich in erster Linie aus der Art der Aufrauungsmethode und der Art der Verbundbewehrung, die sich von denen bei einer planmäßigen Ortbetonergänzung bei der Halbfertigteilbauweise unterscheiden.

Untersuchungen zur Schubtragfähigkeit von Betonergänzungen an nachträglich aufgerauten Betonoberflächen bei Sanierungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen werden in *DAfStb Heft 528* vorgestellt. Hierzu wurden von Zilch und Mainz (in *DAfStb Heft 528*) Schub-Druckversuche an Prismen mit geeigneter Fugenfläche durchgeführt und dabei die Betonfestigkeit sowie die Methode der Oberflächenbearbeitung variiert. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden verschiedene mechanische Bearbeitungsmethoden sowie Hochdruckwasserstrahlen untersucht.

Allgemein konnte ein Zusammenhang zwischen der Oberflächenrauheit und der Fugenfestigkeit festgestellt werden. Die Festigkeit von per Hand geschliffenen Fugenflächen lag deutlich unter der von Fugen mit vergleichbarer Oberflächenrauheit (Rautiefe  $R_i$ ) und den übrigen Bearbeitungsarten. Hierbei kam es zu einem adhäsiven Versagen in der Verbundfuge. Die Betonfestigkeit hatte keinen Einfluss auf die Fugenfestigkeit. Die Festigkeit der Fuge wurde durch ein lineares Bruchkriterium abgebildet.

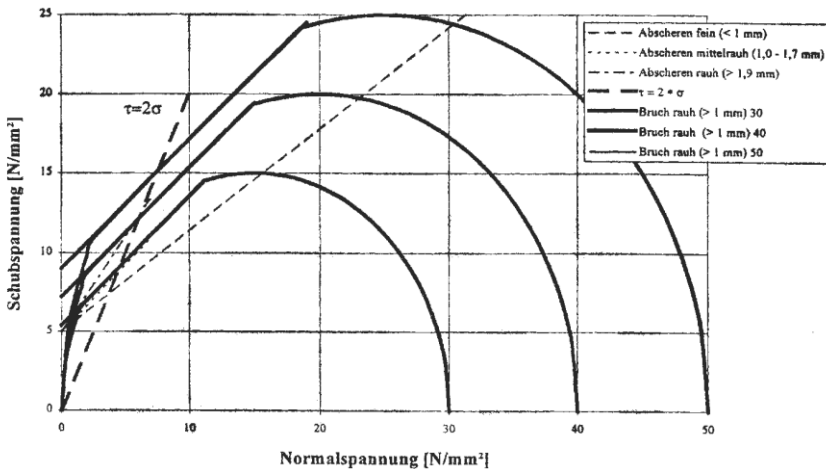


Abb. 2.32: Verschiedene Bruchkriterien in Abhängigkeit der Fugenrauigkeit (Rautiefe  $R_i$ ) und der Versagensart für mit Hochdruckwasserstrahl aufgeraute Fugenflächen (*DAfStb Heft 528*)

Bei den übrigen Versuchen kam es für steile Fugenneigungswinkel ebenfalls zu einem scherflächigen Bruch in der Fuge, bei flacheren Neigungswinkeln aber zu einem Betonversagen. Hierbei verlief die Bruchfläche nur teilweise entlang der Fuge. In einigen Fällen kreuzte diese die Fuge sogar. Die Spannungspunkte lagen dabei jedoch unterhalb des Mohrschen Spannungsreises der einaxialen Betonfestigkeit (siehe Abb. 2.32). Die Fugenfestigkeit ist bei den Versuchen mit einem Betonversagen abhängig von der Betonfestigkeit. In Abb. 2.32 sind die Fugenspannungen für unterschiedliche Betonfestigkeiten und Fugenrauigkeiten im Schubspannungs-Druckspannungs-Diagramm dargestellt. Zur Beschreibung der Fugenfestigkeit verwenden Zilch und Mainz (in *DAfStb Heft 528*) wiederum lineare Bruchkriterien in Abhängigkeit der Versagensart (siehe Abb. 2.32). Als Abgrenzung zwischen den Bruchkriterien für einen Bruch im Prisma (Betonversagen) und einem Abscheren in der Verbundfuge verwenden Zilch und Mainz die Gerade  $\tau = 2 \cdot \sigma_n$ . Bei dem Ansatz handelt es sich im Grunde genommen um einen bilinearen Ansatz.

In Tab. 2.6 sind die Parameter  $\tau_0$  und  $\mu$  nach Gl. (26) in Abhängigkeit der Oberflächenrauheit (Rautiefe  $R_f$ ) für den Fall eines Fugenversagens zusammengestellt. Mit Hilfe von Gl. (26) lässt sich damit die übertragbare Schubspannung als 5%-Fraktilwert in Abhängigkeit der Fugennormalspannung bestimmen.

Tab. 2.6: Parameter zur Bestimmung der Fugenfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenrauheit (Rautiefe  $R_f$ ) für den Fall eines Fugenversagens (*DAfStb Heft 528*)

Oberflächenrauheit	$\tau_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]
0,4 – 0,8 mm	4,916	0,638
1,0 – 1,7 mm	5,629	0,837
> 1,9 mm	3,771	1,249

Die Parameter  $\tau_0$  und  $\mu$  nach Gl. (26) in Abhängigkeit der Aufrauungsmethode für den Fall eines Betonversagens sind in Tab. 2.7 zusammengestellt. Mit Hilfe von Gl. (26) lässt sich damit übertragbare Schubspannung bezogen auf die Betondruckfestigkeit als 5%-Fraktilwert in Abhängigkeit der ebenfalls auf die Betondruckfestigkeit bezogenen Fugennormalspannung bestimmen.

Tab. 2.7: Parameter zur Bestimmung der Fugenfestigkeit in Abhängigkeit der Aufrauungsmethode für den Fall eines Betonversagens (*DAfStb Heft 528*)

Aufrauungsverfahren	$\tau_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]
geschliffen	0,045	0,802
Nadelhammer	0,632	0,146
Stockhammer	0,206	0,517

Die Bemessung von Spritzbetonverstärkungen ist in *DIN 18551: 2014-08* normativ geregelt. Ein vielversprechender Ansatz ist auch die Verstärkung von Betonbauteilen mit Textilbeton. Der Einsatz von Kohlefasergewebe ermöglicht sehr geringe Schichtdicken, wodurch wenig zusätzliche Eigenlast in die Konstruktion eingetragen wird. In Deutschland war eine Verstärkung von Betonbauteilen durch Spritzbeton mit textiler

Bewehrung aus Kohlefaser nur in Ausnahmefällen zulässig (Zustimmung im Einzelfall ZiE). Seit 2014 ist das System TUDALIT®-Textilbeton zur Verstärkung von Betonbauteilen bauaufsichtlich zugelassen (Z-31.10-182 6/2014).

Für die Bemessung der Verbundfuge bei Spritzbetonverstärkungen und auch bei der TUDALIT®-Textilbetonverstärkung gelten allgemein die Regelungen nach *DIN EN 1992-1-1: 2011-01*. Die Bestimmung der Schubtragfähigkeit zwischen Altbeton und Spritzbetonschicht bzw. zwischen Altbeton und Textilbetonschicht erfolgt mit Hilfe von Gl. (2.27). Auch hier wird also die Tragfähigkeit durch ein lineares Bruchkriterium beschrieben. An Stelle des Bemessungswerts der Betonzugfestigkeit  $f_{ctd}$  ist jedoch gemäß der bauaufsichtlichen Zulassung Z-31.10-182 6/2014 für Verstärkungen mit dem TUDALIT®-System die Oberflächenzugfestigkeit im Altbeton bzw. die Haftzugfestigkeit zwischen Altbeton und Textilbetonschicht  $f_{ctd,surf}$  nach *DIN EN 1542: 1999-07* einzusetzen. Maßgebend ist jeweils der kleinere Wert. Haftzugfestigkeit und Verbundfestigkeit unter Schubbeanspruchung stehen in enger Verbindung (vgl. *Ortlepp 2007*). Auf diese Weise wird der Verbund deutlich besser charakterisiert und die Schubtragfähigkeit abgeschätzt als dies mit dem Ansatz nach *DIN EN 1992-1-1: 2011-01* der Fall ist. Die Ergänzungsschicht kann dementsprechend wirtschaftlicher dimensioniert werden.

Auf Grund der Tatsache, dass bei einer Spritzbetonverstärkung im Allgemeinen keine Druckspannung senkrecht zur Verbundfuge vorhanden ist, kann kein Reibverbund aktiviert werden. Wird eine Verstärkung ohne Verbundbewehrung ausgeführt, muss die Kraftübertragung zwischen Altbeton und dem der Spritzbetonschicht alleine durch den Haftverbund sichergestellt werden. Im Endbereich von Verstärkungsschichten können dabei neben Schubspannungen auch Zugspannungen in der Verbundfuge auftreten. Die Tragfähigkeit des Haftverbunds bei Verbundfugen für eine kombinierte Schub-Zugbeanspruchung ist bislang jedoch kaum erforscht (*Ortlepp 2007*).

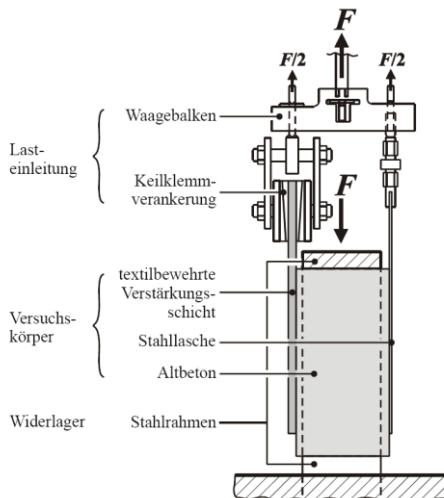


Abb. 2.33: Laschen-Schubversuch nach *Ortlepp 2007*

Intensiv beschäftigte sich *Ortlepp 2007* und *Ortlepp 2014* mit den Mechanismen der Kraftübertragung in der Verbundfuge zwischen Textilbetonverstärkungsschicht und Altbeton. Auf Basis von Laschen-Schubversuch (siehe Abb. 2.33) - wie sie auch zur Untersuchung des Verbundverhaltens von aufgeklebten Verstärkungslaschen eingesetzt werden - wurden einige alternative Modelle für die Beschreibung des Verbundverhaltens entwickelt. Favorisiert wird dabei ein Stabwerkmodell zur Bemessung des Verankerungsbereichs, worauf aber hier nicht näher eingegangen werden soll.

### 2.2.4.6 Bruchkriterien für Klebfugen im Massivbau – Stand der Wissenschaft

Beim nachträglichen Verstärken von Betonbauteilen mit Hilfe von geklebter Bewehrung werden - wie allgemein in der Klebtechnik - Klebfugen in erster Linie auf Schub beansprucht. Der Nachweis der Verbundkraftübertragung erfolgt nach *DAfStb -RiLi VBgB* am Zwischenrisselement. Das Verbundverhalten wird durch eine Differenzialgleichung – die sogenannte Differenzialgleichung des verschieblichen Verbundes – beschrieben. Nach *DAfStb -RiLi VBgB* wird dabei eine bilineare Verbundspannungs-Schlupfbeziehung angesetzt, wodurch das Nachbruchverhalten berücksichtigt wird.

Aufgrund der Tatsache, dass beim Kleben mit einem zementgebundenen Klebstoff ein starrer Verbund herrscht und kein verschieblicher Verbund, ist das Vorgehen nicht übertragbar. Analytische Verbundansätze auf Grundlage einer aus Versuchen hergeleiteten Schubspannungs-Schlupfbeziehung sind zur Modellierung von Beton-Beton-Verbunden ungeeignet (vgl. *Ortlepp 2007*).

Umfangreiche Forschungen an Betonverklebungen führten Rehm und Franke durch. Die Ergebnisse werden in *DAfStb Heft 331* vorgestellt. Als Klebstoff wurden dabei Mörtel auf Epoxidharz- und Polyesterharzbasis eingesetzt. Der EP-Klebstoff I wies eine Zugfestigkeit von 19,0 N/mm<sup>2</sup> und der UP-Klebstoff II eine Zugfestigkeit von 13,4 N/mm<sup>2</sup> bei Raumtemperatur auf. Die Druckfestigkeit unter Raumtemperatur lag für den EP-Klebstoff I bei 92,8 N/mm<sup>2</sup> und für den UP-Klebstoff II bei 70,8 N/mm<sup>2</sup>. Rehm und Franke untersuchten unter anderem den Feuchteinfluss, unterschiedliche Arten der Klebflächenvorbereitung, Dauerschwellbeanspruchung und die Festigkeit unter Langzeitbeanspruchung. In erster Linie wurden dazu Teilflächen-Schub-Druckprobekörper, also Schub-Druckprobekörper mit reduzierter Klebfläche eingesetzt (siehe Abb. 2.34). Die Druckfestigkeit des zur Herstellung der Probekörper verwendeten Betons lag bei rund 90 N/mm<sup>2</sup>. Die Klebschichtdicke betrug 1,5 bis 2,0 mm.

Es war sowohl in den Kurzzeitversuchen als auch in den Dauerstandsversuchen und den Versuchen mit Feuchtelagerung generell ein Adhäsionsversagen zu beobachten. Ergebnisse der Schub-Druckversuche als Mittelwerte aus jeweils fünf Versuchen sind in Abb. 2.34 in einem Schubspannungs-Druckspannungs-Diagramm dargestellt. Zur Beschreibung der Fugenfestigkeit unter einer Schub-Druckbeanspruchung schlagen Rehm und Franke ein lineares Bruchkriterium vor. Zur Berücksichtigung der Einflüsse aus Feuchte, Dauerbeanspruchung sowie Dauerschwellbeanspruchung führen sie den Faktor  $k(t)$  ein und modifizieren die Gl. (2.26) wie folgt:

$$\tau(\sigma_n, t) = \beta_s \cdot k(t) + \mu \cdot \sigma_n \quad (2.28)$$



Hierbei entspricht  $\beta_s$  dem von der Normalspannung unabhängigen Traganteil  $\tau_0$  nach Gl. (2.26). Der Reibbeiwert  $\mu$  (siehe Gl. (26)) beträgt nach *DAfStb Heft 331* sowohl für durch Sägen erzeugte Klebflächen als auch durch Feststoffstrahlen erzeugte Klebflächen, für alle untersuchten Klebstoffarten gleich 1,0. Für durch Schleifen bearbeitete Klebflächen beträgt der Reibbeiwert  $\mu$  gleich 0,6. Wie sich in den Versuchen gezeigt hat, hat die Steifigkeit des Klebstoffs oder die Umgebungstemperatur keinen Einfluss auf den Reibbeiwert. Bei dem Ansatz wird der Faktor  $k(t)$  daher lediglich mit der Konstante  $\beta_s$  multipliziert. Bei Raumtemperatur beträgt der  $\beta_s$ -Wert im Falle von gesägten und gesandstrahlten Klebflächen gleich  $10 \text{ N/mm}^2$ , bei einer Temperatur von  $50^\circ\text{C}$  gleich  $8 \text{ N/mm}^2$  und bei  $70^\circ\text{C}$  rund  $7,5 \text{ N/mm}^2$ .

Langzeitbeanspruchung in Verbindung mit Feuchtelagerung werden durch den Beiwert  $k_\infty$  gleich 0,55 erfasst. Der Beiwert zur Berücksichtigung einer Dauerschwellbeanspruchung in Verbindung mit Feuchtelagerung  $k_{dyn}$  beträgt ebenfalls 0,55.

Da durch die Beiwerte mehrere Einflussfaktoren gemeinsam erfasst werden, können diese nicht einfach kombiniert werden. Anzumerken bleibt außerdem, dass nicht ganz klar ist wie die Bemessungswerte in *DAfStb Heft 331* zustande gekommen sind. Es geht daraus nicht hervor, ob es sich dabei um charakteristische Werte oder Mittelwerte handelt.

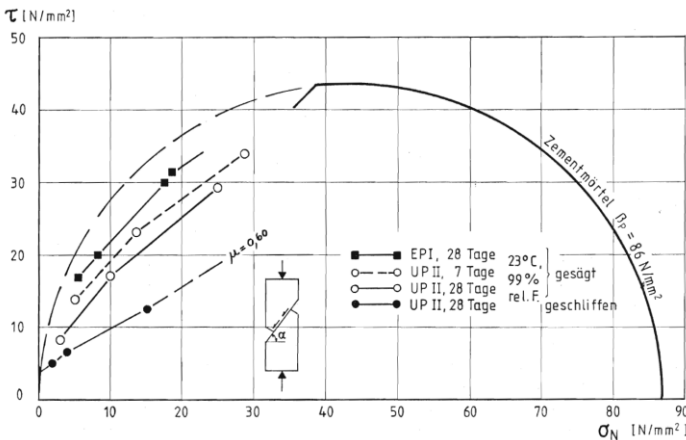


Abb. 2.34: Festigkeit von Klebfugen unter Schub-Druckbeanspruchung für Epoxid- und Polyesterharzklebstoff für unterschiedliche Arten der Oberflächenbearbeitung (*DAfStb Heft 331*)

Bei einer Betrachtung der Ergebnisse in Abb. 2.34 ist nicht nachvollziehbar warum Rehm und Franke ein lineares Bruchkriterium vorschlagen. Durch eine lineare Funktion lassen sich lediglich die Versuchsergebnisse für eine geschliffene Klebfläche abbilden. Die Ergebnisse der Versuche mit einer durch Sägen erzeugten Klebfläche können deutlich besser durch eine nichtlineare Funktion abgebildet werden.

Grundlegende Untersuchungen zum Tragverhalten von Grenzflächen bei Fugen führten *Franke und Deckelmann 1989* durch. Dabei setzten sie neben Schub-Druckprobekörpern mit einer zur Beanspruchungsrichtung geneigten Fuge eine Tor-

sionsapparatur ein. Außerdem wurden Versuche mit zweiaxialer Beanspruchung durchgeführt und dabei der Einfluss von Fugenlängsspannungen auf die Fugentragfähigkeit untersucht (siehe Abs. 2.2.4.4). Die Versuchskörper bestanden aus Aluminium mit einer durch Feststoffstrahlen aufgerauten Klebfläche. Die Fugendicke betrug 0,2 mm. Als Klebstoff wurde ein Epoxidharzklebstoff der Fa. Hoechst eingesetzt.

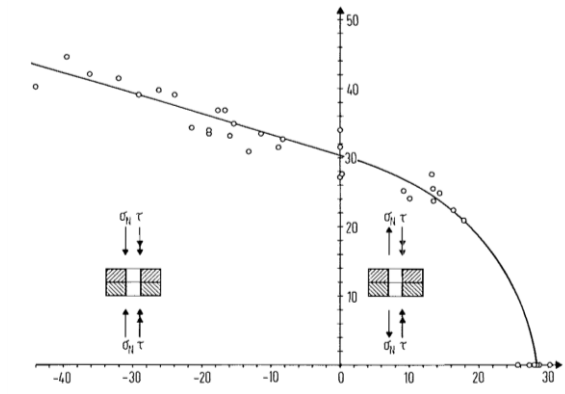


Abb. 2.35: Ergebnisse der mit Hilfe einer Torsionsapparatur durchgeführten Schub-Zug- und Schub-Druckversuche nach Franke und Deckelmann 1989, dargestellt im Schubspannungs-Normalspannungs-Diagramm

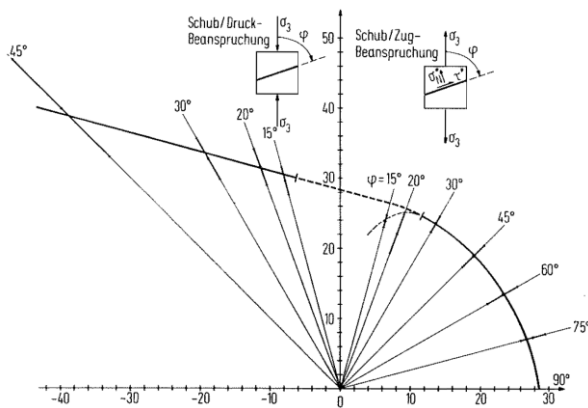


Abb. 2.36: Ergebnisse der mit Hilfe von Prismen mit geneigter Klebfläche durchgeführten Schub-Zug- und Schub-Druckversuche nach Franke und Deckelmann 1989, dargestellt im Schubspannungs-Normalspannungs-Diagramm

In den Versuchen kam es generell zu einem adhäsiven Versagen in der Grenzfläche zwischen Klebstoff und Füge teil. In beiden Fällen, in voneinander unabhängigen Versuchen, entsprach die reine Schubfestigkeit in etwa der Haftzugfestigkeit. Nach Franke und Deckelmann 1989 kann das Verhalten im Schub-Druckbereich durch eine Gerade angenähert werden. Im Schub-Zugbereich besteht danach ein nichtlinearer Zusammenhang (siehe Abb. 2.35 und Abb. 2.36). Es wird jedoch keine konkrete Funktion angegeben, mit der sich die Fugenfestigkeit im Schub-Druckbereich und im

Schub-Zugbereich beschreiben lässt, sondern lediglich festgestellt, dass der Übergang zwischen der Gerade und der nichtlinearen Funktion stetig ist. Geeignet erscheint hier ein parabolisches Bruchkriterium.

*Franke und Deckelmann 1989* gehen davon aus, dass sich die Grenzflächen von Fugen, bei denen mineralische Stoffe im Verbund stehen, analog verhalten.

Weiterhin konnten sie zeigen, dass das Versagen von Grenzflächen unabhängig vom einwirkenden Hauptspannungszustand ist und lediglich die zugehörige Normalspannung und die resultierende Schubspannung maßgebend sind. Eigenspannungen, beispielsweise aus Schwinden parallel zur Grenzfläche, haben daher keinen Einfluss auf die örtliche Haftfestigkeit (vgl. *Franke und Deckelmann 1989*).

Das Tragverhalten von Betonverklebungen untersuchte weiterhin *Bergmeister 2001*. Hierzu wurden Versuche mit Hilfe von Schub-Druckprobekörpern sowie Spaltzugversuche durchgeführt. Zur Herstellung der Probekörper wurde ein Beton der Festigkeitsklasse C80/95 eingesetzt. Als Klebstoff verwendete *Bergmeister 2001* einen Verbundmörtel auf Vinylesterbasis, dessen Materialeigenschaften nicht bekannt sind. Die Klebschichtdicke betrug rund drei Millimeter und die Klebflächen wurden durch Schneiden mit einer Steinsäge realisiert (Rautiefe  $R_t = 0,085$ ). Das Versagen in den Versuchen konnte in der Regel nicht einer Versagensart zugeordnet werden. Neben adhäsivem und kohäsivem Versagen der Klebfuge kam es auch zu einem Bruch des Probekörpers. Bei der Auswertung unterscheidet *Bergmeister 2001* nicht nach der Versagensart.

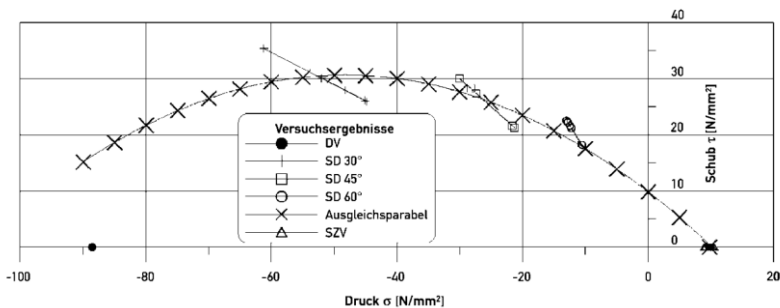


Abb. 2.37: Ergebnisse der Versuche von *Bergmeister 2001*, dargestellt im Schubspannungs-Normalspannungs-Diagramm

Zur Beschreibung der Klebfugenfestigkeit wählt *Bergmeister 2001* einen nichtlinearen Ansatz (siehe Abb. 2.37). Die verwendete Bezeichnung „Ausgleichsparabel“ ist nicht korrekt. Es handelt sich hierbei um ein Polynom zweiten Grades. Geschrieben in allgemeiner Form sieht dieses wie folgt aus:

$$\tau(\sigma_n) = a \cdot \sigma_n^2 + b \cdot \sigma_n + c \tag{2.29}$$

Auf Basis der durchgeführten Versuche bestimmte *Bergmeister 2001* die Parameter  $a$ ,  $b$  und  $c$  im Rahmen einer Regressionsanalyse (siehe Tab. 2.8).

Tab. 2.8: Parameter zur Ermittlung der Fugenfestigkeit nach *Bergmeister 2001*

a	b	c
[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]
-0,0089	-0,8604	9,8015

Auch bei diesem Ansatz entspricht die reine Schubfestigkeit in etwa der Haftzugfestigkeit. Anzumerken ist, dass der Zugbereich lediglich durch einen Versuchswert, nämlich die reine Zugfestigkeit, abgebildet wird. Das Bruchkriterium besitzt daher eine eingeschränkte Aussagekraft für den Zugbereich.

Die Tragfähigkeit von Klebverbindungen für Bauteile aus UHPC wurde umfangreich von *Mühlbauer 2012* erforscht. Hierbei kamen eine feinkörnige UHPC-Mischung (M2Q) mit einer mittleren Druckfestigkeit von rund 185 N/mm<sup>2</sup> sowie eine grobkörnige Mischung (M5Q) mit einer mittleren Druckfestigkeit von rund 175 N/mm<sup>2</sup> zum Einsatz. Neben dem von *Mühlbauer 2012* entwickelten zementgebundenen RPC-Klebstoff wurde auch ein konventioneller kalterhärtender Epoxidharzklebstoff (EP-Klebstoff) der Fa. MC-Bauchemie betrachtet. Die Zugfestigkeit des EP-Klebstoffs MC-DUR 1280 liegt nach Herstellerangaben bei größer gleich 20 N/mm<sup>2</sup> und die Druckfestigkeit bei 82 N/mm<sup>2</sup>, jeweils im Normklima. In Abs. 2.2.3.3 ist der RPC-Klebstoff näher beschrieben. Die Klebflächen wurden mit festem Strahlgut gestrahlt und wiesen eine Rautiefe  $R_t$  von 0,5-1,0 mm auf. Der Wenzel'sche Quotient  $W$  lag bei rund 1,1. Die planmäßige Klebschichtdicke betrug 1 mm.

*Mühlbauer 2012* führte sowohl Schub-Druckversuche als auch Schub-Zugversuche sowie reine Zugversuche durch. Betrachtet wurden unter anderem auch ein Medien-einfluss, der Einfluss von Dauerbeanspruchung sowie eine Dauerschwellbeanspruchung auf die Tragfähigkeit der Klebverbindung.

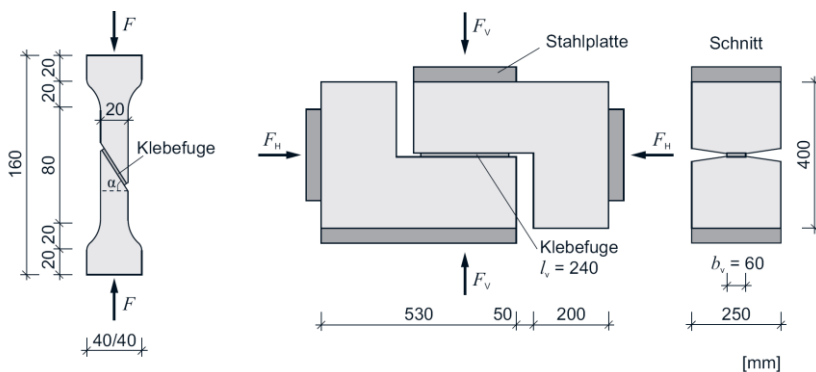


Abb. 2.38: Von *Mühlbauer 2012* eingesetzte Probekörpertyp A, rechts Probekörpertyp B aus *Wingenfeld 2013*

Zunächst wurden Versuche an einaxial beanspruchten Probekörpern mit einer zur Belastungsrichtung geneigten Klebfläche (Typ A siehe Abb. 2.38) durchgeführt. Da sich damit nur bestimmte Schubspannungs-Normalspannungskombinationen realisieren lassen und es für flache Fugeneigungswinkel teilweise zu einem Versagen der Probekörper kam, wurde eine weitere Versuchsserie durchgeführt, bei der der in

Abb. 2.38 rechts zu sehende Probekörper (Typ B) verwendet wurde. Dabei handelt es sich um einen einhäufigen Scherversuch mit einer Druckbeanspruchung senkrecht zur Fuge. Zur Herstellung der Probekörper wurde der Beton der Mischung M5Q verwendet.

In Abb. 2.39 sind die Ergebnisse der Versuche mit EP-Klebstoff, durchgeführt an Schub-Druckprobekörpern mit zweiaxialer Beanspruchung, dargestellt. Bei Scherversuchen ohne Drucknormalspannung war ein oberflächennaher Bruch im Beton zu beobachten. Für eine Drucknormalspannung von 2 % und 4 %, bezogen auf die Betondruckfestigkeit, kam es zu einem Mischbruch aus oberflächennahem Betonversagen und kohäsivem Versagen. Lagen die Fugennormalspannungen darüber, war ein rein kohäsives Versagen des Klebstoffs zu verzeichnen.

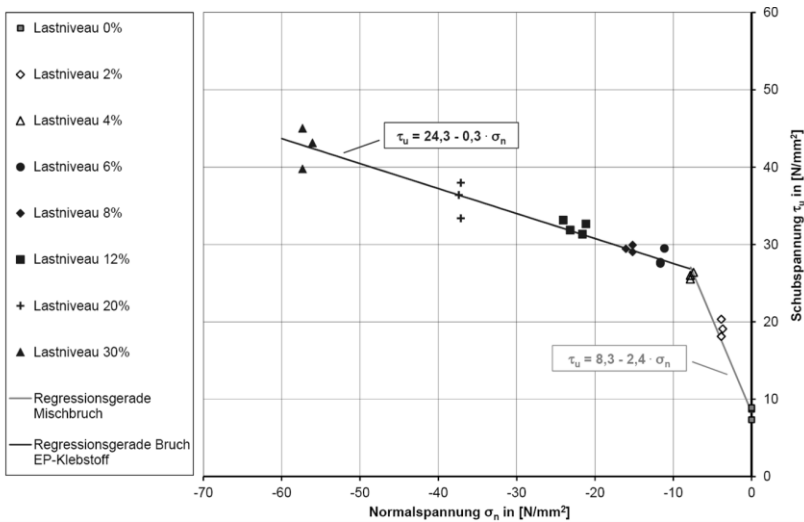


Abb. 2.39: Ergebnisse der Schub-Druckversuche mit EP-Klebstoff, dargestellt im Schubspannungs-Normalspannungs-Diagramm (Mühlbauer 2012)

Zur Beschreibung der Fugenfestigkeit unter Schub-Druckbeanspruchung verwendet Mühlbauer 2012 einen bilinearen Ansatz (siehe Abb. 2.39). Wie auch bei dem Ansatz von Zilch und Mainz in *DAfStb Heft 528* werden hierbei die unterschiedlichen Versagensarten berücksichtigt. Die Fugenfestigkeit als Mittelwert aus in der Regel drei Versuchen pro Lastniveau wird durch zwei abschnittsweise gültige lineare Gleichungen (siehe Gl. 26) beschrieben. Für den Bereich einer Drucknormalspannung von 0 bis ca. 7 N/mm<sup>2</sup>, wo es zu einem kombinierten Versagen kam, beträgt dabei der Parameter  $\tau_0$  gleich 8,3 N/mm<sup>2</sup> und der Reibbeiwert  $\mu$  gleich 2,4. Ab einer Drucknormalspannung von rund 7 N/mm<sup>2</sup>, wo sich ein kohäsives Versagen einstellt, beträgt der Parameter  $\tau_0$  gleich 24,3 N/mm<sup>2</sup> und der Reibbeiwert  $\mu$  gleich 0,3.

Bei den Versuchen mit RPC-Klebstoff, durchgeführt an Schub-Druckprobekörpern mit zweiaxialer Beanspruchung, war generell ein adhäsives Versagen der Klebfuge zu beobachten. Auf Grundlage von in der Regel drei Versuchen pro Lastniveau entwickelte Mühlbauer 2012 einen lineares Bruchkriterium (siehe Abb. 2.40), mit dem sich die mittlere Fugenfestigkeit unter Schub-Druckbeanspruchung bestimmen lässt.

Der Parameter  $\tau_0$  beträgt hierbei 5,5 N/mm<sup>2</sup> und der Reibbeiwert  $\mu$  gleich 1,0 (nach Gl. (26)).

Sowohl die mit Probekörper A durchgeführten Schub-Zugversuche als auch die Schub-Druckversuche wurden nicht zur Formulierung des Bruchkriteriums herangezogen, da es hier größtenteils zu einem Betonversagen an den Probekörpern kam.

Für den Schub-Zugbereich steht somit kein Bruchkriterium zur Verfügung. Berücksichtigt werden lediglich die Ergebnisse der Versuche mit einem Fugeneigungswinkel von 0°, also einer Fuge rechtwinklig zur Beanspruchungsrichtung. Die mittlere sowie die charakteristische Zugfestigkeit der Klebverbindung für die beiden verwendeten UHPC-Mischungen sind in Tab. 2.9 aufgeführt.

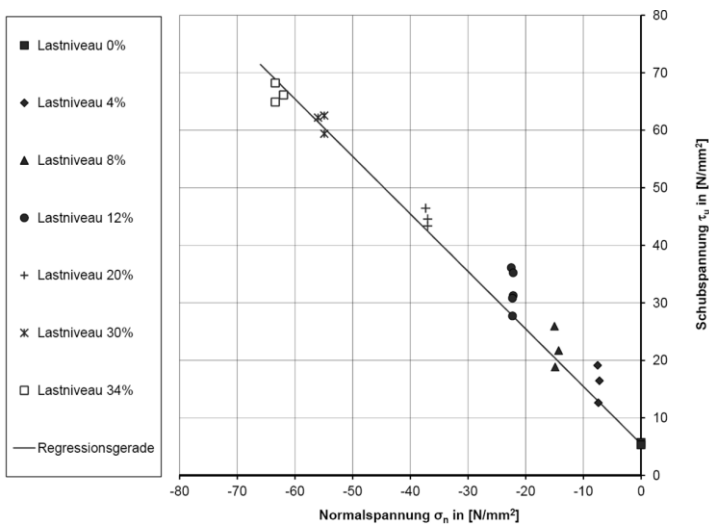


Abb. 2.40: Ergebnisse der Schub-Druckversuche mit RPC-Klebstoff, dargestellt im Schubspannungs-Normalspannungs-Diagramm (Mühlbauer 2012)

Tab. 2.9: Mittlere und charakteristische Zugfestigkeit der Klebfuge nach Mühlbauer 2012

UHPC-Sorte	Klebstoff	$f_{ijm}^1$	$f_{ijk}^1$
M2Q	EP	9,3	6,3
B5Q	EP	8,6	6,8
M2Q	RPC	8,6	6,1
B5Q	RPC	6,4	4,8

<sup>1</sup>als Mittelwert aus mehreren Versuchsserien

Mit dem Ziel, das Bruchkriterium auf den Schub-Zugbereich zu erweitern, wurden die mit Hilfe von Probekörpertyp A sowie Probekörper B durchgeführten Versuche gemeinsam ausgewertet und einer Regressionsanalyse unterzogen.

In Abb. 2.41 und Abb. 2.42 sind die Ergebnisse der mit Probekörpertyp A sowie Probekörper B von Mühlbauer 2012 durchgeführten Versuche als Mittelwerte pro Lastniveau zusammen in einem Schubspannungs-Normalspannungs-Diagramm dargestellt. Dabei wurden nur die Versuche mit aufgenommen, bei denen es zu einem Versagen der Klebfuge kam.

Bei den Versuchen mit RPC-Klebstoff kam es allgemein zu einem adhäsiven Versagen. In Anlehnung an Mühlbauer 2012 wurde zunächst ein linearer Ansatz gewählt und mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate die Parameter  $\tau_0$  und  $\mu$  neu bestimmt. Hier kann die Fugenfestigkeit sowohl unter Schub-Zug als auch unter Schub-Druckbeanspruchung durch die lineare Gleichung mit den Parametern  $\tau_0$  gleich 8,11 N/mm<sup>2</sup> und  $\mu$  gleich -0,99 abgebildet werden (siehe Abb. 2.42). Danach entspricht die reine Schubfestigkeit in etwa der Haftzugfestigkeit.

Wie auch in Mühlbauer 2012 erfolgte die Auswertung der Versuche mit EP-Klebstoff abschnittsweise. Für den Bereich einer Zugnormalspannung von 7,6 N/mm<sup>2</sup> bis zu einer Drucknormalspannung von -9,3 N/mm<sup>2</sup> kann die Fugenfestigkeit durch die lineare Gleichung mit den Parametern  $\tau_0$  gleich 12,31 N/mm<sup>2</sup> und  $\mu$  gleich -1,62 abgebildet werden (siehe Abb. 2.41). Hier kam es sowohl bei den Versuchen mit Probekörper Typ A als auch mit Probekörper Typ B hauptsächlich zu einem Mischbruch aus oberflächennahem Betonversagen und kohäsivem Versagen. Für eine Drucknormalspannung von größer gleich 9,3 N/mm<sup>2</sup> war in beiden Fällen ein kohäsives Versagen der Klebung zu verzeichnen. Die Fugenfestigkeit lässt sich dabei durch die lineare Gleichung mit den Parametern  $\tau_0$  gleich 23,91 N/mm<sup>2</sup> und  $\mu$  gleich -0,37 abbilden. Auch hier wurden die Parameter  $\tau_0$  und  $\mu$  mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate neu bestimmt.

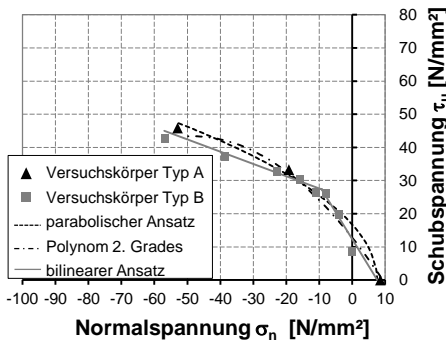


Abb. 2.41: Gemeinsame Auswertung der Versuche von Mühlbauer 2012 sowohl mit Probekörper Typ A und Typ B für den EP-Klebstoff

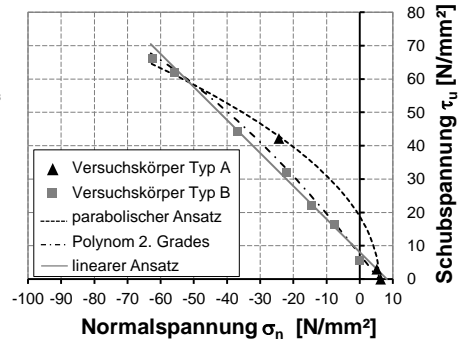


Abb. 2.42: Gemeinsame Auswertung der Versuche von Mühlbauer 2012 sowohl mit Probekörper Typ A und Typ B für den RPC-Klebstoff

Wie die Ergebnisse von Rehm und Franke (DAfStb Heft 331) zeigen, lässt sich die Festigkeit von Verbundfugen mitunter besser durch eine nichtlineare Funktion abbilden. Diese ist im Gegensatz zu dem bilinearen Ansatz stetig, was im Hinblick auf das Ziel der „Fugenoptimierung“ vorteilhaft sein kann.

In Anlehnung an *Bergmeister 2001* wurde daher weiterhin ein Polynom zweiten Grades (Gl. (2.29)) eingesetzt. Sowohl für die Versuche mit EP-Klebstoff als auch für die Versuche mit RPC-Klebstoff wurden entsprechen dem in *Bergmeister 2001* beschriebenen Vorgehen die Parameter  $a$ ,  $b$  und  $c$  im Rahmen einer Regressionsanalyse mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt (siehe Tab. 2.10). Die Ergebnisse werden in beiden Fällen gut durch die Polynome abgebildet.

Vielversprechend erscheint jedoch auch ein parabolischer Ansatz in Anlehnung an *Bay 1943* (vgl. Abs. 2.2.4.3). Wie die Untersuchungen von *Franke und Deckelmann 1989* gezeigt haben, lässt sich die Festigkeit von Klebfugen insbesondere im Schubzugbereich gut durch eine Potenzfunktion zweiten Grades abbilden.

Tab. 2.10: Parameter zur Beschreibung der Fugenfestigkeit mit Hilfe eines Polynoms zweiten Grades

Klebstoff	$a$ [-]	$b$ [-]	$c$ [N/mm <sup>2</sup> ]
EP	-0,013	-1,262	12,75
RPC	-0,005	-1,271	7,42

In den Abb. 2.41 und Abb. 2.42 fällt auf, dass insbesondere bei den Versuchen mit RPC-Klebstoff, der Probekörper Typ A höhere Festigkeiten liefert als der Probekörpertyp B. Grund dafür ist vermutlich, dass bei Probekörpertyp B keine konstante Spannungsverteilung in der Klebfläche vorliegt (siehe Abs. 2.2.4.4). Am Rand der Klebfuge auftretende Spannungsspitzen können in der Fuge mit EP-Klebstoff, bei der ein verschieblicher Verbund vorliegt, offenbar besser umgelagert werden. Die Ergebnisse der mit Probekörper Typ A durchgeführten Versuche sind daher deutlich besser zur Formulierung eines Bruchkriteriums geeignet. Dies gilt es entsprechend zu berücksichtigen.

Für den Zugbereich liegen insgesamt kaum Versuchsdaten vor, um daraus ein belastbares Bruchkriterium für diesen ableiten zu können.

Im Falle des EP-Klebstoffs unterscheiden sich die Ergebnisse der beiden Probekörpertypen nur geringfügig voneinander. Die Fugenfestigkeit lässt sich hier für den Druckbereich sowohl durch ein Polynom zweiten Grades als auch durch eine Potenzfunktion zweiten Grades (parabolischen Ansatz) abbilden (siehe Abb. 2.41 und Abb. 2.42). Um eine Aussage über den Charakter des Bruchkriteriums für den Zugbereich machen zu können, sind weitere Untersuchungen nötig.

Für den RPC-Klebstoff steht nur eine aus Versuchen mit Probekörper A resultierende Stützstelle im Schubdruckbereich zur Verfügung. Hier sind ebenfalls weitere Untersuchungen notwendig, um eine Aussage über den Charakter des Bruchkriteriums treffen zu können.

Das Kleben als Fügetechnik zum Verbinden von Fertigteilen untersuchte weiterhin *Schoening et al 2013*. Neben einem Epoxidharzklebstoff wurde hierbei auch ein Feinkornbeton als Klebstoff betrachtet. Es wurde jedoch kein Bruchkriterium entwickelt, sondern lediglich die Schubtragfähigkeit von Klebfugen auf Grundlage von



zweihöftigen Scherversuchen mit einer Querdruckbeanspruchung für einige wenige Schubspannungs-Normalspannungskombinationen ermittelt.

## 2.2.5 Bemessungsansätze

### 2.2.5.1 Bemessungsansatz für Verbundfugen im Massivbau

Der Bemessungsansatz für Verbundfugen nach der aktuellen Norm *DIN EN 1992-1-1: 2011-01* wurde in Abs. 2.2.4.5 näher erläutert. Die Regelungen nach *DIN EN 1992-1-1: 2011-01* gelten ebenfalls für die Bemessung der Verbundfuge bei Spritzbetonverstärkungen sowie bei der TUDALIT®-Textilbetonverstärkung. Die Bestimmung der Schubtragfähigkeit von Verbundfugen erfolgt danach mit Hilfe von Gl. (2.27).

Bei gering beanspruchten Bauteilen sind grundsätzlich unbewehrte Fugen möglich. In dem Fall erfolgt die Übertragung von Verbundspannungen alleine über den Haftverbund zwischen Fertigteil und Ortbetonschicht oder Altbeton und Verstärkungsschicht. Bei der Ermittlung des Haftverbund-Traganteils nach Gl. (2.27) gehen neben der Oberflächenrauigkeit der Bemessungswert der Betonzugfestigkeit  $f_{ctd}$  ein.

Der Bemessungswert der Betonzugfestigkeit  $f_{ctd}$  lässt sich nach *DIN EN 1992-1-1: 2011-01* wie folgt ermitteln:

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} \cdot \frac{f_{ctk;0,05}}{\gamma_c} \quad (2.30)$$

Hierbei ist  $\gamma_c$  der Teilsicherheitsbeiwert für Beton und  $\alpha_{ct}$  ein Beiwert zur Berücksichtigung von Langzeitauswirkungen auf die Betonzugfestigkeit sowie von ungünstigen Auswirkungen durch die Art der Beanspruchung. Der sogenannte Dauerstandsbeiwert  $\alpha_{ct}$  beträgt 0,85. Zu den Langzeitauswirkungen auf die Festigkeit können in gewisser Weise wohl auch festigkeitsmindernde Einflüsse aus Medienangriff gezählt werden, wenn auch Beton im Vergleich zu Kunststoffen grundsätzlich eher unempfindlich gegenüber Medienangriff ist. Bei der Bemessung von Verbundfugen werden Umwelteinflüsse sonst nicht weiter berücksichtigt.

Während nach *DIN EN 1992-1-1: 2011-01* bei der Bemessung von Verbundfugen der allgemeine Teilsicherheitsbeiwert für Beton von  $\gamma_c$  gleich 1,5 gilt, galt nach der alten *DIN 1045-1 2008-08* hier der Teilsicherheitsbeiwert für unbewehrten Beton. Dieser lag bei 1,8 und berücksichtigte das geringe Verformungsvermögen von unbewehrtem Beton.

### 2.2.5.2 Bemessungsansatz für Klebfugen nach *Bergmeister 2001*

Für eine Betonverklebung mit Hilfe eines Verbundmörtels auf Vinylesterbasis entwickelte *Bergmeister 2001* einen Bemessungsansatz. Er schlägt dabei eine separate Bemessung der Verbindungsfuge, also der Grenzschicht und der Klebschicht vor. Maßgebend wird der kleinere Wert.

Danach erfolgt die Bemessung der Grenzschicht mit Hilfe eines linearen Bruchkriteriums in Anlehnung an einen Ansatz von *Randl und Wicke 2000* zur Bemessung von

Verbundfugen. Der Bemessungswert der Schubtragfähigkeit für die Grenzschicht lässt sich danach allgemein wie folgt berechnen:

$$\tau_{Rd,i} = \frac{f_{cm}^{1/3}}{\gamma_{coh}} \cdot \alpha_{ag} \cdot \alpha_d \cdot \alpha_{coh} + \mu \cdot \sigma_n \leq \frac{f_{ck}^{1/3}}{\gamma_{coh}} \quad (2.31)$$

Hierbei sind  $f_{cm}$  der Mittelwert der Betondruckfestigkeit und  $f_{ck}$  die charakteristische Betondruckfestigkeit. Als Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{coh}$  verwendet *Bergmeister 2001* den Teilsicherheitsbeiwert für unbewehrten Beton nach *ENV 1992-1-6: 1994* bzw. *DIN 1045-1: 2008-08* gleich 1,8. Auf Grund der Tatsache, dass der Haftverbund stark streut, empfehlen *Randl und Wicke 2000* jedoch einen höheren Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{coh}$  von 2,0.

Tab. 2.11: Faktor  $\alpha_{ag}$  in Abhängigkeit der Zugschlagart nach *Bergmeister 2001* in Anlehnung an CEB-FIP MC 1990

Zuschlag	$\alpha_{ag}$
quarzitische Zuschläge	1,0
Basalt bzw. dichter Kalkstein	1,15
Kalkstein	0,8
Sandstein	0,7

Tab. 2.12: Faktor  $\alpha_d$  in Abhängigkeit des Größtkorndurchmessers (*Bergmeister 2001*)

Größtkorndurchmesser $d$ [mm]	$\alpha_d$
32	0,5
25	0,4
16	0,3
8	0,25

Tab. 2.13: Faktoren  $\alpha_{coh}$  und  $\mu$  in Abhängigkeit der Art der Oberflächenvorbereitung (*Bergmeister 2001*)

Aufrauungsverfahren	$\alpha_{coh}$	$\mu$
HDW-Strahlen <sup>1</sup> ( $R_t > 15$ mm)	1,0	1,0
HDW-Strahlen <sup>1</sup> ( $R_t > 15$ mm)	0,8	0,9
HDW-Strahlen <sup>1</sup> ( $R_t > 15$ mm)	0,6	0,8
feststoffstrahlen ( $R_t > 0,5$ mm)	0,4	0,7
diamantschneiden	0,2	0,6
glatt	0	0,5

<sup>1</sup>Hochdruckwasserstrahlen

Durch den Faktor  $\alpha_{ag}$  wird der Einfluss der Art des verwendeten Zugschlags, durch den Faktor  $\alpha_d$  der Einfluss des Größtkorndurchmessers und durch die Faktoren  $\alpha_{coh}$  sowie  $\mu$  der Einfluss des Aufrauungsverfahrens auf die Festigkeit der Grenzschicht berücksichtigt (siehe Tab. 2.11, Tab. 2.13 und Tab. 2.12). Aus *Bergmeister 2001* und

auch *Randl und Wicke 2000* geht jedoch nicht hervor, wie die Werte in Tab. 2.11, Tab. 2.13 und Tab. 2.12 zustande gekommen bzw. ermittelt worden sind.

Eine Bemessungsgleichung für die Klebschicht ist nach *Bergmeister 2001* für den konkreten Fall mit Hilfe von Schub-Druckversuche sowie Zugversuche zu ermitteln. Als Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{adh}$  schlägt *Bergmeister 2001* hier 1,5 vor.

Bei dem Bemessungsansatz werden Langzeitauswirkungen und auch Medieneinfluss auf die Fugenfestigkeit nicht berücksichtigt.

### 2.2.5.3 Bemessungsansatz für Klebfugen nach *Mühlbauer 2012*

Einen Ansatz zur Bemessung von schub-druck- und zugbeanspruchten Klebverbindungen entwickelte auch *Mühlbauer 2012*.

Auf Grundlage der Versuche ermittelte *Mühlbauer 2012* Teilsicherheitsbeiwerte für die Klebverbindung sowie den von ihm verwendeten UHPC nach DIN 1055-100-2001. Der Teilsicherheitsbeiwert für die Klebverbindung  $\gamma_{jt}$  beträgt sowohl für den EP-Klebstoff als auch für den RPC-Klebstoff allgemein 1,8. Für den UHPC beträgt der Teilsicherheitsbeiwert unter Druckbeanspruchung  $\gamma_{c,UHPC}$  gleich 1,5 und unter Zugbeanspruchung 1,6. Dadurch wird der Tatsache Rechnung getragen, dass die Betonzugfestigkeit stärker streut als die Druckfestigkeit.

Außer im Falle von mit EP-Klebstoff verklebten Probekörpern aus UHPC der Sorte M5Q lag bei den Zugversuchen eine im Vergleich zu den monolithischen Probekörpern reduzierte Tragfähigkeit vor. *Mühlbauer 2012* führt daher den Fugenfaktor  $j$  ein, mit dem die Schwächung bei der Bemessung zugbeanspruchter Klebverbindungen berücksichtigt wird (siehe Tab. 2.14).

Eine Minderung der Festigkeit durch Langzeitbeanspruchung und Umwelteinflüsse wird durch einen Reduktionsfaktor  $k$  berücksichtigt (siehe Tab. 2.15). Während sich Feuchtigkeit allgemein nicht negativ auf die Fugentragfähigkeit auswirkt, führen erhöhte Umgebungstemperaturen bei Verklebungen mit EP-Klebstoff zu einer Minderung der Fugenfestigkeit. Durch den Faktor  $k_{load}$  werden sowohl festigkeitsmindernde Einflüsse aus zyklischer Beanspruchung als auch Dauerbeanspruchung abgedeckt.

Bei dem Bemessungsansatz von *Mühlbauer 2012* für zugbeanspruchte Klebfugen werden wie auch bei dem Ansatz von *Bergmeister 2001* unterschiedliche Versagenszustände erfasst und so das in den Versuchen beobachtete Tragverhalten abgebildet. Der Bemessungswert der Zugtragfähigkeit für die Klebverbindung mit EP-klebstoff berechnet sich danach wie folgt:

$$f_{tjd,EP} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,85 \cdot \frac{1}{j} \cdot \frac{f_{ctk}}{\gamma_{ij}} \\ k_{load} \cdot k_{temp} \cdot k_{hum} \cdot \frac{f_{gtk}}{\gamma_{ij}} \end{array} \right\} \quad (2.32)$$

Mit Hilfe der ersten Zeile der Gleichung wird hierbei ein oberflächennahes Betonversagen erfasst. Basis ist der charakteristische Wert der Betonzugfestigkeit. Bei dem Faktor 0,85 handelt es sich vermutlich um den Dauerstandsbeiwert  $\alpha_{ct}$  nach *DIN EN*

1992-1-1: 2011-01, mit dem Langzeitbeanspruchung und Umwelteinflüsse erfasst werden.

Durch die zweite Zeile der Gleichung wird ein kohäsives Versagen des Klebstoffs beschrieben. Hierbei bildet die charakteristische einaxiale Zugfestigkeit des EP-Klebstoffs  $f_{gfk}$  bei Raumtemperatur die Basis.

Mühlbauer 2012 geht davon aus, dass für optimal vorbehandelte Klebeflächen bei Zugbeanspruchung die Langzeit-Adhäsionsfestigkeit unter Betriebsbedingungen nicht maßgebend wird.

Tab. 2.14: Fugenfaktor  $j$  in Abhängigkeit der UHPC-Sorte nach Mühlbauer 2012

UHPC-Sorte	Klebstoff	Fugenfaktor $j$
M2Q	EP	1,25
B5Q	EP	1,0
M2Q	RPC	1,5
B5Q	RPC	1,4

Tab. 2.15: Reduktionsfaktoren zur Berücksichtigung von Langzeit- und Umwelteinflüssen (Mühlbauer 2012)

Langzeit-/Umwelteinfluss	Reduktionsfaktor	EP-Klebstoff	RPC-Klebstoff
Last	$k_{load}$	0,4	0,6
Temperatur (50°C)	$k_{temp}$	0,7	1,0
Feuchte	$k_{hum}$	1,0	1,0
Dauerstandsbeiwert	$k_{ges}$	0,28	0,6

In den Schub-Druckversuchen an Klebfugen mit EP-Klebstoff war entweder ein kohäsives Klebstoffversagen oder aber ein Bruch des Probekörpers im Fugenbereich zu beobachten. Bei dem Bemessungsansatz für schub-druckbeanspruchte Klebfugen mit EP-Klebstoff nach Mühlbauer 2012 wird entsprechend zwischen diesen beiden Versagenszuständen unterschieden. Sind die Klebflächen durch Feststoffstrahlen vorbehandelt, kann auch hier ein adhäsives Versagen ausgeschlossen werden. Sowohl um das Versagen der Fügeteile als auch um das kohäsive Versagen der Klebschicht zu beschreiben, bedient sich Mühlbauer 2012 der Hauptspannungshypothese nach Rankin. Das auf Basis der Schub-Druckversuche von Mühlbauer 2012 (siehe Abs. 2.2.4.6) entwickelte bilineare Bruchkriterium zur Beschreibung der Fugenfestigkeit wird nicht berücksichtigt.

Da sich bei Klebverbindungen mit EP-Klebstoff der E-Modul des Klebstoffs von dem der Fügeteile unterscheidet, kommt es, wie in Abs. 2.2.4.2 erläutert wurde, unter Belastung, bedingt durch das unterschiedliche Verformungsverhaltens von Klebstoff und Fügeteil, zu Querkzug- bzw. Querdruckspannungen in der Klebfuge. Es liegt also ein mehraxialer Spannungszustand vor.

Bei einer Druckbeanspruchung kommt es in der Klebfuge zu Querdruckspannungen und in den Fügeteilen im fugennahen Bereich zu Querkzugspannungen. Das Phäno-

men dritt grundsätzlich auch bei zugbeanspruchten Klebverbindungen auf. In der Klebfuge treten in dem Fall entsprechend Querkzugspannungen auf. Bei dem oben aufgeführten Ansatz von *Mühlbauer 2012* für zugbeanspruchte Klebfugen wird dies vernachlässigt.

Für die Bemessung der Klebfuge muss zunächst der darin vorliegende Hauptspannungszustand ermittelt werden. Hierbei können auch die in der Klebfuge auftretenden Querdruckspannungen  $\sigma_{x,EP,d}$  mit berücksichtigt werden. Nach *Mühlbauer 2012* und in Anlehnung an *DAfStb Heft 499* lassen sich diese für dünne Klebfugen ( $b/t_g > 7$ ; mit  $b$  gleich Fugenlänge und  $t_g$  gleich Fugendicke) aus der vorherrschenden Fugen-normalspannung  $\sigma_{y,d}$  sowie mit Hilfe der Materialparameter Querkontraktionszahl  $\nu_i$  und E-Modul  $E_i$  wie folgt berechnen:

$$\sigma_{x,EP,d} = \left( \frac{\nu_{EP}}{E_{EP}} - \frac{\nu_{UHPC}}{E_{UHPC}} \right) \cdot E_{EP} \cdot \sigma_{y,d} \quad (2.33)$$

Aufgrund der Tatsache, dass in der Klebfuge ein zweiachsender Spannungszustand vorliegt, muss für die Bemessung entsprechend die zweiachsende Materialfestigkeit angesetzt werden. Für den Zug-Druckbereich der Hauptspannungsebene kann diese nach *Mühlbauer 2012* folgendermaßen bestimmt werden:

$$f_{2gtd} = \left( \sigma_{gcd,1} - \frac{\tau_{0d}^2}{f_{gtd}} \right) + \sqrt{\left( \sigma_{gcd,1} - \frac{\tau_{0d}^2}{f_{gtd}} \right)^2 - \left( \sigma_{gcd,1}^2 + \tau_{0d}^2 \cdot \left( \frac{2 \cdot \sigma_{gcd,1}}{f_{gtd}} - 4 + \frac{\tau_{0d}^2}{f_{gtd}^2} \right) \right)} \quad (2.34)$$

Mit:

$$\tau_{0d} = \sqrt{\left( f_{gtd} + f_{gcd} \right) \cdot f_{gtd} - f_{gtd}^2} \quad (2.35)$$

Sowie mit:

$\sigma_{gcd,1}$  Bemessungswert der normal zur Hauptzugspannung  $\sigma_{gtd,2}$  wirkenden Hautdruckspannung. Für  $\sigma_{gcd,1}$  gilt:

$$\sigma_{gcd,1} \leq 0 \text{ und } 0 \leq \sigma_{gcd,1} \leq f_{gcd}$$

Außerdem ist  $f_{gtd}$  der Bemessungswert der einaxialen Klebstoffzugfestigkeit und  $f_{gcd}$  der Bemessungswert der einaxialen Klebstoffdruckfestigkeit, welche sich entsprechend Gl. (2.32) Zeile zwei ermitteln lassen.

Der Nachweis der Fugentragfähigkeit für ein Versagen Klebschicht gilt als erbracht, wenn der Bemessungswert der einwirkenden Hautzugspannung  $\sigma_{gcd,2}$  kleiner als der Bemessungswert der zweiachsenden Zugfestigkeit  $f_{2gcd}$  ist.

Für die Bemessung des Betons im fugennahen Bereich muss zunächst ebenfalls der dort vorliegende Hauptspannungszustand ermittelt werden. Auch hier können für eine geringe Druckbeanspruchung dabei auftretende Querkzugspannungen berücksichtigt werden. Bei einer hohen Drucknormalspannung müssen diese bei der Fugenbemessung nach *DAfStb Heft 499* berücksichtigt werden.

Die aus der Querdehnungsbehinderung für den Beton resultierenden Querzugspannungen lassen sich nach *Mühlbauer 2012* und in Anlehnung an *DAfStb Heft 499* wie folgt ermitteln:

$$Z_{qd,UHPC,d} = 1,25 \cdot \sigma_{x,EP,d} \cdot h_0 \cdot \frac{t_g}{2} \quad (2.36)$$

Hierbei ist  $h_0$  die Bauteildicke und  $t_g$  die Fugendicke.

Je nach dem welcher Spannungszustand vorliegt, ist für den Nachweis der Fugentragfähigkeit entweder der Bemessungswert der einaxialen Zug- bzw. Druckfestigkeit im fugennahen Beton oder aber der Bemessungswert der zweiaxialen Zug- bzw. Druckfestigkeit anzusetzen. Können die Spannungen dabei vom Beton nicht aufgenommen werden, ist nach *DAfStb Heft 499* in den Füge­teilen im Fugenbereich eine entsprechende Querbewehrung vorzusehen.

Der Bemessungswert der einaxialen Zug- bzw. Druckfestigkeit ( $f_{ctjd}$  und  $f_{cjd}$ ) im fugennahen Beton kann gemäß Gl. (2.32) Zeile eins sowie nach Gl. (2.40) ermittelt werden. Nach *Mühlbauer 2012* lässt sich der Bemessungswert der zweiaxialen Zugfestigkeit für den fugennahen Beton im Zug-Druckbereich der Hauptspannungsebene wie folgt berechnen:

$$f_{2ctjd} = f_{ctjd} + \sigma_{cd,1} \cdot \frac{f_{ctjd}}{f_{cjd}} \quad (2.37)$$

Hierbei ist  $\sigma_{cd,1}$  der Bemessungswert der normal zur Hauptzugspannung  $\sigma_{gtd,2}$  wirkenden Hauptdruckspannung. Für  $\sigma_{cd,1}$  gilt:

$$\sigma_{cd,1} \leq 0 \text{ und } 0 \leq |\sigma_{cd,1}| \leq f_{cjd}$$

Anstatt des Bemessungswerts der zweiaxialen Druckfestigkeit des fugennahen Betons für den Druck-Druckbereich der Hauptspannungsebene  $f_{2cjd}$  wird von *Mühlbauer 2012* auf der sicheren Seite liegend der Wert der einaxialen Druckfestigkeit  $f_{cjd}$  angesetzt.

Der Nachweis der Klebverbindung für ein Versagen im fugennahen Beton gilt als erbracht, wenn der Bemessungswert der einwirkenden Hautzugspannung  $\sigma_{gtd,2}$  kleiner als der Bemessungswert der zweiaxialen Zugfestigkeit  $f_{2gtd}$  ist.

Für zugbeanspruchte Klebverbindungen mit RPC-Klebstoff berechnet sich der Bemessungswert der Zugtragfähigkeit nach *Mühlbauer 2012* wie folgt:

$$f_{tjd,RPC} = \min \left\{ \begin{array}{l} k_{load} \cdot k_{temp} \cdot k_{hum} \cdot \frac{1}{j} \cdot \frac{f_{ctk}}{\gamma_{ij}} \\ 0,85 \cdot \frac{f_{gtk}}{\gamma_{ij}} \end{array} \right\} \quad (2.38)$$

Mit Hilfe der ersten Zeile der Gleichung wird ein adhäsives Fugenversagen abgebildet. Die Basis bildet wiederum der charakteristische Wert der Betonzugfestigkeit. Im Falle des RPC-Klebstoffs ergeben sich lediglich festigkeitsmindernde Einflüsse infol-

ge zyklischer Beanspruchung sowie Dauerbeanspruchung, welche durch den Faktor  $k_{load}$  (siehe Tab. 2.15) berücksichtigt werden.

Auf Basis der charakteristischen Zugfestigkeit des EP-Klebstoffs  $f_{gtk}$  bei Raumtemperatur wird durch die zweite Zeile ein kohäsives Versagen des Klebstoffs beschrieben. Hierbei werden negative Einflüsse aus Langzeitbeanspruchung und Umwelteinflüsse durch den Faktor 0,85 berücksichtigt. Hierbei handelt es sich um den Dauerstandsbeiwert  $\alpha_{ct}$  nach *DIN EN 1992-1-1: 2011-01*.

In den Schub-Druckversuchen an Klebfugen mit RPC-Klebstoff war allgemein ein adhäsives Versagen zu verzeichnen, welches sich nach *Mühlbauer 2012* durch ein lineares Bruchkriterium beschreiben lässt. Der charakteristische Wert der Fugenfestigkeit unter Schub-Druckbeanspruchung kann danach wie folgt ermittelt werden:

$$\tau_{u,k} = 0,85 \cdot \tau_{u,m} = 0,85 \cdot (5,5 - 1,0 \cdot \sigma_{cnd}) \quad (2.39)$$

Hierbei ist  $\sigma_n$  die in der Fuge vorliegende Drucknormalspannung, für die gilt:

$$\sigma_{cnd} \leq 0 \text{ und } |\sigma_{cnd}| \leq f_{cjd}$$

Die Druckfestigkeit der mit RPC-Klebstoff ausgeführten Klebfuge  $f_{cjd}$  kann unter Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwerts für die Klebfuge von  $\gamma_j$  gleich 1,8 folgendermaßen berechnet werden:

$$f_{cjd} = 0,85 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_j} \quad (2.40)$$

Der Bemessungswert der Fugenfestigkeit unter Schub-Druckbeanspruchung für RPC-Klebstoffverbindungen lässt sich mit Hilfe der nachfolgenden Gleichung bestimmen:

$$\tau_{ud} = k_{load} \cdot k_{temp} \cdot k_{hum} \cdot \frac{\tau_{u,k}}{\gamma_j} \quad (2.41)$$

Eine Minderung der Festigkeit durch Langzeitbeanspruchung und Umwelteinflüsse wird wiederum durch den Reduktionsfaktor  $k$  berücksichtigt (siehe Tab. 2.15). Der Teilsicherheitsbeiwert für die Klebfuge  $\gamma_j$  beträgt auch hier 1,8.





### 3 Verwendete Werkstoffe

#### 3.1 Hochleistungsbeton

##### 3.1.1 Verwendete Betonrezepturen

Zur Herstellung der Versuchskörper wurde sehr gefügedichter, selbstverdichtender Feinkornbeton mit Druckfestigkeiten von rund 130 N/mm<sup>2</sup> verwendet. Bei den im Rahmen der Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurden dabei drei unterschiedliche Betonrezepturen eingesetzt (siehe Tab. 3.1). Hinsichtlich ihrer Zusammensetzung gleichen die Rezepturen denen von Ultrahochleistungsbetonen (UHPC). Nach der Definition von *Schmidt 2008* ist der verwendete Beton aufgrund seiner Druckfestigkeit von im Mittel rund 145 N/mm<sup>2</sup> jedoch als Hochleistungsbeton (HPC) einzustufen.

Tab. 3.1: Mischungszusammensetzung der verwendeten Hochleistungsbetone

Rohstoff	Bezeichnung	HPC-1 [kg/m <sup>3</sup> ]	HPC-2 [kg/m <sup>3</sup> ]	HPC-3 [kg/m <sup>3</sup> ]
Zement	CEM I 42,5 R HS	831,6	695	695
Wasser	Wasser	73,8	101	101
Zuschlag	Sand 0/2	694	0	0
	Quarzsand 0,125/0,5	223,9	779	779
Zusatzstoff	Quarzmehl QM 1600	205,4	487	487
	Mikrosilika (incl. 50% Wasser)	249,5	216	216
Stahlfasern	DM 6/0,17	-	-	153,6
Zusatzmittel (Fließmittel)	Glenium ACE30	35,8	-	-
	Glenium 51	-	29,9	29,9

Die am Fachgebiet für Werkstoffe im Bauwesen der TU Kaiserslautern entwickelte und bei den ersten Tastversuchen eingesetzte Rezeptur HPC-1 wies einen Wasserzementwert von 0,27 auf. Das Größtkorn betrug 2 mm. Hierbei wurde Mikrosilika EMSAC 500 S der Fa. BASF als Suspension mit einem Wassergehalt von 50 M.-% verwendet. Bei dem verwendeten Glenium ACE 30 handelt es sich um ein von der Fa. BASF hergestelltes PCE-Fließmittel.

Die Rezeptur HPC-2 wurde von *Heese 2013* im Rahmen seiner Dissertation entwickelt und hinsichtlich ihrer rheologischen Eigenschaften optimiert. Diese wies ein Größtkorn von 0,5 mm und einen Wasserzementwert von 0,33 auf. Aufgrund des geringeren Größtkorndurchmessers ist auch bei der Herstellung von Bauteilen mit mehrlagig angeordneter Mikrobewehrung eine gute Durchdringung mit Feinkornbeton sichergestellt. Die Gefahr einer Entmischung durch die von Hauser beschriebene Siebwirkung der Bewehrung wird so verhindert. Anstelle des Glenium ACE30 wurde das PCE-Fließmittel Glenium 51 der Fa. BASF eingesetzt.

Die Rezeptur HPC-3 glich der Rezeptur HPC-2, jedoch enthält diese zusätzlich Mikrostahtfasern mit einem Durchmesser von 0,175 mm und einer Länge von 6 mm. Der Stahtfasergehalt betrug 2,0 Vol.-%.

#### 3.1.2 Herstellung

Die auf 7°C temperierten Ausgangsstoffe wurden entsprechend der in Tab. 3.2 aufgeführten Mischanleitung in einem Einwellen-Zwangsmischer mit einem Fassungsvermögen von 80 Litern hergestellt.

Das Herunterkühlen der Ausgangsstoffe wirkt sich zum einen positiv auf die Verarbeitbarkeit des Betons aus und zum anderen sollte so die Gefahr einer durch inneren Zwang infolge abfließender Hydratationswärme hervorgerufenen Rissbildung bei den Versuchskörpern minimiert werden.

Tab. 3.2: Mischreihenfolge und Mischzeiten bei der Betonherstellung

Schritt	Vorgang/Zugabe	Mischzeit [min]	Mischgeschw. [1/min]
1	Quarzsand + Quarzmehl + Zement	0-2	30
2	Silikasuspension und Wasser	2-4	30
3	75 % Fließmittel	4-7	30
4	Mischgeschwindigkeit erhöhen	7-10	60
5	25 % Fließmittel (evtl. Stahlfasern)	10-14	60
6	langsameres Nachmischen	14-15	20

Die Herstellung der Versuchskörper HZ3 zur Bestimmung der Haftzugfestigkeit nach Abs. 5.1.3 erfolgte in einem Vakuum-Intensivmischer der Fa. Eirich mit einem Fassungsvermögen von 75 Litern. Hierbei waren die Ausgangsstoffe vorher jedoch nicht heruntergekühlt worden.

#### 3.1.3 Materialeigenschaften

Grundsätzlich wurden die Materialeigenschaften des verwendeten Betons im Zuge der unterschiedlichen Versuchsreihen ermittelt.

Hierbei wurden im Allgemeinen die Druckfestigkeit an mindestens drei Würfeln mit Seitenlängen von entweder 150 mm oder 100 mm nach *DIN EN 12390-3: 2009-07* sowie die Biegezugfestigkeit und die Druckfestigkeit an mindestens drei Prismen mit den Abmessungen 40x40x160 mm nach *DIN 18555-3: 1982-09* am Versuchstag bestimmt. Die dafür benötigten Würfel oder Prismen wurden bis zur Prüfung bei den Versuchskörpern gelagert. Während die Versuchskörper für die Bauteilversuche nach der Betonage mit feuchten Stofftüchern abgedeckt wurden, wurden die bei den Untersuchungen zur Formulierung eines Bruchkriteriums für die Klebfuge eingesetzten Schub-Druck- und Schub-Zugprobekörper gemeinsam mit den Würfeln und Prismen in einem Wasserbad gelagert. Die bei den Bauteilversuchen am Versuchstag vorliegende Betondruck- und Betonzugfestigkeit ist als Mittelwert im Anhang aufgeführt.

Bei der Herstellung der Versuchskörper wurden außerdem in den meisten Fällen die Frischbetoneigenschaften ermittelt. Neben der Frischbetonrohddichte nach *DIN EN 12350-6: 2011-03* und dem Luftporengehalt nach *DIN EN 12350-7: 2009-08* wurden bei den einzelnen Chargen das Setzfließmaß und die Zeit  $t_{500}$  nach *DIN EN 12350-8: 2010-12* bestimmt.

Zur Charakterisierung der verschiedenen Hochleistungsbetone wurden im Vorfeld der eigentlichen Versuche Probemischungen durchgeführt und dabei die Fest- und Frischbetoneigenschaften ermittelt (siehe Tab. 3.3 und Tab. 3.4). Die dabei hergestellten Würfel, Zylinder sowie Prismen wurden in einem Wasserbad gelagert und in einem Alter von 49 bis 53 Tagen geprüft. Die Probekörper zur Bestimmung der zentrischen Zugfestigkeit wurden bis zur Prüfung im Alter von 50 Tagen in einem Wasserbad gelagert.

Tab. 3.3: In Probemischungen ermittelte Frischbetoneigenschaften

		HPC-1	HPC-2	HPC-3
Setzfließmaß $SF$	[mm]	860	990	890
Zeit $t_{500}$	[s]	4,8	5,5	5,0
Frischbetonrohddichte $D$	[kg/dm <sup>3</sup> ]	2,34	2,31	2,38
Luftporengehalt $A_c$	[%]	3,5	2,3	2,3

Die drei HPC-Rezepturen wiesen allgemein eine sehr fließfähige Konsistenz auf. Das Setzfließmaß lag bei rund 900 mm und die Zeit  $t_{500}$  betrug jeweils ca. 5 s. Zusätzlich zur Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit an jeweils sechs Würfeln (Seitenlänge 150 mm) sowie Prismen wurden im Rahmen der Voruntersuchungen die Spaltzugfestigkeit nach *DIN EN 12390-6: 2010-09* und der Elastizitätsmodul in Anlehnung an *DIN 1048-5: 1991-06* an sechs Zylindern mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 300 mm bestimmt. Für den HPC-2 und den HPC-3 wurde zusätzlich der Elastizitätsmodul an drei Prismen in Anlehnung an *DIN EN 13412: 2006-11* ermittelt. In Zugversuchen wurde außerdem die zentrische Zugfestigkeit des HPC-2 bestimmt. Der dabei verwendete Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung werden in Abs. 4.1.4 beschrieben.

Tab. 3.4: In Probemischungen ermittelte Festbetoneigenschaften

		HPC-1	HPC-2	HPC-3
Mittlere Rohddichte $\rho_c$	[kg/dm <sup>3</sup> ]	2,32	2,30	2,49
Mittlere Druckfestigkeit $f_{cm,cube,150}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	136,0	138,9	142,8
Mittlere Druckfestigkeit $f_{cm,fl}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	123,6	126,6	132,5
Mittlere Spaltzugfestigkeit $f_{ctm,sp}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	6,2	6,9	-
Mittlere Biegezugfestigkeit $f_{ctm,fl}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	13,37	16,3	15,2
Mittlere zentrische Zugfestigkeit $f_{ctm}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	-	8,33	-
Mittlerer Elastizitätsmodul $E_{cm}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	37.912	39.090	-
Mittlerer Elastizitätsmodul $E_{cm,fl}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	-	40.705	44.073

Anzumerken ist, dass die Materialfestigkeit von Beton nicht unerheblichen Streuungen unterliegt. Die im Rahmen der Voruntersuchungen an lediglich sechs in einer Betoniercharge hergestellten Prüfkörpern ermittelten Kenngrößen sind daher nur als grobe Anhaltswerte zu sehen.

Im Rahmen der Arbeit wurde eine Vielzahl an Würfeln und Prismen geprüft und die Betondruck- sowie die Biegezugfestigkeit bestimmt. Das Alter des Betons lag dabei

in der Regel zwischen 37 und 56 Tagen. Für den HPC-2 wurden die Ergebnisse gemeinsam ausgewertet (siehe Tab. 3.5). Hierbei muss zwischen der Lagerungsart der Versuchskörper bis zur Prüfung, unterschieden werden.

Tab. 3.5: Festigkeitskennwerte des HPC-2 ermittelt auf Grundlage aller im Rahmen der Arbeit durchgeführten Prüfungen

			nass <sup>1</sup>	trocken <sup>2</sup>
Mittlere Druckfestigkeit	$f_{cm,cube150}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	137,9	139,3
Variationskoeffizient		[%]	6,63	4,57
Versuchsanzahl	$n$	[-]	33	25
Mittlere Druckfestigkeit	$f_{cm,fl}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	129,8	135,3
Variationskoeffizient		[%]	9,48	15,89
Versuchsanzahl	$n$	[-]	104	145
Mittlere Biegezugfestigkeit	$f_{ctm,fl}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	13,5	11,9
Variationskoeffizient		[%]	17,02	30,61
Versuchsanzahl	$n$	[-]	62	74

<sup>1</sup> in einem Wasserbad gelagert

<sup>2</sup> mit feuchten Tüchern abgedeckt

Die an wassergelagerten Prüfkörpern ermittelte Druckfestigkeit war grundsätzlich geringer als die an unter feuchten Tüchern gelagerten Prüfkörpern ermittelte Druckfestigkeit. Im Gegensatz dazu wiesen die wassergelagerten Prismen eine höhere Biegezugfestigkeit als die unter feuchten Tüchern gelagerten Prismen auf. Die an Prismen nach *DIN 18555-3: 1982-09* ermittelte Druckfestigkeit war geringer als die Würfeldruckfestigkeit und wies eine größere Streuung auf, was sich in einem höheren Variationskoeffizient widerspiegelt. Bei den Biegezugversuchen war allgemein eine deutlich größere Streuung der Ergebnisse zu verzeichnen als bei den Druckversuchen. Außer was die Würfeldruckfestigkeit angeht, war die Streuung in den an unter feuchten Tüchern gelagerten Prüfkörpern durchgeführten Versuchen größer als in den an wassergelagerten Prüfkörpern durchgeführten Versuchen.

Eine Ursache für die Streuungen liegt darin begründet, dass sich das Alter der Probekörper zum Zeitpunkt der Prüfung unterschied und dieses Einfluss auf die Betonfestigkeit hat. Die Streuungen sind weiterhin durch einen schwankenden Luftporengehalt zu erklären. Bei den Untersuchungen war ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Luftporengehalt und Betonfestigkeit festzustellen. Ein hoher Luftporengehalt wirkt sich insbesondere negativ auf die Betonzugfestigkeit aus. Außerdem hat sich gezeigt, dass das Zementalter bei der Verarbeitung erheblichen Einfluss auf die Betonfestigkeit hat und darin ein Grund für die Streuungen der Betonfestigkeit liegt. Bei älterem Zement fielen die Festigkeiten der damit hergestellten Betone deutlich geringer aus.

Aufgrund des relativ geringen Fassungsvermögens des Mischers wurde bei der Herstellung der Probekörper für die Bauteilversuche sowie der Schub-Druck- und Schub-Zugprobekörper mit der Zeit auf Würfel mit einer Kantenlänge von 100 mm zurückgegriffen anstatt auf Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm. Teilweise wurden

auch nur Prismen zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften des HPC's hergestellt. Um die Versuche gemeinsam auszuwerten und die Ergebnisse vergleichen zu können, müssen diese entsprechend umgerechnet werden.

Nach *Hegger et al 1999* lässt sich die an nass gelagerten Würfeln mit einer Kantenlänge von 100 mm ermittelte Druckfestigkeit  $f_{cm,cub100}$  sowohl für normalfesten Beton als auch für hochfesten Beton wie folgt auf eine 150er Würfel-Druckfestigkeit  $f_{cm,cub150}$  umrechnen:

$$f_{cm,cub150} = 0,900 \cdot f_{cm,cub100} \quad (3.1)$$

Die Ergebnisse der eigenen Prüfungen an 150er und 100er Würfeln bestätigen den von *Hegger et al 1999* angegebenen Umrechnungsbeiwert von 0,900.

Auf Basis der eigenen Ergebnisse von Druckprüfungen an Würfeln und Prismen wurden weitere Umrechnungsbeiwerte ermittelt. Hierbei wurden im Gegensatz zu dem Vorgehen im Zusammenhang mit der Ermittlung der Kennwerte in Tab. 3.5 nicht alle im Rahmen der Arbeit durchgeführten Prüfungen berücksichtigt, sondern lediglich Chargen, wo Ergebnisse von Würfel- und Prismenprüfungen vorlagen.

Die mittlere Betondruckfestigkeit von wassergelagerten 150er Würfeln  $f_{cm,cub150}$  lässt sich näherungsweise aus der von an unter feuchten Tüchern gelagerten Würfeln ermittelten Druckfestigkeit mit den gleichen Abmessungen  $f_{cm,cub150,dry}$  mit folgender Gleichung berechnen:

$$f_{cm,cub150} = 0,99 \cdot f_{cm,cub150,dry} \quad (3.2)$$

Eine Umrechnung von Druckfestigkeiten ermittelt, an unterschiedlich gelagerten Prismen, ist folgendermaßen möglich:

$$f_{cm,fl} = 0,90 \cdot f_{cm,fl,dry} \quad (3.3)$$

Aus der an unter feuchten Tüchern gelagerten Prismen ermittelten Betondruckfestigkeit  $f_{cm,fl,dry}$  kann die Würfel-Druckfestigkeit  $f_{cm,cub150,dry}$  näherungsweise wie folgt bestimmt werden:

$$f_{cm,150,dry} = 0,95 \cdot f_{cm,fl,dry} \quad (3.4)$$

Die Betondruckfestigkeit  $f_{cm,cub150,dry}$  lässt sich aus der an nass gelagerten Prismen ermittelten Druckfestigkeit  $f_{cm,fl}$  mit Hilfe der folgenden Gleichung näherungsweise berechnen:

$$f_{cm,cub150} = 1,05 \cdot f_{cm,fl} \quad (3.5)$$

Neben der Druckfestigkeit ist außerdem die zentrische Zugfestigkeit des Bauteilbetons zum Zeitpunkt der Versuche von Interesse. Die versuchstechnische Ermittlung ist jedoch deutlich aufwändiger. Die Zugfestigkeit von Beton wird deshalb in der Regel indirekt in Spaltzugversuchen oder Biegezugversuchen ermittelt. Außerdem finden sich in der Literatur Ansätze, mit denen die zentrische Zugfestigkeit  $f_{ctm}$  aus der Betondruckfestigkeit abgeleitet werden kann. Die in der *DIN EN 1992-1-1: 2011-01* enthaltene Gleichung passt *Fitik 2012* für einen feinkörnigen sowie einen grobkörnigen Hochleistungsbeton an. Im Falle des feinkörnigen Betons lässt sich dabei der

Zusammenhang zwischen Zylinderdruckfestigkeit  $f_{cm}$  und zentrischer Zugfestigkeit  $f_{ctm}$  wie folgt abbilden:

$$f_{ctm} = 3,95 \cdot \ln\left(1 + \frac{f_{cm}}{10}\right) \quad (3.6)$$

Für den im Rahmen der Arbeit verwendeten Hochleistungsbeton gilt folgender Zusammenhang zwischen Würfeldruckfestigkeit  $f_{cm,cub}$  und zentrischer Zugfestigkeit  $f_{ctm}$ :

$$f_{ctm} = 3,95 \cdot \ln\left(1 + \frac{f_{cm,cub}}{10}\right) \quad (3.7)$$

Sowohl für Normalbeton als auch für Hochleistungsbeton existieren Gleichungen, mit denen sich die zentrische Zugfestigkeit  $f_{ctm}$  aus der Spaltzugfestigkeit  $f_{ctm,sp}$  oder der Biegezugfestigkeit  $f_{ctm,fl}$  berechnen lässt. Die in der Literatur beschriebenen Ansätze liefern jedoch sehr unterschiedliche Ergebnisse, welche sich alleine nicht durch Unterschiede in der Betonzusammensetzung erklären lassen. Anders als im Falle der Druckfestigkeit unterscheiden sich der Versuchsaufbau und damit die Beanspruchung bei den verschiedenen Verfahren zur Ermittlung der Zugfestigkeit grundsätzlich. Während Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung sowie die Abmessungen der Probekörper im Zusammenhang mit der Bestimmung der Biegezugfestigkeit in *DIN 18555-3: 1982-09* geregelt sind, unterscheiden sich die Methoden zur Bestimmung der zentrischen Zugfestigkeit. Der Versuchsaufbau und die Probekörpergeometrie haben jedoch einen erheblichen Einfluss auf die Versuchsergebnisse (vgl. *Trunk 1999*).

Nach *Schmidt 2008* entspricht die zentrische Zugfestigkeit  $f_{ctm}$  bei UHPC in etwa der Spaltzugfestigkeit  $f_{ctm}$ . Aus der Biegezugfestigkeit  $f_{ctm,fl}$  kann danach die zentrische Zugfestigkeit  $f_{ctm}$  wie folgt ermittelt werden:

$$f_{ctm} = f_{ctm,fl} \cdot \frac{2 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^{0,7}}{1 + 2 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^{0,7}} \quad (3.8)$$

Mit:

$h_0$       gleich 100 mm (nach *DIN 18555-3: 1982-09*)

$h$         gleich 40 mm (nach *DIN 18555-3: 1982-09*)

Ergibt sich:

$$f_{ctm} \approx 0,5 \cdot f_{ctm,fl} \quad (3.9)$$

Für den im Rahmen der Arbeit eingesetzten HPC kann in Anbetracht der eigenen Versuchsergebnisse (siehe Tab. 3.4) die zentrische Zugfestigkeit durch den Ansatz brauchbar abgeschätzt werden.

Die für den HPC-2 empirisch ermittelten Gl. (3.2) bis Gl. (3.5) sowie die Gl. (3.9) wurden im Zusammenhang mit der Auswertung der Bauteilversuche vereinfacht auch für den HPC-1 angewendet. Grundsätzlich bleibt anzumerken, dass die Gleichungen

auf einer relativ geringen Anzahl an Versuchen basieren, weshalb sie nicht zur Ermittlung von Bemessungswerten herangezogen werden sollten.

## **3.2 Klebstoff auf Zementbasis**

### **3.2.1 Allgemeines**

Wie die Untersuchungen von *Mühlbauer 2012* belegen, sind Klebstoffe auf Zementbasis alterungsbeständig und weitestgehend unempfindlich gegenüber Umwelteinflüssen (siehe Abs. 2.2.3.3). Der von ihm entwickelte RPC-Klebstoff zeichnet sich außerdem durch seine Leistungsfähigkeit bei erhöhten Umgebungstemperaturen aus. Vorteilhaft ist zudem, dass der Klebstoff annähernd gleiche Materialeigenschaften wie der Beton der Fügebauteile besitzt und daraus eine gleichmäßige Spannungsverteilung im Bereich der Klebung resultiert. Für Schub-Druck- und zugbeanspruchte Klebverbindungen steht ein entsprechender Bemessungsansatz zur Verfügung.

Der Einsatz von industriell hergestellten Hochleistungsmörteln als Klebstoff ist in vielerlei Hinsicht vorteilhaft und stellt eine vielversprechende Alternative zu dem RPC-Klebstoff dar. Sie zeichnen sich durch gute mechanische Eigenschaften und eine auf den jeweiligen Einsatz abgestimmte Verarbeitbarkeit aus. Durch eine Güteüberwachung wird eine gleichbleibende Qualität erreicht, die auch für das Kleben von zentraler Bedeutung ist.

### **3.2.2 Verwendete Klebstoffe**

#### **3.2.2.1 Hochleistungsmörtel HPM**

Im Rahmen der Arbeit wurden zwei Hochleistungsmörtel eingesetzt, die auf der von *Mühlbauer 2012* entwickelten Rezeptur basieren (siehe Tab. 3.6). Die Klebstoffe werden im Weiteren als „High Performance Mortar“, kurz HPM, bezeichnet. Dabei wurde grundsätzlich der gleiche Zement eingesetzt wie auch zur Herstellung des Hochleistungsbetons.

Der Hochleistungsmörtel HPM-1 kam bei ersten Tastversuchen zum Einsatz. Dafür wurde im Labor für konstruktiven Ingenieurbau vorhandenes Quarzmehl, Silikapulver sowie Fließmittel verwendet (siehe Tab. 3.6) und die Rezeptur von *Mühlbauer 2012* modifiziert. Hierbei konnte nur durch eine Erhöhung des Fließmittelgehalts und des Wassergehalts eine für das Verkleben geeignete Konsistenz erzielt werden. Der Fließmittelgehalt wurde dabei auf rund 6,5 Gew.-%, bezogen auf den Zementgehalt, begrenzt. Der Mörtel besaß ein Größtkorn von 0,3 mm und mit 0,32 einen im Vergleich zu der Rezeptur von *Mühlbauer 2012* deutlich höheren Wassermengeanteil.

Tab. 3.6: Mischungszusammensetzung der verwendeten Klebstoffe auf Zementbasis

Rohstoff	Bezeichnung	HPM-1 [kg/m <sup>3</sup> ]	HPM-2 [kg/m <sup>3</sup> ]	HFL [kg/m <sup>3</sup> ]
Zement	CEM I 42,5 R HS	730	730	-
Trockenmörtel	Pagel Hochfestleim	-	-	1970
Wasser	Wasser	203,3	200	256
Zuschlag	Quarzand 0,06/0,3	995,8	-	-
	Quarzsand 0,06/0,2 (BSC413)	-	995,8	-
Zusatzstoff	Quarzmehl QM 1600	262,8	-	-
	Quarzmehl W12	-	262,8	-
	RW Silicum	189,8	-	-
	Mikrosilica Grade 940	-	189,8	-
Zusatzmittel (Fließmittel)	Glenium ACE30	48,5	-	-
	Glenium 51	-	47,8	-

Insgesamt besaß der HPM-1 schlechtere mechanische Eigenschaften als der RPC-Klebstoff (siehe Abs. 3.2.4). Daher sollte der Mörtel für die weiteren Untersuchungen verbessert werden. Auf Grund der Tatsache, dass die von *Mühlbauer 2012* eingesetzten Ausgangsstoffe größtenteils nicht mehr erhältlich waren, mussten diese durch ähnliche Komponenten ersetzt werden. Das Glenium ACE30 wurde gegen das leistungsfähigere Fließmittel Glenium 51 ausgetauscht.

In Vorversuchen wurde versucht, die Rezeptur zu optimieren. Ziel war es, den Wassergehalt zu reduzieren, ohne dass dadurch die rheologischen Eigenschaften beeinträchtigt werden. Der Fließmittelgehalt wurde ebenfalls auf 6,5 Gew.-%, bezogen auf den Zementgehalt, begrenzt, um negativen Auswirkungen auf den Erhärtungsprozess vorzubeugen. Auch mit veränderten Ausgangsstoffen gelang es jedoch nicht, die mechanischen Eigenschaften nennenswert zu verbessern (siehe Tab. 3.9). Der HPM-2 wies ebenfalls einen Wasserzementwert von 0,32 auf und das Größtkorn lag bei 0,2 mm.

#### 3.2.2.2 Pagel Hochfestleim HFL

Wie sich gezeigt hat, ist der RPC-Klebstoff problematisch, was die Reproduzierbarkeit angeht. Kleinste Veränderungen bei den Mischungsbestandteilen können sich in hohem Maße negativ auf die rheologischen Eigenschaften und die Festigkeit des Klebstoffes auswirken.

Als praxistaugliche Alternative wurde daher außerdem ein Hochleistungsmörtel der Fa. Pagel eingesetzt. Bei dem sogenannten Hochfestleim (HFL) handelt es sich um einen rein zementgebundenen hochfesten Werk trockenmörtel mit einem Größtkorn von 0,25 mm. Die Festigkeiten liegen mit einer Druckfestigkeit von  $\geq 120$  N/mm und einer Biegezugfestigkeit von  $\geq 20$  N/mm<sup>2</sup> (jeweils nach Herstellerangabe) in derselben Größenordnung wie der des RPC-Klebstoffes von *Mühlbauer 2012*. Der zum Verfüllen von Fugen entwickelte hoch fließfähige und formstabile Mörtel – er besitzt laut Hersteller nach 24 h ein Quellmaß von 0,1 Vol. % - ist bislang jedoch nicht im Handel erhältlich.



In Vorversuchen wurde der Wassergehalt so eingestellt (siehe Tab. 3.6), dass sich die Konsistenz für das Vergießen der Klebfugen eignet. Dieser lag mit 13 % an der unteren Grenze des vom Hersteller empfohlenen Gehalts.

### 3.2.3 Herstellung

Für Vorversuche wurde eine größere Menge des HPM-1 entsprechend der in Tab. 3.2 aufgeführten, für die Herstellung von Hochleistungsbeton entwickelten Mischanlage in einem Einwellen-Zwangsmischer mit einem Fassungsvermögen von 80 Litern hergestellt. Kleinere Mengen wurden in einem Zwangsmischer mit einem Fassungsvermögen von einem Liter gemischt. Der Klebstoff war insgesamt jedoch schwierig zu verarbeiten und wies einen relativ hohen Luftporengehalt auf.

Einen erheblichen Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften von Beton und auch von Mörtel hat die verwendete Mischeinrichtung. Zur Herstellung des HPM-1 und HPM-2 wurde daher weiterhin ein Intensivmischer der Fa. Eirich mit einem Fassungsvermögen von 5 Litern verwendet. Dadurch konnten die Frischmörteleigenschaften im Hinblick auf das Kleben deutlich verbessert werden.

Großen Einfluss auf die Frischbetoneigenschaften haben außerdem die Mischreihenfolge und die Mischzeiten. Bei den Bauteilversuchen wurde der HPM-2 nach der in Tab. 3.7 aufgeführten Mischanlage in Anlehnung an *Mühlbauer 2012* hergestellt. Die Fließfähigkeit konnte dadurch nochmal gesteigert werden.

Zur Herstellung des HFL's wurde allgemein ein Zwangsmischer mit einem Fassungsvermögen von einem Liter verwendet. Hierbei wurde der Mörtel zunächst mit 90 % des Anmachwassers fünf Minuten lang gemischt. Nach einer einminütigen Pause wurde das restliche Wasser zugegeben und weitere fünf Minuten gemischt.

Vor dem Verarbeiten wurde der HPM rund fünf Minuten und der HFL rund zehn Minuten ruhen gelassen, damit dieser entlüften konnte.

Tab. 3.7: Mischreihenfolge und Mischzeiten bei der Herstellung des HPM

Schritt	Vorgang/Zugabe	Mischzeit [min]	Mischgeschw. [l/min]
1	Quarzmehl + Zement (vormischen)	0-1	150
2	Wasser +75 % Fließmittel	1-3	150
3	Silikapulver	3-5	150
4	Pause	5-6	150
5	25 % Fließmittel	6-8	300
6	Quarzsand	8-11	300
7	langsames Nachmischen	11-12	50

### 3.2.4 Materialeigenschaften

Wie auch für den Beton wurden die Materialeigenschaften des Klebstoffs im Zuge der unterschiedlichen Versuchsreihen ermittelt.

Hierbei wurden die Biegezugfestigkeit und die Druckfestigkeit an in der Regel drei Prismen mit den Abmessungen 40x40x160 mm nach *DIN 18555-3: 1982-09* am Versuchstag bestimmt. Die dafür benötigten Prismen wurden bis zur Prüfung bei den Versuchskörpern trocken gelagert oder mit feuchten Tüchern abgedeckt. Die bei den Bauteilversuchen am Versuchstag vorliegenden Druck- und Biegezugfestigkeit des Klebstoffs sind als Mittelwerte im Anhang aufgeführt.

Tab. 3.8: In Probemischungen ermittelte Frischmörteleigenschaften

		HPM-1	HPM-2	HFL
Ausbreitmaß	[mm]	135	170	>300
Frischbetonrohddichte $D$	[kg/dm <sup>3</sup> ]	2,27	2,27	2,40
Luftporengehalt $A_c$	[%]	5,2	2,7	2,1

Zur Charakterisierung der verschiedenen Klebstoffe wurden im Vorfeld der eigentlichen Versuche wiederum Probemischungen durchgeführt.

Die dabei in Anlehnung an *DIN 18555-2: 1982-09* ermittelten Frischmörteleigenschaften sind in Tab. 3.8 aufgeführt. Während der HPM-1 nach *DIN 18555-2: 1982-09* als steif einzustufen ist, fällt der HPM-2 in die Kategorie plastisch. Der HFL kann als fließfähig bezeichnet werden und ist zum Vergießen von Klebfugen geeignet. Im Falle des HPM-1 und HPM-2 können die Fügeile nur mit Mörtel bestrichen und anschließend zusammengepresst werden. Die Verarbeitungszeit der Klebstoffe beträgt im Normalklima ca. 45 min, wobei insbesondere bei dem HPM nach kurzer Zeit eine „Hautbildung“ einsetzt. Bei einer steifen Konsistenz des Mörtels kann dieser nicht in dem gewünschten Maße entlüften, was sich in einem hohen Luftporengehalt widerspiegelt.

Weiterhin wurde der Erstarrungsverlauf mit dem Knetbeutelverfahren in Anlehnung an *DIN 18218: 2010-01* bestimmt. Während der HFL bereits nach sechs Stunden erstarrt war, betrug die Erstarrungszeit im Falle des HPM-2 gut 14 Stunden. Hierbei macht sich der hohe Fließmittelgehalt bemerkbar. Das eingesetzte Fließmittel hat eine erhärtungsverzögernde Wirkung.

Die im Rahmen der Voruntersuchungen nach *DIN 18555-3: 1982-09* ermittelten Biegezugfestigkeiten und Druckfestigkeiten sind in Tab. 3.9 aufgeführt. Für den HPM-1 wurde außerdem an drei Zylindern mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 300 mm die Spaltzugfestigkeit nach *DIN EN 12390-6: 2010-09* und der Elastizitätsmodul in Anlehnung an *DIN 1048-5: 1991-06* bestimmt. Im Falle des HPM-2 und des HFL wurde der Elastizitätsmodul an drei Prismen in Anlehnung an *DIN EN 13412: 2006-11* ermittelt sowie die zentrische Zugfestigkeit an drei Zugprobekörpern (siehe Tab. 3.9) ermittelt. Der bei den Zugversuchen verwendete Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung werden in Abs. 4.1.4 beschrieben. Die Prismen und Zylinder wurden jeweils in einem Wasserbad gelagert und in einem Alter zwischen 28 und 30 Tagen geprüft.

Tab. 3.9: In Probemischungen ermittelte Festmörteleigenschaften

		HPM-1	HPM-2	HFL
Mittlere Druckfestigkeit $f_{am,fl}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	120,1	128,4	126,6
Mittlere Biegezugfestigkeit $f_{atm,fl}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	14,5	15,5	19,8
Mittlere Spaltzugfestigkeit $f_{atm,sp}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	4,2	-	-
Mittlere zentrische Zugfestigkeit $f_{atm}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	-	4,4	6,5
Mittlerer Elastizitätsmodul $E_{am}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	38.084	-	-
Mittlerer Elastizitätsmodul $E_{am,fl}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	-	42.232	41.203

Im Rahmen der einzelnen Versuchsserien wurde eine Vielzahl an Prismen geprüft und die Druck- sowie die Biegezugfestigkeit des Klebstoffs am Versuchstag bestimmt. Das Alter lag dabei in der Regel zwischen 27 und 31 Tagen. Für den HPM-2 und den HFL wurden die Ergebnisse gemeinsam ausgewertet (siehe Tab. 3.10).

Tab. 3.10: Im Zuge der Schub-Druck und Schub-Zugversuche sowie der Bauteilversuche ermittelte Festigkeitskennwerte

		HPM-2 <sup>1</sup>	HFL <sup>1</sup>
Mittlere Druckfestigkeit $f_{am,fl}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	115,0	128,2
Variationskoeffizient	[%]	11,09	9,38
Versuchsanzahl $n$	[-]	60	87
Mittlere Biegezugfestigkeit $f_{atm,fl}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	10,25	16,1
Variationskoeffizient	[%]	33,69	20,84
Versuchsanzahl $n$	[-]	30	49

Die mittlere Biegezugfestigkeit  $f_{atm,fl}$  und die mittlere Druckfestigkeit  $f_{am,fl}$  liegen deutlich unter den in den Vorversuchen ermittelten Werten. Dies lässt zum einen dadurch erklären, dass die Prismen nicht nass, sondern trocken bis zur Prüfung gelagert wurden. Im Falle des HPM-2 liegt die Ursache außerdem in einem erhöhten Luftporengehalt. Wie auch bei dem HPC streute insbesondere die Biegezugfestigkeit stark. Der HFL wies dabei eine deutlich geringere Streuung auf. Erklären lassen sich die Streuungen durch einen schwankenden Luftporengehalt. Auch hier war ein Zusammenhang zwischen Zementalter bzw. dem Alter des Trockenmörtels bei der Verarbeitung und der Festigkeit festzustellen, worin ein weiterer Grund für die Streuungen lag. Bei älterem Zement oder Mörtel fielen die Festigkeiten der damit hergestellten Klebstoffe deutlich geringer aus. Außerdem lassen sich die geringeren Festigkeitswerte und Streuungen dadurch erklären, dass bewusst ein Teil der Prismen mit Mörtel vor dem Klebevorgang und ein anderer Teil mit überschüssigem Mörtel nach dem Klebevorgang hergestellt wurden. So sollte eine Abnahme der Mörtelqualität während des Klebevorgangs beispielsweise in Folge der Hautbildung mit erfasst werden. Ziel war es grundsätzlich, die Festigkeit des Klebstoffs in der Klebfuge während der Versuche zu ermitteln. Im Zusammenhang mit der Auswertung der Bauteilversuche ist dabei die zentrische Zugfestigkeit  $f_{atm}$  von besonderem Interesse. Wie bei den Ausführungen zu dem eingesetzten HPC in dem Zusammenhang bereits erwähnt wurde, ist die versuchstechnische Ermittlung jedoch relativ aufwändig. In der Literatur zu

findende Formeln, mit denen sich die zentrische Zugfestigkeit  $f_{atm}$  aus der Würfeldruckfestigkeit  $f_{am,cube}$  oder der Biegezugfestigkeit  $f_{atm,fl}$  berechnen lässt, bergen viele Unwägbarkeiten. Für einen bestimmten Beton oder Mörtel entwickelte Gleichungen lassen sich in der Regel nicht auf einen anderen übertragen. An der Stelle muss auch darauf hingewiesen werden, dass sich die beim Aushärten der Prismen herrschenden Bedingungen von den beim Aushärten des Mörtels in der Fuge herrschenden Bedingungen grundlegend unterscheiden und diese bekanntlich Einfluss auf die Festigkeit von Beton bzw. Mörtel haben. Die an Prismen ermittelten Materialeigenschaften sind daher nur bedingt auf den Mörtel in der Fuge übertragbar.

Auf Grundlage der Ergebnisse von eigenen zentrischen Zugversuchen und Biegezugversuchen an wassergelagerten Probekörpern wurde die nachfolgende Gleichung entwickelt, mit der sich für die drei Klebstoffe die zentrische Zugfestigkeit  $f_{atm}$  näherungsweise aus der nach *DIN 18555-3: 1982-09* ermittelten Biegezugfestigkeit  $f_{atm,fl}$  berechnen lässt:

$$f_{atm} = 0,3 \cdot f_{atm,fl} \quad (3.10)$$

Umrechnungsfaktor von 0,3 ermittelt auch *Mühlbauer 2012* für seinen RPC-Klebstoff.

Warum die zentrische Zugfestigkeit bei den Klebstoffen im Verhältnis zur Biegezugfestigkeit deutlich geringer war als bei dem HPC, ist unklar. Eine Ursache dafür kann in dem tendenziell höheren Luftporengehalt liegen.

Insgesamt wies der HFL höhere mechanische Eigenschaften und eine bessere Verarbeitbarkeit auf als der HPM. Bedingt dadurch, dass es sich um eine Fertigmischung handelt, bei der lediglich Wasser hinzugegeben werden muss, ist die Herstellung deutlich weniger aufwändig wie bei dem HPM.

## 3.3 Bewehrung

### 3.3.1 Allgemeines

Als Bewehrung wurden im Rahmen der Arbeit in erster Linie Mikrobewehrung, und Stabstahl in Form von geripptem Betonstahl eingesetzt. Mikrostahtfasern wurden bei einigen Schub-Druckversuchen verwendet, um die Tragfähigkeit der Fügeile zu steigern, sowie bei einer Versuchsserie im Zusammenhang mit den Untersuchungen an Keilzinkenverbindung.

### 3.3.2 Mikrobewehrung

Bei der eingesetzten Mikrobewehrung handelt es sich um Matten aus normalfestem Stahldraht mit einer Maschenweite von 12,7 mm und einem Drahtdurchmesser von 1,0 mm, der Firma DUCON®. Das in Zugversuchen ermittelte Spannungsdehnungsverhalten - mit einem ausgeprägten Fließplateau - entspricht dem von kaltverformtem Stahl. Die Bruchdehnung beträgt dabei rund 200‰ (*Hauser und Wörner 1999a*).

Bei seinen Untersuchungen an Sandwichelemente mit Deckschichten aus Hochleistungs-beton verwendete *Müller 2015* die gleiche Mikrobewehrung derselben Charge. In Tab. 3.11 sind zum einen die Materialkennwerte der Mikrobewehrung nach *Hauser*

1999 aufgeführt und zum anderen die von Müller 2015 im Rahmen seiner Dissertation ermittelten. Während die von Hauser 1999 angegebenen Materialkennwerte an Einzeldrähten ermittelt wurden, führte Müller 2015 Zugversuche an dreilagig angeordneten, 20 cm breiten Mattenstreifen durch. Der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung werden in Müller 2015 beschrieben. Die hierbei gemessene Bruchdehnung und der Elastizitätsmodul  $E_s$  waren deutlich geringer als nach Hauser 1999. Gründe dafür können eine lokale Querschnittsschwächung oder Versprödung an den Schweißstellen der punktgeschweißten Matten sein.

Tab. 3.11: Materialeigenschaften der verwendeten Mikrobewehrung

		$s^1$	$s^2$
Drahtdurchmesser $d$	[mm]		1,0
Maschenweite $a$	[mm]		12,7
Mattenquerschnitt $A$	[mm <sup>2</sup> /m]		61,8
Mittelwert der Streckgrenze $f_{ym}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	-	345
Streckgrenzendehnung $\varepsilon_y$	[‰]	-	4,0-4,2
Charakteristischer Wert der Streckgrenze $f_{yk}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	240	
Mittlere Zugfestigkeit $f_{tm}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	350-400	407
Bruchdehnung $\varepsilon_u$	[‰]	170-220	38-62
Charakteristischer Wert der Zugfestigkeit $f_{tk}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	380	
Elastizitätsmodul $E_s$	[N/mm <sup>2</sup> ]	205.000	160.000

<sup>1</sup> nach Hauser 1999

<sup>2</sup> nach Müller 2015

### 3.3.3 Stahlfaserbewehrung

Es wurden Mikrostahtfasern der Firma Krampeharex mit einem Durchmesser von rund 0,17 mm und einer Länge von 6 mm eingesetzt. Die aus hochfestem Stahl bestehenden und mit einer Messingbeschichtung versehenen Fasern weisen eine minimale Zugfestigkeit von 2.100 N/mm<sup>2</sup> auf (Krampeharex 2014).

### 3.3.4 Stabstahlbewehrung

Bei den Versuchen mit diskreter Bewehrung wurden gerippter Betonstabstahl mit einem Durchmesser von 4 nach DIN 488-1: 2009-08 der Güte B500A eingesetzt.

In Zugversuchen nach DIN EN ISO 15630-1: 2011-02 bzw. DIN EN ISO 6892-1: 2014-06 wurden die Zugfestigkeit  $f_t$ , die Streckgrenze  $f_y$  und der Elastizitätsmodul an jeweils drei Proben bestimmt, wobei die Streckgrenze hier der 0,2%-Dehngrenze entspricht. Die Stäbe wiesen das charakteristische Spannungsdehnungsverhalten kalt verformten Stahls auf. In Tab. 3.12 sind die Materialeigenschaften als Mittelwerte aufgeführt.

### 3 Verwendete Werkstoffe

---

Tab. 3.12: Materialeigenschaften der verwendeten Stabstahlbewehrung

			SS4
Mittelwert der Streckgrenze	$f_{ym}^1$	[N/mm <sup>2</sup> ]	568,3
Mittlere Zugfestigkeit	$f_{tm}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	646,0
Elastizitätsmodul	$E_{ms}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	193.000

<sup>1</sup>0,2%-Dehngrenze ( $f_{0,2k}$ )

## **4 Voruntersuchungen**

### **4.1 Versuchsreihe zur Optimierung des Haftverbunds**

#### **4.1.1 Allgemeines**

Der Haftverbund zwischen zementgebundenen Schichten wird durch viele Faktoren beeinflusst (siehe Abs. 2.2.2.2 und Abs. 2.2.2.3). Mit Hilfe einer gezielten, auf die werkstoffspezifischen Verbund- und Aushärtemechanismen abgestimmten Vor- und Nachbehandlung lassen sich die Adhäsionsfestigkeit und die Kohäsionsfestigkeit positiv beeinflussen wie die Ergebnisse der Literaturrecherche vermuten lassen. Im Rahmen der hier vorgestellten Versuchsserien wurden daher verschiedene Methoden und Maßnahmen untersucht, um den Haftverbund zu verbessern. Ziel war es letztendlich den Klebvorgang unter Berücksichtigung der Ergebnisse für die weiteren Versuche zu standardisieren.

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurde der Einfluss des „Vornässgrades“ sowie einer Nachbehandlung auf den Haftverbund für den konkreten Anwendungsfall untersucht. Außerdem wurden verschiedene Arten der Oberflächenvorbehandlung und deren Einfluss auf den Haftverbund untersucht.

#### **4.1.2 Versuchsprogramm**

Die Versuchsprogramme zur Optimierung des Haftverbunds sind in Tab. 4.1 und Tab. 4.2 zusammengefasst.

In einer ersten Serie wurden Haftzugversuche durchgeführt und der Vornässgrad sowie die Art der Nachbehandlung variiert (siehe Tab. 4.1). Es wurden drei unterschiedliche Vornässgrade untersucht, nämlich „trocken“, „nass“ und „feucht“. Bei Vornässgrad „nass“ wurden die nach der Herstellung wassergelagerten Fügebauteile eine Stunde vor dem Verkleben aus dem Wasserbad genommen. Für die Versuche mit Vornässgrad „trocken“ und „feucht“ wurden die Probekörper drei Tage vor dem Verkleben aus dem Wasserbad genommen und trocken an der Luft gelagert. Die Versuchskörper mit Vornässgrad „feucht“ wurden eine halbe Stunde vor dem Verkleben mit einem nassen Schwamm betupft. Allgemein wurde darauf geachtet, dass die Betonoberfläche vor dem Verkleben leicht abgetrocknet war und keinen tropfbaren Wasserfilm aufwies. In Bezug auf die Frage nach der optimalen Nachbehandlungsart nach dem Verkleben, wurden die Lagerungsarten „trocken“, Lagerung unter feuchten Stofftüchern sowie Wasserlagerung untersucht. Bevor die Probekörper in ein Wasserbad gelegt werden konnten, wurden sie ebenfalls zwölf Stunden unter feuchten Stofftüchern gelagert. Die Klebflächen waren dabei „gewaschen“ ausgeführt. Dazu wurden die Probekörper spätestens zwölf Stunden nach der Betonage ausgeschalt und die Klebflächen unter fließendem Wasser mit einer Drahtbürste bearbeitet. Ähnlich wie bei der Waschbetonherstellung wurde hierbei die Zementschlempen entfernt und die Zuschlagskörner freigelegt. Als Klebstoff wurde der HPM-1 eingesetzt. Die Klebschichtdicke betrug drei Millimeter.

In einer zweiten Serie wurden ebenfalls im Rahmen von Haftzugversuchen verschiedene Arten der Oberflächenvorbehandlung untersucht (siehe Tab. 4.2). Neben

#### 4 Voruntersuchungen

schalglatten und gesandstrahlten Klebflächen wurden hierbei durch Schneiden mit einer Steinsäge (mit Diamantsägeblatt) sowie mittels Hochdruckwasserstrahlschneiden erzeugte Klebflächen betrachtet. Im Falle der feststoffgestrahlten Klebflächen wurden diese so intensiv bearbeitet, dass an der Oberfläche liegende Zuschlagskörner frei lagen. Die einzelnen Oberflächen werden in Abs. 4.2 detailliert beschrieben. Als Klebstoff wurde bei dieser Versuchsserie der HPM-2 verwendet. Weiterhin wurde die Klebschichtdicke variiert.

Tab. 4.1: Versuchsprogramm zur Untersuchung des Einflusses des Vornässgrades sowie der Nachbehandlung auf den Haftverbund mit Hilfe von Haftzugversuche

Bezeichnung		Vornässgrad	Nachbehandlung	Anzahl
HZ1-GW-D3- HPM1-	D/D	trocken (D) <sup>2</sup>	trocken (D) <sup>2</sup>	6
	W/D	nass (W) <sup>1</sup>	trocken (D) <sup>2</sup>	6
	B/F	feucht (B) <sup>3</sup>	feuchte Tücher (F)	6
	W/F	nass (W) <sup>1</sup>		6
	D/F	trocken (D) <sup>2</sup>	nass (W) <sup>1</sup>	6
	W/W	nass (W) <sup>1</sup>		6

<sup>1</sup>bis 1 h vor dem Verkleben in einem Wasserbad gelagert und 12 h nach dem Verkleben bis zur Prüfung

<sup>2</sup>vier Tage vor dem Verkleben aus dem Wasserbad genommen

<sup>3</sup>vor dem Verkleben mit Wasser betupft

Tab. 4.2: Versuchsprogramm der Haftzugversuche an unterschiedlich vorbehandelten Klebflächen

Bezeichnung	Klebstoff	Klebfläche	Klebschichtdicke [mm]	Anzahl
HZ1-SG-D1-HPM2	HPM-2	schalglatt (SG)	1	5
HZ1-SG-D3-HPM2			3	5
HZ1-GS-D1-HPM2		Geschnitten (GS) <sup>1</sup>	1	5
HZ1-WSG-D1-HPM2		wasserstrahl- geschnitten (WSG)	1	5
HZ1-WSG-D3-HPM2			3	5
HZ1-SS2-D1-HPM2		maximal gesandstrahlt (SS2) <sup>2</sup>	1	5
HZ1-SS2-D3-HPM2			3	5

<sup>1</sup>mit einer Steinsäge (Diamantsägeblatt)

<sup>2</sup>das Korngerüst wurde freigelegt

Die Bezeichnung der Versuche und Probekörper ist in Abb. 4.1 erläutert. Diese ist in mehrere Teile gegliedert, die durch Bindestriche voneinander getrennt sind. An erster Stelle ist der Versuchsaufbau oder Probekörpertyp aufgeführt, an der zweiten Stelle die Art der Klebflächenvorbehandlung (siehe auch Tab. 4.1 und Tab. 4.2), an dritter Stelle die Klebschichtdicke und an vierter Stelle der eingesetzte Klebstoff. Bei einigen Versuchen gibt es eine fünfte Stelle, die weitere Details über den Versuch wiedergibt, in Abb. 4.1 beispielsweise den Vornässgrad der Klebfläche sowie die Art der Nachbehandlung. Die Versuchsbezeichnung schließt mit der Versuchsnummer ab.



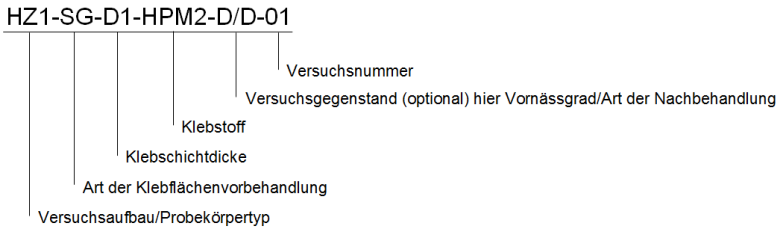


Abb. 4.1: Versuchsbezeichnung (siehe auch Tab. 4.1 und Tab. 4.2)

### 4.1.3 Probekörper

Für die Haftzugversuche wurden die in Abb. 4.4 dargestellten, im mittleren Teil tallierten Probekörper HZ1 in Anlehnung an *Mühlbauer 2012* verwendet. Die Breite im tallierten Bereich betrug 20 mm, die Dicke des Probekörpers 40 mm. Zur Herstellung wurden Kunststoffschalungen verwendet (siehe Abb. 4.2). Je nach Versuchskonstellation wurden entweder ganze Probekörper aus dem HPC-2 hergestellt, und diese mit der gewünschten Technik in zwei Hälften geschnitten oder Stahlplättchen in die Schalung eingestellt und halbe Probekörper hergestellt. Etwa zwei Wochen nach der Herstellung wurden die beiden Probekörperhälften verklebt. Dazu wurden die Klebflächen mit Mörtel bestrichen und die Füge­teile anschließend zusammengepresst (siehe Abb. 4.3). Die für die zweite Versuchsserie - mit unterschiedlich vorbehandel­ten Klebflächen - hergestellten Probekörper wurden unmittelbar nach dem Ausschalen bis kurz vor dem Verkleben in einem Wasserbad eingelagert. Nach dem Verkleben wurden die Probekörper mit nassen Stofftüchern abgedeckt.

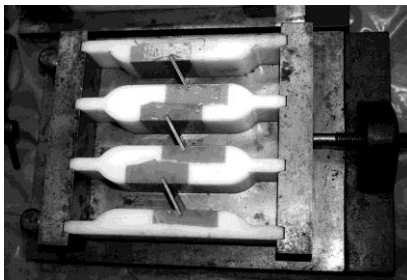


Abb. 4.2: Kunststoffschalung zur Herstellung der Probekörper HZ1 (hier mit geneigter Klebfuge)



Abb. 4.3: Verkleben von Haftzugprobekörpern (hier mit geneigter Klebfuge)

Im Zuge der Betonage und des Verklebens wurden mindestens drei Prismen aus HPC bzw. Klebstoff hergestellt, um damit die Biegezugfestigkeit und die Druckfestigkeit nach *DIN 18555-3: 1982-09* am Versuchstag bestimmen zu können. Die Prismen wurden bis zur Prüfung zusammen mit den Versuchskörpern gelagert. Die entsprechenden Werkstoffkennwerte sind als Mittelwerte im Anhang A aufgeführt.

#### 4.1.4 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

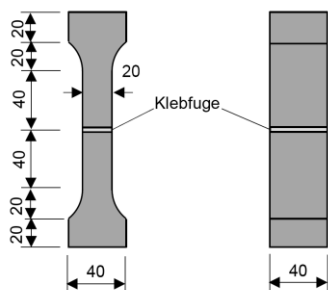
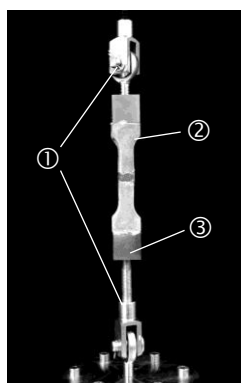


Abb. 4.4: Abmessungen der Haftzugprobekörper HZ1



- ① Kugelgelenke
- ② Probekörper
- ③ Stahlprisma mit Gewindebohrung

Abb. 4.5: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Haftzugfestigkeit HZ1

Die Haftzugversuche wurden rund 28 Tage nach dem Verkleben mit dem in Abb. 4.5 dargestellten Versuchsaufbau in einem Zwei-Säulen-Prüfrahmen mit servohydraulischem 250 kN Zylinder durchgeführt. Mit dem gewählten Versuchsaufbau lässt sich die Belastung möglichst zentrisch und momentenfrei aufbringen. Auf die Versuchskörper wurden Stahlprismen mit einer mittig angeordneten Gewindebohrung geklebt. Die Befestigung an der Prüfmaschine erfolgt über die Stahlprismen mit Gewindestäben und Kugelgelenken. Diese sollen eine ungewollte Biegebeanspruchung der Probekörper minimieren. Die Lastaufbringung erfolgte weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 0,01 mm/Sek. Zur Messung der Versuchslast wurde die in der Prüfmaschine integrierte Kraftmessdose herangezogen.

#### 4.1.5 Versuchsergebnisse

Die Versagenslasten der einzelnen Versuche sowie Informationen, wie z.B. die Materialfestigkeiten am Versuchstag oder die vorhandenen Bauteilabmessungen, sind in Anhang A übersichtlich zusammengestellt. Außerdem sind im Anhang die bei den jeweiligen Versuchen erzielte Haftzugfestigkeit, der Mittelwert der Haftzugfestigkeit, die vorliegende Streuung sowie die charakteristische Haftzugfestigkeit als 5%-Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75 % aufgeführt. Es wurde von einer unbekanntem Standartabweichung der Grundgesamtheit ausgegangen. Mit Hilfe des in *DIN EN 1990: 2010-12* beschriebenen Verfahrens wurde diese entsprechend abgeschätzt.

In Tab. 4.3 sind die Ergebnisse der Haftzugversuche mit unterschiedlichen Vornässgraden und unterschiedlicher Nachbehandlung, zusammengefasst. Bei den im Rahmen dieser Versuchsserie durchgeführten Versuchen war in den meisten Fällen ein adhäsives Versagen oder ein substratnaher Kohäsionsbruch der Klebfuge zu verzeichnen. Hierbei waren auf dem Beton in der Regel leichte Klebstoffrückstände und ganz vereinzelt auch Betonrückstände auf dem Klebstoff zu beobachten (siehe Abb. 4.6). Bei den Versuchen mit Wasserlagerung kam es teilweise auch zu einem Mischversagen aus Adhäsions- und Kohäsionsbruch (siehe Abb. 4.7).

Tab. 4.3: Ergebnisse der Haftzugversuche mit unterschiedlichen Vornässgraden und unterschiedlicher Nachbehandlung

Versuchsserie	Variationskoeffizient $v$ [%]	Haftzugfestigkeit		Versagensart <sup>3</sup>
		$f_{jtm,surf}^1$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{jtk75,surf}^2$ [N/mm <sup>2</sup> ]	
HZ1-GW-D3-HPM1-D/D	51,12	0,49	-0,18	a, a(k), x, a, x, a(k)
HZ1-GW-D3-HPM1-WD	19,09	2,04	1,13	k(a), k(a), k(a), k(a), k(a), k
HZ1-GW-D3-HPM1-B/F	49,45	1,87	-0,41	a, a, a, a, k(a)
HZ1-GW-D3-HPM1-W/F	4,67	2,69	2,40	a, a, a, a, a, a
HZ1-GW-D3-HPM1-D/W	46,82	0,78	-0,07	a(k), a, a, a, a(k), a
HZ1-GW-D3-HPM1-W/W	12,45	2,05	1,45	a(k), a, a, a, a, a

<sup>1</sup> Mittelwert

<sup>2</sup> charakteristischer Wert als 5-% Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

<sup>3</sup> a=adhäsiv; k=kohäsiv; b=Betonversagen allgemein; bf=Betonversagen im fugennahen Bereich; x=ausgefallen

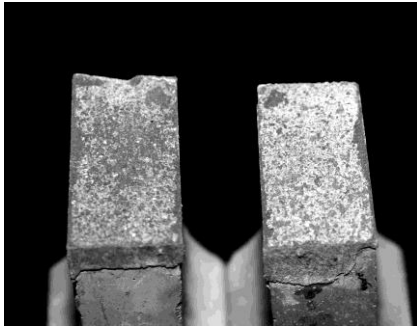


Abb. 4.6: Adhäsives Versagen mit leichten Mörtelrückständen auf dem Beton

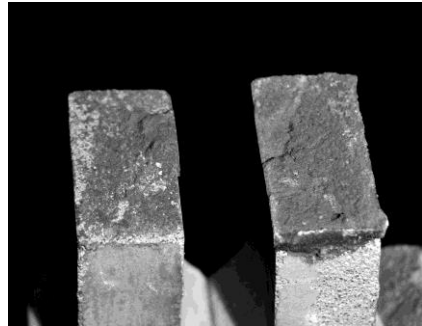


Abb. 4.7: Mischversagen aus Adhäsions- und Kohäsionsbruch

In Abb. 4.8 sind für die einzelnen Versuchskonstellationen die Mittelwerte der Haftzugfestigkeiten jeweils in Balkenform dargestellt sowie die entsprechenden Einzelwerte. Teilweise versagte die Klebung beim Einbau der Versuchskörper in die Prüfmaschine, einige Versuchskörper wurden wegen herstellungsbedingten Mängeln nicht bei der Auswertung berücksichtigt. Während die Streuungen bei den Versuchen mit im Vorfeld wassergelagerten Probekörpern zwischen 5 und 20 % lagen, betrug die Streuung bei den übrigen Versuchen rund 50 %.

Die Versuche machen deutlich, dass ein Vornässen der Klebfuge zwingend erforderlich ist, um brauchbare Haftzugfestigkeit zu erzielen. Bei den nicht vorgehästeten Klebfugen waren die erzielten Haftzugfestigkeiten wesentlich geringer als bei vorgehästeten. Die Werte der Versuche mit vorgehästeten Klebfugen lagen alle in derselben Größenordnung. Bei den mit einem Schwamm vorgehästeten Klebflächen war die Streuung jedoch größer als bei den „nass“ ausgeführten Klebflächen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die mit dem Schwamm aufgebraachte Wassermenge wahrscheinlich schwankt. Weiterhin zeigte sich, dass durch eine gezielte Nachbehandlung

#### 4 Voruntersuchungen

sowohl bei den vorgehästeten als auch bei den nicht vorgehästeten Klebflächen keine nennenswerte Steigerung der Haftzugfestigkeiten erreicht werden konnte. Die Werte der Versuche ohne Nachbehandlung waren nur unwesentlich niedriger als die der nach dem Verkleben wassergelagerten Versuche.

Insgesamt war die Haftzugfestigkeit bei den im Rahmen dieser Serie durchgeführten Versuchen auch bei optimaler Vor- und Nachbehandlung im Vergleich zu den Ergebnissen von Mühlbauer 2012 sehr niedrig. Dies ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass der eingesetzte HFM-1 einen deutlich höheren Wasserzementwert als der RPC-Klebstoff von Mühlbauer 2012 aufwies.

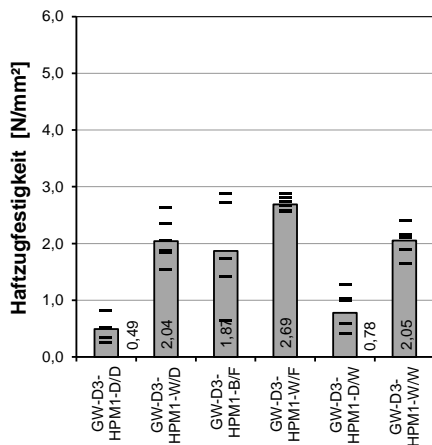


Abb. 4.8: Ergebnisse der Haftzugversuche (HZ1-) mit unterschiedlichen Vornässgraden und unterschiedlicher Nachbehandlung

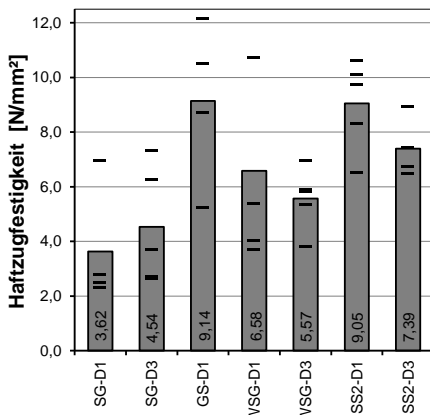


Abb. 4.9: Ergebnisse der Haftzugversuche (HZ1-\_\_-\_\_HPM2) mit unterschiedlich vorbehandelten Klebflächen

Tab. 4.4: Ergebnisse der Haftzugversuche mit unterschiedlich vorbehandelten Klebflächen

Versuchsserie	Variationskoeffizient $v$ [%]	Haftzugfestigkeit		Versagensart <sup>3</sup>
		$f_{jtm,surf}^1$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{jtk75,surf}^2$ [N/mm <sup>2</sup> ]	
HZ1-SG-D1-HPM2	61,12	3,63	-2,32	a(k), a, a+k, a+k, x
HZ1-SG-D3-HPM2	47,42	4,54	-0,76	a, a+k, a, a, a
HZ1-GS-D1-HPM2	32,50	9,14	1,18	b, a, a(k), a(k), x
HZ1-WSG-D1-HPM2	55,76	6,58	-4,98	a(k), a(k), a(k), a(k), x
HZ1-WSG-D3-HPM2	20,64	5,57	2,73	a(k), a, a, a, a(k), a
HZ1-SS2-D1-HPM2	18,28	9,05	4,98	b, a, a+k, a+k, a+k
HZ1-SS2-D3-HPM2	14,95	7,39	4,43	b, a, k, a, x

<sup>1</sup> Mittelwert

<sup>2</sup> charakteristischer Wert als 5-% Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

<sup>3</sup> a=adhäsiv; k=kohäsiv; b=Betonversagen allgemein; bf=Betonversagen im fugennahen Bereich; x=ausgefallen

In Tab. 4.4 sind die Ergebnisse der Haftzugversuche mit unterschiedlich vorbehandelten Klebflächen zusammengefasst. Bei den mit Hilfe des verbesserten Klebstoffs HPM-2 durchgeführten Versuchen dieser Serie wurden deutlich höhere Haftzugfestigkeiten erzielt (siehe Abb. 4.9). Hier war meist ein Mischversagen aus Adhäsionsbruch und Kohäsionsbruch zu verzeichnen. Vereinzelt kam es zu einem rein adhäsiven Versagen oder Betonversagen.

Im Falle der Versuche mit schalglatten Klebflächen wiesen die Ergebnisse eine sehr hohe Streuung auf. Der Variationskoeffizient lag bei rund 60 %. Die mittlere Haftzugfestigkeit betrug dabei für eine Klebschichtdicke von einem Millimeter 3,6 N/mm<sup>2</sup> und für eine Klebschichtdicke von drei Millimeter 4,5 N/mm<sup>2</sup>. Eine Haftzugfestigkeit von rund 6 N/mm<sup>2</sup> wurde bei den Versuchen mit wasserstrahlgeschnittenen Klebflächen erzielt. Bei den Versuchen mit einer durch Schneiden mit einer Steinsäge erzeugten Klebfläche lag die mittlere Haftzugfestigkeit bei rund 9 N/mm<sup>2</sup> und damit in der Größenordnung wie für maximal feststoffgestrahlte Klebflächen. Im Vergleich zu den Versuchen mit wasserstrahlgeschnittenen Klebflächen und Versuchen mit feststoffgestrahlten Klebflächen war dabei die Streuung auch hier hoch (Variationskoeffizient ca. 30 %). Sieht man von den Versuchen mit schalglatten Klebflächen ab, lässt sich feststellen, dass die Festigkeit für eine Klebschichtdicke von 1 mm tendenziell höher ausfällt als für eine Dicke von 3 mm.

#### 4.1.6 Fazit

Insgesamt hat sich bei den Untersuchungen gezeigt, dass das Verkleben von Betonbauteilen mithilfe eines zementgebundenen Klebstoffs vom Anmischen des Klebstoffs über die Vorbehandlung der Klebfläche bis hin zum Klebvorgang selbst hohe Sorgfalt erfordert. Durch eine gezielte, auf die werkstoffspezifischen Verbund und Aushärtemechanismen abgestimmte Vor- und Nachbehandlung lassen sich die Adhäsionsfestigkeit und die Kohäsionsfestigkeit positiv beeinflussen. Hält man sich an gewisse Grundsätze lassen sich brauchbare Haftzugfestigkeiten mit geringer Streuung erzielen.

Der Mörtel sollte nach dem Anmischen mit Hilfe einer geeigneten Mischeinrichtung umgetopft und vor dem Verarbeiten einige Minuten ruhen gelassen werden, damit dieser entlüften kann. Ein hoher Luftporengehalt wirkt sich negativ auf die Festigkeit des Klebstoffs und letztendlich die Tragfähigkeit der Klebverbindung aus.

Um weitgehend zu verhindern, dass dem Klebstoff Wasser entzogen wird welches dann nicht mehr für den chemischen Prozess der Hydratation zur Verfügung steht und um das sogenannte Trocknungsschwinden zu minimieren sind die Füge-teile vor dem Verkleben mehrere Tage in einem Wasserbad zu lagern. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die Klebflächen vor dem Verkleben leicht abgetrocknet sind. In keinem Fall dürfen sie feucht glänzen. Die Füge-teile sollten daher rund eine Stunde vor dem Klebvorgang aus dem Wasserbad genommen werden. Andernfalls besteht die Gefahr, dass der Klebstoff „verwässert“, also der Wasserzementwert im Klebstoff ansteigt, mit negativen Folgen für Materialfestigkeit. Wie *Lenz 2012* bei seinen Forschungen zum Beton-Betonverbund herausgefunden hat, wirken sich saugende Betonoberflächen außerdem positiv auf den Haftverbund aus. Der Mörtel kann sich

mikroskopisch im Beton der Füge­teile verwurzeln. Es kommt zu einer mikromechanischen Verzahnung.

Unabhängig davon, wie die Klebflächen ausgeführt werden, müssen diese in jedem Fall vor dem Verkleben sorgfältig gesäubert werden. Schalöl­rückstände beispielsweise wirken wie eine Imprägnierung und verhindern, dass kapillare Saugvorgänge stattfinden können.

Die Adhäsion zwischen zementgebundenen Schichten basiert in erster Linie auf mikromechanischen Verzahnungseffekten (vgl. *Juhart 2005*). Die Rauigkeit der Oberfläche hat daher großen Einfluss auf den Haftverbund. In den Versuchen hat sich gezeigt, dass geschal­te Betonoberflächen zwingend einer mechanischen Nachbearbeitung bedürfen. Problematisch bei schal­glatten Betonoberflächen ist unter anderem die große Streuung, was die Haftzugfestigkeiten angeht. Neben deutlich höheren Haftzugfestigkeiten wiesen die bearbeiteten Betonoberflächen wesentlich geringere Streuungen auf. Bei durch Wasserstrahl­schneiden erzeugten Klebflächen betrug die Haftzugfestigkeit rund  $6 \text{ N/mm}^2$  und lag damit in einer Größenordnung, die für das Verkleben von Betonbauteilen brauchbar erscheint. Im Falle von feststoffgestrahlten Klebflächen sowie durch Schneiden mit einer Steinsäge und Diamantsägeblatt erzeugten Klebflächen, lassen sich Haftzugfestigkeiten von bis zu  $10 \text{ N/mm}^2$  erreichen. Die mittlere Haftzugfestigkeit lag hier jeweils bei rund  $9 \text{ N/mm}^2$ . Dies zeigt, dass der Grob­zuschlag nicht wie von *Lenz 2012* bei Verbundfugen gefordert (siehe Abs. 2.2.2) zwingend freigelegt werden muss um „hohe“ Haftzugfestigkeitswerte zu erreichen. Die Festigkeit und Struktur des Betons im oberflächennahen Bereich unterscheiden sich bei Fertigteilen aus Hochleistungsbeton mit geschal­ter Oberfläche nicht wesentlich von der des Kernbetons.

## 4.2 Charakterisierung der Klebflächen

### 4.2.1 Allgemeines

Wie die Versuche nach Abs. 4.1 aufgezeigt haben, besitzt die Beschaffenheit der Klebfläche großen Einfluss auf den Haftverbund der Klebverbindung. Im Rahmen der Arbeit wurden unterschiedliche Methoden der Klebflächen­vorbereitung angewendet und untersucht. Um diese Methoden bewerten und vergleichen zu können, wurde jeweils die Rauigkeit ermittelt.

Eine gebräuchliche Kenngröße zur quantitativen Beschreibung von Oberflächen ist die Rautiefe  $R_t$ , auch Profilkuppenhöhe  $R_p$  genannt (siehe Abs. 2.2.2.4). Besser geeignet als eine Senkrecht­kenngröße wie die Rautiefe  $R_t$  ist nach *Schäfer et al 1996* und *Reinecke 2004* der sogenannte Wenzel'sche Quotient. Dieser beschreibt für einen Profilschnitt das Verhältnis von tatsächlicher Länge zur Grundlänge.

Zur Charakterisierung der verschiedenen Klebflächen sollen jeweils beide Kenngrößen herangezogen werden.

### 4.2.2 Vorgehen

Von Interesse sind in dem Zusammenhang Rauheitsstrukturen bis zur 3. Ordnung nach *Reinecke 2004* (siehe Tab. 2.1). Auf der Ebene der sogenannten Mikrorauheit (Rauheitsstruktur 2. Ordnung) wird beispielsweise die Oberflächenstruktur der Zuschläge oder Deformierungen infolge Feststoffstrahlen erfasst. Die Rautiefe  $R_t$  als Amplitude der Gestaltabweichung liegt hierbei in einer Größenordnung zwischen 10 und 500  $\mu\text{m}$ . Zur Erfassung der Oberflächengeometrie kommen nach *Reinecke 2004* nur berührungslose Verfahren in Frage. Diese ermöglichen gegenüber berührenden Verfahren eine deutlich höhere Auflösung.

*Mühlbauer 2012* setzt im Rahmen seiner Dissertation das optische Messsystem ATOS der Firma GOM mbH ein, um die Klebflächen zu digitalisieren. Hierbei handelt es sich um ein photogrammetrisches Messsystem mit einer Auflösung von 10  $\mu\text{m}$ .

In einem ersten Anlauf wurden die Klebflächen mit einem am Fachbereich Bauingenieurwesen vorhandenen 2D-Laserscanner vermessen (*Bundrück 2013*). Der Messpunkteabstand in der Ebene betrug hierbei jedoch lediglich rund 300  $\mu\text{m}$  und war damit zu grob für die hier anvisierten Untersuchungen.

Im Weiteren wurden die Klebflächen mit Hilfe eines Weißlichtprofilometers der Firma FRT GmbH vermessen. Dieses optische Verfahren basiert auf dem Prinzip der chromatischen Abstandsmessung. Hierbei wird Weißlicht mit einer speziellen Linse auf die Oberfläche fokussiert. Über das Spektrum des an der Oberfläche gestreuten Lichtes und die dominierende Wellenlänge lässt sich der Abstand zum Objekt bestimmen. Die Auflösung in Höhenrichtung liegt bei maximal drei Nanometer und in lateraler Richtung bei einem Mikrometer.

Mit Hilfe der Software FRP Mark III ist es möglich, aus den Profildaten verschiedene Rauheitskenngrößen zu ermitteln und die Oberflächen zu visualisieren (siehe Abb. 4.10 und Abb. 4.11).

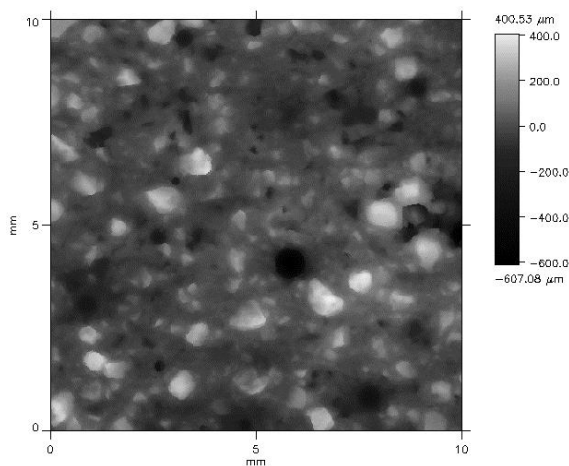


Abb. 4.10: Mit Hilfe eines Weißlichtprofilometers vermessene gewaschene Klebfläche - Zwei-dimensionale Darstellung der Profilhöhen

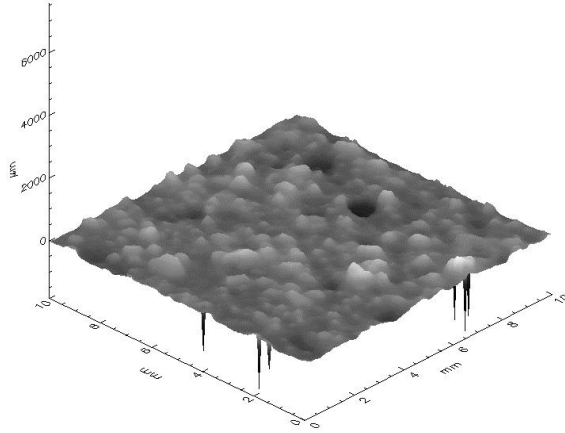


Abb. 4.11: Mit Hilfe eines Weißlichtprofilometers vermessene gewaschene Klebfläche - Dreidimensionale Darstellung der Profilhöhen

In Tab. 4.5 ist das Messprogramm zur Ermittlung der Klebflächenrauigkeit aufgeführt. Es wurden dabei teilweise Proben von überschüssigen Versuchskörpern aus verschiedenen im Rahmen der Arbeit durchgeführten Versuchsserien untersucht, teilweise wurden aber auch Proben zu diesem Zweck hergestellt. Sowohl beim Feststoffstrahlen als auch beim Waschen der Klebflächen (siehe Abs. 4.1) können unterschiedliche Rauigkeitsgrade erzeugt werden, je nachdem wie lange und intensiv die Bearbeitung erfolgt. Es wurden daher je Oberflächenvariante Proben mit unterschiedlichen Rauigkeitsgraden sowie mit und ohne Fehlstellen, wie z.B. Poren, ausgewählt, um das Spektrum der Oberflächenrauigkeit abzubilden. Nach demselben Prinzip erfolgte auch die Auswahl der Messstellen. Bei feststoffgestrahlten Oberflächen wurden planmäßig zwei unterschiedlich stark aufgeraute Varianten untersucht. Bei der Variante SS1 wurden die Oberflächen nur kurz bearbeitet und gerade die oberste Schlemmeschicht abgetragen. Im Falle der zweiten Variante (SS2) wurde die Oberfläche „maximal“ mit Strahlgut bestrahlt, so dass an der Oberfläche liegende Zuschlagskörner frei lagen. Repräsentative Proben der verschiedenen Oberflächen sind in Abb. 4.12 zu sehen.

Tab. 4.5: Messprogramm zur Ermittlung der Klebflächenrauigkeit

Bezeichnung	Oberflächenbearbeitung	Anzahl	Messfeld [mm]	Auflösung [µm]
SG	Schalglatt	2	4x4	5
GS	mit einer Steinsäge geschnitten	3		
SS1	gesandstrahlt	3	10x10	20
SS2	maximal gesandstrahlt	3		
GW	gewaschen <sup>1</sup>	3		

<sup>1</sup>siehe Abs. 4.1



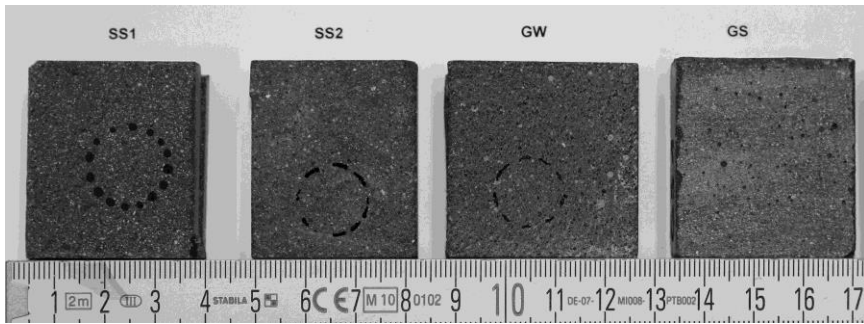


Abb. 4.12: Untersuchte Betonoberflächen. Gesandstrahlt (SS1), maximal gesandstrahlt (SS2), gewaschen (GW), und mit einer Steinsäge geschnitten (GS)

Die Auflösung hängt bei dem verwendeten Weißlichtprofilometer von der gewählten Messfeldgröße ab. Bei den Untersuchungen von *Mühlbauer 2012* hatte sich gezeigt, dass die Rauigkeitsparameter mit der Messfeldgröße zu nehmen, weshalb dieses so groß wie möglich gewählt werden sollte. Das Messfeld und damit die Auflösung wurden der zu erwartenden Rauigkeit angepasst. Für die schalglatte sowie die durch Schneiden mit einer Steinsäge erzeugte Oberfläche wurde ein Messfeld von vier mal vier Millimeter gewählt. Die Auflösung betrug dabei fünf Mikrometer. Im Falle der gesandstrahlten und gewaschenen Oberflächen wurde ein Messfeld von zehn mal zehn Millimetern gewählt. Hierbei betrug die Auflösung 20 Mikrometer. In im Vorfeld durchgeführten Probemessungen mit unterschiedlichen Messfeldgrößen und Auflösungen hatte sich gezeigt, dass eine Auflösung von 20 Mikrometer für die gesandstrahlten und gewaschenen Klebflächen ausreichend ist, um die Oberflächenstruktur zu erfassen.

Die Bestimmung der mittleren Rautiefe  $R_{tm}$  und der maximalen Rautiefe  $R_{tmax}$  erfolgte mit Hilfe der Software FRP Mark III in Anlehnung an *DIN EN ISO 4287: 2013-4*. Zur Berechnung der Parameter wird hierbei das Messfeld nochmal in 25 Teilflächen unterteilt. Im Gegensatz zu dem Vorgehen in *Mühlbauer 2012* werden durch Poren verursachte „Ausreißer“ zur Ermittlung der mittleren Rautiefe  $R_{tm}$  mit berücksichtigt, was so auch gewollt ist. Mit Hilfe der Software FRP Mark III wurde auch der Wenzel'sche Quotient als Verhältnis der wahren Oberfläche zur projizierten Fläche ermittelt.

### 4.2.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Rauigkeitsanalyse sind in Tab 4.4 zusammengestellt. Bei schalglatten Oberflächen hängt die Rauigkeit entscheidend von der Qualität des Schalmaterials ab. Zur Herstellung der Proben wurde eine Stahlschalung verwendet. Außerdem fallen Poren wie auch bei den durch Schneiden mit einer Steinsäge erzeugten Oberflächen ins Gewicht. Bei den Proben SG-2 sowie GS-2 und GS-3 waren jeweils Poren in der Klebfläche vorhanden, weshalb die Rauigkeitskennwerte höher waren.

Der Wenzel'sche Quotient bei den durch Schneiden mit einer Steinsäge erzeugten Klebflächen lag mit rund 1,06 um ca. 4 % höher als bei den schalglatten Klebflächen mit rund 1,02. Durch leichtes Feststoffstrahlen lässt sich der Wenzel'sche Quotient

#### 4 Voruntersuchungen

im Vergleich zur schalglatten Oberfläche um rund 8 % steigern ( $w = 1,11$ ), durch intensives Feststoffstrahlen (Oberfläche SS2) um rund 11 % ( $w = 1,14$ ). Bei den gewaschenen Klebflächen lag der Wenzel'sche Quotient mit rund 1,19 um ca. 16 % höher als bei den schalglatten Klebflächen.

Tab. 4.6: Rauigkeitsparameter  $R_{tm}$ ,  $R_{tm,m}$ ,  $R_{tmax}$  sowie  $W$  für die verschiedenen Oberflächen

Bezeichnung	Oberfläche	$R_{tm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{tm,m}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{tmax}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$W$ [-]
SG-1	schalglatt	42,38	27,47	211,76	1,04
SG-2		12,56		35,81	1,01
GS-1	geschnitten	31,33	51,30	49,56	1,04
GS-2		64,59		214,36	1,09
GS-3		57,99		293,20	1,07
SS1-1	feststoffgestrahlt	207,69	208,72	340,68	1,11
SS1-2		208,55		415,57	1,11
SS1-3		210,07		347,21	1,11
SS2-1	max. feststoff- gestrahlt	230,53	240,95	338,94	1,13
SS2-2		244,77		478,71	1,13
SS2-3		247,56		348,87	1,15
GW-1	gewaschen <sup>1</sup>	307,99	329,26	879,12	1,19
GW-2		370,25		546,91	1,23
GW-3		309,55		475,14	1,15

<sup>1</sup>siehe Abs. 4.1

Anzumerken bleibt, dass die Rauigkeit von feststoffgestrahlten Betonoberflächen von der Betonrezeptur abhängt, wie die Untersuchungen von *Mühlbauer 2012* gezeigt haben. Die Ergebnisse sind daher auf andere Betonrezepturen nicht ohne weiteres übertragbar.

Im Anhang B ist die Profilhöhenverteilung für die verschiedenen Oberflächen jeweils in zweidimensionaler Form bildlich dargestellt.

Im Folgenden werden repräsentative Profilschnitte der unterschiedlichen Betonoberflächen betrachtet. Der Wenzel'sche Quotient entsprach dabei jeweils dem Mittelwert nach Tab. 4.6.

Die Rautiefe  $R_t$  als Amplitude der Gestaltabweichung war sowohl bei der schalglatten als auch bei der durch Schneiden mit einer Steinsäge erzeugten Betonoberfläche im Allgemeinen kleiner als  $10 \mu\text{m}$ , wie bei einer Betrachtung von repräsentativen Profilschnitten in Abb. 4.13 zu erkennen ist. Damit ist die Rauigkeitsstruktur der 3. Ebene entsprechend der Einteilung nach *Reinecke 2004* (siehe Tab. 2.1) zuzuordnen.

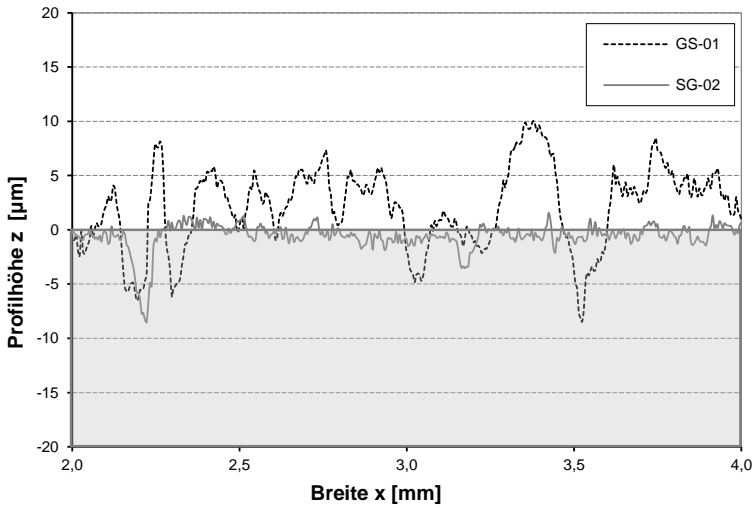


Abb. 4.13: Repräsentative Profilschnitte für eine schalglatte (SG-02) sowie eine durch Schneiden mit einer Steinsäge (GS-01) erzeugte Betonoberfläche

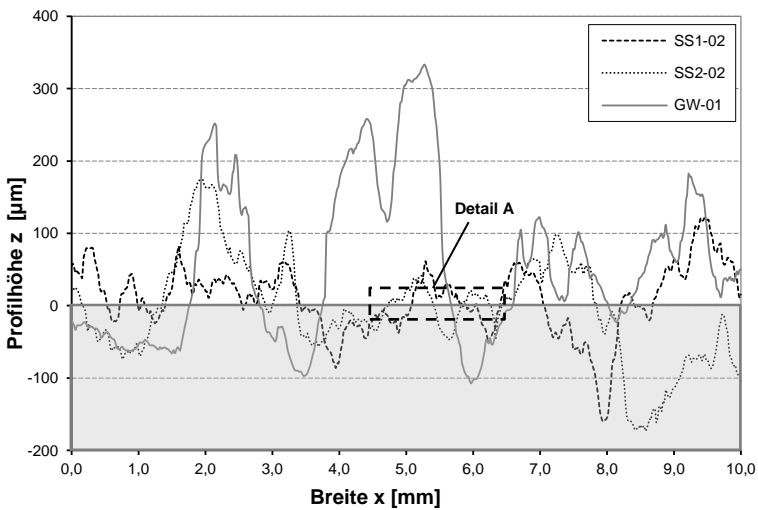


Abb. 4.14: Repräsentative Profilschnitte für unterschiedlich stark gesandstrahlte Betonoberflächen (SS1-02 und SS2-02) sowie eine gewaschene Oberfläche (GW-01)

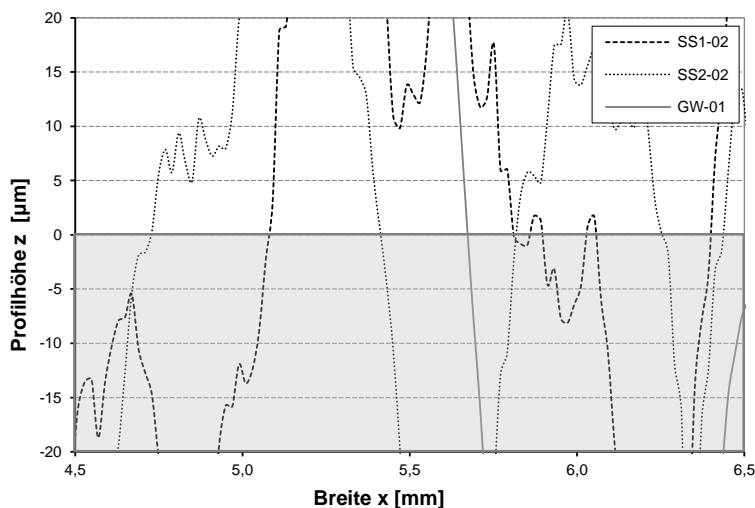


Abb. 4.15: Detail A der Profilschnitte aus Abb. 4.14

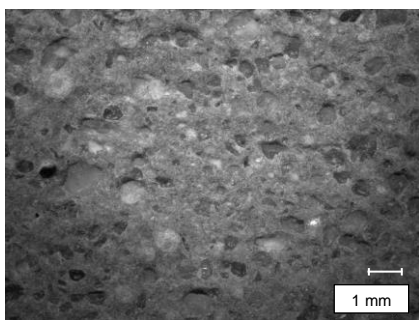


Abb. 4.16: Mikroskopaufnahme einer gewaschenen Betonoberfläche

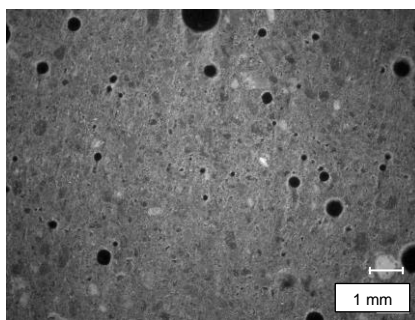


Abb. 4.17: Mikroskopaufnahme einer durch Wasserstrahlschneiden erzeugten Betonoberfläche

Die bei den gesandstrahlten und gewaschenen Oberflächen vorliegenden Gestaltabweichungen sind der 2. und 3. Ebene zuzuordnen (siehe Abb. 4.14). Freigelegte Zuschlagskörner (siehe auch Abb. 4.16) sind im Wesentlichen für die Mikrorauheit verantwortlich. Die maximale Rautiefe  $R_t$  als Amplitude der Gestaltabweichung liegt bei rund  $300 \mu\text{m}$ . Überlagert wird die Mikrorauheit von einer Rauheit der 3. Ordnung (siehe Abb. 4.15).

Vor dem Hintergrund, dass Rauheitsstrukturen der 3. Ordnung erfasst wurden, ist die bei dem Verfahren und der gewählten Messfeldgröße erreichte Auflösung als ausreichend zu bewerten.

## 4.3 Tastversuche an Klebverbindungsvarianten

### 4.3.1 Allgemeines

Im Rahmen dieser teilweise bereits in *Kohlmeyer und Oster 2012* vorgestellten Versuchsserie wurden verschiedene Klebverbindungsvarianten im Hinblick auf das Tragverhalten für unterschiedliche Beanspruchungszustände untersucht. Neben der Fugengeometrie wurden auch verschiedene Bewehrungsarten betrachtet. Auf Grundlage der Versuchsergebnisse wurden letztendlich vielversprechende Fugenvarianten ausgewählt, um dies dann gezielt weiter optimieren und untersuchen zu können. Ziel war dabei, neben einer hohen Tragfähigkeit, ein „gutmütiges“, duktileres Tragverhalten der Verbindung. Gleichzeitig wurden auch verschiedene Methoden zur Realisierung der entsprechenden Fugengeometrie erprobt werden. Eine vielversprechende Alternative zum Schalen der entsprechenden Geometrie stellt Wasserstrahlschneiden dar.

„Nach unten hin“ ist die Klebschichtdicke durch das Größtkorn des Mörtels begrenzt. Soll die Fuge mit dem Klebstoff verpresst werden, wie dies beispielsweise bei der Segmentklebebauweise der Fall ist, muss die Klebschichtdicke so groß gewählt werden, dass das Material die Fuge gut durchströmen kann und diese letztendlich voll ausfüllt. Die Schichtdicken bei der Segmentklebebauweise betragen in der Regel 0,5 bis 2 mm. *Mühlbauer 2012* empfiehlt für seinen RPC-Klebstoff eine Klebschichtdicke von 1 bis 3 mm. Für die Tastversuche wurde eine Klebschichtdicke von 3 mm gewählt.

### 4.3.2 Versuchsprogramm

In Tab. 4.7 ist das absolvierte Versuchsprogramm aufgeführt. Dieses sah in erster Linie Zugversuche, aber auch Vierpunkt- und Dreipunktbiegeversuche vor. Bei den Zugversuchen wurde neben Mikrobewehrung auch der Einsatz von Stabstahl in Form von Bewehrungsstahl mit einem Durchmesser von vier Millimetern getestet. Das Versuchsprogramm sah drei unterschiedliche Fugengeometrien vor: Zum einen eine rechteckige Zahngeometrie (engl. rectangle), eine dreieckige Zahngeometrie oder auch Keilzinkengeometrie (engl. finger joint) sowie eine Hinterschnittgeometrie (engl. undercut). Außerdem wurden Referenzversuche ohne Fuge an jeweils drei Probekörpern mit Mikrobewehrung durchgeführt.



Abb. 4.18: Rechteckige Zahngeometrie



Abb. 4.19: Keilzinkengeometrie

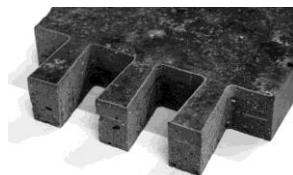


Abb. 4.20: Hinterschnittgeometrie

#### 4 Voruntersuchungen

Tab. 4.7: Versuchsprogramm der Tastversuche an Klebfugenvarianten

Bezeichnung	Versuch	Geometrie	Bewehrung	Anzahl
Z1-MR-REF	Zugversuch an ungestörten Referenzprobekörpern	-	10 Lagen Mikrobewehrung	3
Z1-MR-CA-RT	Zugversuch an Probekörpern mit geschalter Fugengeometrie	Rechteck (engl. rectangle)	Mikrobewehrung 20 Längsdrähte pro Zahn	3
Z1-MR-WSG-RT	Zugversuch an Probekörpern mit wasserstrahlgeschnittener Fugengeometrie	Rechteck (engl. rectangle)	10 Lagen Mikrobewehrung	4
Z1-MR-WSG-FJ		Keilzinken (engl. finger joint)		4
Z1-MR-WSG-UC		Hinterschnitt (engl. undercut)		4
Z1-SS-CA-RT	Zugversuch an Probekörpern mit geschalter Fugengeometrie	Rechteck (engl. rectangle)	Stabstahlbewehrung, Ø 4 mm	3
B1-MR-WSG-RT	4-Pkt.-Biegeversuche Fugengeometrie wasserstrahlgeschnitten	Rechteck (engl. rectangle)	10 Lagen Mikrobewehrung	2
Q1-MR-W SG-RT	3-Pkt.-Biegeversuche Fugengeometrie wasserstrahlgeschnitten	Rechteck (engl. rectangle)	10 Lagen Mikrobewehrung	1

Die Bezeichnung der Versuche und Probekörper ist in Abb. 4.21 erläutert. Diese ist in mehrere Teile gegliedert, die durch Bindestriche voneinander getrennt sind. An erster Stelle ist wie gewohnt der Versuchsaufbau oder Probekörpertyp aufgeführt, an der zweiten Stelle die Art der Bewehrung, an dritter Stelle das Herstellungsverfahren und an vierter Stelle die Fugengeometrie. Die Versuchsbezeichnung schließt auch hier mit der Versuchsnummer ab.

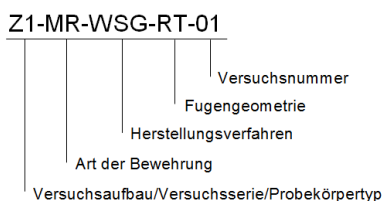


Abb. 4.21: Versuchsbezeichnung

#### 4.3.3 Probekörper

Die Dicke der plattenartigen Probekörper betrug 30 mm. Zur Herstellung wurde hier der HPC-1 verwendet. Die Probekörper mit Fuge wiesen eine rechteckige Form mit den Abmessungen von 144 x 610 mm auf, die Referenzprobekörper ohne Fuge eine in Breitenrichtung taillierte Form (siehe Abb. 4.22). Im Lasteinleitungsbereich betrug

die Breite der Referenzprobekörper 189 mm und im mittleren Bereich 144 mm. Die Länge betrug ebenfalls 610 mm.

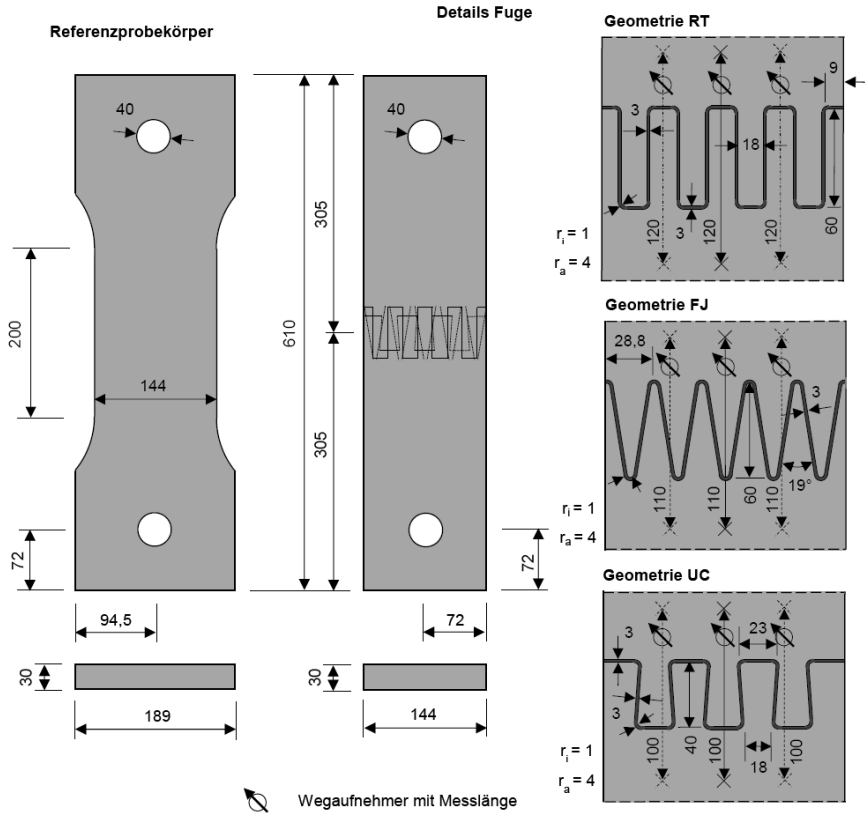


Abb. 4.22: Abmessungen der Probekörper für die Zugversuche Z1, Fugengeometrien und Anordnung der Wegaufnehmer

Für die Versuche mit wasserstrahlgeschnittener Fugengeometrie wurden zunächst Platten mit den genannten Abmessungen betoniert und unter feuchten Tüchern gelagert. Nach fünf Tagen wurden die Fugengeometrien (siehe Abb. 4.22) mittels Hochdruckwasserstrahlschneidverfahren in die Betonplatten geschnitten, so dass zwei Hälften entstanden. Aus fertigungstechnischen Gründen mussten die Ecken ausgegondet werden (siehe Abb. 4.22). Für die Referenzprobekörper wurden zunächst Platten mit einer Breite von 189 mm betoniert und diese anschließend mittels Hochdruckwasserstrahl auf 144 mm tailliert. Bewehrt waren die Platten in beiden Fällen mit jeweils zehn Lagen Mikrobewehrung und wiesen damit einen geometrischen Bewehrungsgehalt  $V_{eff}$  von 2,1 % auf. Die Betondeckung betrug an allen Seiten jeweils rund drei Millimeter.

Beim Hochdruckwasserstrahlschneiden erfolgt die Schnittführung in der Regel CNC-gesteuert. Die Technik ermöglicht damit die Realisierung von komplexen Fugengeometrien in hoher Präzision. Wie in Abb. 4.23 deutlich wird passen die Füge-teile exakt ineinander. Es hat sich gezeigt, dass der Hochdruckwasserstrahl von den Stahl-dräh-

ten leicht abgelenkt wird. Der Schnitt war nach unten hin leicht geweitet. In Bereichen hinter Drähten entstanden „Schneidschatten“. Die Schnittflächen wiesen insgesamt eine merkliche Rauheit auf (siehe Abb. 4.24 sowie Abb. 4.17). Sie lassen sich zwischen durch Schneiden mit einer Steinsäge erzeugten und mittels Feststoffstrahlen vorbereiteten Klebflächen einordnen (siehe Abs. 4.2).

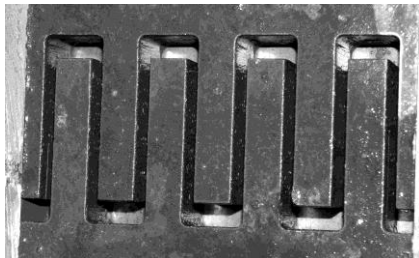


Abb. 4.23: Fugengeometrie Wasserstrahlge-  
schnitten

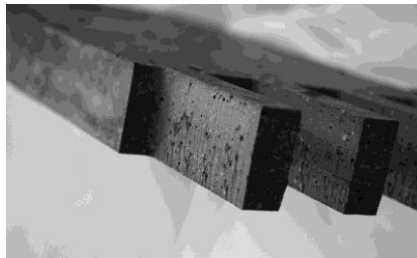


Abb. 4.24: Detail der Schnittfläche der mittels  
Hochdruckwasserstrahltechnik ge-  
schnittenen Fugengeometrie

Die Probekörper der Serie Z1-MR-CA-RT, deren Klebfugen geschalt und für das Verkleben nicht aufbereitet wurden, waren ebenfalls mit zehn Lagen Mikrobewehrung bewehrt. Hier wurden die Matten so zugeschnitten und angeordnet, dass die Zähne – bis auf die äußeren - in jeder Lage jeweils zwei Längsdrähte enthielten (siehe Abb. 4.25). Anders als bei den kontinuierlich bewehrten Platten mit per Hochdruckwasserstrahl erzeugten Fugengeometrien lag in den Zähnen ein definierter (genau festgelegter) Bewehrungsgehalt vor. Die Herstellungsvariante ist jedoch erheblich aufwendiger als das Wasserstrahlschneiden.

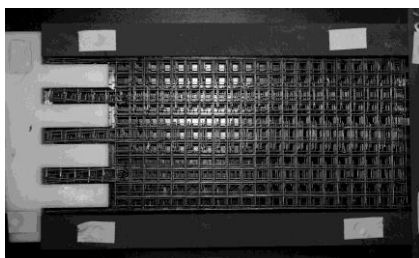


Abb. 4.25: Schalung mit eingebauter Mikro-  
bewehrung

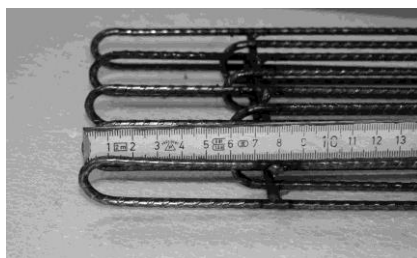


Abb. 4.26: Stabstahlbewehrung im Fugenbe-  
reich

Bei Serie Z1-SS-CA-RT wurde gerippter Betonstabstahl mit einem Durchmesser von vier Millimetern verwendet. Dabei wurde pro Zahn eine Schlaufe angeordnet (siehe Abb. 4.26). Der Biegerollenradius betrug acht Millimeter und die Betondeckung - wie bei den Matten auch - mindestens drei Millimeter. Auch hier wurde die Fugengeometrie mittels einer entsprechenden Schalung aus Kunststoff realisiert. Vor dem Verkleben wurde mit einer Steinsäge im Nassschneideverfahren die oberste Schicht der in Längsrichtung verlaufenden Klebflächen abgeschliffen. Der für die Zugversuche gewählte Versuchsaufbau (siehe Abs. 4.3.4) erforderte Löcher im Lasteinleitungsbe-



reich. Diese wurden bei den Zugprobekörpern vor dem Verkleben durch Kernbohren erzeugt. Die beiden Probekörperhälften wurden schließlich mit dem HPM-1 verklebt. Vor dem Verkleben wurde die Betonoberfläche vorgesenzt.

#### 4.3.4 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Sowohl die Zugversuche als auch die Dreipunkt- und die Vierpunktbiegeversuche wurden in einem Vier-Säulen-Prüfrahmen mit servohydraulischem Zylinder durchgeführt. Die Maximallast der Prüfmaschine beträgt 630 kN.

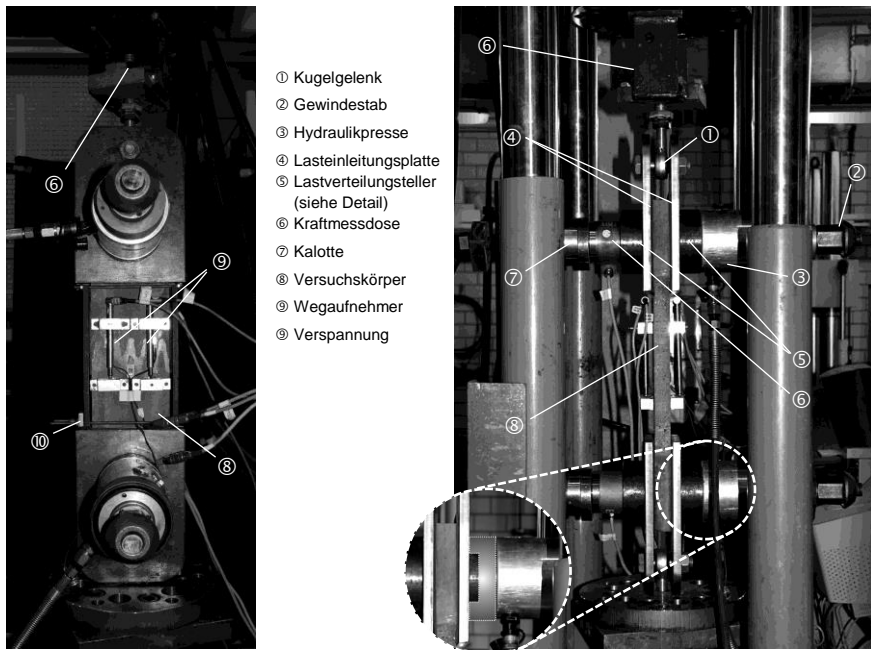


Abb. 4.27: Versuchsaufbau der Zugversuche in der Vorderansicht

Abb. 4.28: Versuchsaufbau der Zugversuche in der Seitenansicht

Für die Zugversuche wurde in Zusammenarbeit mit Müller 2015 der in Abb. 4.27 und Abb. 4.28 dargestellte Aufbau konzipiert. Die Probekörper wurden an ihren beiden Enden mittels Gewindestangen und Hydraulikpressen jeweils zwischen zwei Stahlplatten eingespannt. Unebenheiten zwischen den Stahlplatten und den Probekörpern wurden durch Elastomermatten ausgeglichen. Um sicherzustellen, dass die Last gleichmäßig auf die Stahlplatten aufgebracht wird, wurden spezielle Lastverteilungsteller angeordnet (siehe Detail in Abb. 4.28). Mit Hilfe einer Kraftmessdose konnte die entsprechende Anpresskraft zielsicher eingestellt werden. Diese lag bei rund 150 kN. Bei dem gewählten Versuchsaufbau erfolgt die Lasteinleitung damit alleine durch Reibung.

Die Probekörper wurden mit Hilfe von Kugelgelenken frei drehbar in den Vier-Säulen-Prüfrahmen eingebaut. Zur Erfassung der Versuchslast wurde eine Kraftmessdose eingesetzt. Die Messung wurde bei frei hängendem Probekörper mit einer Last von 0 kN gestartet. Das Eigengewicht des unterhalb der Fuge befindlichen Teils des

4 Voruntersuchungen

Probekörpers sowie das Gewicht der sich am unteren Ende befindenden Lasteinleitungskonstruktion von 43 kg wurden dabei nicht mit erfasst. Dies wurde bei der Auswertung der Versuche berücksichtigt.

Die Verformungen in Längsrichtung wurden jeweils mit drei oder vier induktiven Wegaufnehmern (Messbereich 10 mm) gemessen (siehe Abb. 4.27). Ihre jeweiligen Messlängen sind in Abb. 4.22 angegeben. Zusätzlich wurden bei einigen Versuchen Dehnmessstreifen (Messlänge 10 mm) auf den Zähnen im Fugenbereich appliziert. Alle Versuche wurden Weggesteuert gefahren, wobei anfangs der Weg mit 0,1 mm/min gesteigert wurde und später, im Bereich größerer Verformungen, mit 1,0 mm/min.

Die Klebverbindung soll zum Fügen plattenartiger Bauteile eingesetzt werden. Bei dem Versuch Z1-MR-CA-RT-03 trat im Versuchsverlauf ein Riss in der äußeren in Längsrichtung verlaufenden Klebfläche auf. Um ein seitliches Ausweichen der äußeren Zähne zu verhindern, und um so die Verhältnisse in ausgedehnten Bauteilen besser abzubilden, wurde in den weiteren Versuchen dieser Reihe, allen Versuchen mit Stabstahlbewehrung sowie den Versuchen mit Keilzinkengeometrie, eine seitliche horizontale Verspannung angebracht (siehe Abb. 4.27). Hierbei wurden die Muttern jeweils „leicht“ angezogen.

Der bei den Vierpunktbiegeversuchen verwendete Aufbau ist in Abb. 4.29 schematisch dargestellt. Die Spannweite betrug 50 cm und die Lasteinleitung erfolgte in den Viertelpunkten über zwei Stahlrollen. Die Lagerung des Probekörpers als gelenkige Fest-Loslagerung wurde wiederum mittels Rolle und Halbschale umgesetzt. Zur Erfassung der Versuchslast wurde eine Kraftmessdose eingesetzt. Die Durchbiegung wurde mit zwei in Feldmitte angeordneten induktiven Wegaufnehmern gemessen. Das Gewicht der Lasteinleitungskonstruktion (Traverse und Rollen), der Kalotte sowie der Kraftmessdose ( $\Sigma = 10,0 \text{ kg}$ ) wurde vor den Versuchen bestimmt und bei der Versuchsauswertung entsprechend berücksichtigt.

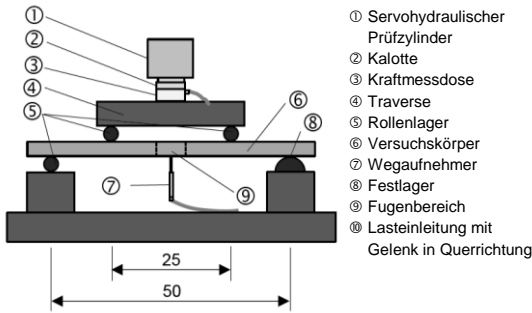


Abb. 4.29: Aufbau der Vierpunktbiegeversuche

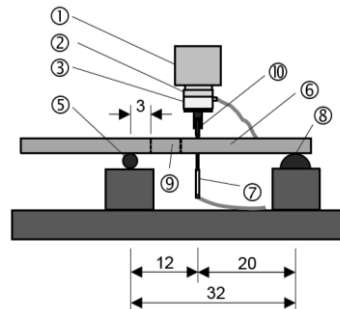


Abb. 4.30: Aufbau der Dreipunktbiegeversuche

In Abb. 4.30 ist der bei dem Dreipunktbiegeversuch verwendete Aufbau schematisch dargestellt. Die Lasteinleitung erfolgte über eine in Querrichtung gelenkig gelagerte Rolle in einem Abstand von drei Zentimetern zum Rand des Fugenbereichs.

Auch hier erfolgte die Umsetzung der Lagerung des Probekörpers als gelenkige Fest-Loslagerung mittels Rolle und Halbschale. Der Abstand zum Fugenbereich betrug ebenfalls drei Zentimeter. Zur Erfassung der Versuchslast wurde eine Kraftmessdose eingesetzt. Die Durchbiegung wurde mit zwei unterhalb der Lasteinleitung angeordneten induktiven Wegaufnehmern gemessen (Messbereich 20 mm).

Die Belastung erfolgte bei dem Dreipunkt- und den Vierpunktbiegeversuchen ebenfalls weggesteuert, wobei anfangs der Weg mit 0,1 mm/min gesteigert wurde und später, im Bereich größerer Verformungen, mit 1,0 mm/min. Die Last wurde stufenweise aufgebracht. Beim Auftreten von Rissen, was durch einen Lastabfall gekennzeichnet war, wurde der Versuch unterbrochen, die Risse markiert und teilweise die Rissbreite an der Unterseite mit Hilfe einer Rissmesskarte gemessen. Anschließend wurde der Probekörper fotografiert.

#### 4.3.5 Ergebnisse der Zugversuche

Die Versagensbilder der einzelnen Versuche, Last-Dehnungskurven bzw. Last-Verformungskurven sowie Informationen, wie z.B. die Materialfestigkeiten am Versuchstag oder die vorhandenen Bauteilabmessungen, sind in Anhang C übersichtlich zusammengestellt. Außerdem sind im Anhang für alle Versuche die bei Erreichen der Erstrisskraft herrschende Betonzugspannung, die Streckgrenze bezogen auf die im Versagensschnitt rechnerisch vorhandene Bewehrungsmenge mit der zu dem Zeitpunkt vorliegenden Dehnung, die vorhandene Zugspannung bei Maximallast, ebenfalls bezogen auf die im Versagensschnitt rechnerisch vorhandene Bewehrungsmenge, sowie die zum Versagenszeitpunkt vorhandene Dehnung aufgeführt.

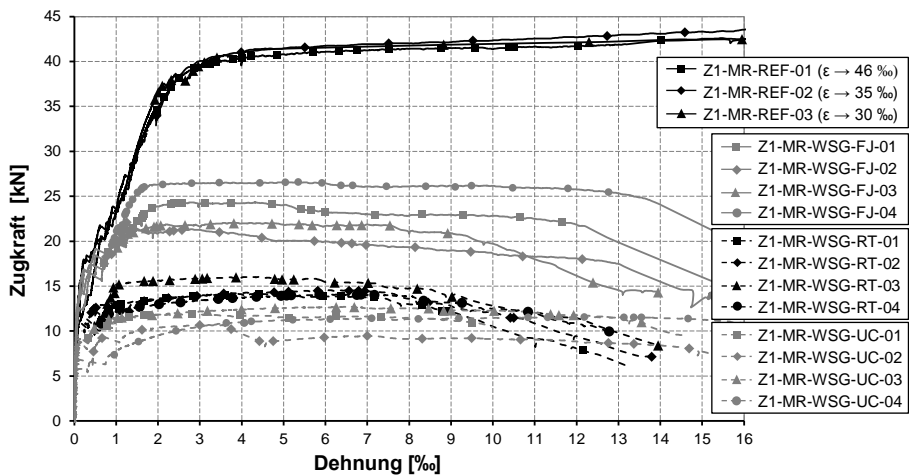


Abb. 4.31: Last-Dehnungskurven der Zugversuche an Probekörper mit Mikrobewehrung und unterschiedlichen durch Wasserstrahlschneiden erzeugten Fugengeometrien

In Abb. 4.31 und Abb. 4.32 sind die Last-Dehnungskurven der Zugversuche dargestellt. Die Dehnungen wurden dabei aus den gemittelten Längenänderungen der Wegaufnehmer und den entsprechenden Messlängen berechnet. Bis zum Erreichen der Erstrisskraft lag bei allen Versuchen ein nahezu linear elastisches Last-

#### 4 Voruntersuchungen

Verformungsverhalten vor. Nach dem Auftreten des Erstrisses kam es zu einem Abfall der Steifigkeit.

Bei den Referenzversuchen Z1-MR-REF (siehe auch Abb. 2.2) entstanden, gleichmäßig über den gesamten Probekörper verteilt, weitere Risse quer zur Belastungsrichtung. Der Rissabstand entsprach dabei ungefähr der Maschenweite der Mikrobewehrungsmatten. Ab einer Dehnung von rund 1,4 ‰ traten keine weiteren Risse mehr auf (abgeschlossenes Rissbild). Bei etwa 2,0 ‰ Dehnung begann die Bewehrung zu fließen. Im weiteren Verlauf kam es zu einer starken Zunahme der Verformungen. Die Last konnte nur noch geringfügig gesteigert werden. Letztendlich öffnete sich ein Riss, bevor es zu einem Bewehrungsversagen kam.

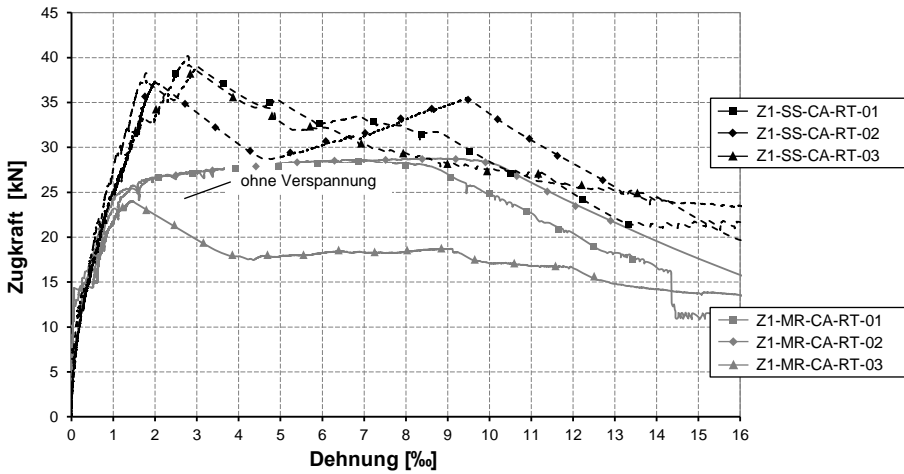


Abb. 4.32: Last-Dehnungskurven der Zugversuche an Probekörper mit geschalter Fugengeometrie, zum einen mit Mikrobewehrung und zum anderen mit diskreter Bewehrung

Bei den Versuchen mit Fuge trat der Erstriss jeweils an einem Ende des Fugebereichs, ebenfalls rechtwinklig zur Belastungsrichtung, auf und verlief dabei jeweils im Bereich der Stirnflächen der Zähne, in der Klebschicht und im Bereich der „Zahnwurzel“. Bei den Versuchen mit Mikrobewehrung Z1-MR-CA-RT, Z1-MR-WSG-RT sowie Z1-MR-WSG-UC entstanden mit zunehmender Belastung jeweils ein weiterer Riss am anderen Ende des Fugenbereichs sowie vereinzelt Risse in den ungestörten Bereichen der Probekörper. Einer der beiden Risse am Ende des Fugenbereichs öffnete sich schließlich (siehe Abb. 4.33) und es kam zu einem Bewehrungsversagen. Die Last-Dehnungskurven weisen ein ausgeprägtes Fließplateau auf. Das Tragverhalten kann somit als duktil bezeichnet werden. Lediglich bei dem Versuch Z1-MR-CA-RT-03, welcher ohne seitliche Verspannung durchgeführt wurde, zeigte sich ein abweichendes Lastverformungsverhalten. Einhergehend mit dem Auftreten von Längsrissen in der Fuge im Bereich der äußeren Zähne kam es nach Erreichen der Maximallast zu einem deutlichen Lastabfall. Hier kam es zu einem kombinierten Versagen, einem Fugenversagen an den äußeren Zähnen und einem Bewehrungsversagen im mittleren Bereich (siehe Abb. 4.34). Ein Längsris in der Fuge am äußere-

ren Zahn bildete sich ebenfalls bei Versuch Z1-MR-WSG-UC-02, welcher wie alle Versuche mit Hinterschnittfugengeometrie ohne Verspannung durchgeführt wurde. Dieses Ausbrechen des äußeren Zahns bei einer Dehnung von ca. 3,5 ‰ (siehe Abb. 4.31) ging mit einem Lastabfall einher. Die Bewehrung floss zu dem Zeitpunkt bereits. Bei den Versuchen der Serie Z1-MR-WSG-FJ mit Keilzinkengeometrie kam es neben Rissen an den beiden Ende des Fugenbereichs auch zu Querrissen in der Mitte des Fugenbereichs sowie zu einer ausgeprägten Rissbildung außerhalb des Fugenbereichs. Gegen Ende des Versuchs traten vereinzelt auch Risse in der Klebfuge auf (siehe Abb. 4.35). Es handelt sich also um ein kombiniertes Versagen. Die Last-Dehnungskurven weisen aber auch hier ein ausgeprägtes Fließplateau auf, weshalb das Tragverhalten als duktil eingestuft werden kann.

Bei Erreichen der Streckgrenze betrug die Rissbreite im Falle der Versuche mit Mikrobewehrung rund 0,05 mm.

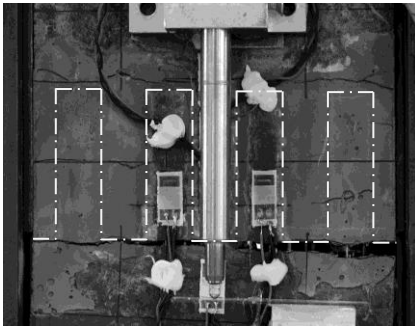


Abb. 4.33: Rissbild vor dem Versagen bei Versuch Z1-MR-CA-RT-01

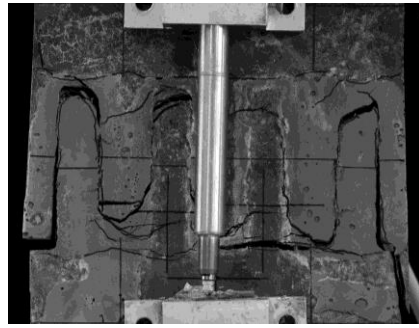


Abb. 4.34: Versagensbild bei Versuch Z1-MR-CA-RT-03

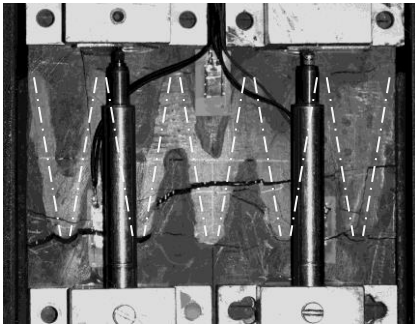


Abb. 4.35: Rissbild vor dem Versagen bei Versuch Z1-MR-WSG-FJ-03

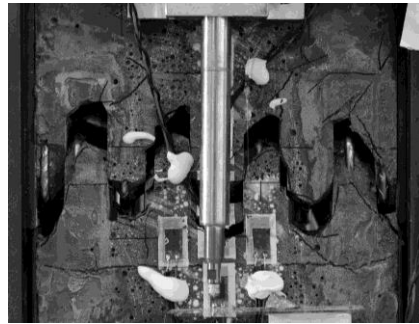


Abb. 4.36: Versagensbild bei Versuch Z1-SS-CA-RT-03

Bei den Versuchen der Serie Z1-SS-CA-RT mit Stabstahlbewehrung traten ebenfalls zunächst zwei Risse jeweils am Ende des Fugenbereichs auf. Mit zunehmender Belastung bildeten sich weitere Risse in den ungestörten Bereichen der Probekörper sowie im Fugenbereich, bevor es letztendlich zu einem schlagartigen Fugenversagen auf Maximallastniveau, einhergehend mit einem Lastabfall, kam. Teilweise wurde

#### 4 Voruntersuchungen

auch die Betondeckung abgesprengt (siehe Abb. 4.36). Durch Reibung in den Bruchflächen blieb bei weiterer Steigerung der Verformung noch eine Resttragfähigkeit erhalten. Die Rissbreite unmittelbar vor dem Versagen lag bei rund 0,1 mm.

Die Fuge stellt eine Bauteilschwächung dar. Hier ist die Längsbewehrung unterbrochen. Entscheidend für die Zugtragfähigkeit ist daher der Fugenanteil im senkrecht zur Hauptzugspannungsrichtung verlaufenden Bauteilquerschnitt.

In der Ebene mit dem maximalen Fugenanteil trat jeweils der Erstriss auf. Die Erstrisskraft bezogen auf den Bruttobetonquerschnitt, wird als Erstrissspannung  $\sigma_{cr}$  bezeichnet. Sie streute stark und lag zwischen 0,9 und 3,6 N/mm<sup>2</sup>.

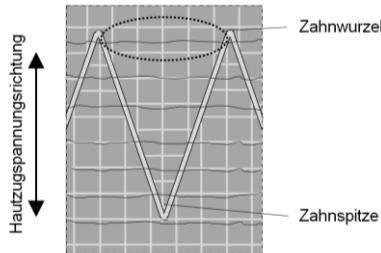


Abb. 4.37: Detail Fugenbereich – Begriffslichkeiten

Tab. 4.8: Ergebnisse der Zugversuche

Versuchsserie	$\sigma_{cr}$ <sup>a)</sup>	$A_{s,eff}$ <sup>b)</sup>	$\sigma_{c,y,m}$ <sup>c)</sup>	$\sigma_{s,y,m}$ <sup>d)</sup>	$\epsilon_{y,m}$ <sup>e)</sup>	$\sigma_{s,y,m,REF}$ <sup>f)</sup>	$\sigma_{c,u,m}$ <sup>g)</sup>	$\sigma_{s,u,m}$ <sup>h)</sup>	$\epsilon_{u,m}$ <sup>i)</sup>
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
Z1-MR-REF	2,7-3,6	~90,0	8,3	389	2,1	100	10	494	40,5
Z1-MR-CA-RT	2,7-3,3	62,0	5,4	378	1,1	97	6,6 <sup>2</sup>	462 <sup>2</sup>	9,4 <sup>2</sup>
Z1-MR-WSG-RT	2,4-2,8	~ 37,5 <sup>1</sup>	3,0	342	1,0	87	3,4	389	7,4
Z1-MR-WSG-FJ	2,7-3,3	~ 64,0 <sup>1</sup>	5,2	348	1,3	89	5,5	371	11,8
Z1-MR-WSG-UC	1,3-2,1	~ 28,1 <sup>1</sup>	2,4	366	1,0	94	2,7	415	10,7
Z1-SS-CA-RT	0,9-1,1	100	-	-	-	-	9,0	387	2,6

a)  $\sigma_{cr}$ : Erstrissspannung

b)  $A_{s,eff}$ : im Bereich der „Zahnwurzel“ jeweils vorhandene effektive Bewehrungsquerschnittsfläche

c)  $\sigma_{c,y,m}$ : mittlere Tragfähigkeit bezogen auf den Bruttobetonquerschnitt bei Erreichen der Streckgrenze

d)  $\sigma_{s,y,m}$ : mittlere Streckgrenze oder rechnerische Stahlspannung

e)  $\epsilon_{y,m}$ : mittlere Dehnung bei Erreichen der Streckgrenze

f)  $\sigma_{c,u,m}$ : mittlere Streckgrenze bezogen auf die mittlere Streckgrenze bei den Referenzversuchen

g)  $\sigma_{s,u,m}$ : mittlere maximale Tragfähigkeit bezogen auf den Bruttobetonquerschnitt

h)  $\sigma_{s,u,m}$ : mittlere rechnerische Stahlspannung oder mittlere maximale Tragfähigkeit bezogen auf  $A_{s,eff}$

i)  $\epsilon_{u,m}$ : mittlere Dehnung auf Maximallastniveau

<sup>1</sup> berechnet aus dem Betonquerschnitt der „Zahnwurzel“

<sup>2</sup> der ohne Verspannung durchgeführte Versuch Z1-MR-CA-RT-03 wurde hierbei nicht berücksichtigt

Der Lastabtrag erfolgte im Weiteren alleine durch die in den Zähnen vorhandene Bewehrung. In Tab. 4.8 sind die im Bereich der „Zahnwurzel“ jeweils vorhandenen effektiven Querschnittsflächen  $A_{s,eff}$  der rissüberbrückenden Bewehrung aufgeführt.

Im Falle der Versuche mit wasserstrahlgeschnittener Fugengeometrie handelt es sich dabei um den rechnerischen Bewehrungsquerschnitt, ermittelt aus dem Bewehrungsgehalt des ungeschwächten Querschnitts abzüglich der im Versagensschnitt vorhandenen Fugenfläche. Hierbei wies die Keilzinkengeometrie den höchsten Bewehrungsgehalt  $A_{s,eff}$  auf. Die mittlere maximale Tragfähigkeit bezogen auf die Betonquerschnittsfläche  $\sigma_{c,u,m}$  war hier mit im Mittel 5,5 N/mm<sup>2</sup> auch am höchsten (siehe Tab. 4.8). Bei den Referenzversuchen ohne Fuge betrug diese 10 N/mm<sup>2</sup>.

Im Falle der Serie Z1-MR-CA-RT mit Mikrobewehrung und geschalter Fugengeometrie war deutlich mehr Mikrobewehrung in den Zähnen vorhanden als bei den Versuchen der Serie Z1-MR-WSG-RT mit wasserstrahlgeschnittener Fugengeometrie. Die bezogene Tragfähigkeit  $\sigma_{c,u,m}$  war dementsprechend mit 6,6 N/mm<sup>2</sup> höher als bei der Serie Z1-MR-WSG-RT.

Die ebenfalls in Tab. 4.8 aufgeführten rechnerischen Stahlspannungen  $\sigma_{s,y,m}$  und  $\sigma_{s,u,m}$  wurden mit Hilfe der effektiven Bewehrungsgehalte  $A_{s,eff}$  und den entsprechenden Versuchslasten ermittelt. Im Falle der Referenzversuche (Z1-MR-REF) betrug die Streckgrenze  $\sigma_{s,y,m}$  389 N/mm<sup>2</sup> und die Stahlspannung auf Maximallastniveau  $\sigma_{s,u,m}$  rund 500 N/mm<sup>2</sup>. Bei den Versuchen mit Klebfugen und wasserstrahlgeschnittener Geometrie lag die Streckgrenze  $\sigma_{s,y,m}$  im Mittel zwischen 342 und 366 N/mm<sup>2</sup> und die maximale Stahlspannung  $\sigma_{s,u,m}$  im Mittel zwischen 371 und 415 N/mm<sup>2</sup>. Eine Ursache dafür, dass die rechnerischen Stahlspannungen bei den Versuchen mit Klebverbindung im Vergleich zu den Referenzversuchen allgemein geringer ausfielen, kann sein, dass tatsächlich weniger Bewehrung vorhanden war als der rechnerische Bewehrungsquerschnitt. Ein weiterer Grund kann darin liegen, dass die äußeren in den Zähnen liegenden Längsdrähte der Mikrobewehrung nicht ausreichend im Beton verankert sind, da die Querdrähte an der Fuge enden. Diese beteiligen sich dann nicht in dem Maße am Lastabtrag wie die Drähte im ungestörten Bauteil.

Der effektive Bewehrungsquerschnitt ist also geringer als angenommen. Im Hinblick auf ein Bemessungskonzept muss zusätzlich zu dem geometrischen Fugenanteil also ein weiterer, die Tragfähigkeit mindernder Einfluss der Fuge berücksichtigt werden.

Mit 9 N/mm<sup>2</sup> lag die auf den Bruttobetonquerschnitt bezogene Tragfähigkeit  $\sigma_{c,u,m}$  bei den Versuchen mit diskreter Bewehrung in Form von Schlaufen deutlich höher als bei den Versuchen mit Mikrobewehrung. Die mittlere rechnerische Stahlspannung  $\sigma_{s,u,m}$ , kurz bevor es zu dem Fugenversagen kam, betrug hier 387 N/mm<sup>2</sup> und lag damit weit unterhalb der Streckgrenze von rund 570 N/mm<sup>2</sup> (siehe Tab. 3.12).

Im Falle der Versuchskörper Z1-MR-CA-RT-01 und Z1-MR-SS-RT-01 waren beidseitig im Fugenbereich Dehnmessstreifen (DMS) auf der Bauteiloberfläche angeordnet (siehe Abb. 4.38 und Abb. 4.39). Hochleistungsbeton weist näherungsweise ein linear-elastisches Lastverformungsverhalten auf, weshalb das Hookesche Gesetz angewendet werden kann. Die Messwerte der DMS von Vorder- und Rückseite wurden jeweils gemittelt und daraus mit Hilfe des Beton-E-moduls  $E_{cm}$  gemäß Tab. 3.4 die Betonspannungen berechnet. In den Abb. 4.38 und Abb. 4.39 sind die Betonspannungen im Fugenbereich bei verschiedenen Laststufen (Werte in kN) darge-

4 Voruntersuchungen

stellt. Hierbei handelt es sich um Zugspannungen in Längsrichtung bezogen auf der Bauteilachse.

Bei der Klebverbindung liegt im Fugenbereich eine Art „Übergreifungsstoß“ vor. Kräfte lagern sich hierbei von einem Bewehrungselement auf das benachbarte Element über den Beton und die Fuge um. Dabei werden Verbundspannungen aktiviert (vgl. *Kurz 1997*). Der Verlauf und die Größe der Verbund- sowie Zugspannungen hängen entscheidend von der Steifigkeit der Materialien ab. Während bei Normalbeton eine kontinuierliche Umlagerung stattfindet, erfolgt die Umlagerung bei Hochleistungsbeton mit seiner dichten, homogenen Gefügestruktur und seinem höheren Elastizitätsmodul auf einer kurzen Strecke jeweils an den Stabenden (vgl. *Burkhardt 2000*). Dabei treten hohe Verbundspannungsspitzen auf. Im Falle der Klebverbindung mit diskreter Stabstahlbewehrung resultieren daraus hohe Zugspannungen im Beton am Anfang des Zahns (siehe Abb. 4.38). Dies war bereits zu einem frühen Zeitpunkt des Versuchs im noch ungerissenen Zustand festzustellen. Bei einer Versuchslast von rund 1 kN bildete sich der Erstriss im Bereich der Zahnwurzel. Mit weiterer Laststeigerung stiegen die Spannungen am Anfang des Zahns stark an, bis ab einer Versuchslast von 3,5 kN in dem Bereich die DMS ausfielen. Teilweise war ein Absprengen der Betondeckung zu verzeichnen.

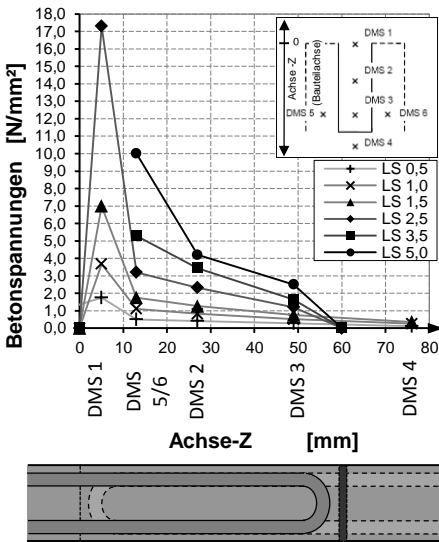


Abb. 4.38: Betonspannungen auf der Bauteiloberfläche bei Versuch Z1-SS-CA-RT-01

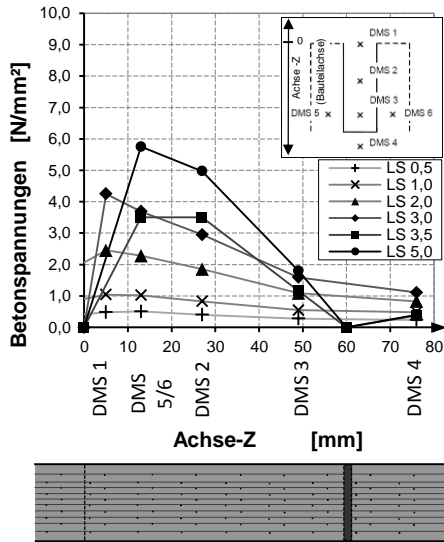


Abb. 4.39: Betonspannungen auf der Bauteiloberfläche bei Versuch Z1-MR-CA-RT-01

Im Falle des Versuchs Z1-MR-CA-RT-01 mit Mikrobewehrung waren zunächst - im Vergleich zum restlichen Probekörper - leicht erhöhte Betonspannungen an der Zahnwurzel zu verzeichnen. Mit dem Auftreten von Rissen an beiden Enden des Fugenbereichs lagerten sich die Spannungen in den mittleren Bereich des Zahns um. Insgesamt war die Spannungsverteilung im Vergleich zu dem Versuch mit Stabstahl-



bewehrung deutlich gleichmäßiger. Hier macht sich die Mikrobewehrung positiv bemerkbar. Der Stahl ist bessere im Bauteil verteilt.

#### 4.3.6 Ergebnisse der Vierpunkt- sowie Dreipunktbiegeversuche

Sowohl die 4-Punktbiegeversuche (Serie B1-MR-WSG-RT) als auch der 3-Punktbiegeversuch (Q1-MR-WSG-RT) wurden mehrmals unterbrochen und die Probekörper nach Rissen untersucht. Zunächst wiesen diese ein linear-elastisches Lastverformungsverhalten auf. Wie auch in den Zugversuchen trat der Erstriss jeweils an einem Ende des Fugenbereichs und verlief rechtwinklig zur Hauptzugspannungsrichtung entlang der Zahnspitzen. Ein weiterer Riss entstand am anderen Ende des Fugenbereichs. Bei den Vierpunktbiegeversuchen öffnete sich im weiteren Verlauf einer der beiden Risse, im Falle des Dreipunktbiegeversuchs war es der, der Lasteinleitung nahe liegende Riss, bis es schließlich zu einem Bewehrungsversagen kam (siehe Abb. 4.43). Das Tragverhalten lässt sich auch hier in beiden Fällen als duktil einstufen (siehe Abb. 4.40 und Abb. 4.41).

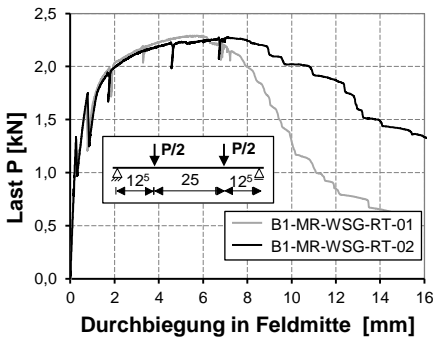


Abb. 4.40: Durchbiegung in Feldmitte bei den Vierpunktbiegeversuche

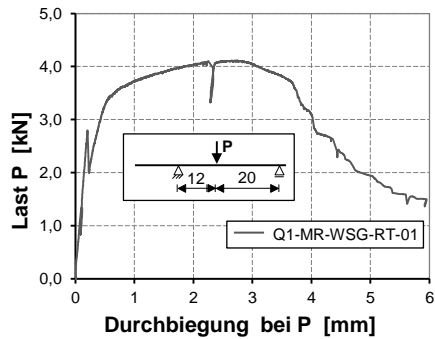


Abb. 4.41: Durchbiegung bei P im Dreipunktbiegeversuch

Im Falle der Vierpunktbiegeversuche begann die Bewehrung ab einer Durchbiegung von etwa 1,5 mm zu fließen. Bei einer Durchbiegung von 2 mm betrug die Rissbreite 0,3 bis 0,4 mm. Im Falle der Dreipunktbiegeversuche begann die Bewehrung bei einer Durchbiegung von etwa 0,6 mm zu fließen. In Abb. 4.42 ist das Verformungsbild auf Maximallastniveau zu sehen. Zu erkennen ist hier, dass sich im Fugenbereich ein Fließgelenk ausbildete.

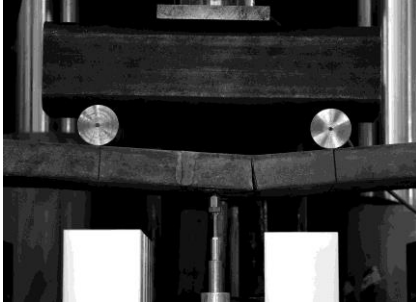


Abb. 4.42: Verformungsbild bei Versuch B1-MR-WSG-RT-01 auf Maximallastniveau



Abb. 4.43: Rissbild auf der Unterseite des Probekörpers bei Versuch B1-MR-WSG-RT-01

Bei den Versuchen der Serie B1-MR-WSG-RT, bei denen im Fugenbereich eine reine Biegebeanspruchung vorlag, betrug das Bruchmoment 141 Nm. Im Falle des Versuchs Q1-MR-WSG-RT lag im Fugenbereich eine kombinierte Querkraft-Biegebeanspruchung vor. Das Bruchmoment betrug hierbei 138 Nm und war damit nur geringfügig niedriger als bei den Vierpunktbiegeversuchen. Die Querkraft wirkt sich offenbar nicht signifikant auf die Fugentragfähigkeit aus. Um eine gesicherte Aussage treffen zu können, waren jedoch deutlich mehr Versuche erforderlich.

### 4.3.7 Fazit

Bei der Versuchsserie mit unterschiedlichen Klebverbindungsvarianten hat sich gezeigt, dass die Realisierung von Fugengeometrien durch eine entsprechende Schalung bei mikrobewehrten Bauteilen nicht praktikabel ist. Das Einlegen der Mikrobewehrung in die Zähne ist sehr zeitintensiv. Bei geschalteten Fugengeometrien müssen die Klebflächen nachbearbeitet werden, was sich bei komplexen Fugengeometrien ebenfalls als schwierig erwiesen hat. Als eine praktikable Möglichkeit, Fugen bei mikrobewehrten Bauteilen zu realisieren, hat sich das Schneiden mittels Hochdruckwasserstrahl erwiesen.

Eine wichtige Erkenntnis der Tastversuche an verschiedenen Klebverbindungsvarianten war, dass durch die geschickte Wahl der Fugengeometrie ein Versagen in der Klebfuge ausgeschlossen werden kann. Bei den Versuchen mit Mikrobewehrung war stets ein Bewehrungsversagen zu beobachten. Das Tragverhalten kann hierbei als duktil eingestuft werden. Das Versagen findet im Bauteilquerschnitt mit dem höchsten Fugenanteil statt, in einem Riss rechtwinklig zum einwirkenden Hauptspannungszustand. Wie sich gezeigt hat, hängt die Tragfähigkeit in erster Linie vom in diesem Schnitt in der Zahnwurzel vorhandenen effektiven Bewehrungsquerschnitt ab. Die sich aus dem effektiven Bewehrungsquerschnitt und der Festigkeit der Mikrobewehrung ergebende Tragfähigkeit wurde jedoch nicht erreicht. Zusätzlich zu dem geometrischen, den Bewehrungsquerschnitt mindernden Anteil der Fuge, gibt es einen weiteren, die Tragfähigkeit mindernden Einfluss, den es im Hinblick auf ein Bemessungskonzept zu berücksichtigen gilt.

Im Vergleich zur Rechteckgeometrie und zur Hinterschnittgeometrie ist bei der Keilgeometrie diese Querschnittsschwächung der Bewehrung am geringsten. Die Tragfähigkeit war dementsprechend am höchsten. Aus diesen Gründen konzentrierten sich die weiteren Untersuchungen auf die Keilgeometrie oder Keilzinkenverbindung.

Die Auswertung der Dehnungsmessungen hat gezeigt, dass die Spannungsverteilung im Fugenbereich bei der mikrobewehrten Variante sehr viel gleichmäßiger ist als bei dem Versuch mit Stabstahlbewehrung.

Bei den Versuchen mit Stabstahlbewehrung wurde die höchste Tragfähigkeit erzielt. Für Anwendungsfälle, bei denen höhere Schnittkräfte übertragen werden sollen, sind Klebverbindungen mit diskreter Bewehrung möglicherweise zu bevorzugen. Wie sich in den Versuchen gezeigt hat ist das Versagen tendenziell schlagartig. Dies gilt es im Hinblick auf ein Bemessungskonzept zu berücksichtigen.

### 4.4 Rechnerische Voruntersuchungen

#### 4.4.1 Allgemeines

In den Tastversuchen hat sich gezeigt, dass im Fugenbereich ein komplexer Spannungszustand herrscht. Mithilfe der DMS konnten punktuell Dehnungen auf der Bauteiloberfläche erfasst und daraus Spannungen abgeleitet werden. Ergänzend zu den experimentellen Untersuchungen wurden (vgl. *Oster et al 2012*) numerische Berechnungen mit Hilfe der Finite-Elemente Software ANSYS Workbench durchgeführt. Ziel war es, einen Eindruck von der Spannungsverteilung im Fugenbereich bei zugbeanspruchten Bauteilen aus mikrobewehrtem Hochleistungsbeton zu bekommen. Dabei wurden die drei in 4.3 beschriebenen Fugengeometrien im ungerissenen sowie im gerissenen Zustand untersucht.

#### 4.4.2 Modellbildung und Simulation

Für die Berechnung wurde sowohl für den HPM Klebstoff als auch den mikrobewehrten HPC ein lineares Materialmodell verwendet. Der für den Klebstoff angesetzte E-Modul betrug  $34.000 \text{ N/mm}^2$ . Bei mikrobewehrtem Hochleistungsbeton handelt es sich um einen Verbundwerkstoff, welcher ein anisotropes Materialverhalten aufweist. Mithilfe eines numerischen Homogenisierungsverfahrens (vgl. *Oster et al 2012*) wurden am Fraunhofer ITWM in Kaiserslautern aus den Elastizitätsmoduli der Komponenten Mikrobewehrung und Hochleistungsbeton die effektiven orthotropen Elastizitätskoeffizienten in den verschiedenen Bauteilrichtungen ermittelt. In Bauteilebene ergab sich ein effektiver Elastizitätsmodul von  $40.900 \text{ N/mm}^2$  und in Dickenrichtung von  $38.200 \text{ N/mm}^2$ .

Unter Berücksichtigung von Symmetriebedingungen wurden die verschiedenen Varianten dreidimensional modelliert. Für den „gerissenen“ Fall (Zustand II) wurde hierbei vereinfacht nur ein Ausfall der Fuge im Bereich der Zahnsitzen berücksichtigt. Tatsächlich verliefen die in den Versuchen beobachteten Risse auch durch den bewehrten Beton im Bereich der Zahnwurzeln. Die simulierten Betonspannungen im Bereich der Zahnwurzeln (siehe Abb. 4.39) entsprechen daher nicht der Realität. Am Riss

sind diese gleich Null, wie sich auch in den Zugversuchen gezeigt hat (siehe Abb. 4.38 und Abb. 4.39).

An einem Ende wurden die Probekörper fixiert gelagert (Festlagerung) und am anderen Ende mit einer Zugspannung von  $2 \text{ N/mm}^2$  zentrisch beansprucht. Zwischen Klebstoff und Beton wurde jeweils ein starrer Verbund angesetzt. In Voruntersuchungen wurde der Einfluss der Elementgröße auf die Berechnungsergebnisse untersucht. Letztendlich wurden Hexaederelemente mit Kantenlängen von  $1 \text{ mm}$  verwendet.

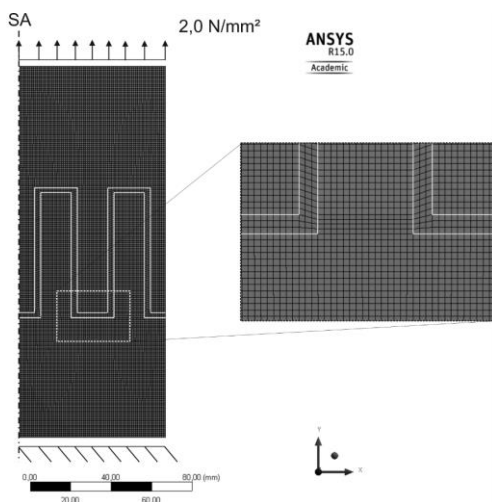


Abb. 4.44: Finite-Elemente-Modell. Hier exemplarisch für die Rechteckgeometrie

### 4.4.3 Auswertung – Postprocessing

In Abb. 4.45, Abb. 4.46 und Abb. 4.47 sind die Hauptnormalspannungsverteilungen für die verschiedenen Fugengeometrien bei einer Zugbeanspruchung von  $2 \text{ N/mm}^2$  dargestellt, zum einen im Zustand I (links) und zum Anderen mit simulierten Rissen in der Klebfuge im Bereich der Zahnspitze (rechts).

Aufgrund der Tatsache, dass sich die E-moduli von Bauteilmaterial und Klebstoff nur geringfügig unterscheiden, sind die Spannungsunterschiede zwischen Fuge und Beton gering. Die Spannungen in den Bereichen der Fuge, welche parallel zur Beanspruchungsrichtung verlaufen, sind niedriger als im übrigen Teil des Bauteils. Bei der Rechteckgeometrie und der Hinterschnittgeometrie treten die maximalen Spannungen im Bereich der Zahnwurzel auf. Dies hatte sich bereits in den experimentellen Untersuchungen gezeigt. Im Falle der Keilzinkengeometrie sind die Spannungen in den Zähnen gleichmäßiger. Die Beanspruchung ist dabei in den Zähnen höher als im Bereich der Zahnwurzel, was erklärt, warum in den Versuchen hier Risse nicht nur am Ende des Fugenbereichs zu beobachten waren.

Im Falle der Simulation mit Rissen im Bereich der Zahnspitzen sind im Bereich der Zahnwurzel jeweils am Rand Spannungsspitzen zu beobachten.

In Wirklichkeit reißt der Beton an der Stelle. Kräfte werden dann alleine von der Mikrobewehrung übertragen. Der Beton lässt Spannungsumlagerungen nur in geringem Maße zu und verhindert, dass die Bewehrung im Riss voll ins Fließen kommt. Die Ergebnisse lassen vermuten, dass die Bewehrung im Riss eine ungleichmäßige Beanspruchung erfährt. Dies würde erklären, warum die Probekörper auf einem niedrigerem Lastniveau versagen, als dies die im Riss vorhandene Bewehrung und die Festigkeit des Drahts erwarten lassen (rechnerische Tragfähigkeit) (vgl. Abs. 4.3.5). Im Falle der Keilzinkengeometrie liegt eine sehr viel gleichmäßigere Spannungsverteilung im Fugenbereich vor als bei den anderen beiden untersuchten Varianten.

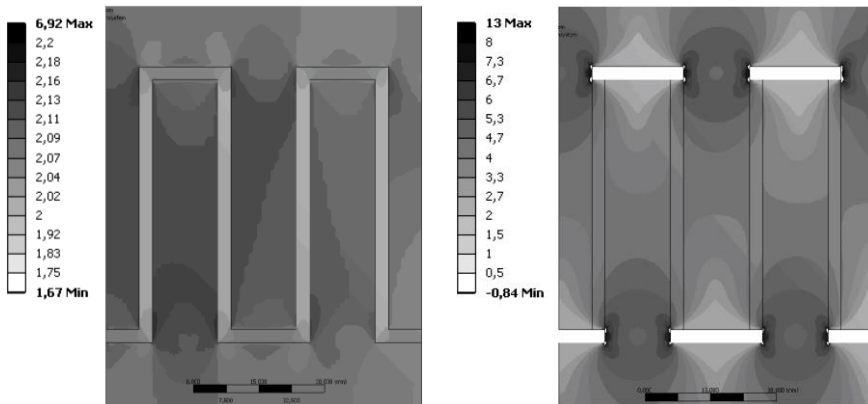


Abb. 4.45: Hauptnormalspannungsverteilung im Falle der Rechteckgeometrie bei einer Zugbeanspruchung von  $2 \text{ N/mm}^2$ : links im Zustand I; rechts mit simulierten Rissen in der Klebfuge im Bereich der Zahnspitze

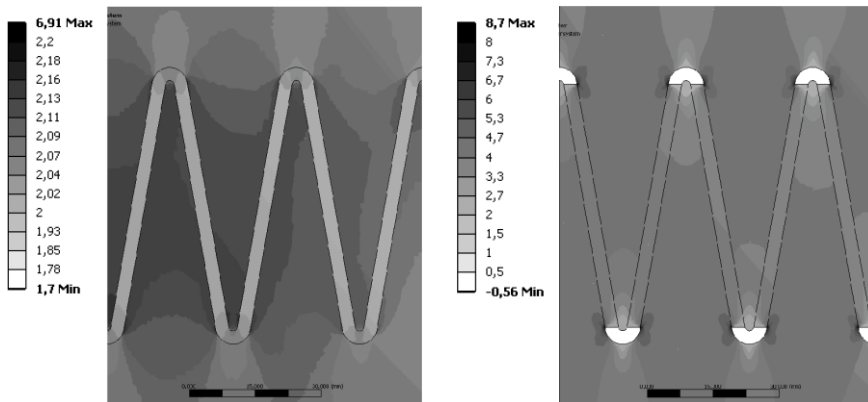


Abb. 4.46: Hauptnormalspannungsverteilung im Falle der Keilzinkengeometrie bei einer Zugbeanspruchung von  $2 \text{ N/mm}^2$ : links im Zustand I; rechts mit simulierten Rissen in der Klebfuge im Bereich der Zahnspitze

## 4 Voruntersuchungen

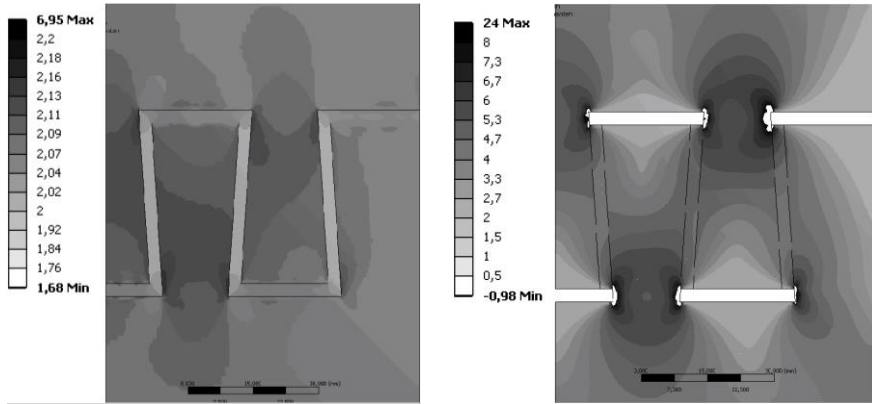


Abb. 4.47: Hauptnormalspannungsverteilung im Falle der Hinterschnittgeometrie bei einer Zugbeanspruchung von  $2 \text{ N/mm}^2$ : links im Zustand I; rechts mit simulierten Rissen in der Klebfuge im Bereich der Zahns Spitze

## 5 Experimentelle Untersuchungen

### 5.1 Untersuchungen zur Formulierung eines Bruchkriteriums für Klebfugen

#### 5.1.1 Allgemeines

In den Tastversuchen war lediglich bei der Klebverbindung mit diskreter Bewehrung ein Fugenversagen zu beobachten. Wird die Fugengeometrie verändert, kommt es möglicherweise auch bei mikrobewehrten Bauteilen zu einem Fugenversagen. Zu wissen bei welcher Beanspruchung oder unter welchen Umständen ein Fugenversagen eintritt, ist Grundvoraussetzung für die Bemessung von Klebverbindungen. Es galt daher, ein entsprechendes Bruchkriterium für die Klebfuge zu entwickeln, mit dem sich das Versagen bei den darin vorherrschenden Beanspruchungszuständen zuverlässig vorhersagen lässt.

Intensiv erforscht wurde bereits das Schubtragverhalten von Verbundfugen, wie sie bei der Halffertigteilbauweise vorkommen, sowie das Tragverhalten von Betonverklebungen im Zusammenhang mit der Entwicklung der Segmentklebebauweise. Der Schwerpunkt lag dabei hauptsächlich auf schub-druckbeanspruchten Fugen. Hierfür existieren entsprechende Bruchkriterien. Den Einsatz eines zementgebundenen Klebstoffs zum Fügen von Bauteilen aus Hochleistungsbeton untersuchte *Mühlbauer 2012*. Er entwickelte ein Bruchkriterium, mit dem sich die Tragfähigkeit der Klebfuge unter einer Schub-Druckbeanspruchung bestimmen lässt. Insbesondere bei der favorisierten Keilzinkenverbindung liegt jedoch in der Fuge eine Schub-Zugbeanspruchung vor. Hierfür existierte bislang kein Bruchkriterium.

Mit dem Ziel, ein integriertes Bruchkriterium sowohl für den Schub-Druck- als auch für den Schub-Zugbereich zu entwickeln, wurden in einem weiteren Arbeitsschritt entsprechende experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Nachfolgend werden die verschiedenen Versuchsserien zunächst einzeln vorgestellt und in einem Abschnitt am Ende gemeinsam ausgewertet. Erste Ergebnisse wurden bereits in *Oster und Kohlmeyer 2013* und *Oster und Kohlmeyer 2014* vorgestellt.

##### 5.1.1.1 Versuchsprogramm

In Tab. 5.1 ist das absolvierte Versuchsprogramm aufgeführt. Dieses sah Zugversuche, Schub-Zugversuche sowie Schub-Druckversuche vor. Über die Variation des Fugeneigungswinkels wurden hierbei verschiedene Schubspannungs-Normalspannungs-Kombinationen abgetestet. Es wurden außerdem verschiedene Arten der Klebflächenvorbehandlung untersucht. Als Klebstoff wurde sowohl der HFL als auch der HPM2 eingesetzt. Die Klebschichtdicke betrug 2 mm. Zur Formulierung eines Bruchkriteriums wurden auch die Ergebnisse der in Abs. 4.1 beschriebenen Haftzugversuche mit herangezogen. Hierbei wurde eine Klebschichtdicke von 1 sowie 3 mm untersucht. Planmäßig wurden immer mindestens fünf Versuche je Konstellation durchgeführt.

Tab. 5.1: Versuchsprogramm der experimentellen Untersuchungen zur Formulierung eines Bruchkriteriums für Klebfugen

Versuch	Klebstoff	Klebfläche	Neigungswinkel [°]	Klebschichtdicke [mm]	Anzahl
Zugversuch HZ1 (Abs. 4.1)	HPM-2	schalglatt	0	1+3	5
		geschnitten <sup>1</sup>		1+3	5
		wasserstrahl- geschnitten		1+3	5
		maximal gesandstrahlt		1+3	5
Zugversuch HZ3	HFL	schalglatt	0	2	5
		geschnitten <sup>1</sup>		2	5
		Wasserstrahl- geschnitten		2	5
		maximal gesandstrahlt		2	5
		gewaschen		2	6
Schub-Zug- versuch SZ2	HFL	schalglatt	0, 15, 30, 45	2	5
		wasserstrahl- geschnitten	0, 15, 30, 45	2	5
Schub-Druck- versuch SD	HPM-2	schalglatt	45+60	2	6
		gewaschen	45+60	2	6
	HFL	schalglatt	45+55+60+65	2	5-6
		gewaschen	45+55+60+65	2	5-6
		geschnitten <sup>1</sup>	55+60+65	2	5
		wasserstrahl- geschnitten	55+60+65	2	5
		maximal gesandstrahlt	55+60+65	2	5

<sup>1</sup>mit einer Steinsäge (Diamantsägeblatt)

Die Bezeichnung der Versuche und Probekörper ist in Abb. 5.1 erläutert. Diese ist auch hier in mehrere Teile gegliedert, die durch Bindestriche voneinander getrennt sind. An erster Stelle ist der Versuchsaufbau oder Probekörpertyp aufgeführt, an der zweiten Stelle der Klebflächen-Neigungswinkel (entfällt bei den Haftzugversuchen), an dritter Stelle die Art der Klebflächenvorbehandlung (siehe auch Tab. 5.1), an vierter Stelle die Klebschichtdicke und an fünfter Stelle der eingesetzte Klebstoff. Die Versuchsbezeichnung schließt mit der Versuchsnummer ab.



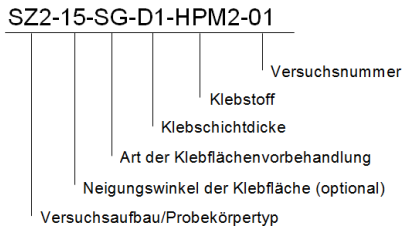


Abb. 5.1: Versuchsbezeichnung (siehe auch Tab. 5.1)

### 5.1.2 Zug- und Schub-Zugversuche SZ2

#### 5.1.2.1 Allgemeines

Erste Zug- und Schub-Zugversuche wurden mit Hilfe des in Abs. 4.1 beschriebenen Probekörpers HZ1 durchgeführt. Die Klebfläche war dabei entsprechend geneigt (siehe auch Abb. 4.2). Selbst bei einem Flankenneigungswinkel von 30° war hierbei häufig ein Bruch im Probekörper zu verzeichnen, so dass die Ergebnisse zur Formulierung eines Bruchkriteriums unbrauchbar waren.

Die im Rahmen dieser Versuchsserie eingesetzten Probekörper SZ2 (siehe Abb. 5.2) wurden daher bewehrt ausgeführt. Außerdem wurde der Versuchsaufbau weiter verbessert.

#### 5.1.2.2 Probekörper

Für die Versuche mit wasserstrahlgeschnittener Klebfläche wurde eine großformatige mit 18 Lagen Mikrobewehrung versehene Platte aus HPC-2 betoniert. Nach rund einer Woche wurden die einzelnen Probekörperhälften mittels Hochdruckwasserstrahl aus der Platte herausgeschnitten. Zur Herstellung der Probekörper für die Versuche mit schalglatter Klebfläche wurde der HPC-3 mit Mikrostahlfasern verwendet. Hierbei kamen Kunststoffschalungen mit rechteckigem Grundriss zum Einsatz. In diese wurden Stahlplättchen im entsprechenden Winkel eingestellt, so dass zwei Hälften entstanden. Die Taillierung wurde durch Wasserstrahlschneiden realisiert.

Etwa zwei Wochen nach der Betonage wurden die beiden Probekörperhälften verklebt. Hierbei wurden die in den Voruntersuchungen zur Optimierung des Haftverbands gewonnenen Erkenntnisse (siehe Abs. 4.1) berücksichtigt. Die bis dahin unter feuchten Tüchern gelagerten Probekörperhälften wurden zwei Tage vor dem Verkleben in ein Wasserbad gelegt. Rund ein Stunde vor dem Verkleben wurden diese wieder herausgenommen und auf einer Holzplatte entsprechend ausgerichtet. Fixiert waren die Füge-teile mit doppelseitigem Klebeband. Der Fugenspalt wurde anschließend mit dem hoch fließfähigen HFL vergossen. Seitlich am Fugenspalt angebrachtes Klebeband verhinderte ein Herauslaufen des Klebstoffs. Nach dem Verkleben wurden die Probekörper mit nassen Stofftüchern abgedeckt.

Im Zuge der Betonage und des Verklebens wurden drei Prismen aus HPC bzw. Klebstoff hergestellt, um damit die Biegezugfestigkeit und die Druckfestigkeit nach

DIN 18555-3: 1982-09 am Versuchstag bestimmen zu können. Die Prismen wurden bis zur Prüfung zusammen mit den Versuchskörpern gelagert.

### 5.1.2.3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Der bei den Zug- und Schub-Zugversuchen verwendete optimierte Versuchsaufbau ist in Abb. 5.3 zu sehen. Auch hierbei wird die Last über aufgeklebte Stahlprismen in die Probekörper eingeleitet. Werden diese nicht exakt gerade geklebt, entstehen ungewollte Exzentrizitäten, welche Biegemomente im Probekörper zur Folge haben. Bei dem bis dahin verwendeten Versuchsaufbau verstärkte sich die Problematik dadurch, dass sich das Kugelgelenk relativ weit weg vom Probekörper befand. Im Falle des Versuchsaufbaus Z2 wird die gelenkige Lagerung durch Schekel realisiert. Die Befestigung erfolgt hier sehr viel näher am Probekörper. Dadurch, dass der Hebelarm geringer ist, wirken sich Ungenauigkeiten beim Aufkleben der Stahlprismen weniger stark auf die Versuchsergebnisse aus.

Die Prüfungen wurden etwa vier Wochen nach dem Kleben durchgeführt. Dabei erfolgte die Lastaufbringung weggesteuert mit einer Geschwindigkeit 0,01 mm/Sek. Zur Messung der Versuchslast wurde die in der Prüfmaschine integrierte Kraftmessdose verwendet.

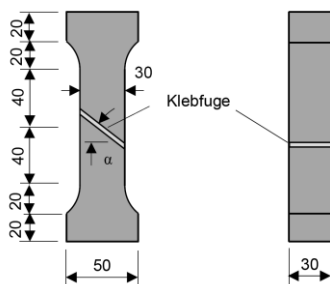


Abb. 5.2: Abmessungen der Schub-Zugprobekörper SZ2

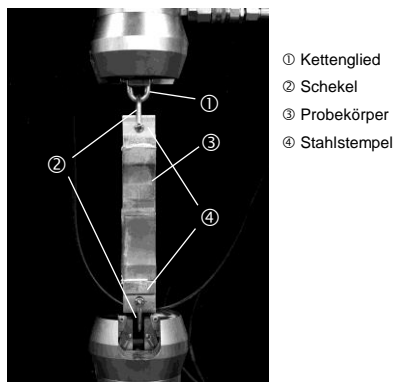


Abb. 5.3: Bei den Schubzugversuchen SZ2 eingesetzter Aufbau

### 5.1.2.4 Versuchsergebnisse

Bei den Versuchen mit schalglatter Klebfläche war in den meisten Fällen ein adhäsives Versagen zu verzeichnen (siehe Abb. 5.4). Im Falle der Versuche mit durch Wasserstrahlschneiden erzeugter Klebfläche war teilweise ein kohäsives Versagen und teilweise ein adhäsives Versagen jeweils in Kombination mit leichten Betonausbrüchen zu beobachten (siehe Abb. 5.5). Vereinzelt kam es auch zu einem Mischversagen aus Adhäsions- und Kohäsionsbruch. Bei den Versuchen mit einem Neigungswinkel von  $45^\circ$  sowie  $30^\circ$  traten teilweise Querrisse im Beton auf, bevor es letztendlich zu einem Fugenversagen kam.

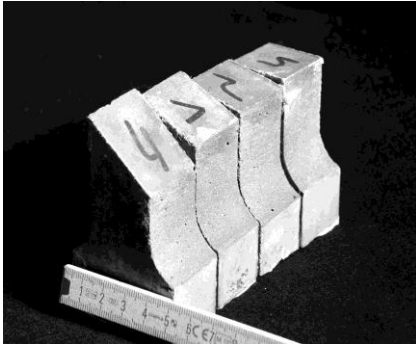


Abb. 5.4: Schub-Zugprobekörper mit schalglatter Kleblfläche nach dem Versuch

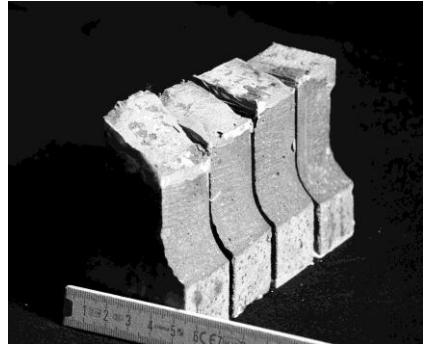
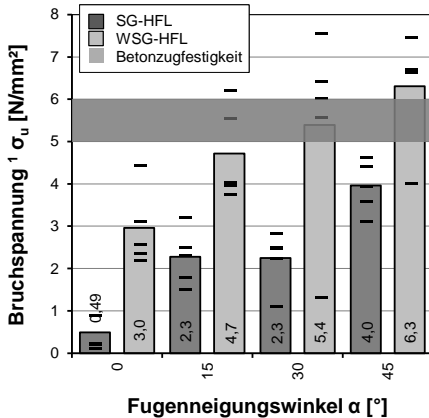


Abb. 5.5: Schub-Zugprobekörper mit wasserstrahlgeschnittener Kleblfläche nach dem Versuch



<sup>1</sup> bezogen auf die vorhandene Brutto-Betonquerschnittsfläche

Abb. 5.6: Bruchspannungen  $\sigma_u$  bei den Schub-Zugversuchen im Vergleich

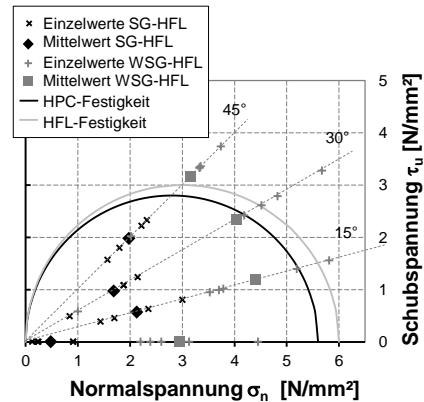


Abb. 5.7: Darstellung der beim Versagen in der Klebfuge herrschenden Spannungszustände

Die Zusammenhänge bei Schub-Druckversuchen, welche prinzipiell auf Schub-Zugversuche übertragbar sind, wurden in Abs. 2.2.4.4 beschrieben.

In Abb. 5.6 sind die bei den Versuchen erreichten Bruchspannungen  $\sigma_u$  als Einzelwerte sowie Mittelwerte für die verschiedenen Serien aufgeführt. Hierbei handelt es sich um die beim Versagen im Probekörper herrschenden Hauptnormalspannungen.

Die bei den einzelnen Versuchsserien vorhandene Streuung sowie die charakteristische Bruchfestigkeit als 5%-Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75 % sind in Anhang D aufgeführt. Auch hier wurde von einer unbekanntem Standartabweichung der Grundgesamtheit ausgegangen.

Daneben sind im Anhang auch die Materialfestigkeiten am Versuchstag oder die vorhandenen Bauteilabmessungen übersichtlich zusammengestellt.

Die in der Klebfuge beim Versagen herrschenden Spannungszustände sind in Abb. 5.7 im Schubspannungs-Normalspannungsdiagramm dargestellt. Ein limitierender Faktor bei Schub-Zugversuchen ist die Festigkeit des Probekörpermaterials. Ist diese nicht ausreichend hoch, tritt ein Versagen im Probekörper ein und es kann keine Aussage über die Fugenfestigkeit getroffen werden. In Abb. 5.7 sind ebenfalls die Spannungskreise der einaxialen Beton- sowie der Klebstoffzugfestigkeit am Versuchstag dargestellt. Die Zugfestigkeit des Betons lag zwischen 5 und 6 N/mm<sup>2</sup>, die des Klebstoffs bei rund 6 N/mm<sup>2</sup>. Im Falle der Versuche mit wasserstrahlgeschnittener Klebfläche und einem Flankenneigungswinkel von 45° sowie 30° lagen die Spannungen deutlich über der einaxialen Materialfestigkeit. Dies erklärt die Risse im Beton.

Wie zu erwarten war, wiesen die durch Wasserstrahlchneiden erzeugten Klebflächen allgemein deutlich höhere Fugenfestigkeiten auf. Die Streuung war bei den Schub-Zugversuchen generell hoch (siehe Abb. 5.6). Im Falle der Versuche mit durch Wasserstrahlchneiden erzeugten Klebflächen lag diese zwischen 20 und 44%. Bei den Versuchen mit schalglatter Klebfläche betrug die Streuung bis zu 76%.

Die großen Streuungen bei diesen und andere im Rahmen der Arbeit durchgeführten Haftzugversuchen sind im geringe Umlagerungsvermögen des mineralischen Klebstoffs - als sprödem Werkstoffs - unter Zugbeanspruchung begründet sowie im gewählten Versuchsaufbau. Fehlstellen in der Klebschicht wie beispielsweise Poren oder Mikrorisse aber auch bereichsweise auf der Klebfläche vorhandene Verschmutzungen wirken sich unmittelbar festigkeitsmindernd aus.

### 5.1.3 Zugversuche HZ3

#### 5.1.3.1 Allgemeines

Es wurde vermutet, dass eine Ursache für die große Streuung bei den Schub-Zugversuchen sowie bei den in Abs. 4.1 aufgeführten Haftzugversuchen in unsauber verklebten Probekörpern zu suchen ist. Sind diese leicht versetzt oder winklig verklebt, ergibt sich eine Biegebeanspruchung für die Fuge. Bei einer Exzentrizität von einem Millimeter und einer Zugbeanspruchung von 7,0 N/mm<sup>2</sup> beträgt die Biegezugspannung am Rand der Probekörper rund 1,0 N/mm<sup>2</sup>.

In Anlehnung an *Juhart et al 2007* wurde die Haftzugfestigkeit daher in einer weiteren Versuchsserie an Bohrkernen ermittelt. Hierbei können Biegebeanspruchungen weitestgehend ausgeschlossen werden.

#### 5.1.3.2 Probekörper

Zunächst wurden mehrere Balken mit den Abmessungen von 150x150x750 mm aus HPC-2 hergestellt. Einer war dabei mit Mikrobewehrung versehen. Entsprechend dem in Abs. 4.1 beschriebenen Verfahren wurde die Unterseite zweier Balken unmittelbar nach dem Ausschalen „gewaschen“. Etwa eine Woche nach der Betonage wurden alle Balken auf der Oberseite abgeschliffen und horizontal aufgesägt. An-

schließlich wurden die Klebflächen teilweise, wie im Versuchsprogramm (siehe Tab. 5.1) vorgesehen, weiter bearbeitet.

Die bis dahin unter feuchten Tüchern gelagerten Betonplatten wurden zwei Tage vor dem Verkleben in einem Wasserbad eingelagert. Eine Stunde davor wurden sie wieder herausgenommen. Die Platten sollten liegend verklebt werden. An den Unterseiten musste dazu eine entsprechende Schalung angebracht werden (siehe Abb. 5.8). Stahlplättchen dienten als Abstandhalter, so dass die gewünschte Klebschichtdicke exakt realisiert werden konnte. Zwei Tage vor den Versuchen wurden dann die Bohrkerne mit einem Durchmesser von 50 mm entnommen.

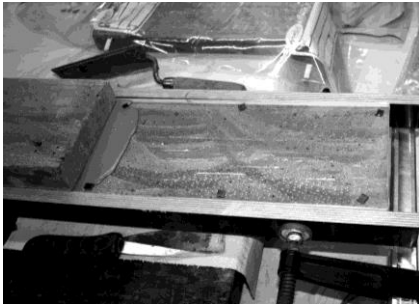


Abb. 5.8: Herstellung der Probekörper



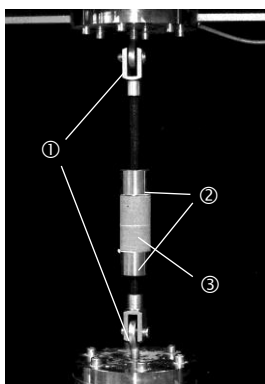
Abb. 5.9: Fertiger Probekörper. Bohrkern mit Klebfuge

Im Zuge der Betonage und des Verklebens wurden drei Prismen aus HPC bzw. Klebstoff hergestellt, um damit die Biegezugfestigkeit und die Druckfestigkeit nach *DIN 18555-3: 1982-09* am Versuchstag bestimmen zu können. Die Prismen wurden wiederum bis zur Prüfung zusammen mit den Versuchskörpern gelagert.

### 5.1.3.3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die Prüfung der Haftzugfestigkeit erfolgte etwa 28 Tage nach dem Verkleben in einem Zwei-Säulen-Prüfrahmen mit servohydraulischem 250 kN Zylinder. Der dabei eingesetzte Versuchsaufbau HZ3 ist in Abb. 5.10 zu sehen. Die Lasteinleitung wurde durch runde aufgeklebte Stahlstempel realisiert.

Wie auch bei den Zugversuchen HZ1 und Z2 wurde die Last weggesteuert mit einer Geschwindigkeit 0,01 mm/Sek aufgebracht. Die Erfassung der Versuchslast erfolgte mit Hilfe der in der Prüfmaschine vorhandenen Kraftmessdose.



- ① Kugelgelenke
- ② Stahlstempel
- ③ Probekörper (Bohrkern)

Abb. 5.10: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Haftzugfestigkeit HZ3

Die Probekörper mit wasserstrahlgeschnittener sowie gewaschener Klebfläche, bei denen es zu einem adhäsiven Fugenversagen kam, wurden ein zweites Mal geprüft. Dazu wurden die Stahlstempel direkt auf die noch intakte Klebschicht geklebt. Diese Wiederholungsversuche sind nicht im Versuchsprogramm in Tab. 5.1 enthalten.

### 5.1.3.4 Versuchsergebnisse

Im Falle der Haftzugversuche mit gesandstrahlter Klebfläche kam es vereinzelt zu einem kohäsiven Versagen. Bei den Versuchen mit durch Schneiden mit einer Steinsäge erzeugten Klebflächen ereignete sich in zwei Fällen ein Betonversagen. Sonst waren durchweg Adhäsionsbrüche zu verzeichnen (siehe Abb. 5.11).

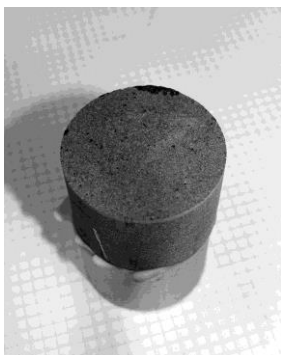


Abb. 5.11: Adhäsives Versagen bei einem Versuch mit gewaschener Klebfläche

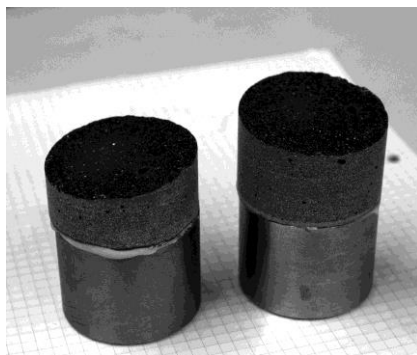


Abb. 5.12: Betonversagen bei einem Wiederholungsversuch

Das Versagen unterscheidet sich damit von dem in den Schub-Zugversuchen bei durch Wasserstrahl schneiden erzeugten Klebflächen für einen Fugenneigungswinkel von null Grad beobachteten Versagen. Der Bruch ereignete sich immer in der oberen Grenzschicht (bezogen auf den Herstellungsvorgang) zwischen Klebstoff und Beton. In der Bruchfläche waren im Klebstoff unzählige, sehr kleine Luftporen zu erkennen. Bei den Schub-Zugversuchen waren hingegen nur vereinzelt Luftporen in der Kleb-

ge vorhanden. Im Gegensatz zu den Schub-Zugversuchen verlief die Fuge bei der Probekörperherstellung hier vertikal, so dass der Klebstoff offenbar nicht ausreichend entlüften konnte. Ein weiterer Grund für das hier beobachtete Versagen ist vermutlich auch, dass der frische HFL zu einer Hautbildung neigt, und diese Haut den Haftverbund negativ beeinflusst.

Bei den Wiederholungsversuchen kam es immer zu einem Betonversagen (siehe Abb. 5.12).

In Abb. 5.14 sind für die einzelnen Versuchskonstellationen die Mittelwerte der Haftzugfestigkeiten jeweils in Balkenform dargestellt sowie die entsprechenden Einzelwerte. Die Versagenslasten der einzelnen Versuche sowie Informationen, wie z.B. die Materialfestigkeiten am Versuchstag oder die vorhandenen Bauteilabmessungen, sind wiederum in Anhang D übersichtlich zusammengestellt. Im Anhang sind außerdem die bei einzelnen Versuchsserien vorliegende Streuung sowie die charakteristische Haftzugfestigkeit als 5%-Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75 % aufgeführt. Die Standardabweichung der Grundgesamtheit ist unbekannt und kann daher nur abgeschätzt werden. Angewendet wurde hierfür das in *DIN EN 1990: 2010-12* beschriebene Verfahren.

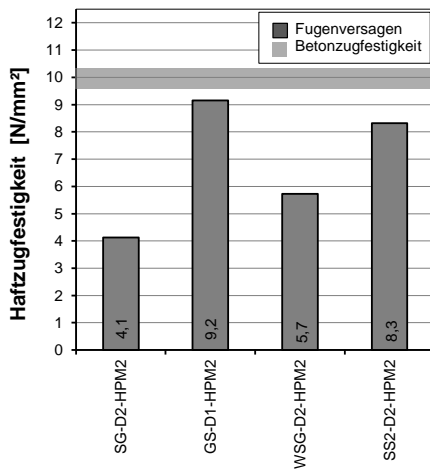


Abb. 5.13: Gemittelte Haftzugfestigkeiten der Vorversuche nach Abs. 4.1 mit HPM-2 (siehe auch Tab. 4.4)

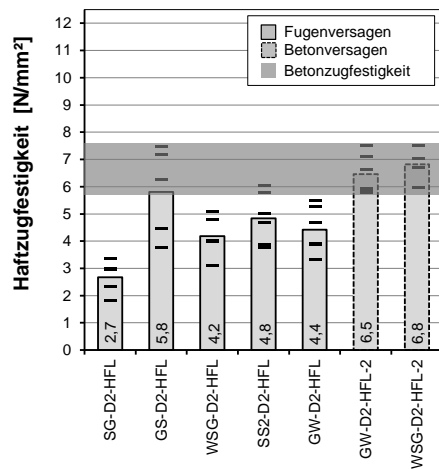


Abb. 5.14: Ergebnisse der Haftzugversuche mit HFL und unterschiedlich vorbehandelten Klebflächen

Die Streuung lag bei rund 20 % und war damit deutlich niedriger als bei den Haftzugversuchen HZ1 und den Schub-Zugversuche SZ2.

Die Haftzugfestigkeit von Klebverbindungen mit HPM-2 für unterschiedliche Arten der Klebflächenvorbehandlung sowie Klebschichtdicken wurde im Rahmen der Vorversuche nach Abs. 4.1 ermittelt (siehe Abb. 4.9). Die aus den Versuchen mit einer Klebschichtdicke von 1 mm und einer Dicke von 3 mm gemittelten Haftzugfestigkeiten sind in Abb. 5.13 aufgeführt. Die mit dem HPM-2 erzielten Haftzugfestigkeiten

sind rund 30 bis 50 % höher als für den HFL nach Abb. 5.14. Ein Grund dafür sind die angesprochenen Luftporen in der Grenzschicht zwischen Klebstoff und Beton.

Es zeigt sich auch hier, dass die Fugenfestigkeit für schalglatte Klebflächen sehr viel niedriger ist als beispielsweise für gewaschene Klebflächen (siehe Abb. 5.14).

Im Falle der durch Wasserstrahlschneiden erzeugten Klebfläche lag die mittlere Haftzugfestigkeit  $f_{jtm,surf}$  bei 4,2 N/mm<sup>2</sup> und die charakteristische Haftzugfestigkeit  $f_{jtk,surf}$  bei 2,3 N/mm<sup>2</sup>. Während  $f_{jtm,surf}$  für die durch Schneiden mit einer Steinsäge erzeugten Klebfläche 5,8 N/mm<sup>2</sup> betrug, lag die charakteristische Haftzugfestigkeit hier bei 1,74 N/mm<sup>2</sup>.

Bei den Versuchen mit gewaschener Klebfläche betrug die Haftzugfestigkeit  $f_{jtm,surf}$  4,4 N/mm<sup>2</sup> und die Haftzugfestigkeit  $f_{jtk,surf}$  2,4 N/mm<sup>2</sup>. Im Falle der Versuche mit feststoffgestrahlter Klebfläche lag die mittlere Haftzugfestigkeit bei 4,8 N/mm<sup>2</sup> und die charakteristische Haftzugfestigkeit bei 2,6 N/mm<sup>2</sup>. Von den untersuchten Verfahren ist Feststoffstrahlen demnach die beste Methode der Klebflächenvorbehandlung, wobei das Waschen nicht wesentlich schlechtere Ergebnisse liefert. Durch Wasserstrahlschneiden erzeugte Klebflächen sind annähernd gleichwertig was die Haftzugfestigkeit angeht, wie gewaschene Klebflächen

Im Diagramm in Abb. 5.14 sind die Ergebnisse der wiederholten Haftzugversuche, bei denen es zu einem Betonversagen kam, gekennzeichnet (gestrichelte Linie). Die mittlere Zugfestigkeit betrug fast 7,0 N/mm<sup>2</sup>. Die Haftzugfestigkeit der Grenzschicht zwischen Klebstoff und Beton wurde dabei jedoch nicht erreicht. Die Versuche zeigen damit das Potential des Mörtels, was seine Haftzugfestigkeit angeht. Um dies im Hinblick auf einen Einsatz bei Klebverbindungen ausschöpfen zu können, gilt es, den Luftporengehalt in der Fuge so weit wie möglich zu reduzieren. Dazu muss vor allem die die Klebtechnik weiter optimiert werden.

### 5.1.4 Schub-Druckversuche

#### 5.1.4.1 Probekörper

Bei den sogenannten Schub-Druckprobekörpern handelt es sich um Prismen mit einer geneigten Klebfuge (siehe Abb. 5.15). Zur Herstellung wurden Kunststoffschalungen eingesetzt. In diese wurden entweder Blechstreifen in den gewünschten Winkeln eingestellt, so dass zwei Hälften entstanden oder aber ganze Prismen hergestellt und diese mit der gewünschten Technik (nach Tab. 5.1) in zwei Hälften geschnitten. Die geschalteten Klebflächen wurden teilweise entweder noch gesandstrahlt oder, wie in Abs. 4.1 beschrieben, gewaschen. Zunächst wurden die Schub-Druckprobekörper aus HPC-2 gefertigt. Da es bei den Versuchen jedoch häufig zu einem unerwünschten Betonversagen kam, wurde der HPC-2 durch den HPC-3 mit Stahlfaserbewehrung ersetzt. Die Teile wurden bis zum Verkleben in einem Wasserbad gelagert.

Etwa zwei Wochen nach der Betonage wurden die Probekörperhälften verklebt. Sie wurden eine Stunde vorher aus dem Wasserbad genommen und zurück in die Schalung gelegt. So sollte erreicht werden, dass die Bauteile ohne Versatz verklebt werden. Außerdem wurde so ein seitliches Herauslaufen des Klebstoffs verhindert. Im



Fälle des HFL's wurden die Fugen dabei vergossen. Beim Verkleben mit HPM-2 wurden die Klebflächen mit Mörtel bestrichen und die Fügeile anschließend zusammengespresst. Nach dem Verkleben wurden die Probekörper mit nassen Stofftüchern abgedeckt.

#### 5.1.4.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die Schub-Druckversuche wurden ebenfalls nach etwa 28 Tagen in einem Zwei-Säulen-Prüfrahmen mit servohydraulischem 250 kN Zylinder durchgeführt. Der hierbei eingesetzte Versuchsaufbau ist in Abb. 5.16 zu sehen. Die Lasteinleitung erfolgte über einen quadratischen Stahlstempel, auf welchem eine Kalotte befestigt war. Damit war es möglich, die Prismen zentrisch und gleichmäßig zu belasten. Um ein Abgleiten in der Fuge zu ermöglichen, wurde eine Rollenlagerung angeordnet. Wie auch bei den übrigen Versuchen im Zusammenhang mit der Entwicklung eines Bruchkriteriums wurde die Last weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 0,01 mm/Sek aufgebracht. Die Erfassung der Versuchslast erfolgte mit Hilfe der in der Prüfmaschine vorhandenen Kraftmessdose.

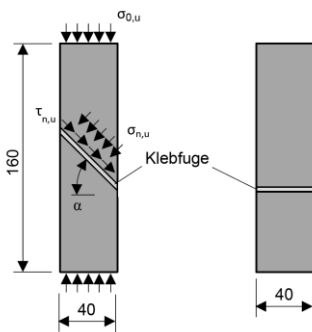


Abb. 5.15: Schub-Druckprobekörper

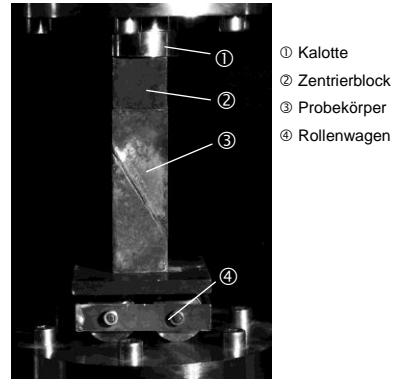


Abb. 5.16: Versuchsaufbau bei den Schub-Druckversuchen

#### 5.1.4.3 Versuchsergebnisse

Die Zusammenhänge beim Schub-Druckversuch wurden in Abs. 2.2.4.4 erläutert. Hierbei hat der Fugenneigungswinkel großen Einfluss auf die Versagensart. Zu einem Fugenversagen kann es nur zwischen den beiden Grenzwinkeln  $\alpha_{crit}$  kommen. Bei Fugenneigungswinkel darüber oder darunter stellt sich ein Prismen- bzw. Betonversagen ein. Die Ergebnisse dieser Versuche können nicht zur Formulierung eines Bruchkriteriums der Fuge herangezogen werden. Zunächst wurden Versuche mit Fugenneigungswinkeln von 45° und 60° durchgeführt. Hierbei kam es im Falle der Versuche mit einem Fugenneigungswinkel von 45° meist zu einem Prismenversagen. Aus dem Grund wurden für die weiteren Versuche Fugenneigungswinkel von 55°, 60° und 65° gewählt.

Im Falle der Versuche mit schalglatter Klebfläche kam es allgemein zu einem adhäsiven Fugenversagen (siehe Abb. 5.17 ganz rechts). Bei den übrigen Versuchen ereignete sich lediglich bei steilen Fugenwinkeln ein reiner Adhäsionsbruch (siehe Abb. 5.17 halb rechts).

Bei einem Fugenneigungswinkel von  $55^\circ$  war, mit Ausnahme der schalglatten und der durch Wasserstrahlschneiden erzeugten Klebflächen, ebenfalls ein Prismen- oder Betonversagen zu verzeichnen (siehe Abb. 5.17 ganz links). Dieses fand auf hohem Lastniveau statt und kann als explosionsartig - typisch für Hochleistungs- beton ohne Faserbewehrung unter Druckbeanspruchung - beschrieben werden. Die Fuge blieb hierbei meist intakt. Anders als auf Abb. 5.17 links zu sehen ist, entstanden bei einem Betonversagen in der Regel unzählige kleine Bruchstücke.

In den Versuchen mit einem Fugenneigungswinkel von  $60^\circ$  war teilweise eine Mischform der beiden genannten Versagensarten (siehe Abb. 5.17 Mitte) zu beobachten. Es kam sowohl zu einem Bruch der Fuge als auch des Probekörpers. Ob dabei zuerst die Fuge oder zuerst das Prisma versagte, konnte auch mit Hilfe einer speziellen Highspeed-Kamera nicht festgestellt werden. Im Falle eines Mischversagens lag die Bruchspannung  $\sigma_{0u}$  unterhalb der einaxialen Betondruckfestigkeit. Die Fuge stellt also eine Schwächung dar, weshalb die Versuche zur Formulierung eines Bruchkriteriums herangezogen wurden. Nur Versuche, bei denen die Fuge intakt war, wurden als Betonversagen eingestuft und entsprechend bei der Formulierung eines Bruchkriteriums nicht mit berücksichtigt.

Die bei den einzelnen Versuchen beobachteten Versagensarten sind jeweils in Anhang D aufgeführt.

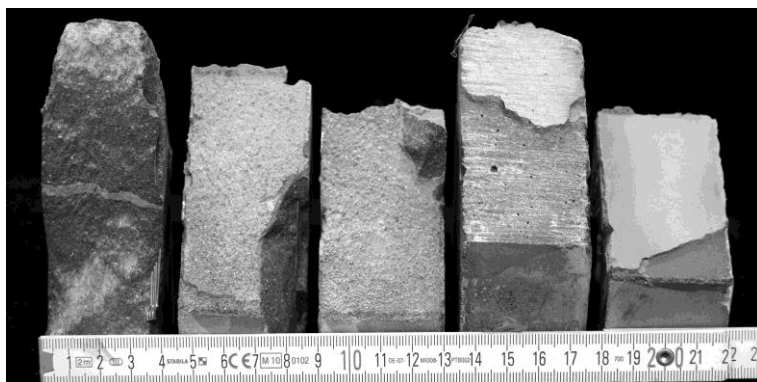
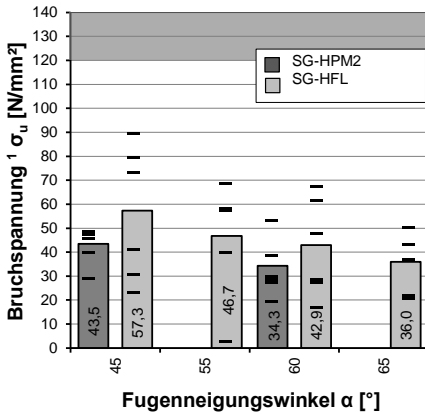


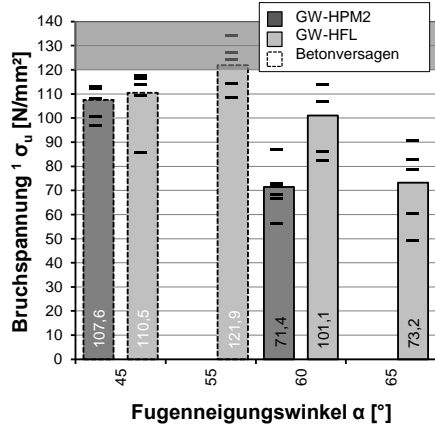
Abb. 5.17: Unterschiedliche Versagensbilder bei den Schub-Druckversuchen:  
links Betonversagen, rechts adhäsives Fugenversagen, in der Mitte Mischversagen

In Abb. 5.18, Abb. 5.19 und Abb. 5.20 sind die bei den Versuchen erreichten Bruchspannungen  $\sigma_{0u}$  als Einzelwerte sowie Mittelwerte für die verschiedenen Serien aufgeführt. Hierbei handelt es sich um die beim Versagen im Probekörper herrschenden Hauptnormalspannungen. Die bei den einzelnen Versuchsserien vorhandene Streuung sowie die charakteristische Bruchfestigkeit als 5%-Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75 % sind in Anhang D aufgeführt. Daneben sind im Anhang die Ma-

terialfestigkeiten am Versuchstag oder die vorhandenen Bauteilabmessungen übersichtlich zusammengestellt.



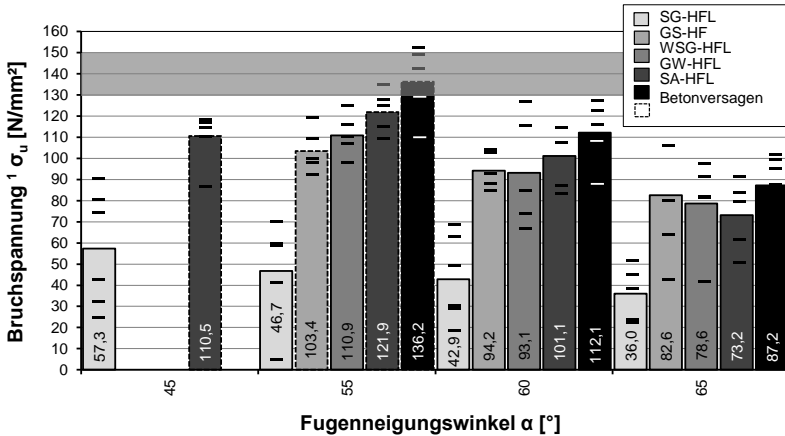
<sup>1</sup> bezogen auf die vorhandene Brutto-Querschnittsfläche



<sup>1</sup> bezogen auf die vorhandene Brutto-Querschnittsfläche

Abb. 5.18: Bruchspannungen  $\sigma_u$  bei den Versuchsserien SG-HPM-2 und SG-HFL im Vergleich

Abb. 5.19: Bruchspannungen  $\sigma_u$  bei den Versuchsserien GW-HPM-2 und GW-HFL im Vergleich



<sup>1</sup> bezogen auf die vorhandene Brutto-Querschnittsfläche

Abb. 5.20: Bruchspannungen  $\sigma_u$  bei den Versuchen mit HFL und unterschiedlich vorbehandelten Klebflächen im Vergleich (SG=schalglatt; GS=geschliffen; WSG= wasserstrahl-geschnitten; GW= gewaschen; SA=feststoffgestrahlt)

Wie auch bei den Haftzug- und Schubzugversuchen war die Streuung bei den Versuchen mit schalglatten Klebflächen deutlich größer als bei den übrigen Versuchen. Diese betrug bis zu 55 %. Bei Serien, in denen es zu einem Betonversagen kam, lag die Streuung zwischen 10 und 15 %. Im Falle eines Fugenversagens oder Mischversagens betrug die Streuung in der Regel rund 15 bis 25%.

Die in der Klebfuge beim Versagen herrschenden Spannungszustände sind in den Abb. 5.21 bis Abb. 5.26 in Schubspannungs-Normalspannungsdiagrammen dargestellt. Zur Berechnung der Spannungszustände, wie in Abs. 2.2.4.4 beschrieben, wurden dabei die tatsächlich vorhandenen Neigungswinkel verwendet. Diese wichen teilweise von den planmäßigen Fugenwinkeln leicht ab. Weiterhin sind in den Abb. 5.21 bis Abb. 5.26 die Spannungskreise der einaxialen Beton- sowie Klebstofffestigkeit am Versuchstag dargestellt. Die Betondruckfestigkeit variierte hierbei zwischen 120 und 140 N/mm<sup>2</sup>, was daran lag, dass die Herstellung der Schub-Druckprobekörper in mehreren Betonagedurchgängen erfolgte. Die mittlere Druckfestigkeit des HFL's lag bei rund 130 N/mm<sup>2</sup>. Der bei den Schub-Druckversuchen eingesetzte HPM-2 wies eine mittlere Druckfestigkeit von 110 N/mm<sup>2</sup> auf. Die Festigkeit des Probekörpermaterials ist bei Schub-Druckversuchen ein limitierender Faktor. Sowohl in Abb. 5.18, Abb. 5.19 und Abb. 5.20 als auch in den Abb. 5.21 bis Abb. 5.26 sind die Versuchsserien, bei denen es zu einem Betonversagen kam, entsprechend kenntlich gemacht. Im Schubspannungs-Normalspannungsdiagramm liegen die Spannungspunkte der Versuche mit Betonversagen meist auf oder unmittelbar in der Nähe der Spannungskreise der einaxialen Betondruckfestigkeit (siehe beispielsweise Abb. 5.22).

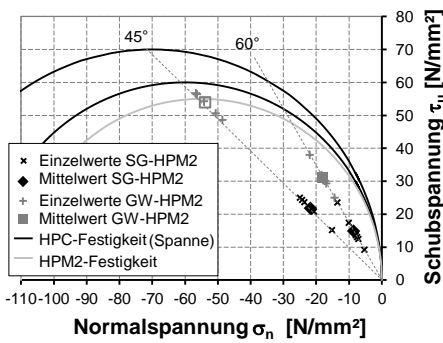


Abb. 5.21: Darstellung der beim Versagen in der Klebfuge herrschenden Spannungszustände für die Versuchsserie SG-HPM2 sowie GW-HPM2

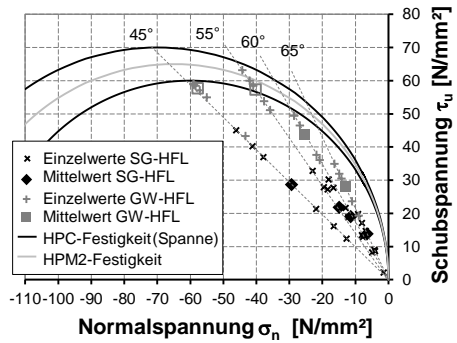


Abb. 5.22: Darstellung der beim Versagen in der Klebfuge herrschenden Spannungszustände für die Versuchsserie SG-HFL sowie GW-HFL

Sowohl bei der schalglatten Klebfläche als auch bei der gewaschenen Klebfläche war die Fugenfestigkeit im Falle der mit HFL verklebten Probekörper höher als bei den mit HPM-2 verklebten Probekörpern (siehe Abb. 5.21 und Abb. 5.22 sowie Abb. 5.18 und Abb. 5.19). Hierbei ist aber anzumerken, dass der bei den Versuchen eingesetzte HPM-2-Klebstoff verhältnismäßig niedrige Festigkeiten aufwies. Die mittlere Biegezugfestigkeit lag bei lediglich 6 N/mm<sup>2</sup>. Die Ergebnisse sind nicht repräsentativ und werden daher zur Formulierung eines Bruchkriteriums im nächsten Abschnitt nicht verwendet.

Weiterhin zeigt sich, dass auch hier die Fugenfestigkeit schalglatter Klebflächen sehr viel niedriger ist als beispielsweise die gewaschener Klebflächen (siehe Abb. 5.21 und Abb. 5.22).

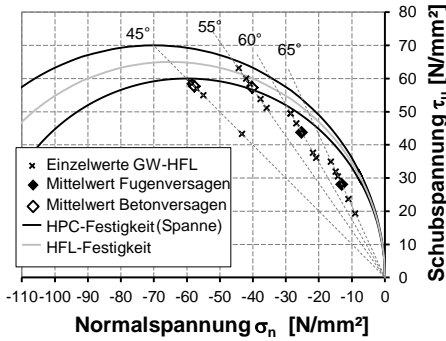


Abb. 5.23: Darstellung der beim Versagen in der Klebfuge herrschenden Spannungszustände für die Versuchsreihe GW-HFL

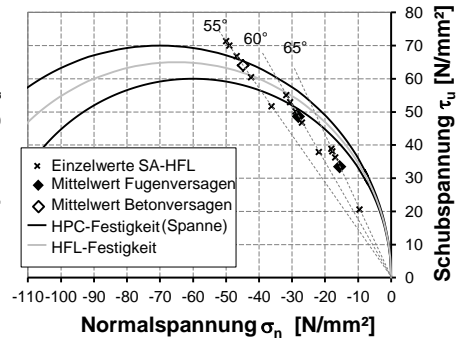


Abb. 5.24: Darstellung der beim Versagen in der Klebfuge herrschenden Spannungszustände für die Versuchsreihe SA-HFL

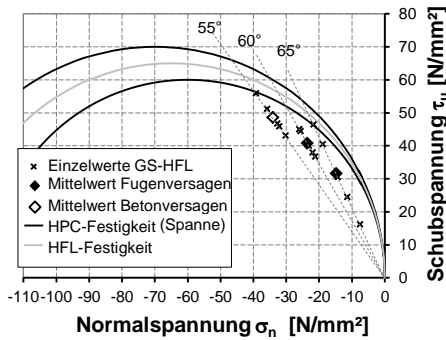


Abb. 5.25: Darstellung der beim Versagen in der Klebfuge herrschenden Spannungszustände für die Versuchsreihe GS-HFL

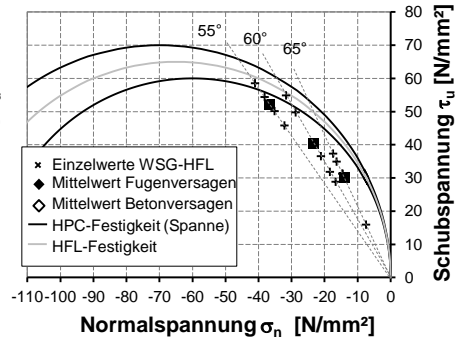


Abb. 5.26: Darstellung der beim Versagen in der Klebfuge herrschenden Spannungszustände für die Versuchsreihe WSG-HFL

Wie sich bereits bei den Zug- und Haftzugversuchen gezeigt hat, ist Feststoffstrahlen die optimale Methode zur Klebflächenvorbereitung. Das „Waschen“ als Möglichkeit der Klebflächenvorbereitung ist als etwas schlechter zu bewerten. Die Methode ist in der Praxis jedoch einfach umzusetzen und kann daher als brauchbare Alternative zum Feststoffstrahlen angesehen werden.

Bei einem Fugenneigungswinkel von 55° kam es im Falle der durch Schneiden mit einer Steinsäge erzeugten Klebfläche zu einem Betonversagen. Die Fugenfestigkeit für die Fugenneigungswinkel von 60° und 65° unterschied sich nur unwesentlich von der durch Wasserstrahlschneiden erzeugter Klebflächen. Die beiden Klebflächen sind damit als gleichwertig zu beurteilen und werden bei der weiteren Auswertung gemeinsam betrachtet.

5.1.5 Auswertung der Versuche und Diskussion der Ergebnisse

Im Rahmen der einzelnen Versuchsreihen wurde die Fugenfestigkeit für unterschiedliche Schubspannungs-Normalspannungskombinationen ermittelt. Zur Formulierung eines integrierten Klebfugen-Bruchkriteriums werden im Folgenden die durchgeführten Zug-, Schub-Zug- und Schub-Druckversuche gemeinsam ausgewertet. Das Bruchkriterium stellt letztendlich eine Ausgleichsfunktion oder Regressionsfunktion der Versuchswerte dar.

Zunächst galt es die Frage zu klären, welchen Charakter ein mögliches Bruchkriterium besitzt oder anders ausgedrückt, durch welche Funktion die Fugenfestigkeit am besten beschrieben werden kann.

Der Charakter des Bruchkriteriums hängt grundsätzlich von der Qualität des Verbunds in der Fuge ab. Das Spektrum möglicher Bruchkriterien ist in Abb. 2.31 dargestellt. Neben linearen Funktionen werden hierfür teilweise auch quadratische oder bilineare Ansätze verwendet, wie sich in einem Literaturstudium gezeigt hat (siehe Abs. 2.2.4.5 und Abs. 2.2.4.6). Aufgrund der Tatsache, dass eine stetige Funktion verwendet werden soll, scheidet hier jedoch ein bilinearer Ansatz aus.

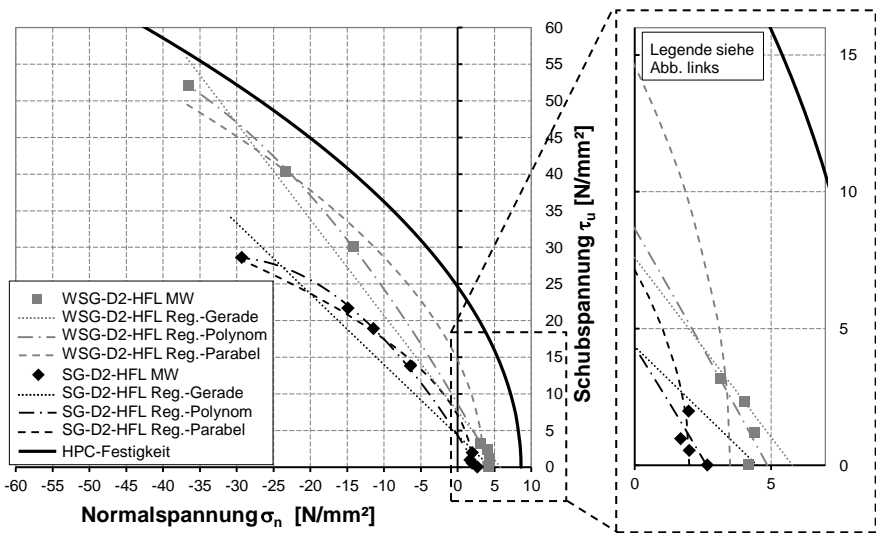


Abb. 5.27: Festigkeit von Klebverbindungen mit HFL-Klebstoff und schalglatten sowie durch Wasserstrahlschneiden erzeugten Klebflächen

Zur Beantwortung der Frage, welchen Charakter das Bruchkriterium hat, wurden die Versuche mit HFL und schalglatter sowie durch Wasserstrahlschneiden erzeugter Klebfläche herangezogen. Für den Schub-Zugbereich lagen hier jeweils vier Messwerte vor. Bei allen Versuchen kam es zu einem Fugenversagen, so dass letztendlich sieben bzw. acht Stützstellen vorhanden waren. Was die reine Haftzugfestigkeit angeht, wurden bei der Auswertung die Ergebnisse der Zugversuche HZ3 mit optimiertem Aufbau verwendet. In Abb. 5.27 sind die Ergebnisse der Versuche als Mittelwerte pro Serie mit gleichem Fugenneigungswinkel in einem Schubspannungs-Normalspannungs-Diagramm dargestellt. Darin ist außerdem die Mohrsche Hüllpa-

riabel der HPC-Festigkeit am Versuchstag dargestellt, durch welche die Festigkeit des monolithischen Probekörpers beschrieben wird.

In Abb. 5.27 ist zu erkennen, dass sich die Fugenfestigkeit sowohl für die schalglatte Klebfläche als auch für die durch Wasserstrahlschneiden erzeugte Klebfläche sehr viel besser durch eine nichtlineare Funktion als durch eine lineare Funktion abbilden lässt. Dies hatte sich beispielsweise auch in den Untersuchungen von *Franke und Deckelmann 1989* oder *Bergmeister 2001* im Zusammenhang mit Betonverklebungen gezeigt (siehe Abs. 2.2.4.4).

*Bergmeister 2001* verwendet ein Polynom zweiten Grades (Gl. (2.29)) zur Beschreibung der Fugenfestigkeit. In Anlehnung daran wurden die Versuchsergebnisse einer Regressionsanalyse unterzogen und die Parameter  $a$ ,  $b$  und  $c$  mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt (siehe Tab. 5.2). In beiden Fällen lässt sich die Fugenfestigkeit gut durch Polynome abbilden. Das Bestimmtheitsmaß beträgt für die schalglatte Klebfläche 0,9357 und für die durch Wasserstrahlschneiden erzeugte Klebfläche 0,9991.

Das Bestimmtheitsmaß für eine Regressionsgeraden mit den in Tab. 5.3 aufgeführten Parametern  $a$ , und  $b$  liegt bei 0,9357 bzw. 0,987. Wie in Abb. 5.27 zu erkennen ist, wird hierdurch insbesondere die Zugfestigkeit deutlich überschätzt.

Tab. 5.2: Parameter von Regressionspolynomen zur Beschreibung der Fugenfestigkeit für die Klebverbindung mit HFL und unterschiedlich vorbehandelten Klebflächen

Klebfläche	$a$ [-]	$b$ [-]	$c$ [N/mm <sup>2</sup> ]
SG	-0,0253	-1,569	4,31
WSG	-0,0142	-1,706	8,64
GW	-0,0069	-1,663	7,47
SA	-0,0128	-1,774	8,87

Tab. 5.3: Parameter von Regressionsgeraden zur Beschreibung der Fugenfestigkeit für die Klebverbindung mit HFL und schalglatter sowie durch Wasserstrahlschneiden erzeugter Klebfläche

Klebfläche	$a$ [-]	$b$ [N/mm <sup>2</sup> ]
SG	-0,966	4,33
WSG	-1,311	7,59

Vielversprechend erscheint weiterhin ein parabolischer Ansatz in Anlehnung an *Bay 1943* (vgl. Abs. 2.2.4.3). Dies lassen insbesondere die Ergebnisse der Schub-Zugversuche vermuten (siehe Detail in Abb. 5.27). Die Festigkeit der Fuge im Schubbereich wird hierdurch besser abgebildet. Für den Fall einer reinen Schubbeanspruchung sowie für den Bereich geringer Druck- oder Zugnormalspannungen liegen jedoch keine Versuchsergebnisse vor. In diesem relativ großen Bereich fehlen Stützstellen, die die Wahl einer parabolischen Ansatzfunktion rechtfertigen würden.

Wie sich gezeigt hat, kann die Fugenfestigkeit unter kombinierter Schub-Normalspannungsbeanspruchung am besten mit Hilfe eines quadratischen Ansatzes also einem Polynom zweiten Grades abgebildet werden. In Abb. 5.28 sind die Ergebnisse aller Versuche als Mittelwerte pro Serie mit gleichem Fugenneigungswinkel sowie die entsprechenden Regressionspolynome in einem Schubspannungs-Normalspannungs-Diagramm dargestellt.

Auch für die Versuche mit gewaschener sowie feststoffgestrahlter Klebfläche wurden die Parameter  $a$ ,  $b$  und  $c$  mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt (siehe Tab. 5.2). Hier standen jeweils nur drei Stützstellen zur Verfügung. Das Bestimmtheitsmaß beträgt jeweils eins.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass mit Ausnahme der schalglatten Klebfläche die Fugenfestigkeiten ungefähr in derselben Größenordnung liegen.

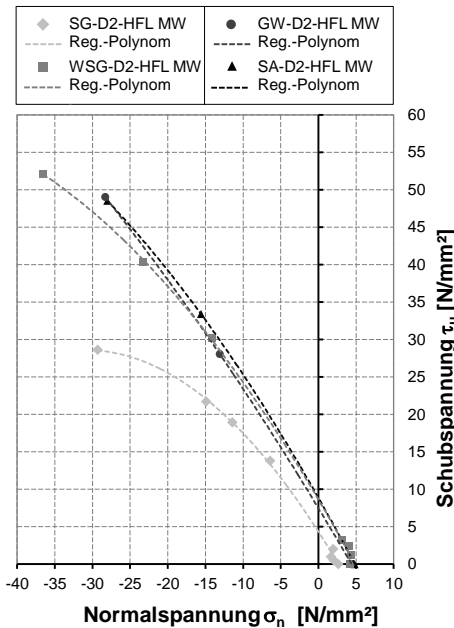


Abb. 5.28: Beschreibung der Fugenfestigkeit mit Hilfe von Regressionspolynomen

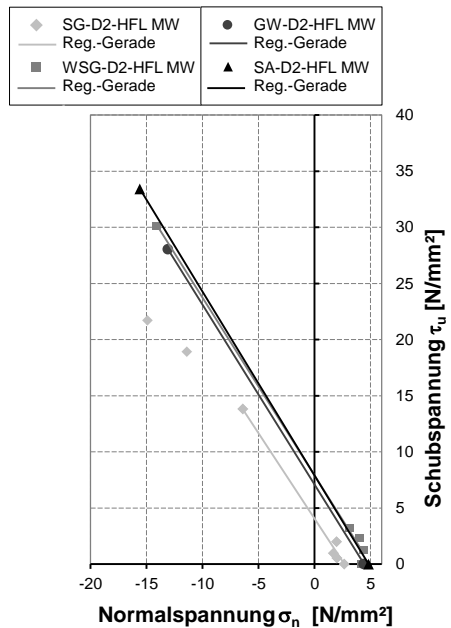


Abb. 5.29: Beschreibung der Fugenfestigkeit mit Hilfe von Regressionsgeraden im Zugbereich und im Bereich geringer Drucknormalspannungen

In Abb. 5.28 erkennt man, dass für den Zugbereich und für den Bereich von Druckspannungen bis etwa 15 N/mm<sup>2</sup> - im Falle von schalglatten Klebflächen bis rund 6 N/mm<sup>2</sup> - die Fugenfestigkeit gut durch eine lineare Funktion abgebildet werden kann. Betrachtet man nur die in diesem Bereich liegenden Versuchsergebnisse und führt hierfür wiederum eine Regressionsanalyse unter Verwendung einer linearen Ansatzfunktion durch, ergeben sich Geradengleichungen mit den in Tab. 5.4 aufgeführten Parametern  $a$  und  $b$ . Das Bestimmtheitsmaß für die schalglatte Klebfläche beträgt hierbei 0,9900 und für die durch Wasserstrahlschneiden erzeugte Kleb-



fläche 0,9963. Im Falle der gewaschenen Klebfläche und der gesandstrahlten Klebfläche liegt das Bestimmtheitsmaß bei 1,0. Die Steigung der Regressionsgeraden beträgt in allen Fällen ca. 1,5 (siehe Abb. 5.29).

Tab. 5.4: Parameter von Regressionsgeraden zur Beschreibung der Fugenfestigkeit im Zugbereich und im Bereich geringer Drucknormalspannungen für die Klebverbindung mit HFL und unterschiedlich vorbehandelten Klebflächen.

Klebfläche	a [-]	b [N/mm <sup>2</sup> ]
SG	-1,521	4,05
WSG	-1,582	7,91
GW	-1,603	7,07
SA	-1,636	7,90

### 5.1.6 Fazit

Bei den durchgeführten Haftzugversuchen mit HPM-2- und HFL-Klebstoff wurden die von Mühlbauer 2012 mit seinen RPC-Klebstoff erzielten Festigkeiten nicht ganz erreicht. Die Ursache hierfür liegt im zur Herstellung der Probekörper angewendeten Verfahren. Die Füge­teile wurden im Falle der Versuche mit HFL horizontal schichtweise verklebt. In der Klebschicht kam es im oberen Randbereich zu einer Konzentration von Luftporen. Es gilt daher das Klebverfahren zu optimieren. Das Potential des HFL-Klebstoffs, was seine Haftzugfestigkeit angeht, hat sich in den Wiederholungsversuchen offenbart.

Es zeigte sich, dass schalglatte Klebflächen zwingend vorbehandelt werden müssen. Die Ergebnisse der Versuche mit schalglatter Klebfläche wiesen allgemein eine große Streuung auf. Die Fugenfestigkeit war hier sehr viel niedriger als beispielsweise im Falle von durch Schneiden mit Hochdruckwasserstrahl erzeugten Klebflächen.

Die höchste Fugenfestigkeit wiesen die durch Feststoffstrahlen vorbehandelten Klebflächen auf. Nicht viel niedriger war die Festigkeit bei den gewaschenen Klebflächen. Diese Methode der Klebflächen­vorbehandlung ist mit einfachsten Mitteln in der Praxis umsetzbar und stellt eine gute Alternative zum Feststoffstrahlen dar.

Es zeigte sich weiterhin, dass wasserstrahlgeschnittene und mit einer Steinsäge geschnittene Klebflächen gleichwertig sind, was die Fugenfestigkeit angeht. Im Zusammenhang mit der Formulierung eines Bruchkriteriums wurde daher nicht mehr zwischen den beiden Klebflächen unterschieden.

Auf Grundlage der durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurden für Klebverbindungen mit HFL, einer Klebschichtdicke von zwei Millimetern und unterschiedlichen Arten der Oberflächenvorbehandlung Bruchkriterien entwickelt, mit denen sich die Fugenfestigkeit sowohl für eine kombinierte Schub-Druck- als auch Schub-Zugbeanspruchung ermitteln lässt.

Die Versuche decken den kompletten Zugbereich sowie den Bereich von Druckspannungen bis rund 30 N/mm<sup>2</sup> ab. Ungeeignet ist hier ein lineares Bruchkriterium. Die Zusammenhänge lassen sich am besten durch ein Polynom zweiten Gra-

des, also ein quadratisches Bruchkriterium, beschreiben. Um das Bruchkriterium auf den Bereich größerer Drucknormalspannungen zu erweitern, sind weitere Untersuchungen erforderlich. Hierfür eignen sich beispielsweise Triaxialversuche (vgl. Abs. 2.2.4.3) mit geneigter Klebfläche.

Betrachtet man nur die Ergebnisse der Zugversuche, Schub-Zugversuche sowie Schub-Druckversuche mit einem Fugenneigungswinkel von  $65^\circ$ , zeigt sich, dass die Fugfestigkeit auch gut durch ein lineares Bruchkriterium abgebildet werden kann (siehe Abb. 5.29). Die Steigung der Regressionsgerade beträgt unabhängig von der Art der Oberflächenvorbehandlung 1,5. Für Anwendungsfälle, wie beispielsweise die Keilzinkengeometrie, bei denen in der Fuge eine reine Schub-Zugbeanspruchung vorliegt, eignet sich dies zur Fugbemessung.

Anzumerken bleibt, dass für den Bereich geringer Druck- oder Zugnormalspannungen keine Versuchsergebnisse vorliegen. Insbesondere die Ermittlung der reinen Scherfestigkeit gestaltet sich schwierig, wie in Abs. 2.2.4.4 erläutert wurde. Werden weitere Versuche für diesen Bereich beispielsweise mit einer Torsionsapparatur durchgeführt, wie von *Franke und Deckelmann 1989* beschrieben, kann das Bruchkriterium unter Umständen weiter verbessert werden. Insbesondere für den Schub-Zugbereich wird die Fugentragfähigkeit sowohl durch das quadratische als auch das lineare Bruchkriterium möglicherweise etwas unterschätzt. Als vielversprechende Alternative, um Klebverbindungen wirtschaftlicher bemessen zu können, erscheint hier ein parabolischer Ansatz in Anlehnung an *Bay 1943 (Kohlmeyer und Oster 2014)*.

Soll ein anderer Klebstoff als der HFL verwendet werden, muss das Bruchkriterium entsprechend angepasst werden. Bei den in der Literatur beschriebenen Untersuchungen mit Reaktionsharzklebstoffen hatte sich gezeigt, dass die Schubfestigkeit von Klebverbindungen in etwa der Zugfestigkeit entspricht. Im Falle von zementgebundenen Klebstoffen ist die Festigkeit unter reiner Schubbeanspruchung jedoch offenbar größer als unter einaxialer Zugbeanspruchung. Dies lassen auch die Ergebnisse der in 2.2.4.6 beschriebenen Versuche von *Mühlbauer 2012* vermuten. Hier machen sich der starre Verbund und das spröde Materialverhalten des Klebstoffs bemerkbar.

## 5.2 Untersuchungen an Keilzinkenverbindungen

### 5.2.1 Allgemeines

Die Klebfuge mit Keilgeometrie hat sich in den Tastversuchen als die Variante mit der höchsten Tragfähigkeit erwiesen. Wie sich in den FE-Untersuchungen gezeigt hat, ist die Spannungsverteilung im Fugbereich hierbei sehr viel gleichmäßiger als bei anderen Varianten.

Das Schneiden mittels Hochdruckwasserstrahl ist vergleichsweise teuer. Um beispielsweise bei Rechteckgeometrien definierte Klebschichtdicken realisieren zu können, ist eine doppelte Schnitfführung erforderlich. Die Keilgeometrie lässt sich dagegen durch einen einfachen Trennschnitt erzeugen und ist daher im Hinblick auf die

Herstellkosten günstiger. Ein Vorteil der Keilgeometrie ist auch, dass sie sich im Gegensatz zu andere Geometrien mit herkömmlichen Steinsägen herstellen lässt.

Aus dem Holzbau sind derartige Verbindungen als Keilzinkenverbindung oder Keilzinkung bekannt. Ein Anwendungsfall ist hier die Herstellung von Brettschichtholz. Die sogenannte Universal-Keilzinkenverbindung kommt bei Vollstößen oder Rahmenecken zum Einsatz (siehe Abb. 5.30). Beim Verkleben werden die Füge Teile ineinander gepresst. Neben der Adhäsionswirkung des Leims wirken daher auch Reibkräfte in der Verbindung sowie Selbsthemmung, die zur Festigkeit der Verbindung beitragen (vgl. Neuhaus 2011).



Abb. 5.30: Keilzinkenverbindungen nach DIN 1052:204-08. Von links nach rechts: keilgezinkte Einzelquerschnitte, keilgezinkte Rahmenecke, Universal-Keilzinkenverbindung zweier Brettschichtholzbauteile (Neuhaus 2011)

Wie sich in den Vorversuchen gezeigt hat, lässt sich durch die richtige Wahl der Fugengeometrie ein Fugensagen verhindern, und es kommt zu einem Bewehrungsversagen. Das Tragverhalten ist in dem Fall duktil und damit günstig.

Bei welcher Beanspruchung es zu einem Fugensagen kommt, lässt sich theoretisch mit Hilfe des Bruchkriteriums ermitteln. Dieses wurde jedoch an kleinformigen Probekörpern ermitteln. Ob die Übertragbarkeit gegeben ist und sich damit die Fugentragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen ermitteln lässt, sollte in einer entsprechenden Versuchsserie untersucht werden.

Tab. 5.5: Übersicht der Untersuchungen an Keilzinkenverbindungen

Versuchsserie/ Untersuchungsgegenstand	Versuchsart	Versuchsparameter
Untersuchungen zur Tragfähigkeit allgemein/ Fugentragfähigkeit	Zugversuche	Flankenneigungswinkel, Klebflächenvorbehandlung
	4-Pkt.-Biegeversuche	
	3-Pkt.-Biegeversuche	
Untersuchungen zur Tragfähigkeit im Zustand II/ Bewehrungstragfähigkeit	Zugversuche	Flankenneigungswinkel, Zahnlänge, Bewehrungsgehalt

Hält die Fuge der Beanspruchung stand, kommt es zunächst zu einer Rissbildung entsprechend dem einwirkenden Hauptspannungszustand. Im Falle der Keilzinkenverbindung findet das Bewehrungsversagen letztendlich in einem beliebigen Schnitt im Fugbereich statt. Wie sich in den Tastversuchen gezeigt hat, hängt die Tragfähigkeit der Verbindung in erster Linie vom im Versagensschnitt, in den Zähnen vor-

handenen Bewehrungsquerschnitt ab. Die sich aus dem Bewehrungsquerschnitt und der Festigkeit der Mikrobewehrung ergebende Tragfähigkeit wurde jedoch nicht erreicht. Zusätzlich zu dem geometrischen, den Bewehrungsquerschnitt mindernden Anteil der Fuge gibt es einen weiteren die Tragfähigkeit mindernden Einfluss, den es im Hinblick auf ein Bemessungskonzept zu berücksichtigen gilt. In einer weiteren Versuchsserie galt es daher, die Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit bei Keilzinkenverbindungen im Zustand II zu untersuchen.

Die nachfolgend beschriebenen experimentellen Untersuchungen wurden durch *Alff und Stallmann 2015* im Rahmen einer Studienarbeit sowie durch *Ringelspacher 2015* im Rahmen einer Diplomarbeit durchgeführt.

### 5.2.2 Versuchsprogramm

Tab. 5.6: Versuchsprogramm der Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen

Bezeichnung		Versuch	Klebfläche	FN-winkel <sup>1</sup> [°]	Bewehrung	Anzahl
Z3-FJ-D2-	SG-15	Zugversuch nach Abs.4.3.4	schalglatt	15	2,0 Vol.-% Mikrostahlfasern	3
	SG-30			30		3
	SG-45			45		3
	SS2-15		maximal gesand- strahlt	15	18 Lagen Mikrobewehrung ( $V_{eff}$ 3,7 Vol.-%)	3
	SS2-30			30		3
	SS2-45			45		3
	WSG-15		wasser- strahl- geschnitten	15	18 Lagen Mikrobewehrung ( $V_{eff}$ 3,7 Vol.-%)	3
	WSG-30			30		3
	WSG-45			45		3
	WSG-60			60		3
WSG-75	75	3				
B2-REF		4-Pkt.- Biegeversuch	-	-	18 Lagen Mikrobewehrung ( $V_{eff}$ 3,7 Vol.-%)	3
B2-FJ-D2-	WSG-30		30	3		
	WSG-45		45	3		
	WSG-60		60	3		
	WSG-75		75	3		
BQ2-FJ-D2	3-Pkt.- Biegeversuch	wasser- strahl- geschnitten	30	18 Lagen Mikrobewehrung ( $V_{eff}$ 3,7 Vol.-%)	3	
			45		3	
			60		3	
			75		3	

<sup>1</sup>Fugeneigungswinkel

In Tab. 5.6 ist das absolvierte Versuchsprogramm der allgemeinen Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen aufgeführt. Dieses sah Zugversuche, Vierpunktbiegeversuche sowie Dreipunktbiegeversuche vor. Neben der Art der Beanspruchung wurden der Flankeneigungswinkel sowie die Klebflächenvorbehand-

lung variiert. Bei den Vierpunktbiegeversuchen wurden außerdem drei Referenzversuche ohne Fuge durchgeführt.

Der Fokus lag bei den Untersuchungen auf der Fugentragfähigkeit. Um insbesondere bei den Versuchen mit steileren Fugenneigungswinkeln ein vorzeitiges Bewehrungsversagen auf niedrigem Lastniveau zu verhindern, wurden die übrigen Probekörper mit 18 Lagen Mikrobewehrung entsprechend hoch bewehrt. Der Bewehrungsgehalt  $V_{eff}$  lag bei 3,7 %. Zur Herstellung der Versuchskörper mit schalglatter Kleblfläche wurde der HPC-3 mit 2,0 Vol.-% Mikrostahtfasern eingesetzt.

Ursprünglich waren nur Versuche mit schalglatter und durch Wasserstrahlschneiden erzeugter Kleblfläche geplant. Bei den Versuchen mit schalglatter Kleblfläche war durchweg ein adhäsives Versagen zu beobachten. Da die Probekörper intakt blieben, wurden die Kleblflächen feststoffgestrahlt, erneut verklebt und ein zweites Mal geprüft.

Tab. 5.7: Versuchsprogramm der Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen im Zustand II

Bezeichnung	Versuch	Zahnlänge [mm]	FN-winkel <sup>1</sup> [°]	Bewehrung	Anzahl
Z4-FJ-D2-WSG	60-65	60	65	10 Lagen Mikrobewehrung ( $V_{eff}$ 2,1 Vol.-%)	3
	60-75		75		3
	60-85		85		3
	90-85	90	65		3
	90-75		75		3
	90-85		85		3

<sup>1</sup>Fugenneigungswinkel

Das Versuchsprogramm der Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen im gerissenen Zustand sah Zugversuche an Keilzinkenverbindungen mit unterschiedlichen Flankenneigungswinkeln und Zahnlängen vor (siehe Tab. 5.7). Die Probekörper waren mit zehn Lagen Mikrobewehrung versehen. Hier betrug der Bewehrungsgehalt  $V_{eff}$  somit 2,1 %.

Bei den Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen betrug die Klebschichtdicke generell 2 mm. Als Klebstoff wurde hier der HFL eingesetzt.

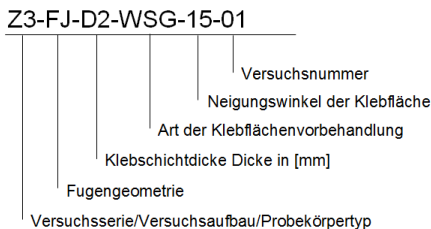


Abb. 5.31: Versuchsbezeichnung (siehe auch Tab. 5.6 und Tab. 5.7)

Die Bezeichnung der Versuche und Probekörper ist in Abb. 5.31 erläutert. Diese ist auch hier in mehrere Teile gegliedert, die durch Bindestriche voneinander getrennt sind. An erster Stelle ist die Versuchsserie oder der Versuchsaufbau aufgeführt, an der zweiten Stelle die Fugengeometrie, an dritter Stelle die Klebschichtdicke, an vierter Stelle die Art der Klebflächenvorbehandlung (siehe auch Tab. 5.6 und Tab. 5.7) und an fünfter Stelle der Klebflächen-Neigungswinkel. Die Versuchsbezeichnung schließt wiederum mit der Versuchsnummer ab.

### 5.2.3 Probekörper

Bei den Untersuchungen wurden plattenartige Probekörper mit einer Dicke von 30 mm eingesetzt. Bis auf die Probekörper mit schalglatter bzw. gesandsrahlter Klebfläche wurde zur Herstellung der HPC-2 verwendet. Die Betondeckung betrug im Falle der Versuche mit Mikrobewehrung generell drei Millimeter.

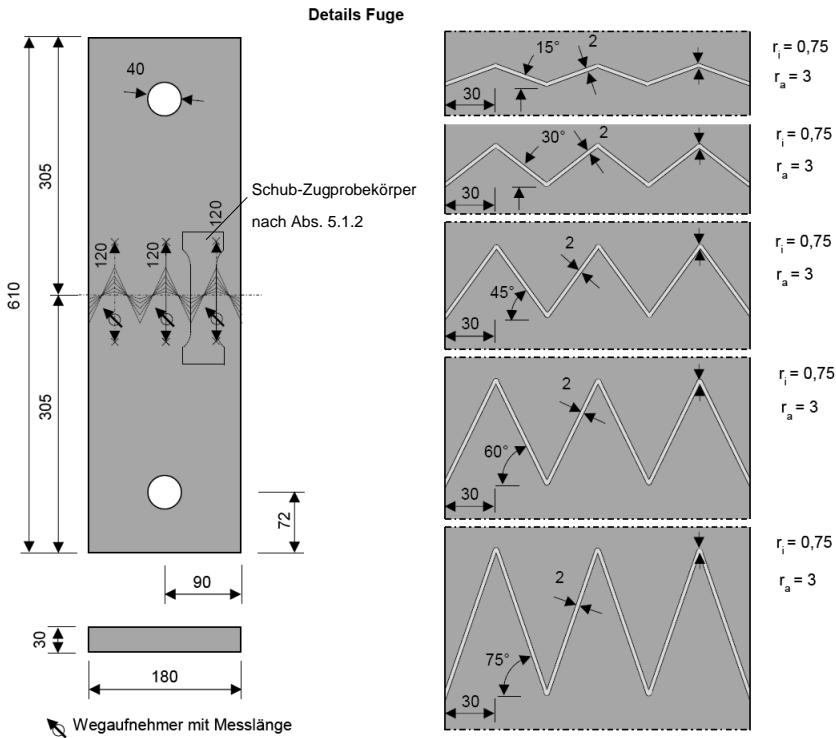
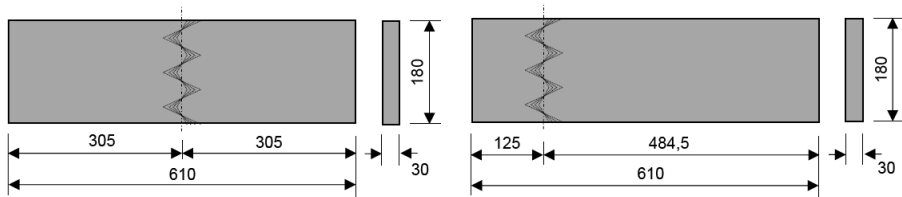


Abb. 5.32: Bei den Untersuchungen zur Zugtragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen eingesetzte Probekörper und Anordnung der Wegaufnehmer

Für die allgemeinen Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen der Serie Z3 wurden Probekörper mit einer Breite von 180 mm und drei Keilzinken verwendet (siehe Abb. 5.32 und Abb. 5.33). Eine Flanke entsprach damit der bei den Schub-Zugprobekörpern aus Abs.5.1.2 vorhandenen Klebfläche. Die Querschnittsfläche betrug somit genau das Sechsfache der bei den Schub-Zugprobekörpern vorhandenen Querschnittsfläche. Im Bereich der Spitzen wurde ein planmäßiger Aus-

rundungsradius von 2,5 mm angeordnet. Der Hochdruckwasserstrahl besitzt eine Dicke von rund 2 mm. Es ergeben sich letztendlich vorhandene Ausrundungsradien von  $r_i$  gleich ca. 0,75 mm und  $r_a$  gleich ca. 3 mm. Die Fugenanordnungen sind in Abb. 5.33 dargestellt.



Fugendetails Abb. 5.32

Abb. 5.33: Bei den Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen unter Biegebeanspruchung (links) sowie unter kombinierter Biege- Querkraftbeanspruchung eingesetzte Probekörper (rechts)

Bei den Untersuchungen zur Tragfähigkeit im Zustand II (Bewehrungstragfähigkeit) wurden die Flankenwinkel variiert und die Zahnlänge mit 60 und 90 mm jeweils konstant gehalten. Dies hat unterschiedliche Zahnbreiten bzw. Probekörperbreiten zur Folge (siehe Abb. 5.34). Die Anzahl an Zähnen variierte zwischen drei und neun. Der planmäßige Ausrundungsradius im Bereich der Zahnspitzen betrug hier 1,5 mm. Es ergaben sich vorhandene Ausrundungsradien von  $r_i$  gleich ca. 0 mm und  $r_a$  gleich ca. 2 mm.

Zur Herstellung der Probekörper mit schalglatter bzw. feststoffgestrahlter Klebfläche wurde eine Kunststoffschalung verwendet, in die entsprechend gebogene Stahlbleche eingestellt wurden (siehe Abb. 5.35). Für die übrigen Versuche wurden Platten mit Abmessungen von 610 mal 1500 mm hergestellt. Diese wurden dann mit Hilfe einer Steinsäge in Streifen mit der gewünschten Breite geschnitten. Anschließend wurden die Fugengeometrien mittels Hochdruckwasserstrahlchneidverfahren in die Betonplatten geschnitten.

Der für die Zugversuche gewählte Versuchsaufbau (siehe Abs. 4.3.4) erfordert Löcher im Lasteinleitungsbereich. Diese wurden bei den Zugprobekörpern vor dem Verkleben durch Kernbohren erzeugt.

Etwa vier Wochen nach der Betonage wurden die beiden Probekörperhälften verklebt. Hierbei wurden die in den Voruntersuchungen zur Optimierung des Haftverbands gewonnenen Erkenntnisse (siehe Abs. 4.1) berücksichtigt. Die bis dahin unter feuchten Tüchern gelagerten Probekörperhälften wurden zwei Tage vor dem Verkleben in ein Wasserbad gelegt. Rund ein Stunde vor dem Verkleben wurden diese wieder herausgenommen und auf einer Holzplatte entsprechend ausgerichtet. Mit Aluminiumprofilen wurden die Hälften gesichert (siehe Abb. 5.36). So sollte erreicht werden, dass diese gerade und ohne Versatz verklebt werden. Außerdem verhindern die Schienen ein seitliches Herauslaufen des Klebstoffs. Der Fugenspalt wurde anschließend mit dem hoch fließfähigen HFL vergossen. Da bei den ersten Klebvorgängen die Fuge teilweise auslief, wurden die Probekörper in Kunststofffolien eingeschlagen. Nach dem Verkleben wurden die Probekörper mit nassen Stofftüchern abgedeckt.

5 Experimentelle Untersuchungen

Im Zuge der Betonage und des Verklebens wurden drei Prismen aus HPC bzw. Klebstoff hergestellt, um damit die Biegezugfestigkeit und die Druckfestigkeit nach *DIN 18555-3: 1982-09* am Versuchstag bestimmen zu können. Die Prismen wurden bis zur Prüfung zusammen mit den Versuchskörpern gelagert.

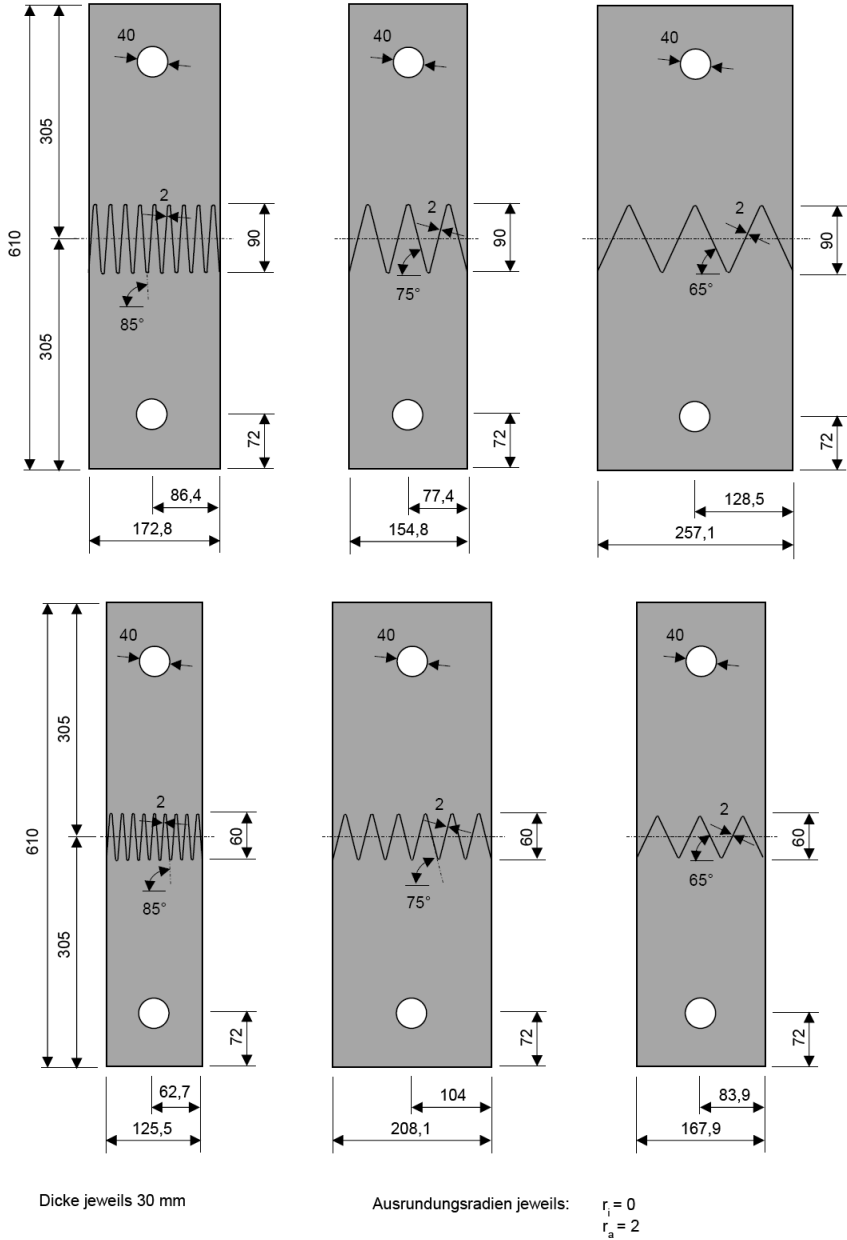


Abb. 5.34: Bei den Untersuchungen zur Tragfähigkeit im Zustand II eingesetzte Probekörper



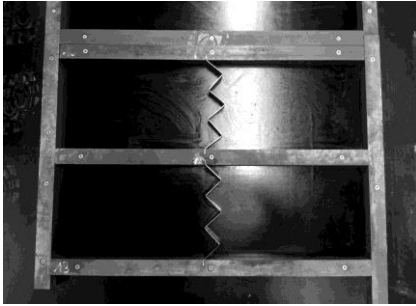


Abb. 5.35: Schalung zur Herstellung der Probekörper mit schalglatter bzw. feststoffgestrahlter Klebfläche

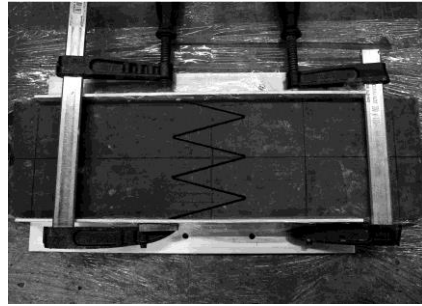


Abb. 5.36: Für das Verkleben vorbereiteter Probekörper

### 5.2.4 Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen unter Zugbeanspruchung

#### 5.2.4.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die Versuche wurde ca. vier Wochen nach dem Verkleben in einem Vier-Säulen-Prüfraumen mit servohydraulischem 630 kN Zylinder durchgeführt. Bei den Zugversuchen wurde der in Abs. 4.3.4 beschriebene gleiche Aufbau wie auch in den Tastversuchen verwendet. Mit Hilfe von Kugelgelenken sind die Probekörper hier frei drehbar in der Prüfmaschine befestigt.

Zur Erfassung der Versuchslast wurde eine Kraftmessdose eingesetzt. Wie auch in den Tastversuchen wurde die Messung bei frei hängendem Probekörper mit einer Last von 0 kN gestartet. Das Eigengewicht des unterhalb der Fuge befindlichen Teils des Probekörpers sowie das Gewicht der sich am unteren Ende befindenden Lasteinleitungskonstruktion von 43 kg wurden bei der Auswertung der Versuche entsprechend berücksichtigt.

Die Verformungen in Längsrichtung wurden jeweils mit drei oder vier induktiven Wegaufnehmern gemessen (Messbereich 10 mm). Ihre jeweiligen Messlängen sind in Abb. 5.32 angegeben. Bei einigen Versuchen wurden außerdem Dehnmessstreifen (Messlänge 10 mm) auf den Zähnen im Fugenbereich appliziert. Alle Versuche wurden weggesteuert gefahren, wobei anfangs der Weg mit 0,1 mm/min gesteigert wurde und später, im Bereich größerer Verformungen, mit 1,0 mm/min.

Mit Hilfe der DMS lassen sich nur punktuell Dehnungen auf der Bauteiloberfläche erfassen. Eine Möglichkeit zur flächigen Verformungsmessung bei Betonbauteilen stellt die digitale Nahbereichsphotogrammetrie dar (vgl. *Jesse und Kutzner 2013*).

Bei je einem Zugversuch je Serie kam das System ARAMIS 5M der Firma GOM mbH zum Einsatz. Ziel war es, einen Eindruck von der Spannungsverteilung im Fugenbereich zu bekommen. Bei dem verwendeten photogrammetrischen Messsystem wird der Verformungszustand durch zwei synchron arbeitende Kameras aus zwei Perspektiven erfasst (siehe Abb. 5.37). Das Verfahren erfordert eine strukturierte Bau-

teiloberfläche. Die Probekörper mussten in dem Messbereich von 210x180 mm mit einem Punktmuster versehen (siehe Abb. 5.38) werden. Auf die zunächst geweißte Betonoberfläche wurden die Punkte in zufälliger Anordnung mit schwarzem Lack-spray realisiert. Die Messdaten können anschließend mit der gleichnamigen Software ausgewertet werden.

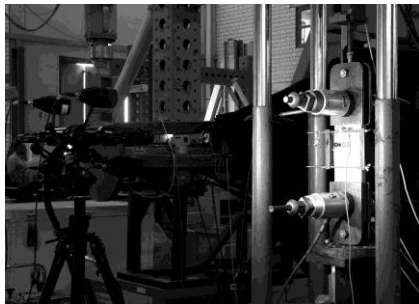


Abb. 5.37: Photogrammetrische Verformungsmessung bei den Zugversuchen

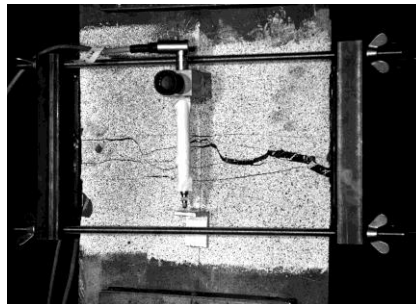


Abb. 5.38: Messbereich mit aufgebrachtem Punktmuster

Bei den in Abs. 4.3 beschriebenen Zugversuchen an Fugenvarianten war in den meisten Fällen eine Verspannung angeordnet, die ein seitliches Ausweichen der äußeren Zähne verhindern sollte. So werden die Verhältnisse in ausgedehnten Plattenbauteilen besser abgebildet. Damit die Vergleichbarkeit zu den Schub-Zugversuchen nach Abs. 5.1.2 gewährleistet ist, wurde hierauf bei den allgemeinen Untersuchungen zur Zugtragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen (Serie Z3) verzichtet. Die so ermittelten Fugentragfähigkeiten unterschätzt die bei größeren Plattenbauteilen vorhandene Fugentragfähigkeit also vermutlich um ein gewisses Maß. Lediglich die Versuche Z3-FJ-D2-WSG-75 02 und 03 wurden mit Verspannung (siehe auch Abb. 5.38) durchgeführt. Hierbei wurden die Muttern jeweils „leicht“ angezogen.

Wie auf den Fotos von den Zugversuchen in Abs. 5.2.4.2 und Abs. 5.2.6.2 zu erkennen ist, rissen die Probekörper teilweise ungleichmäßig auf. Dies ist dem gewählten Versuchsaufbau mit einer gelenkigen Befestigung in der Prüfmaschine geschuldet. Die mit Hilfe eines Lasers exakt in den Versuchstand eingebauten Probekörper wurden zunächst zentrisch beansprucht. Dies zeigen die Messwerte der Wegaufnehmer. Risse entstehen häufig am äußeren Rand der Probekörper, wie die photogrammetrischen Messungen belegen. Der Versuchskörper wird auf einer Seite weicher und es kommt zu einer Schiefstellung der Lasteinleitungsstruktur. Hieraus resultiert eine zusätzliche Biegemomentbeanspruchung für den Probekörper und die Klebverbindung. Dies wirkt sich negativ auf die Tragfähigkeit der Keilzinkenverbindung aus und hat ebenfalls zur Folge, dass die in größeren Plattenbauteilen vorhandene Fugentragfähigkeit durch die Versuche wahrscheinlich unterschätzt wird.

### 5.2.4.2 Versuchsergebnisse

In Anhang E1 sind die Versagensbilder aller Versuche mit den zugehörigen Lastverformungskurven aufgeführt. Daneben sind im Anhang unter anderem auch die Mate-

rialfestigkeiten am Versuchstag oder die vorhandenen Bauteilabmessungen übersichtlich zusammengestellt.

Im Falle der Versuche mit durch Wasserstrahlschneiden erzeugter Geometrie und Flankenneigungswinkeln von kleiner gleich  $45^\circ$  kam es in erster Linie zu einem Fugenversagen. Das Versagensbild ist insgesamt ähnlich wie in den vergleichbaren Schub-Zugversuchen nach Abs. 5.1.2. Teilweise war ein kohäsives Versagen und teilweise ein adhäsives Versagen, zu beobachten (siehe Abb. 5.39 bis Abb. 5.42). Vereinzelt ereignete sich auch ein Mischversagen aus Adhäsions- und Kohäsionsbruch. Bei einem Flankenneigungswinkel von  $30^\circ$  und  $45^\circ$  kam es jedoch im Bereich der Zahnspitzen lokal zu einem Betonversagen, so dass letztendlich die Bewehrung frei lag (siehe Abb. 5.42).

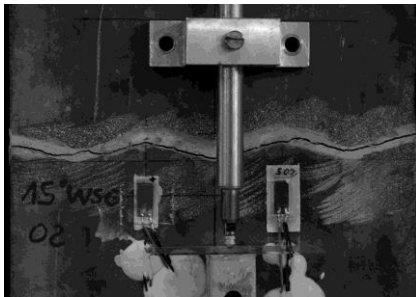


Abb. 5.39: Rissbild bei Versuch  
Z4-FJ-D2-WSG-15-02

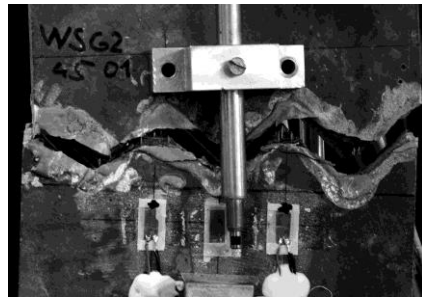


Abb. 5.40: Rissbild bei Versuch  
Z4-FJ-D2-WSG-45-01



Abb. 5.41: Bruchflächen bei Versuch  
Z4-FJ-D2-WSG-15-02

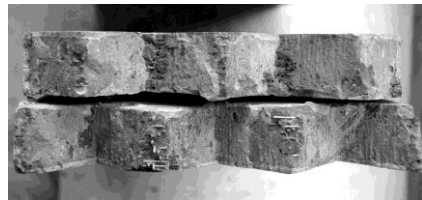


Abb. 5.42: Bruchflächen bei Versuch  
Z4-FJ-D2-WSG-45-01

In Abb. 5.43 sind repräsentative Last-Dehnungskurven der Versuche zu sehen. Die Dehnungen wurden dabei entweder aus den gemittelten Längenänderungen der Wegaufnehmer berechnet, oder es wurde auf die Messwerte der DMS zurückgegriffen. Nach einem linearen Lastanstieg kam es bei den Versuchen zu einem schlagartigen Fugenversagen.

Mit dem bloßen Auge waren keine Risse vor dem Versagen der Klebfuge zu erkennen. Erst mit Hilfe der Photogrammetrie konnten im Falle von Versuch Z3-WSG-45-03 ein Riss detektiert werden. Bei einer Last von rund 12 kN bildete sich hier ein Riss im Bauteilinneren etwas oberhalb der Klebfuge (siehe Abb. 5.44). Im Lastverformungsverlauf war dies als leichter Knick zu erkennen. Mit Hilfe der Photogrammetrie

ließ sich auch der Ablauf des Fugenversagens nachvollziehen. Ab einer Last von ca. 16 kN riss die Fuge von einer Seite her auf (siehe Abb. 5.45).

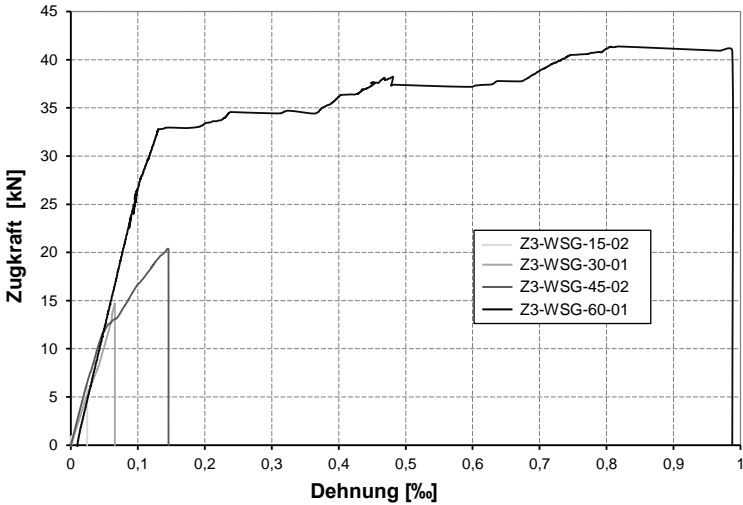


Abb. 5.43: Repräsentative Last-Dehnungskurven der Zugversuche an Keilzinkenverbindungen mit einem Flankenneigungswinkel von  $\leq 60^\circ$

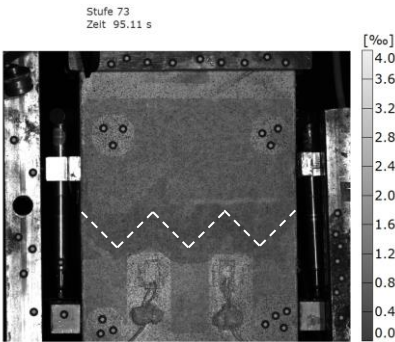


Abb. 5.44: Mit Hilfe der Photogrammetrie erfasste Dehnungsverteilung im Falle von Versuch Z3-WSG-45-03 bei einer Last von rund 12 kN

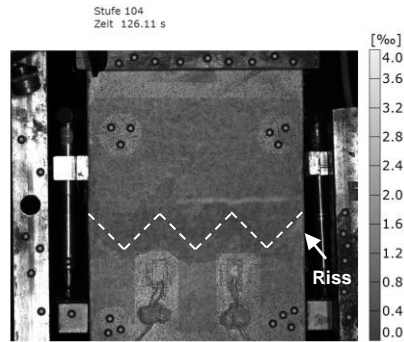


Abb. 5.45: Mit Hilfe der Photogrammetrie erfasste Dehnungsverteilung im Falle von Versuch Z3-WSG-45-03 bei einer Last von rund 16 kN

In Abb. 5.46 sind die Last-Dehnungskurven der Versuche mit einem Flankenneigungswinkel von  $60^\circ$  und  $75^\circ$  aufgeführt. Die Dehnungen wurden wiederum aus den gemittelten Längenänderungen der Wegaufnehmer und der entsprechenden Messlänge berechnet. Außerdem sind in Abb. 5.46 die Last-Verformungskurven von Referenzversuchen ohne Fuge dargestellt. Hierbei handelt es sich um die Ergebnisse der im Rahmen der Voruntersuchungen durchgeführten Versuchsserie Z1-REF. Die Versuchslasten der mit zehn Lagen Mikrobewehrung versehenen Probekörper wurden entsprechend auf mit 18 Lagen bewehrte Probekörper hochgerechnet.

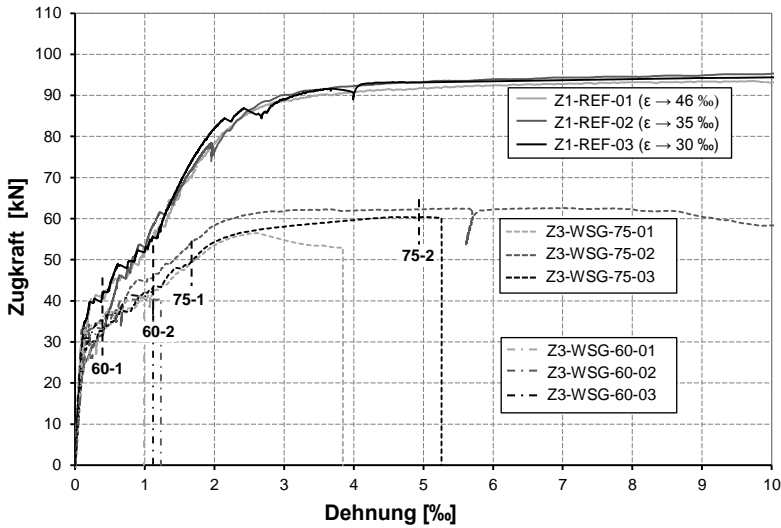


Abb. 5.46: Last-Dehnungskurven der Zugversuche an Keilzinkenverbindungen mit einem Flankenneigungswinkel von  $\geq 60^\circ$

Ab einer Last von rund 25 kN kam es bei den Versuchen mit einem Flankenneigungswinkel von  $60^\circ$  und  $75^\circ$  zu einer Querrissbildung (siehe Abb. 5.47 und Abb. 5.48 sowie Abb. 5.51 und Abb. 5.52) im Fugenbereich sowie auch außerhalb. Bis zum Erreichen der Erstrisskraft lag bei allen Versuchen ein nahezu linear elastisches Last-Verformungsverhalten vor. Das Auftreten des Erstrisses, das heißt der Übergang von Zustand I in Zustand II, ging mit einem Steifigkeitsabfall einher.

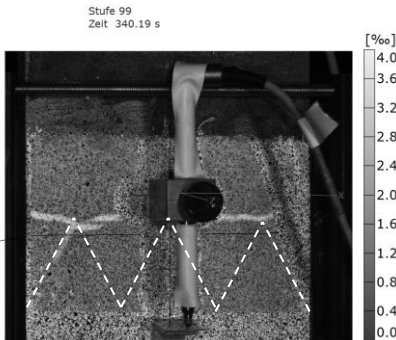


Abb. 5.47: Mit Hilfe der Photogrammetrie erfasste Dehnungsverteilung im Falle von Versuch Z3-WSG-60-03 bei einer Last von rund 32 kN (Stelle 60-1)



Abb. 5.48: Mit Hilfe der Photogrammetrie erfasste Dehnungsverteilung im Falle von Versuch Z3-WSG-60-03 bei einer Last von rund 42 kN unmittelbar vor dem Versagen (Stelle 60-2)



Abb. 5.49: Versagensbild bei Versuch Z4-FJ-D2-WSG-60-02

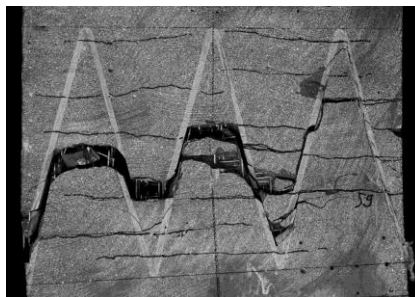


Abb. 5.50: Versagensbild bei Versuch Z4-FJ-D2-WSG-75-02

Im Falle der Versuche mit einem Flankenneigungswinkel von  $60^\circ$  kam es zu einem schlagartigen, in erster Linie adhäsiven Fugenversagen (siehe Abb. 5.49). Im Bereich der Zahnschneiden kam es wiederum zu einem lokalen Betonversagen. Die Bewehrung wurde dabei aus dem Beton herausgezogen. Bei Versuch Z3-WSG-60-03 wurde ebenfalls eine photogrammetrische Verformungsmessung durchgeführt. Hiermit konnte eine Rissbildung in der Fuge bereits ab einer Last von ca. 32 kN (siehe Abb. 5.47), das heißt bereits zu einem relativ frühen Zeitpunkt, nachgewiesen werden. Im weiteren Verlauf traten weitere Risse im Fugenbereich auf, (siehe Abb. 5.48) bis es hier bei ca. 42 kN zu einem schlagartigen Fugenversagen kam.

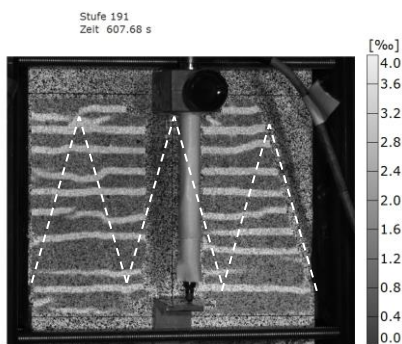


Abb. 5.51: Mit Hilfe der Photogrammetrie erfasste Dehnungsverteilung im Falle von Versuch Z3-WSG-75-03 bei einer Last von rund 50 kN (Stelle 75-1)

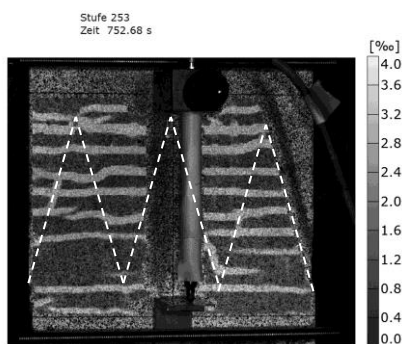


Abb. 5.52: Mit Hilfe der Photogrammetrie erfasste Dehnungsverteilung im Falle von Versuch Z3-WSG-75-03 bei einer Last von rund 60 kN (Stelle 75-2)

Die Rissbildung war bei den Versuchen mit einem Flankenneigungswinkel von  $75^\circ$  ab einer Dehnung von rund 1,4 ‰ abgeschlossen. Bei etwa 2,0 ‰ Dehnung begann die Bewehrung zu fließen. Im weiteren Verlauf kam es zu einer starken Zunahme der Verformungen. Die Last konnte nur noch geringfügig gesteigert werden. Im Falle der Versuche mit einem Flankenneigungswinkel von  $75^\circ$  kann das Tragverhalten als duktil eingestuft werden. Lediglich bei dem Versuch Z3-FJ-D2-WSG-75-01, welcher

ohne seitliche Verspannung durchgeführt wurde, zeigte sich ein abweichendes Lastverformungsverhalten. Hier war ähnlich wie bei den Versuchen mit einem Flankenneigungswinkel von  $60^\circ$  ein adhäsives Fugenversagen zu verzeichnen. Wie im Lastverformungsverlauf deutlich wird, befand sich die Bewehrung zu dem Zeitpunkt bereits im Fließen. Bei den übrigen Versuchen der Serie, bei denen eine Verspannung vorgenommen wurde, kam es zu einem Fugenversagen kombiniert mit einem Bewehrungsversagen. Der Riss sprang hier zwischen zwei Querrissen und verlief dabei in der Klebfuge (siehe Abb. 5.50). Die Risse in der Fuge entstanden hier jedoch zu einem sehr späten Zeitpunkt, als sich die Bewehrung bereits im Fließen befand (siehe Abb. 5.46).

Bei Erreichen der Streckgrenze betrug die Rissbreite im Falle der Versuche mit Mikrobewehrung allgemein rund 0,05 mm. Im Falle der Versuche mit einem Flankenneigungswinkel von  $75^\circ$  entsprach der Rissabstand ungefähr der Maschenweite der Mikrobewehrungsmatten. Die Entwicklung der Rissbreite bei den Zugversuchen ist exemplarisch für Versuch Z3-WSG-75-02 in Abb. 5.53 zu sehen. Hierbei handelt es sich um die mittlere Rissbreite im Fugenbereich, welche aus der mit Hilfe der Wegaufnahme gemessenen Verformung geteilt durch die Anzahl der Risse berechnet wurde.

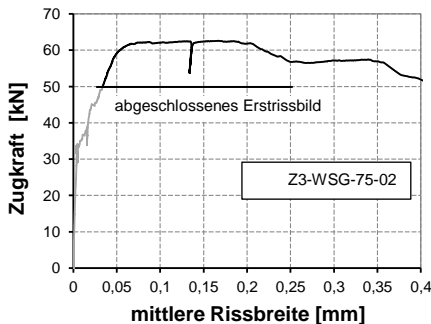
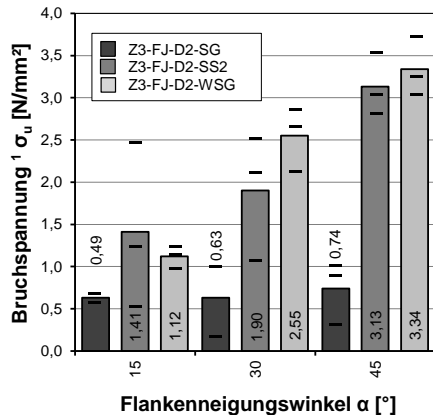


Abb. 5.53: Entwicklung der Rissbreite bei Versuch Z3-WSG-75-02



<sup>1</sup> bezogen auf die vorhandene Brutto-Betonquerschnittsfläche

Abb. 5.54: Ergebnisse der Zugversuche an Keilzinkenverbindungen mit unterschiedlich vorbehandelten Klebflächen

Bei den Versuchen mit schalglatter Klebfläche war unabhängig vom Flankenneigungswinkel ein adhäsives Fugenversagen zu beobachten (siehe Abb. 5.55 bis Abb. 5.58). Der Haftverbund war dabei so schlecht, dass zwei Probekörper bereits bei Einbau in den Versuchsstand versagten. Im Mörtel waren teilweise Verfärbungen sowie eine Schichtung zu erkennen, die aus der Art der Herstellung herrührten (siehe Abb. 5.57 und Abb. 5.58). Nur vereinzelt waren Lunker in der Klebfuge vorhanden. Das Lastverformungsverhalten ist als spröde einzustufen (Lastverformungskurven: siehe Anhang E1).

In Abb. 5.54 sind die bei den Zugversuchen an Keilzinkenverbindungen mit unterschiedlich vorbehandelten Klebflächen erzielte Bruchspannungen, bezogen auf den Brutto-Betonquerschnitt rechtwinklig zur Beanspruchungsrichtung aufgeführt. Die Ergebnisse werden in Abs. 5.2.7.2 mit den Ergebnissen der Schub-Zugversuche nach Abs. 5.1.2 verglichen.

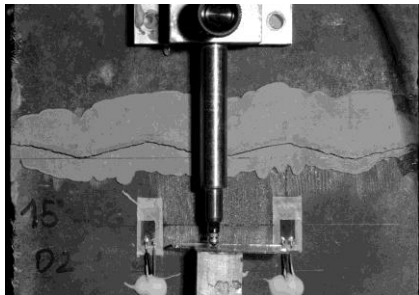


Abb. 5.55: Versagensbild bei Versuch Z4-FJ-D2-SG-15-01

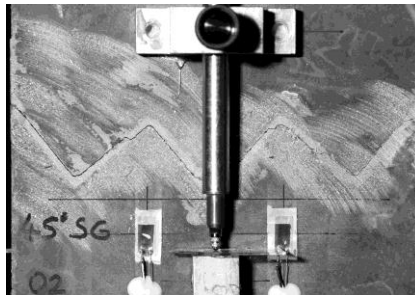


Abb. 5.56: Versagensbild bei Versuch Z4-FJ-D2-SG-45-02

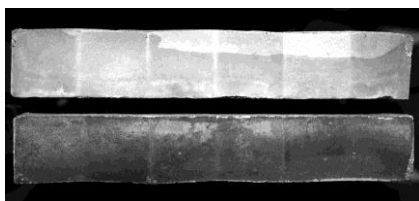


Abb. 5.57: Bruchflächen bei Versuch Z4-FJ-D2-SG-15-01

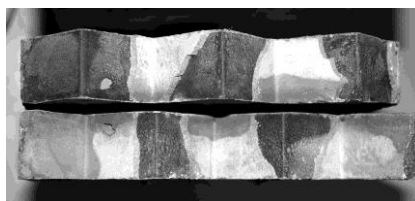


Abb. 5.58: Bruchflächen bei Versuch Z4-FJ-D2-SG-45-02

Im Falle der Versuche mit feststoffgestrahlter Klebfläche kam es ebenfalls schwerpunktmäßig zu einem Fugenversagen. Wie auch bei den Versuchen mit durch Wasserstrahlschneiden erzeugter Klebfläche war teilweise ein kohäsives Versagen und teilweise ein adhäsives Versagen zu beobachten (siehe Abb. 5.59 bis Abb. 5.62). Vereinzelt ereignete sich auch ein Mischversagen aus Adhäsions- und Kohäsionsbruch. Bei einem Flankenneigungswinkel  $45^\circ$  kam es wiederum im Bereich der Zahnschneiden zu einem lokalen Betonversagen.

Bei den Versuchen mit feststoffgestrahlter Klebfläche fielen die erzielten Bruchspannungen insgesamt etwas geringer aus als bei den Versuchen mit wasserstrahlgeschchnittener Fugengeometrie (siehe Abb. 5.54). Auch hier ist das Lastverformungsverhalten als spröde einzustufen.

Im Falle der Versuchsserien, bei denen es zu einem Fugenversagen kam, betrug die Streuung bis 70 %. Bei den Versuchen mit einem Flankenneigungswinkel von  $15^\circ$  und  $30^\circ$  war die Streuung deutlich größer als bei den Versuchen mit einem Flankenneigungswinkel von  $45^\circ$ . Hier lag die Streuung sowohl bei den Versuchen mit wasserstrahlgeschchnittener Fugengeometrie als auch bei den Versuchen mit gesandstrahlter Klebfläche bei rund 10 %.



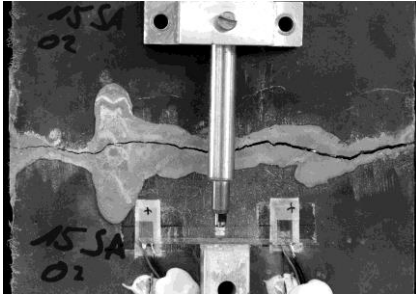


Abb. 5.59: Versagensbild bei Versuch  
Z4-FJ-D2-SA-15-01

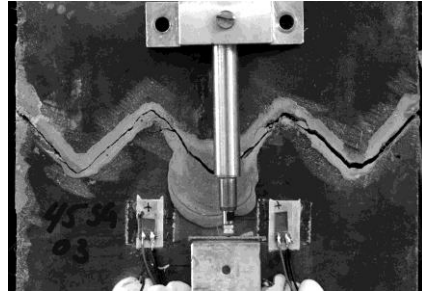


Abb. 5.60: Versagensbild bei Versuch  
Z4-FJ-D2-SA-45-03

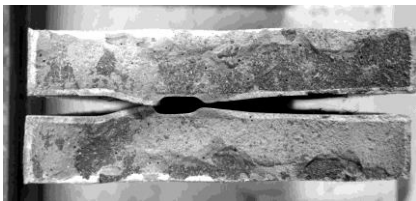


Abb. 5.61: Bruchflächen bei Versuch  
Z4-FJ-D2-SA-15-02



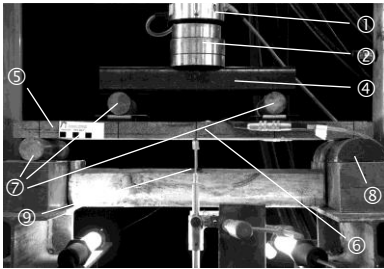
Abb. 5.62: Bruchflächen bei Versuch  
Z4-FJ-D2-SA-45-03

## 5.2.5 Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen unter Biegebeanspruchung sowie unter kombinierter Biege- Querkraftbeanspruchung

### 5.2.5.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Wie auch die Zugversuche wurden die Dreipunkt- und Vierpunktbiegeversuche etwa vier Wochen nach dem Verkleben in einem Vier-Säulen-Prüfrahmen mit servohydraulischem 630 kN Zylinder durchgeführt.

Der bei den Vierpunktbiegeversuchen verwendete Aufbau ist in Abb. 5.63 zu sehen. Die Stützweite betrug 54 cm und die Lasteinleitung erfolgte in den Viertelpunkten über zwei Stahlrollen (siehe Abb. 5.65). Die Lagerung des Prüfkörpers wurde als gelenkige Fest-Loslagerung wiederum mittels Rolle und Halbschale realisiert. Zur Erfassung der Versuchslast wurde eine Kraftmessdose eingesetzt. Die Durchbiegung wurde mit zwei in Feldmitte angeordneten induktiven Wegaufnehmern gemessen (Messbereich  $\pm 20$  mm). Das Gewicht der Lasteinleitungsstruktur (Traverse und Rollen), der Kalotte sowie der Kraftmessdose ( $\Sigma = 10,0$  kg) wurde vor den Versuchen bestimmt und bei der Versuchsauswertung entsprechend berücksichtigt.



- ① Kraftmessdose
- ② Kalotte
- ③ Lasteinleitung mit Gelenk in Querrichtung
- ④ Traverse
- ⑤ Versuchskörper
- ⑥ Fuge
- ⑦ Rollenlager
- ⑧ Festlager
- ⑨ Wegaufnehmer

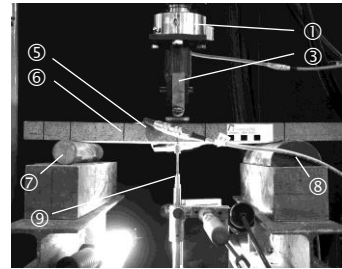


Abb. 5.63: Aufbau der Vierpunktbiegeversuche

Abb. 5.64: Aufbau der Dreipunktbiegeversuche

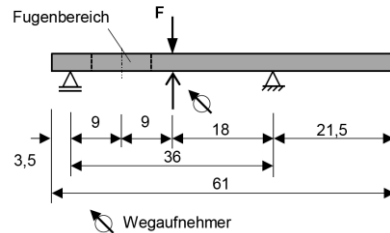
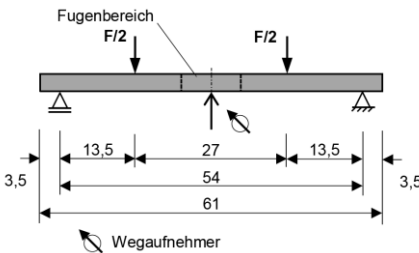


Abb. 5.65: Aufbau der Vierpunktbiegeversuche - Systemabmessung

Abb. 5.66: Aufbau der Dreipunktbiegeversuche - Systemabmessung

In Abb. 5.64 ist der bei dem Dreipunktbiegeversuch verwendete Aufbau zu sehen. Ursprünglich war hier eine Stützweite von ebenfalls 54 cm angedacht. Bei den Versuchen zeigte sich jedoch, dass es hier zu einem Biegeversagen außerhalb der Fuge kommt. Die Stützweite wurde entsprechend reduziert (siehe Abb. 5.66). Über eine in Querrichtung gelenkig gelagerte Rolle erfolgt die Lasteinleitung in Feldmitte. Die Lagerung des Prüfkörpers wurde auch hier als gelenkige Fest-Loslagerung mittels Rolle und Halbschale realisiert. Zur Erfassung der Versuchslast wurde eine Kraftmessdose eingesetzt. Die Durchbiegung wurde mit zwei unterhalb der Lasteinleitung angeordneten induktiven Wegaufnehmern (Messbereich  $\pm 20$  mm) gemessen.

Sowohl bei den Dreipunktbiegeversuchen als auch bei den Vierpunktbiegeversuchen erfolgte die Belastung wiederum weggesteuert. Anfangs wurde der Weg mit 0,1 mm/min gesteigert und später, im Bereich größerer Verformungen, mit 1,0 mm/min. Die Last wurde stufenweise aufgebracht. Beim Auftreten von Rissen, was durch einen Lastabfall gekennzeichnet war, wurde der Versuch unterbrochen, der Riss markiert und teilweise die Rissbreite an der Unterseite mit Hilfe einer Rissmesskarte gemessen. Anschließend wurde der Probekörper fotografiert.

Alle Versuche wurden ohne seitliche horizontale Verspannung wie in Abs. 4.3.4 beschrieben durchgeführt. Die in größeren Plattenbauteilen vorhandene Fugentragfähigkeit wird durch die Versuche wahrscheinlich unterschätzt.

### 5.2.5.2 Versuchsergebnisse

Bei den Referenzversuchen B2-REF entstanden, gleichmäßig über den gesamten Probekörper verteilt, Biegerisse (siehe Abb. 5.68). Der Rissabstand entsprach dabei ungefähr der Maschenweite der Mikrobewehrungsmatten. Exemplarische Lastverformungskurven der Vierpunktbiegeversuche sind in Abb. 5.69 zu sehen. Die Verläufe sind hier deutlich gleichmäßiger als bei den Zugversuchen. Bei den Zugversuchen waren auch auf hohem Lastniveau immer wieder Lastabfällen zu verzeichnen. Grund hierfür ist, dass es bei den Zugversuchen mit der Zeit zu einer Schiefstellung kam. Infolge der ungewollten Biegebeanspruchung entstanden weitere Risse. Bei den Vierpunktbiegeversuchen liegt eine gleichmäßigere Beanspruchung vor.

Die Lastverformungskurven aller Versuche zusammen mit den entsprechenden Versagensbildern sind in Anhang E2 aufgeführt. Im Anhang sind außerdem unter anderem auch die Materialfestigkeiten am Versuchstag oder die vorhandenen Bauteilabmessungen übersichtlich zusammengestellt.

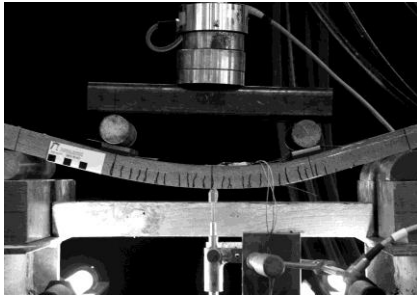


Abb. 5.67: Verformungsbild bei Versuch B2-REF-03

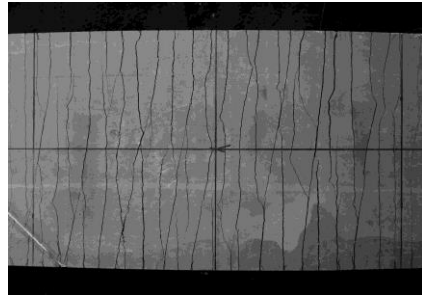


Abb. 5.68: Rissbild auf der Probekörperunterseite bei Versuch B2-REF-03

Der Übergang von Zustand I in Zustand II ist von einem Steifigkeitsabfall gekennzeichnet. Ab einer Durchbiegung von ca. 5 mm war die Rissbildung weitestgehend abgeschlossen. Gleichzeitig begann die Bewehrung zu fließen. Die Rissbreite betrug zu diesem Zeitpunkt ca. 0,15 mm. Im weiteren Verlauf kam es zu einer starken Zunahme der Verformungen (siehe Abb. 5.67) und die Rissbreiten stiegen an (siehe Abb. 5.80). Die Last konnte weiter gesteigert werden, bis sich letztendlich ein Riss öffnete und es schließlich zu einem Bewehrungsversagen kam. Lediglich bei Versuch B2-REF-01 kam es zu einem Versagen der Betondruckzone. Hier war die Betondeckung in der linken Probekörperhälfte nahezu null und im rechten Teil ca. acht Millimeter.

Bei den Versuchen mit Keilzinkenverbindung entstanden zunächst Biegerisse im Fugenbereich. Bis zum Erreichen der Erstrisskraft lag bei allen Versuchen ein nahezu linear elastisches Last-Verformungsverhalten vor. Das Auftreten des Erstrisses, das heißt der Übergang von Zustand I in Zustand II, ging auch hier mit einem Steifigkeitsabfall einher (siehe Abb. 5.69).

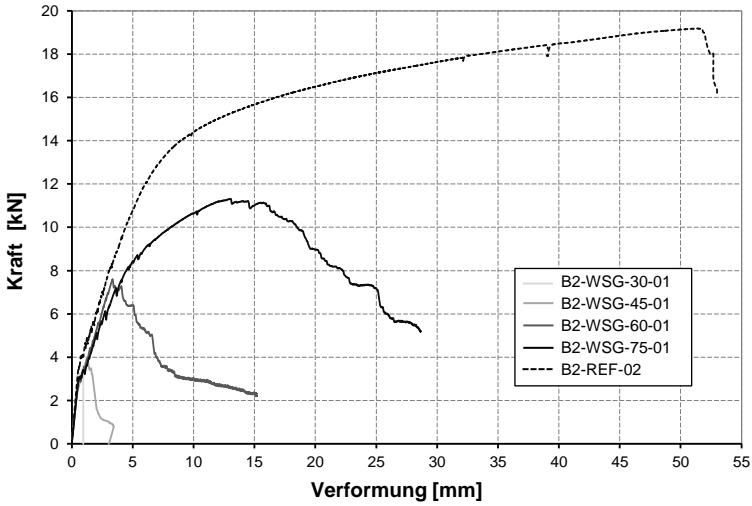


Abb. 5.69: Exemplarische Last-Verformungskurven der Vierpunktbiegeversuche an Keilzinkenverbindungen (Serie B2-WSG)

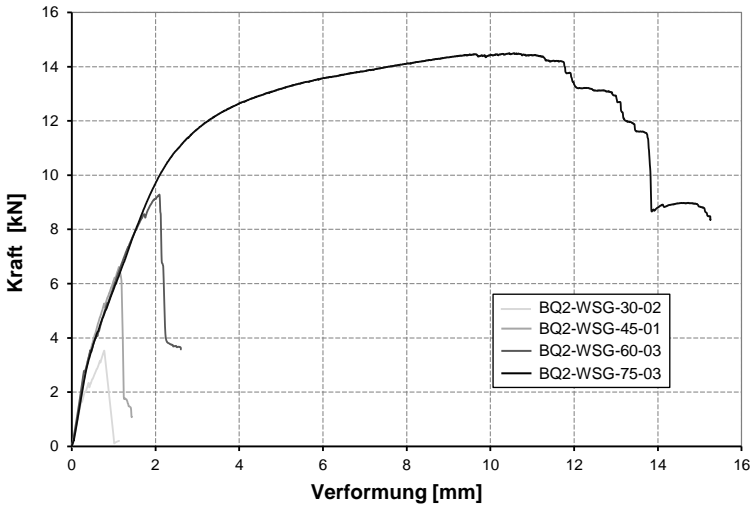


Abb. 5.70: Exemplarische Last-Verformungskurven der Dreipunktbiegeversuche an Keilzinkenverbindungen (Serie BQ2-WSG)

Im Falle der Versuche mit Flankenneigungswinkeln kleiner gleich  $60^\circ$  kam es sowohl bei den Vierpunktbiegeversuchen als auch bei den Dreipunktbiegeversuchen zu einem schlagartigen, in erster Linie adhäsiven Fugenversagen (siehe Abb. 5.72, Abb. 5.71 und Abb. 5.73). Im Bereich der Zahnspitzen war teilweise lokal ein Betonversagen (Riss im Beton) zu verzeichnen. Die Bewehrung wurde dabei aus dem Beton (siehe Abb. 5.72) herausgezogen. Das Lastverformungsverhalten ist allgemein als spröde einzustufen.

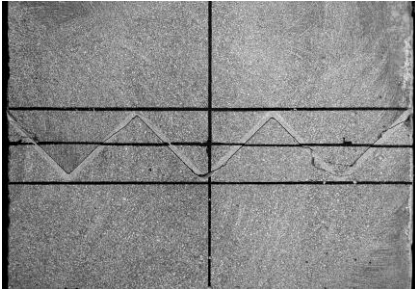


Abb. 5.71: Rissbild auf der Probekörperunterseite bei Versuch B2-FJ- D2-WSG-45-01



Abb. 5.72: Bruchflächen bei Versuch B2-FJ- D2-WSG-30-03

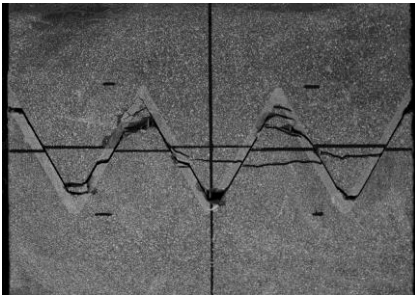


Abb. 5.73: Rissbild auf der Probekörperunterseite bei Versuch B2-FJ- D2-WSG-60-01



Abb. 5.74: Verformungsbild bei Versuch B2-FJ- D2-WSG-75-02

Bei den Vierpunktbiegeversuchen an Keilzinkenverbindungen mit einem Flankenneigungswinkel von  $75^\circ$  bildeten sich im Fugenbereich zahlreiche Risse (siehe Abb. 5.74). Die Fuge selbst blieb aber zunächst rissfrei. Ab einer Durchbiegung von ca. 5 mm begann die Bewehrung zu fließen. Die Rissbreite war zu dem Zeitpunkt deutlich kleiner als 0,1 mm. Im weiteren Verlauf kam es zu einer Zunahme der Verformungen (siehe Abb. 5.67). Gleichzeitig stiegen die Rissbreiten an. Die Entwicklung der Rissbreite im Fugenbereich bei Versuch B2-75-03 ist in Abb. 5.80 zu sehen. Ab einer Verformung von 12,5 kN traten Risse in der Fuge auf. Wie auch bei den Zugversuchen und einem Flankenneigungswinkel von  $75^\circ$  kam es schließlich zu einem Fugenversagen kombiniert mit einem Bewehrungsversagen. Der Riss sprang auch hier zwischen zwei Querrissen und verlief dabei in der Klebfuge (siehe Abb. 5.76). Nach und nach rissen von unten nach oben immer weitere Bewehrungsdrähte.

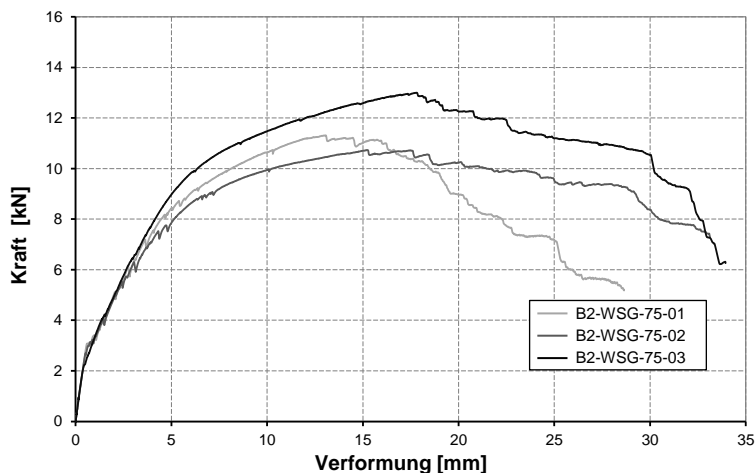


Abb. 5.75: Last-Verformungskurven der Vierpunktbiegeversuche an Keilzinkenverbindungen mit einem Flankenneigungswinkel von 75° (Serie B2-WSG-75)

Insbesondere gegen Ende kam es zu einer Rissbildung in der Fuge im Bereich der äußeren Zähne. Hier machte sich möglicherweise die fehlende Verspannung in Querrichtung bemerkbar.

Bei Versuch B2-FJ-D2-WSG-75-01 riss die Fuge auf der Unterseite stärker auf als bei den übrigen Versuchen der Serie. Die Zähne klappten hier „kammartig“ nach unten heraus (siehe Abb. 5.77). Zu dem Zeitpunkt befand sich die Bewehrung aber bereits im Fließen. Die Last konnte weiter gesteigert werden bis es schließlich zu einem Versagen in der Betondruckzone kam. Im Falle der Versuche mit einem Flankenneigungswinkel von 75° kann das Tragverhalten als duktil eingestuft werden (siehe Abb. 5.75).

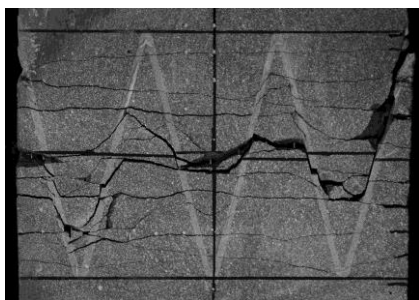


Abb. 5.76: Rissbild auf der Probekörperunterseite bei Versuch B2-FJ- D2-WSG-75-02



Abb. 5.77: Rissbild auf der Probekörperunterseite bei Versuch B2-FJ- D2-WSG-75-01

Bei den Dreipunktbiegeversuchen bildeten sich ebenfalls zahlreiche Risse im Fugenbereich. Auch hier blieb die Fuge zunächst rissfrei. Mit zunehmender Beanspruchung bildete sich im Bereich der Fuge nahe bei der Lasteinleitung dort, wo das

Biegemoment am größten ist, ein Fließgelenk. Zu Beginn des Stahlfließens lag die Rissbreite im Fugenbereich bei rund 0,5 mm.

Im weiteren Verlauf nahmen die Verformungen weiter zu, bis es in der Zugzone wiederum zu einem Fugenversagen kombiniert mit einem Bewehrungsversagen kam (siehe Abb. 5.78). In der Druckzone war ein Betonversagen (siehe Abb. 5.79) zu verzeichnen. Die Entwicklung der Rissbreite im Fugenbereich bei Versuch QB2-75-01 ist in Abb. 5.80 dargestellt. Gegen Ende kam es auch hier zu einer Rissbildung in der Fuge im Bereich der äußeren Zähne. Das Tragverhalten kann als duktil eingestuft werden.



Abb. 5.78: Rissbild auf der Probekörperunterseite bei Versuch BQ2-FJ- D2-WSG-75-03

Abb. 5.79: Betonversagen auf der Probekörperoberseite bei Versuch BQ2-FJ- D2-WSG-75-03

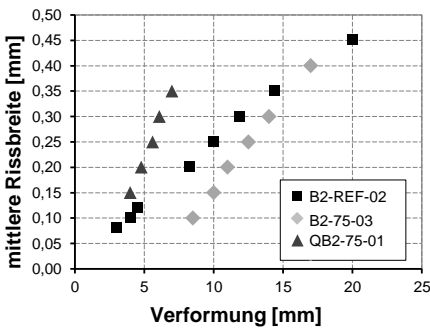


Abb. 5.80: Entwicklung der Rissbreite im Fugenbereich bei Drei- sowie Vierpunktbiegeversuchen

## 5.2.6 Untersuchungen zur Bewehrungstragfähigkeit bei Keilzinkenverbindungen im Zustand II

### 5.2.6.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Der verwendete Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung waren identisch wie bei allgemeinen Untersuchungen zur Fugentragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen unter Zugbeanspruchung nach Abs. 5.2.4.1.

Der einzige Unterschied war, dass hier bei allen Versuchen eine seitliche horizontale Verspannung vorgenommen wurde, die ein seitliches Ausweichen der äußeren Zähne verhindern sollte. Die Muttern wurden jeweils „leicht“ angezogen.

Mit dem Auftreten von Rissen im Fugenbereich kommt es zu Spannungumlagerungen. Hieraus resultieren Umlenkkräfte, ähnlich wie bei einem Übergreifungsstoß. Bei den Probekörpern werden diese von der Verspannung aufgenommen. In großformatigen Plattenbauteilen stehen diese mit den Kräften aus Nachbarzinken im Gleichgewicht. Die Ergebnisse der Versuche sind aus dem Grund jedoch nicht auf Balkenbauteile übertragbar.

5.2.6.2 Versuchsergebnisse

In Abb. 5.81 sind repräsentative Last-Dehnungskurven der Zugversuche an Keilzinkenverbindungen mit unterschiedlicher Zahngeometrie aufgeführt. Es wurden sowohl der Flankenneigungswinkel als auch die Zahnlänge variiert. Die Probekörper wiesen hier alle unterschiedliche Breiten auf. Hierbei handelt es sich um eine auf eine einheitliche Breite von 10 cm bezogene Versuchslast. Nur so ist ein Vergleich der Versuche untereinander möglich. Die Dehnungen wurden auch hier aus den gemittelten Längenänderungen der Wegaufnehmer und der entsprechenden Messlänge berechnet.

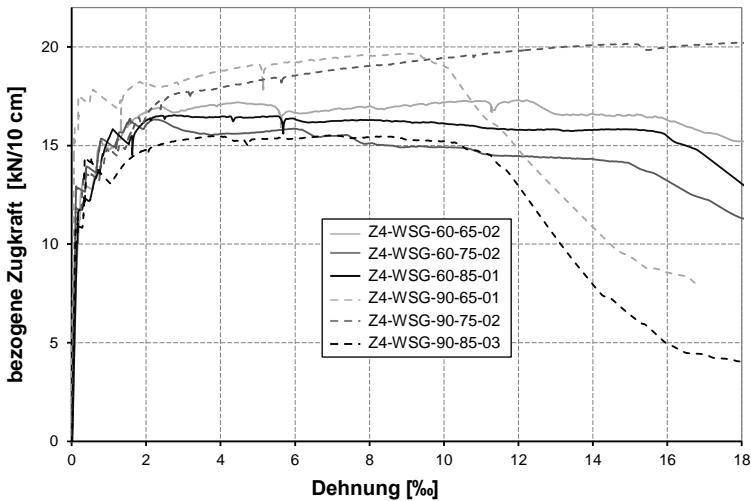


Abb. 5.81: Repräsentative Last-Dehnungskurven der Zugversuche zur Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen im Zustand II

Die Lastverformungskurven aller Versuche sowie die Versagensbilder sind in Anhang E3 aufgeführt. Daneben sind dort unter anderem auch die Materialfestigkeiten am Versuchstag oder die vorhandenen Bauteilabmessungen übersichtlich zusammengestellt. Außerdem sind im Anhang für alle Versuche die bei Erreichen der Erstrisskraft herrschende Betonzugspannung, die Streckgrenze bezogen auf die Querschnittsfläche der außerhalb des Fugenbereichs im Probekörper vorhandenen Bewehrung mit der zu dem Zeitpunkt vorliegenden Dehnung, die vorhandene Zugspannung bei



Maximallast, ebenfalls bezogen auf die Querschnittsfläche der außerhalb des Fugenbereichs im Probekörper vorhandenen Bewehrung sowie die zum Versagenszeitpunkt vorhandene Dehnung aufgeführt.

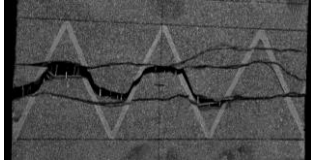


Abb. 5.82: Rissbild bei Versuch Z4-FJ-WSG-60-65-02

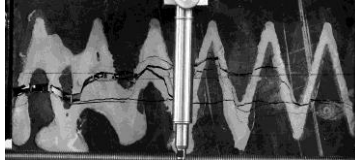


Abb. 5.83: Rissbild bei Versuch Z4-FJ-WSG-60-75-02

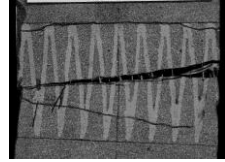


Abb. 5.84: Z4-FJ-WSG-60-85-02

Bis zum Erreichen der Erstrisskraft lag bei allen Versuchen ein nahezu linear elastisches Last-Verformungsverhalten vor. Das Auftreten des Erstrisses, das heißt der Übergang von Zustand I in Zustand II, ging mit einem Steifigkeitsabfall einher. Je nach Größe des im Fugenbereich im Riss vorhandenen Bewehrungsquerschnitts konnte die Last weiter gesteigert werden bis die Bewehrung schließlich ins Fließen überging.

Bei den Versuchen mit einer Zahnlänge von 60 mm entstanden im Fugenbereich meist zwei, maximal drei Querrisse. Anders als bei Bauteilen ohne Fuge kam es hier zu einem abrupten Übergang der Bewehrung ins Fließen. Anschließend waren keine nennenswerten Laststeigerungen mehr zu verzeichnen.

Im Falle der Versuche Z4-FJ-WSG-60-65-01 und -02 kam es zu einem sogenannten kombinierten Versagen, wie es bereits bei den Zugversuchen in Abs. 5.2.4 sowie den Vierpunkt- und Dreipunktbiegeversuchen in Abs. 5.2.5 zu beobachten war.

Zunächst blieb die Fuge selbst rissfrei. Ab einer Dehnung von ca. 1 ‰ begann die Bewehrung zu fließen. Die Rissbreite war zu dem Zeitpunkt deutlich kleiner als 0,1 mm. Im weiteren Verlauf kam es zu einer Zunahme der Verformungen (siehe Abb. 5.81). Gleichzeitig stiegen die Rissbreiten an. Erst gegen Ende des Versuchs traten Risse in der Fuge auf. Es kam schließlich zu einem kombinierten Versagen, einem Fugenversagen kombiniert mit einem Bewehrungsversagen. Der Riss sprang wiederum zwischen zwei Querrissen und verlief dabei in der Klebfuge (siehe Abb. 5.82). Das Tragverhalten ist hierbei als duktil einzustufen. Eine Ausnahme stellt Versuch Z4-WSG-60-65-03 dar. Hier war ein mehr oder weniger schlagartiges Fugenversagen zu beobachten, nachdem die Bewehrung ins Fließen gekommen war.

Zu einem kombinierten Versagen kam es ebenfalls bei den Versuchen der Serie Z4-WSG-60-75 (siehe Abb. 5.83). Mit dem Aufreißen der Fuge kam es hier zu einem deutlichen Lastabfall. Im weiteren Verlauf der Versuche blieb die Last konstant auf niedrigerem Lastniveau und die Verformungen konnten weiter gesteigert werden (siehe Abb. 5.81). Dieses Lastverformungsverhalten ist dem Rissverlauf geschuldet. Dadurch, dass der Riss zwischen zwei Querrissen sprang, kann weniger Bewehrung aktiviert werden, als dies in einem Trennriss der Fall ist. Der Versuch 60-75-01 wurde

ohne Verspannung durchgeführt, weshalb es hier zu einem Ausbrechen eines äußeren Zahnes kam.

Bei den Versuchen mit einer Zahnlänge von 60 mm und einem Flankenneigungswinkel von 85° kam es durchweg zu einem reinen Bewehrungsversagen (Abb. 5.83). Unmittelbar nach dem Erreichen der Steckgrenze lag die Rissbreite deutlich unter 0,1 mm. Im weiteren Verlauf kam es zu einer Zunahme der Verformungen (siehe Abb. 5.81). Gleichzeitig stiegen die Rissbreiten an.

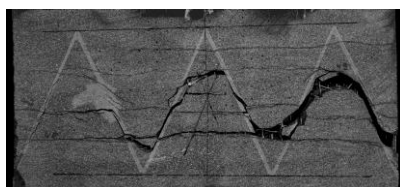


Abb. 5.85: Rissbild bei Versuch  
Z4-FJ-WSG-90-65-02

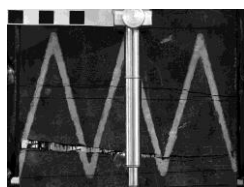


Abb. 5.86: Versuch  
Z4-FJ-WSG-  
90-75-02

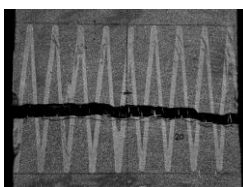


Abb. 5.87: Versuch  
Z4-FJ-WSG-  
90-85-01

Bei den Versuchen der Serie Z4-WSG-90-65 wurden die höchsten Tragfähigkeit bezogen auf eine Bauteilbreite von 10 cm erzielt. Hier kam es, mit Ausnahme von Versuch Z4-WSG-90-65-01, zu einer ausgeprägten Rissbildung im Fugenbereich. Bei den Versuchen Z4-WSG-90-65-02 und Z4-WSG-90-65-03 war ein kombiniertes Versagen zu verzeichnen (siehe Abb. 5.85). Im Falle von Versuch 90-65-01 kam es zu einem reinen Bewehrungsversagen. Die Bewehrung floss hier ab einer Probekörper-Dehnung von ca. 1,5 ‰. Zu dem Zeitpunkt waren die Rissbreiten im Fugenbereich deutlich kleiner als 0,1 mm.

Im Fall der Versuche mit einer Zahnlänge von 90 cm und einem Flankenneigungswinkel von 75° kam es zu einem reinen Bewehrungsversagen ebenso wie bei den Versuchen mit einer Zahnlänge von 90 cm und einem Flankenneigungswinkel von 85°. Bei den Versuchen der Serie Z4-WSG-90-75 bildeten sich drei Risse im Fugenbereich. Ab einer Dehnung von ca. 1,5 ‰ ging die Bewehrung hier ins Fließen über. Bei den Versuchen der Serie Z4-WSG-90-85 bildete sich, mit Ausnahme von Versuch Z4-WSG-90-85-02, nur ein Riss im Fugenbereich (siehe Abb. 5.87), einhergehend mit einem deutlichen Lastabfall (siehe Abb. 5.81). Hier floss die Bewehrung ab einer Dehnung von ca. 1,3 ‰. Die Rissbreiten beim Übergang zum Fließen waren in beiden Versuchsserien deutlich kleiner als 0,1 mm.

Im Unterschied zu den Versuchen mit einer Zahnlänge von 60 mm war bei den Versuchen mit einer Zahnlänge von 90 mm bis auf die Serie Z4-FJ-WSG-90-85 ein kontinuierlicher Übergang ins Bewehrungsfließen zu verzeichnen.

## 5.2.7 Auswertung der Versuche und Diskussion der Ergebnisse

### 5.2.7.1 Tragverhalten

Das Tragverhalten von Keilzinkenverbindungen bei einer zentrischen Zugbeanspruchung, bei reiner Biegebeanspruchung oder auch einer kombinierten Biege-Querkraftbeanspruchung unterscheidet sich nicht wesentlich.

Bei den Versuchen waren drei unterschiedliche Versagensarten zu beobachten. Es kam entweder zu einem Fugenversagen, einem Bewehrungsversagen oder aber einem kombinierten Versagen aus Bewehrungs- und Fugenversagen. Welche Versagensart eintritt, ist neben der Größe des Flankenneigungswinkels, der Zahnlänge, der Art der Klebflächenvorbereitung und des verwendeten Klebstoffs auch von der Höhe des Bewehrungsgehalts abhängig.

Zu einem Fugenversagen kommt es wenn die in der Klebfuge herrschende Beanspruchung die Fugenfestigkeit überschreitet. Ein schlagartiges, im Wesentlichen adhäsives Fugenversagen war allgemein für flache Neigungswinkel von 15 bis 45° zu verzeichnen. Das Bauteil verblieb hierbei im Zustand I.

Für steilere Flankenneigungswinkel, oder wenn eventuell andere, „bessere“ Klebstoffe, eingesetzt werden, kann die Last weiter gesteigert werden bis sich Risse im Fugenbereich entsprechend dem einwirkenden Hauptspannungszustand einstellen. Mit dem Übergang von Zustand I in Zustand II kommt es im Fugenbereich zu Spannungsumlagerungen vom Beton auf die Mikrobewehrung. Das weitere Tragverhalten hängt entscheidend vom Bewehrungsgrad des Bauteils ab.

Bei den Versuchen der Serie Z3-WSG mit hochbewehrten Probekörpern und einem Flankenneigungswinkels von 60° kam es zu einem schlagartigen, in erster Linie adhäsiven Fugenversagen. Für den Fall eines Fugenversagens ist das Tragverhalten allgemein als spröde einzustufen. In den Versuchen streute die Tragfähigkeit hierbei stark. Ein Fugenversagen gilt es durch geeignete Maßnahmen unbedingt zu verhindern.

Im Falle von Versuchsserie Z3 kam es ab einem Flankenneigungswinkel von 75° zu einem kombinierten Versagen und es lag ein duktiler Tragverhalten vor. Sind die Bauteile weniger stark bewehrt oder weisen kurze Zahnängen auf, kann es auch für flachere Neigungswinkel zu einem Bewehrungsversagen oder kombinierten Versagen kommen. Bei den Versuchen der Serie Z4 mit zehn Lagen Mikrobewehrung trat bereits ab einem Flankenneigungswinkel von 65° ein kombiniertes Versagen ein. Im Falle von sehr gering bewehrten Bauteilen oder aber kurzen Zähnen, wie beispielsweise Serie Z4-WSG-60-65, kommt es zu einem abrupten Übergang der Bewehrung ins Fließen. Anschließend sind keine nennenswerten Laststeigerungen mehr möglich. Für den Fall eines kombinierten Versagens kommt es zu einem Lastabfall auf Maximallastniveau. Es handelt sich um ein quasi unterkritisches Tragverhalten. Dadurch, dass der Riss hierbei in zwei Ebenen verläuft, kann weniger Bewehrung aktiviert werden, als dies in einem Trennriss der Fall ist (siehe auch Abb. 5.97). Wie im Massivbau üblich, gilt es auch hier im Fugenbereich eine Mindestbewehrung einzuhalten, welche ein duktiler Tragverhalten garantiert.

Neben dem Bewehrungsgrad lässt sich das Tragverhalten im Zustand II auch durch die Keilzinkengeometrie beeinflussen. In den Versuchen war ab einer Zahnlänge von 90 mm und einem Flankenneigungswinkel von  $75^\circ$  ein kontinuierlicher Übergang der Bewehrung ins Fließen zu verzeichnen. Die Last konnte anschließend noch geringfügig gesteigert werden. Es gilt, die Keilzinkenverbindung entsprechend so auszubilden, dass sich ein solches duktilen Tragverhalten einstellt. Die Zähne sollten möglichst lang sein und der Flankenneigungswinkel so steil wie nötig um ein Fugenversagen zu verhindern. Für mikrobewehrte Bauteile mit einer Dicke von 3 cm wie im Rahmen der Arbeit untersucht, bedeutet dies die Zahnlänge sollte mindestens 90 mm betragen und der Flankenneigungswinkel größer, gleich  $75^\circ$  sein.

Wie sich gezeigt hat, entstehen die Risse in der Klebfuge im Falle eines kombinierten Versagens erst bei großen Verformungen, zu einem Zeitpunkt, wenn sich die Bewehrung bereits im Fließen befindet. Dies belegen die photogrammetrischen Verformungsmessungen. Mit dem Übergang der Bewehrung ins Fließen nehmen die Verformungen im Fugenbereich stark zu, die Last kann nur noch geringfügig gesteigert werden.

Im Bereich der Klebfuge sind die Drähte der Mikrobewehrung unterbrochen. Die von diesen aufgenommene Zugkraft lagert sich hier über den Beton und die Klebfuge in auf der anderen Seite der Fuge liegenden Drähte um (siehe auch Abb. 5.97). Ist die Tragfähigkeit der Fuge erreicht reißt die Fuge lokal und es kommt zu einem kombinierten Versagen.

Im Falle eines reinen Bewehrungsversagens wurde die Maximallast erst im Bereich großer Verformungen erreicht. Die Rissbreiten betragen hierbei teilweise mehrere Millimeter. Vor dem Hintergrund der Gebrauchstauglichkeit und insbesondere der Dauerhaftigkeit gilt es, die Rissbreiten zu begrenzen.

Bei Erreichen der Streckgrenze waren die Rissbreiten im Fugenbereich allgemein kleiner als 0,1 mm. Im Hinblick auf die Bemessung von Keilzinkenverbindungen erscheinen die Traglast oder das Moment bei Erreichen der Streckgrenze als geeignete Werte.

Die einzelnen Versuche werden in Abs. 5.2.7.2 im Hinblick auf die Fugentragfähigkeit und in Abs. 5.2.7.3 im Hinblick auf die Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen im Zustand II weiter ausgewertet. Allgemein

### 5.2.7.2 Fugentragfähigkeit

Ein Ziel der allgemeinen Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen war es, herauszufinden, ob sich ein Fugenversagen mit Hilfe des auf Grundlage von Versuchen an kleinformigen Schub-Zugprobekörpern ermittelten Bruchkriteriums zuverlässig vorhersagen lässt.

In Abb. 5.88 sind die Ergebnisse der Zugversuche an Keilzinkenverbindungen und durch Wasserstrahlschneiden erzeugter Fugengeometrie (Z3-FJ-D2-WSG) sowie schalglatter Fugengeometrie (Z3-FJ-D2-SG) zusammen mit den Ergebnissen der Schub-Zugversuche nach Abs. 5.1.2 dargestellt (Z2-D2-WSG und Z2-D2-SG). Es handelt sich dabei jeweils um die mittlere Bruchspannung für eine entsprechende

Versuchsserie, bezogen auf den Brutto-Betonquerschnitt rechtwinklig zur Beanspruchungsrichtung.

Die bei den Versuchen eingesetzten Probekörper waren alle gleich bewehrt und wurden am selben Tag gemeinsam betoniert.

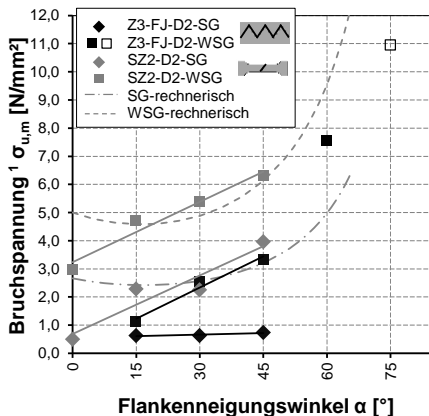
Mit 18 Lagen Mikrobewehrung ( $V_{eff} = 3,7\%$ ) waren die Probekörper maximal bewehrt. Mehr Matten lassen sich in Platten mit einer Dicke von 30 mm nur schwer unterbringen.

Wie beabsichtigt, kam es bei den in Abb. 5.88 aufgeführten Versuchen jeweils zu einem, in erster Linie adhäsiven, Fugenversagen. Lediglich im Falle der Versuche mit einem Neigungswinkel von  $75^\circ$  kam es zu einem kombinierten Versagen aus Bewehrungs- und Fugenversagen.

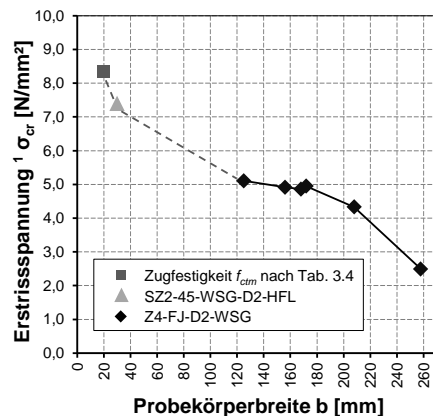
In Abb. 5.88 ist weiterhin die auf Grundlage des in Abs. 5.1 entwickelten linearen Bruchkriteriums, mit den Parametern  $a$  und  $b$  nach Tab. 5.4, ermittelte rechnerische Fugentragfähigkeit sowohl für die schalglatt ausgeführte Fuge als auch die durch Wasserstrahlschneiden erzeugte Fuge zu sehen. Ausgangspunkt für die Berechnungen bildeten hier die beiden Gleichungen (2.21) und (2.22). Der Parameter  $a$  entspricht dabei dem von der einwirkenden Normalspannung unabhängigen Anteil  $\tau_0$  nach Gl. (2.26) und der Parameter  $b$  dem Adhäsions- oder Reibungsbeiwert  $\mu$ .

Durch Einsetzen von Gl. (2.21) sowie Gl. (2.22) in Gl. (2.26) ergibt sich die folgende Funktion, mit der sich die Bruchspannung  $\sigma_u$  in Abhängigkeit des Fugenneigungswinkels  $\alpha$  wie folgt berechnen lässt:

$$\sigma_u = \frac{b}{(\sin \alpha \cdot \cos \alpha - a \cdot \cos^2 \alpha)} \quad (5.1)$$



<sup>1</sup> bezogen auf die vorhandene Brutto-Betonquerschnittsfläche



<sup>1</sup> bezogen auf die vorhandene Netto-Betonquerschnittsfläche

Abb. 5.88: Vergleich der Zugversuche an Keilzinkenverbindungen mit den Schub-Zugversuchen

Abb. 5.89: Einfluss der Probekörperbreite auf die Erstbruchspannung

Vergleicht man die rechnerische – theoretische - Fugentragfähigkeit mit den Ergebnissen der Schub-Zugversuche fällt auf, dass die Tragfähigkeit für einen Fugenneigungswinkel von  $0^\circ$  offenbar durch das lineare Bruchkriterium überschätzt (siehe Abb. 5.88) wird. Deutlich besser wird die Fugentragfähigkeit hier mit Hilfe eines parabolischen Ansatzes in Anlehnung an *Bay 1943* abgebildet, wie in *Kohlmeyer und Oster 2014* erläutert wird.

Bis zu einem Fugenwinkel von  $45^\circ$  kam es zu einem Fugenversagen im Zustand I. Sowohl bei den Versuchen an kleinformatischen Schub-Zugprobekörpern als auch bei den Zugversuchen an Keilzinkenverbindungen war hier ein linearer Zusammenhang zwischen Fugenfestigkeit und Fugenneigungswinkel zu verzeichnen. Die Regressionsgeraden für diesen Bereich weisen annähernd die gleiche Steigung auf (siehe Abb. 5.88). Einzige Ausnahme stellen die Versuche an Keilzinkenverbindungen mit schalglatter Klebfläche dar. Hier ist die Steigung der Geraden nahezu gleich null.

Wie in Abb. 5.88 ersichtlich ist, fiel die Fugentragfähigkeit bei den Zugversuchen an Keilzinkenverbindungen jedoch deutlich niedriger aus als in den Versuchen an kleinformatischen Schub-Zugprobekörpern (siehe Abb. 5.88). Eine Hauptursache hierfür sind wahrscheinlich Maßstabeffekte. Eine Abhängigkeit zwischen Zugfestigkeit und der Probekörpergröße besteht unter anderem bei Beton (*Trunk 1999*). Die in Versuchen an kleinformatischen Probekörpern ermittelte Zugfestigkeit unterscheidet sich in der Regel von der im Bauteil vorhandenen Zugfestigkeit. Erklären lässt sich dies mit Hilfe statistischer Modelle, wie z.B. dem Konzept des schwächsten Kettengliedes nach *Weibull 1939*. Spröde Werkstoffe wie Beton besitzen im Vergleich zu beispielsweise Stahl ein geringes Umlagerungsvermögen. *Weibull 1939* geht davon aus, dass die Festigkeit hier von Fehlstellen über das Werkstoffvolumen gesteuert ist (vgl. *Trunk 1999*). Bei Bauteilen unter zentrischer Zugbeanspruchung kommt es zu einem Versagen, wenn die Zugfestigkeit an der schwächsten Stelle überschritten wird. Mit der Probengröße nimmt die Wahrscheinlichkeit von Fehlstellen zu. Für große Probekörper ergeben sich daher geringere Festigkeiten als für kleine.

Bei den Versuchen zur Tragfähigkeit im Zustand II (Versuchsserie Z4-FJ-D2-WSG) kamen Zugprobekörper mit unterschiedlichen Breiten zum Einsatz. In Abb. 5.89 sind die bei den Versuchen sowie bei den Schub-Zugversuchen an kleinformatischen Probekörpern der Serie SZ2-45-WSG-D2-HFL erzielten Erstrissspannungen aufgeführt. Hierbei handelt es sich jeweils um die auf den Netto-Betonquerschnitt bezogene Zugspannung, also unter Berücksichtigung der Bewehrungsquerschnittsfläche. Es wurden dabei sowohl die Längsdrähte als auch Querdrähte berücksichtigt. Die Mikrobewehrungsmatten waren jeweils um die halbe Maschenweite versetzt in den Probekörpern angeordnet, weshalb die Querdrähte mit 50% berücksichtigt wurden. Des Weiteren ist in dem Diagramm die mittlere Betonzugfestigkeit, ermittelt an kleinformatischen Probekörpern mit Querschnittsabmessungen von 20 mal 30 mm dargestellt. Die Zugfestigkeit bzw. Erstrissspannung bei den Zugversuchen nimmt mit der Probekörperbreite ab, wie in Abb. 5.89 zu erkennen ist. Wie unter anderem *Trunk 1999* zeigen konnte, strebt die Zugfestigkeit von Beton einem unteren Grenzwert entgegen.

Mit der Verbundfestigkeit bei Klebfugen verhält es sich vermutlich ähnlich wie mit der Zugfestigkeit von Beton. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Verbundfestigkeit von der Klebflächengröße und der Klebschichtdicke abhängt. Aus dem Grund

ist das an kleinformatischen Probekörpern ermittelte Bruchkriterium nicht ohne weiteres auf Klebflächen mit beliebiger Größe übertragbar. Die auf Basis des Bruchkriteriums ermittelte rechnerische, theoretische Fugentragfähigkeit ist deutlich größer als die für die Keilzinkenverbindungen in den Versuchen erzielten Tragfähigkeiten (siehe Abb. 5.88). Die Abhängigkeit des Bruchkriteriums von der Bauteilgröße gilt es weiter zu untersuchen.

Eine weitere Ursache, dafür dass die Fugentragfähigkeit bei den Zugversuchen an Keilzinkenverbindungen deutlich niedriger ist als bei den Versuchen an kleinformatischen Schub-Zugprobekörpern sind möglicherweise Schwindverformungen bzw. ein Quellen des Klebstoffs. Das Schwindverhalten der eingesetzten Klebstoffe wurde im Rahmen der Arbeit nicht näher untersucht. Laut Hersteller weist der bei den hier beschriebenen Versuchen eingesetzte HFL nach 24 h ein Quellmaß von 0,1 % auf. Es ist zu vermuten, dass sich diese Eigenschaft insbesondere bei großen Klebflächen negativ auf den Haftverbund zwischen Klebstoff und Beton auswirkt und die Klebfuge in den Randbereichen lokal aufreißt.

Die Anwendbarkeit des Bruchkriteriums beschränkt sich weiterhin nur auf den Fall eines reinen Fugenversagens. Spätestens ab einem Flankenneigungswinkel von 45° war in den Versuchen an Keilzinkenverbindungen im Bereich der Zahnspitzen lokal ein Betonversagen zu beobachten. Der Riss „kürzt“, wenn man so will, „ab“. Für steilere Flankenneigungswinkel kommt es zu einem kombinierten Versagen. Mit dem Übergang des Bauteils in den Zustand II herrscht im Fugenbereich und in der Klebfuge ein komplexer Spannungszustand. Eine Anwendung des Bruchkriteriums ist hier nicht mehr ohne weiteres möglich.

In Tab. 5.8 sind die Ergebnisse der allgemeinen Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen unter reiner Zugbeanspruchung zusammengestellt.

Der Tabelle können die mittlere Maximallast  $N_{j,u,m}$ , die charakteristische Fugentragfähigkeit auf Maximallastniveau  $N_{j,u,k}$  sowie die mittlere Fugentragfähigkeit bei Erreichen der Streckgrenze  $N_{j,y,m}$  und die charakteristische Fugentragfähigkeit bei Erreichen der Streckgrenze  $N_{j,y,k}$  entnommen werden.

Die Ermittlung der charakteristischen Traglasten erfolgte nach *DIN EN 1990: 2010-12* als 5%-Fraktilwerte. Dabei wurde ein Vertrauensniveau von 75 % angesetzt und von einer unbekanntem Standartabweichung ausgegangen.

Des Weiteren ist in Tab. 5.8 die bezogene Tragfähigkeit auf Maximallastniveau sowie bei Erreichen der Streckgrenze aufgeführt. Als Bezugsgrundlage wurden jeweils die auf 18 Lagen Mikrobewehrung umgerechneten Ergebnisse der Versuchsserie Z1-REF verwendet.

Die Ergebnisse der allgemeinen Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen unter Biegebeanspruchung sowie kombinierter Biege-Querkraftbeanspruchung sind in Tab. 5.9 zusammengestellt.

Dort sind die mittlere Momententragfähigkeit auf Maximallastniveau  $M_{j,u,m}$ , die charakteristische Momententragfähigkeit auf Maximallastniveau  $M_{j,u,k}$  sowie die mittlere Momententragfähigkeit bei Erreichen der Streckgrenze  $M_{j,y,m}$  und die charakteristische Momententragfähigkeit bei Erreichen der Streckgrenze  $M_{j,y,k}$  aufgeführt. Im

Fälle der Dreipunktbiegeversuche wirkt gleichzeitig noch eine entsprechende Querkraftkomponente.

Die Ermittlung der charakteristischen Momententragfähigkeit erfolgte auch hier nach *DIN EN 1990: 2010-12* als 5%-Fraktilwert. Das Vertrauensniveau beträgt ebenfalls 75 % und es wurde von einer unbekanntem Standartabweichung ausgegangen.

Tab. 5.9 enthält außerdem wiederum die bezogene Momententragfähigkeit auf Maximallastniveau sowie bei Erreichen der Streckgrenze. Als Bezugsgrundlage wurden hier die Ergebnisse der Referenzversuch B2-REF verwendet.

Tab. 5.8: Ergebnisse der Zugversuche Z3 an Keilzinkenverbindungen

Versuchsserie	$\sigma_{cr,m}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$N_{j,y,m}$ [kN]	$N_{j,y,k}$ [kN]	$N_{j,y,m}/$		$N_{j,u,m}/$	
				$N_{j,y,m,REF}^1$ [%]	$N_{j,u,m}$ [kN]	$N_{j,u,k}$ [kN]	$N_{j,u,m,REF}^1$ [%]
FJ-D2-SG-15	-	-	-	-	7,4	0	7,4
FJ-D2-SG-30	-	-	-	-	10,6	0	10,6
FJ-D2-SG-45	-	-	-	-	17,3	10,6	17,3
FJ-D2-SS2-15	-	-	-	-	3,6	0	3,6
FJ-D2-SS2-30	-	-	-	-	3,7	0	3,7
FJ-D2-SS2-45	-	-	-	-	4,19	0	4,2
FJ-D2-WSG-15	-	-	-	-	5,9	3,8	5,9
FJ-D2-WSG-30	-	-	-	-	13,9	7,3	13,9
FJ-D2-WSG-45	-	-	-	-	18,1	11,7	18,2
FJ-D2-WSG-60	5,3	-	-	-	41,6	38,6	41,6
FJ-D2-WSG-75	5,0	54,6	51,6	69,1	59,8	50,1	59,2

<sup>1</sup>  $N_{j,y,m,REF}=79$  kN,  $N_{j,u,m,REF}=100$  kN; Hierfür wurden die Ergebnisse der Versuchsserie Z1-REF entsprechend umgerechnet

Tab. 5.9: Ergebnisse der Dreipunktbiegeversuche QB2 sowie Vierpunktbiegeversuche B2 an Keilzinkenverbindungen

Versuchsreihe	$M_{j,y,m}$ [kNm]	$Q_{j,y,m}$ [kN]	$M_{j,y,k}$ [kNm]	$Q_{j,y,k}$ [kN]	$M_{j,y,m}/$		$M_{j,u,m}/$			
					$M_{j,y,m,REF}$ [%]	$M_{j,u,m}$ [kNm]	$Q_{j,u,m}$ [kN]	$M_{j,u,m,REF}$ [%]		
B2-REF	0,69	0	0,29	0	100	1,28	0	0,66	0	100
B2-FJ-D2-WSG	30	-	-	-	-	0,21	0	-	-	16,9
	45	-	-	-	-	0,30	0	0,10	0	23,9
	60	-	-	-	-	0,45	0	0,21	0	35,2
	75	0,54	0	0,51	0	78,9	0,79	0	0,54	0
BQ2-FJ-D2-WSG	30	-	-	-	-	0,13	1,5	0,04	0	9,9
	45	-	-	-	-	0,22	2,4	0	0	16,9
	60	-	-	-	-	0,44	4,9	0,37	4,1	35,2
	75	0,40	4,5	0,34	3,8	57,9	0,88	6,7	0,60	5,3



In Abb. 5.90 sind die im Rahmen der Versuchsserie Z3 ermittelten Tragfähigkeiten in Abhängigkeit des Flankenneigungswinkels dargestellt. Neben der mittleren Zugtragfähigkeit ist dort die charakteristische Zugtragfähigkeit aufgeführt.

Bis zu einem Flankenneigungswinkel von 45° besteht, unabhängig von der Art der Oberflächenvorbereitung, ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen Zugtragfähigkeit und Flankenneigungswinkel. In den Versuchen kam es hier zu einem adhäsiven Fugenversagen. Aufgrund der recht großen Streuung fallen die charakteristischen Fugentragfähigkeiten für diesen Bereich teilweise sehr gering aus. Im Falle der schalglatten Klebfläche ist die charakteristische Fugentragfähigkeit gleich null.

Ab einem Winkel von 45° nimmt die Tragfähigkeit stärker zu. Die charakteristische Tragfähigkeit bei einem Flankenneigungswinkel von 60° betrug 38,6 kN. Auch hier war in den Versuchen ein in erster Linie adhäsives Fugenversagen zu verzeichnen. Für einen Flankenneigungswinkel von 75° betrug die charakteristische Fugentragfähigkeit 50,1 kN. Hierbei kam es zu einem kombinierten Versagen. Wie bereits erwähnt ist theoretisch eine noch höhere Fugentragfähigkeit möglich. Die Tragfähigkeit wird jedoch durch die praktisch im Bauteil einbaubare Bewehrungsmenge begrenzt.

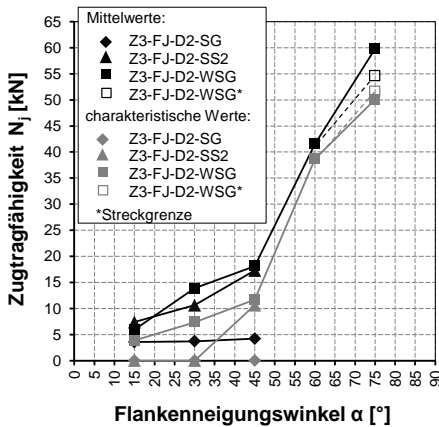


Abb. 5.90: Tragfähigkeit unter Zugbeanspruchung

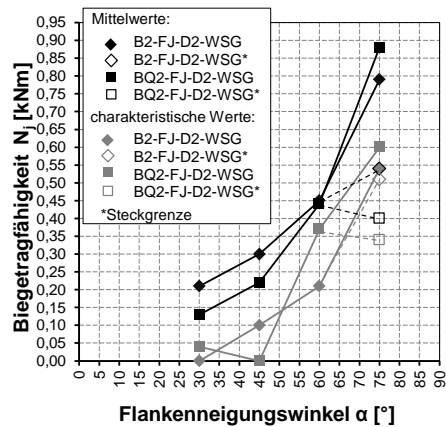


Abb. 5.91: Tragfähigkeit unter Biegebeanspruchung sowie kombinierter Biege-Querkraftbeanspruchung

Die im Rahmen der Versuchsserien B2 und BQ2 ermittelten Biegetragfähigkeiten in Abhängigkeit des Flankenneigungswinkels sind in Abb. 5.91 dargestellt. Auch hier sind sowohl die mittlere Biegetragfähigkeit als auch die charakteristische Biegetragfähigkeit aufgeführt.

Für Flankenneigungswinkel bis 60° war die Tragfähigkeit unter reiner Biegebeanspruchung höher als unter kombinierter Biege-Querkraftbeanspruchung. Die Querkraft wirkt sich hier offenbar negativ auf die Tragfähigkeit aus. Bei einem Flankenneigungswinkel von genau 60° waren die mittleren Tragfähigkeiten für beide Beanspruchungsarten ungefähr gleich. Im Falle der Versuche mit einem Flankenneigungswinkel von 75° fiel die mittlere Tragfähigkeit bei reiner Biegebeanspruchung geringer aus als bei kombinierter Biege-Querkraftbeanspruchung. Die Ursache hierfür ist wahr-

scheinlich in Ungenauigkeiten bei der Probekörperherstellung zu suchen. Die Höhe der Betondeckung und die Lage der Bewehrung im Bauteil variierten teilweise stark. Was die Tragfähigkeit von mikrobewehrten Bauteilen unter Biegebeanspruchung angeht, ist die Lage der Bewehrung jedoch ein wichtiger Einflussfaktor. Bei den Drei- und Vierpunkt-Biegeversuchen war die Streuung insgesamt relativ hoch. Aus dem Grund fallen die charakteristischen Tragfähigkeiten hier gering aus.

In Abb. 5.92 ist die bezogene Tragfähigkeit in Abhängigkeit des Flankenneigungswinkels nach Tab. 5.8 und Tab. 5.9 für die verschiedenen Beanspruchungszustände dargestellt. Es zeigt sich, dass für die verschiedenen Beanspruchungsarten ein prinzipiell ähnlicher Zusammenhang zwischen Flankenneigungswinkel und bezogener Tragfähigkeit besteht.

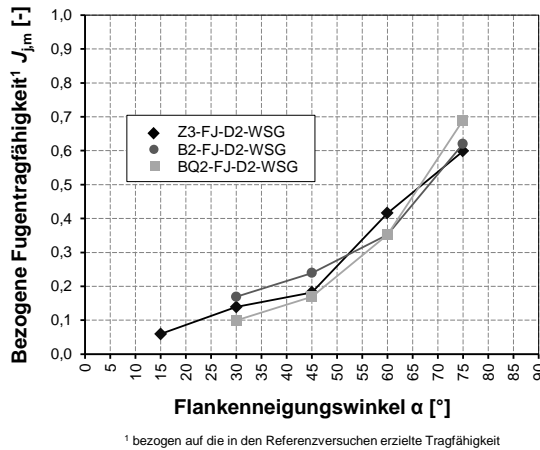


Abb. 5.92: Bezogene Fugentragfähigkeit für unterschiedliche Beanspruchungsarten

### 5.2.7.3 Tragfähigkeit im Zustand II

Eine Erkenntnis der Untersuchungen an Keilzinkenverbindungen ist, dass das Tragverhalten im Zustand II neben dem Bewehrungsgrad auch von der Fugengeometrie beeinflusst wird. Entscheidend für die Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen nach dem Aufreißen des Betonquerschnitts ist in erster Linie die Größe des im Riss befindlichen effektiven Bewehrungsquerschnitts.

Die Querschnittsfläche der Bewehrung ist zum einen durch den (rein geometrischen) Anteil der Fugenfläche reduziert. Dieser hängt ab von der Fugendicke, dem Flankenneigungswinkel sowie der Zahnlänge. Der Fugenteil bei einer Fugenbreite von 2 mm pro laufenden Meter Bauteilquerschnitt in Abhängigkeit des Flankenneigungswinkels und für verschiedene Zahnlängen ist in Abb. 5.93. dargestellt. Hier wird deutlich, dass im Falle von kurzen Zähnen der Fugenteil bezogen auf die Gesamtquerschnittsfläche sehr hoch ist. Je länger die Zähne sind, desto geringer fällt die durch die Fuge verursachte Reduzierung des Bewehrungsquerschnitts aus.

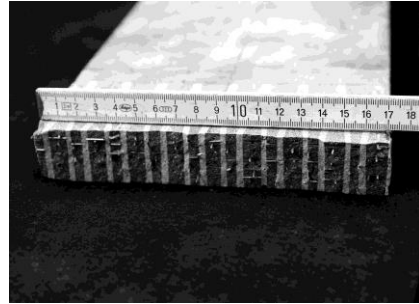
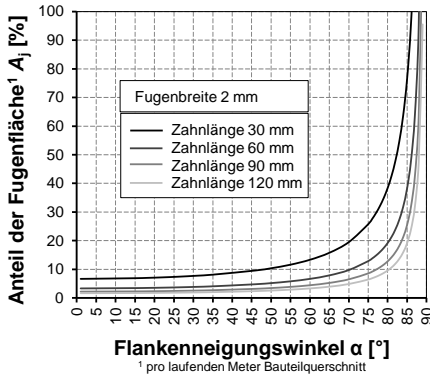


Abb. 5.93: Anteil der Fugenfläche bei einer Fugenbreite von 2 mm pro laufenden Meter Bauteilquerschnitt in Abhängigkeit des Flankenneigungswinkels für verschiedene Zahn­längen

Abb. 5.94: Bauteilquerschnitt im Fugenbereich

In Abb. 5.93 erkennt man weiterhin, dass je steiler der Flanken­neigungswinkel ist, desto größer wird der Anteil der Fugenfläche (siehe Abb. 5.94). Für Flanken­neigungswinkel bis ca. 75°, im Falle einer Zahn­länge von 30 mm bis rund 50°, fällt die Steigerung relativ moderat aus. Bei Winkeln darüber steigt der Anteil der Fugenfläche stark an.

Tab. 5.10: Ergebnisse der Versuche zur Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen im Zustand II

Versuchsserie	$\sigma_{cr,m}$	$\sigma_{s1,y,m}^1$	$\sigma_{s2,y,m}^2$	$\sigma_{s1,u,m}^1$	$\sigma_{s2,u,m}^2$	$\frac{\sigma_{s1,u,m}}{f_{s,u,m}^3}$	$\frac{\sigma_{s2,u,m}}{f_{s,u,m}^3}$
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[%]
Z4-FJ-D2-WSG-60-65	4,1	231,7	262,7	277,2	300,3	56,1	60,8
Z4-FJ-D2-WSG-60-75	3,6	241,2	298,1	272,6	337,1	55,2	68,2
Z4-FJ-D2-WSG-60-85	4,1	237,3	349,2	271,2	398,5	54,9	80,1
Z4-FJ-D2-WSG-90-65	1,8	281,1	305,9	315,3	343,3	63,8	69,5
Z4-FJ-D2-WSG-90-75	4,1	262,4	323,8	320,9	366,6	65,0	74,2
Z4-FJ-D2-WSG-90-85	4,2	237,5	329,9	249,4	376,3	50,0	76,2
Z3-FJ-D2-WSG-110-75	5,0	283,0	295,5	287,4	314,9	59,2	63,7

<sup>1</sup> rechnerische Stahlspannung bezogen auf den außerhalb des Fugenbereichs vorhandenen Bewehrungsquerschnitt

<sup>2</sup> rechnerische Stahlspannung bezogen auf den im Fugenbereich vorhandenen Bewehrungsquerschnitt

<sup>3</sup> mit  $f_{s,u,m} = 494 \text{ N/mm}^2$  nach Abs. 4.3

Bei den Versuchen in grauer Schrift lag ein kombiniertes Versagen vor, bei den übrigen Versuchen ein reines Bewehrungsversagen

Tab. 5.10 enthält die mittleren rechnerischen Stahlspannungen beim bei Erreichen der Fließgrenze (unmittelbarere Übergang vom elastischen Materialverhalten zum plastischen Fließen) sowie auf Maximallastniveau, zum einen bezogen auf den im

ungestörten Bereich - außerhalb des Fugenbereichs - vorhandenen Bewehrungsquerschnitt und zum anderen bezogen auf den theoretisch im Fugenbereich vorhandenen Bewehrungsquerschnitt, reduziert um die Fugenfläche. Grundlage für die Berechnung waren neben dem jeweils vorhandenen Bewehrungsquerschnitt, die entsprechenden Versuchslasten. Anders ausgedrückt handelt es sich hierbei um die auf den Bewehrungsquerschnitt bezogene mittlere Tragfähigkeit bzw. Versuchslast bei Erreichen der Streckgrenze. Bei der Versuchsserie Z4-FJ-D2-WSG-60-65 kam es in einem Fall zu einem Fugenversagen. Dieser Versuch wurde ebenso bei der Auswertung nicht berücksichtigt wie Versuch Z4-FJ-D2-WSG-60-75-01, welcher ohne Verspannung durchgeführt wurde.

In Tab. 5.10 sind des Weiteren die auf die mittlere Stahlzugfestigkeit  $f_{s,u,m}$  von rund 400 N/mm<sup>2</sup> (nach Tab. 3.11) bezogenen Stahlspannungen aufgeführt. Der Zusammenhang zwischen bezogener rechnerischer Stahlspannung und Flankenneigungswinkel für verschiedene Zahnlängen ist in Abb. 5.95 sowie Abb. 5.96 grafisch dargestellt. Für einen Vergleich und eine Bewertung der Varianten wird hier die bezogene rechnerische Stahlspannung auf Maximallastniveau verwendet.

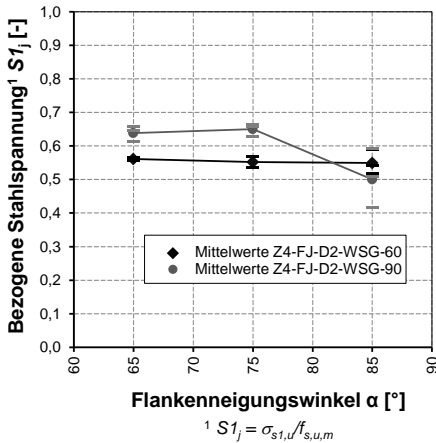


Abb. 5.95: Bezogene Stahlspannung  $S1_j$  bei den einzelnen Versuchsserien

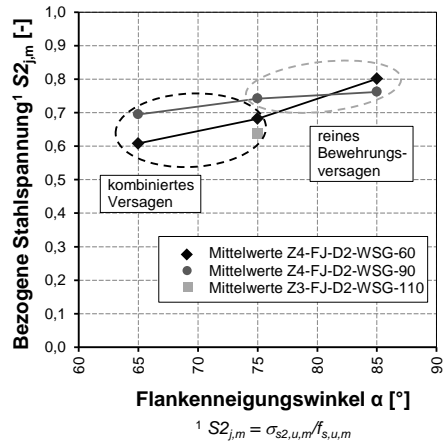


Abb. 5.96: Bezogene Stahlspannung  $S2_{j,m}$  bei den einzelnen Versuchsserien

Für steile Flankenneigungswinkel ist die bezogene Tragfähigkeit  $\sigma_{s1,u,m}$  bzw. die bezogene Stahlspannung  $S1_j$  deutlich niedriger im Vergleich zu flachen Flankenneigungswinkeln (siehe Abb. 5.95). Dies zeigt sich insbesondere bei Versuchsserie Z4-FJ-D2-WSG-90. Grund hierfür ist, wie oben erläutert, der flächenmäßig hohe Fugenteil im Versagensschnitt bei steilen Flankenneigungswinkeln.

Mit Ausnahme der Versuchsserien Z4-FJ-D2-WSG-60-85 waren im Falle der Versuche mit einer Zahnlänge von 60 mm geringere Stahlspannungen zu verzeichnen als bei einer Zahnlänge von 90 mm. Auch hier ist dies im bei einer Zahnlänge von 60 mm höheren Fugenteil begründet (siehe Abb. 5.93).

Die bezogene Stahlspannung  $S2_{j,m}$  nimmt mit dem Flankenneigungswinkel zu (siehe Abb. 5.96). Für einen Flankenneigungswinkel von 85° liegen die Stahlspannungen

bezogen auf den im Fugenbereich vorhandenen Bewehrungsquerschnitt  $\sigma_{s2,u,m}$  sowie,  $\sigma_{s2,y,m}$  annähernd im Bereich der Zugfestigkeit bzw. der Streckgrenze des Stahldrahts von rund 350 N/mm (siehe Tab. 5.10). Bei den Versuchen lag jeweils ein reines Bewehrungsversagen vor.

Für flachere Flankenneigungswinkel sind die bezogenen Stahlspannungen  $\sigma_{s2,u,m}$  und  $\sigma_{s2,y,m}$  deutlich niedriger als die Stahlzugfestigkeit. Hier war teilweise ein reines Bewehrungsversagen und teilweise ein kombiniertes Versagen zu verzeichnen. Die Traglast lag auf einem niedrigeren Lastniveau als dies die im Riss vorhandene Bewehrung und die Festigkeit des Drahts erwarten lassen.

Wie sich bereits in den Vorversuchern gezeigt hatte, gibt es außer dem rein geometrischen Anteil der Fuge offenbar noch weitere Faktoren, welche sich mindernd auf die Tragfähigkeit bei Keilzinkenverbindung auswirken.

In Abb. 5.96 wird deutlich, dass im Falle der Versuche, bei denen ein kombiniertes Versagen vorlag, die bezogenen Stahlspannungen  $S_{2jm}$  niedriger sind als bei den Versuchen mit reinem Bewehrungsversagen. Grund hierfür ist, dass der Riss im Falle des kombinierten Versagens zwischen zwei Querrissen springt und dadurch insgesamt weniger Bewehrung aktiviert werden kann als dies in einem Trennriss der Fall ist (siehe Abb. 5.97). In wieweit der wirksame Bewehrungsquerschnitt reduziert ist, hängt theoretisch vom Flankenneigungswinkel sowie dem Rissabstand im Fugenbereich ab. Der Rissabstand im Fugenbereich hängt wiederum vom Bewehrungsgrad, dem Flankenneigungswinkel sowie der Zahnlänge ab.

Wann es zu einem kombinierten Versagen und wann zu einem Bewehrungsversagen kommt, hängt ebenfalls von vielen Faktoren ab und lässt sich nicht zielsicher vorher sagen. Einflussfaktoren sind auch hier der Flankenneigungswinkel, der Bewehrungsgrad, der verwendete Klebstoff sowie die Art der Klebflächenvorbehandlung.

Darüber hinaus gibt es noch ein weiteres Phänomen, was zu einer Verminderung der Tragfähigkeit bei Keilzinkenverbindungen beiträgt. Durch die Fuge sind sowohl Längsdrähte als auch Querdrähte der Mikrobewehrungsmatten unterbrochen. Längsdrähte in Fugennähe sind teilweise gar nicht oder nur unzureichend im Beton verankert und können sich infolge dessen nicht voll am Lastabtrag beteiligen (siehe Abb. 5.98). Im Randbereich zur Fuge hin ist der Verbund zwischen Mikrobewehrung und Beton beeinträchtigt. Der wirksame Bewehrungsquerschnitt im Fugenbereich reduziert sich so zusätzlich. Bei flachen Flankenneigungswinkeln macht sich dieses Phänomen stärker bemerkbar als bei steilen Winkeln. Im Falle eines Neigungswinkels von  $90^\circ$  sind nur Querdrähte durchtrennt. Für den theoretischen Fall eines Neigungswinkels von  $0^\circ$  sind sämtliche Längsdrähte von der Fuge unterbrochen. Bei einem Winkel von  $90^\circ$  sind dagegen nur Querdrähte durchtrennt jedoch keine Längsdrähte. Ob und in wieweit hier auch der Bewehrungsgrad sowie die Maschenweite der eingesetzten Bewehrung eine Rolle spielen gilt es weiter zu untersuchen.

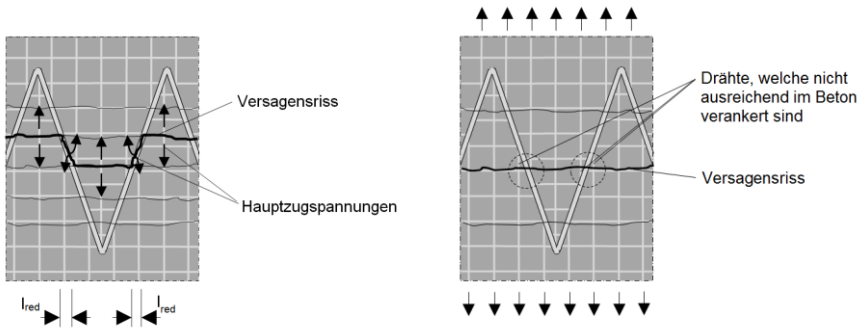


Abb. 5.97: Verminderung der wirksamen Querschnittsfläche der Längsbewehrung im Falle eines kombinierten Versagens

Abb. 5.98: Verminderung der wirksamen Querschnittsfläche der Längsbewehrung infolge von nicht ausreichend im Beton verankerten Längsdrähte

**5.2.8 Fazit**

Bei den Untersuchungen an Keilzinkenverbindungen hat sich gezeigt, dass das Tragverhalten in erster Linie von der Größe des Flankenneigungswinkels, der Zahnlänge, der Art der Klebflächenvorbereitung sowie vom Bewehrungsgrad eines Bauteils abhängt. Einen Einfluss hat außerdem auch der verwendete Klebstoff. Dies wurde jedoch im Rahmen der Versuche in diesem Abschnitt nicht untersucht. Aus der Art der Beanspruchung ergeben sich keine wesentlichen Unterschiede in Bezug auf das Tragverhalten.

Das Versagen lässt sich vereinfachend in ein Fugenversagen sowie ein Bewehrungsversagen unterteilen. Darüber hinaus war in den Versuchen ein kombiniertes Versagen aus Fugen- und Bewehrungsversagen zu verzeichnen. Hierbei handelt es sich um eine Sonderform des Bewehrungsversagens mit einem ähnlichen Tragverhalten. Durch eine fachgerechte Konstruktion und Ausführung von Keilzinkenverbindungen gilt es ein Fugenversagen zu verhindern. Ziel muss ein duktiler Tragverhalten sein.

Das Fugenversagen ist durch einen schlagartigen Lastabfall sowie eine große Streuung der Tragfähigkeit gekennzeichnet. Die charakteristische Tragfähigkeit war entsprechend niedrig. Wie sich bereits in den Vorversuchen gezeigt hatte, müssen schalglatte Klebflächen zwingend vorbehandelt werden, um brauchbare Fugentragfähigkeiten zu erreichen.

Die Tragfähigkeiten der Keilzinkenverbindungen im Falle eines Fugenversagens war deutlich geringer als die berechnete Traglast auf Basis des Bruchkriteriums nach Abs. 5.1. Verantwortlich hierfür sind Maßstabeffekte. Offenbar haben die Abmessungen der Klebfuge sowie die Klebschichtdicke Einfluss auf die Fugenfestigkeit. Das an kleinformatischen Schub-Zugprobekörpern ermittelte Bruchkriterium ist nicht

ohne weiteres auf Keilzinkenverbindungen bei Großbauteilen übertragbar. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Für Flankenneigungswinkel von größer gleich  $60^\circ$  konnte die Last in den Versuchen gesteigert werden, bis sich im Fugenbereich Querrisse, bezogen auf die Beanspruchungsrichtung, bildeten. Mit dem Übergang des Bauteils in den Zustand II liegt im Fugenbereich und in der Klebfuge ein komplexer Spannungszustand vor. Eine Anwendung des Bruchkriteriums ist hier nicht möglich. Zielführend im Hinblick auf eine Bemessung von Keilzinkenverbindungen für den Fall „Fugenversagen“ erscheint ein empirischer Ansatz auf Grundlage der Versuche mit maximal bewehrten Probekörpern. Jedoch besteht auch hier möglicherweise eine Abhängigkeit der Ergebnisse von der Probekörpergröße. Um diese Frage zu klären sind weitergehende Untersuchungen erforderlich.

Sowohl unter Zugbeanspruchung als auch unter reiner Biege- und kombinierter Biege-Querkräftbeanspruchung kam es in den Versuchen im Falle eines Flankenneigungswinkels von  $60^\circ$  zu einem Fugenversagen, während bei einem Winkel von  $75^\circ$  allgemein ein kombiniertes Versagen zu verzeichnen war. Bei Keilzinkenverbindungen in der Art, wie hier untersucht (mit entsprechender Fugenvorbereitung), kann für Flankenneigungswinkel von größer gleich  $75^\circ$  ein Fugenversagen ausgeschlossen werden.

Unter der Voraussetzung, dass die Bauteile ausreichend bewehrt sind und eine Mindestbewehrung eingehalten wird, lässt sich sowohl für den Falle eines reinen Bewehrungsversagens als auch für ein kombiniertes Versagen das Tragverhalten als duktil einstufen. Das Tragverhalten von Keilzinkenverbindungen im Zustand II hängt ganz entscheidend vom Bewehrungsgrad sowie der Fugengeometrie ab. Wie sich in den Versuchen gezeigt hat, kommt es im Falle von kurzen Zahnängen zu einem abrupten Übergang der Bewehrung ins Fließen. Bei längeren Zähnen ergibt sich ein günstigerer Lastverformungsverlauf. Hier findet ein kontinuierlicher Übergang der Bewehrung ins Fließen statt. Was die Tragfähigkeit angeht ist in erster Linie der im Versagensriss liegende effektive Bewehrungsquerschnitt entscheidend. Wie sich gezeigt hat, gibt es mehrere Faktoren, die zu einer Verminderung der Tragfähigkeit im Vergleich zum ungestörten Bauteilquerschnitt beitragen.

Eine entscheidende Rolle spielt hier der (rein geometrische) Anteil der Fugenfläche am Bauteilquerschnitt. Dieser hängt ab von der Fugendicke, dem Flankenneigungswinkel sowie der Zahnlänge und lässt sich rechnerisch ermitteln. Bei kurzen Zähnen und steilen Flankenneigungswinkeln ist der Flächenanteil der Fugenfläche am Bauteilquerschnitt entsprechend hoch. Zu einem massiven Anstieg des Fugenanteils kommt es ab einem Flankenneigungswinkel von ca.  $75^\circ$ . Bei Winkeln darüber ist die Querschnittsfläche der Bewehrung stark reduziert. Aus dem Grund sollte der Flankenneigungswinkel nach oben hin auf einen Winkel von  $85^\circ$  begrenzt werden.

Zu einer Verminderung der Tragfähigkeit trägt weiterhin bei, dass im Randbereich zur Fuge hin die Bewehrungsdrähte nicht ausreichend im Beton verankert sind. Im Riss kann aus dem Grund nicht der volle theoretisch vorhandene Bewehrungsquerschnitt aktiviert werden. Für den Fall eines kombinierten Versagens ist der Bewehrungs-

querschnitt außerdem dadurch reduziert, dass der Versagensriss nicht geradlinig verläuft, sondern zwischen zwei Querrissen springt.

Anders als der geometrische Anteil der Fuge und der sich hieraus ergebende, die Tragfähigkeit mindernde Einfluss, lassen sich die bei den übrigen Phänomenen ergebenden Auswirkungen auf die Fugentragfähigkeit im Einzelnen nur schwer quantifizieren. Die zentralen Einflussgrößen sind hier der Flankenneigungswinkel, die Zahnlänge, der Bewehrungsgrad, der verwendete Klebstoff sowie die Art der Klebflächenvorbehandlung. Wann es zu einem kombinierten Versagen und wann zu einem Bewehrungsversagen kommt, hängt ebenfalls von vielen Faktoren ab und lässt sich nicht zielsicher vorhersagen.

Zielführend im Hinblick auf eine Bemessung von Keilzinkenverbindungen für den Fall „Bewehrungsversagen“ erscheint ebenfalls ein empirischer Ansatz. Mit Ausnahme des geometrischen Anteils der Fuge können die die Tragfähigkeit mindernden Einflüsse hierbei jedoch nur gemeinsam betrachtet werden. Vor dem Hintergrund der Gebrauchstauglichkeit von Keilzinkenverbindungen gilt es, die Rissbreiten im Fugenbereich zu begrenzen. Als Grundlage für die Bemessung sollten hier die Versuchslasten oder das Moment bei Erreichen der Streckgrenze verwendet werden. Die Rissbreiten im Fugenbereich waren zu diesem Zeitpunkt allgemein kleiner als 0,1 mm. Je nach Bewehrungsgrad der Bauteile kann es sein, dass im Falle eines kombinierten Versagens die Versuchslast bei Erreichen der Dehngrenze niedriger ist als bei Erreichen der Streckgrenze. Hier ist der niedrigere Wert bei der Bemessung zu berücksichtigen.

Was die Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen im Zustand II unter Biegebeanspruchung angeht, besteht noch weiterer Forschungsbedarf.

Zusammenfassend bleibt festzustellen: Der Flankenneigungswinkel soll so steil wie nötig sein, dass ein Fugenversagen ausgeschlossen ist und so flach wie möglich, um im Zustand II eine hohe Tragfähigkeit zu erzielen. Für die durch Wasserstrahlschneiden erzeugte Fuge und für den HFL als Klebstoff hat sich ein Winkel von 75° als günstig herausgestellt.

Die auf den außerhalb des Fugenbereichs vorhandenen Bewehrungsquerschnitt bezogene Tragfähigkeit war hier am höchsten. Für andere Klebstoffe und andere Arten der Oberflächenvorbehandlung ergeben sich möglicherweise flachere oder auch steilere Winkel. Die Länge der Zähne sollte so lang wie möglich sein, mindestens 90 mm. Wird eine gewöhnliche Steinsäge zur Herstellung der Zinken verwendet, ist die Zahnlänge durch die Größe des Sägeblattes und die mögliche Schnitttiefe begrenzt.

Die Tragfähigkeit der Keilzinkenverbindung war allgemein niedriger als die des Bauteils außerhalb des Fugenbereichs. Durch die Anordnung zusätzlicher Bewehrungslagen im Fugenbereich kann dem begegnet werden.



## 6 Bemessungsansatz für Keilzinkenverbindung

### 6.1 Allgemeines

Ziel war es unter anderem, ein praxistaugliches Bemessungskonzept für die Klebverbindung zu entwickeln. Die im Rahmen der Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen bilden hierfür die Grundlage. Neben reiner Zugbeanspruchung wurden auch Längsbiegung sowie Längsbiegung in Kombination mit einer Querkraftbeanspruchung als Beanspruchungsarten betrachtet. Der Fokus lag hierbei auf dem Lastfall „zentrischer Zug“.

Grundsätzlich muss man bei Keilzinkenverbindungen zwischen zwei möglichen Versagenszuständen unterscheiden, nämlich einem Fugens Versagen und einem Bewehrungsversagen. Das Fugensversagen ist durch einen schlagartigen Lastabfall gekennzeichnet, wohingegen für das Bewehrungsversagen von einem duktilen Tragverhalten ausgegangen werden kann. Einfluss auf die Versagensart und das Tragverhalten haben dabei in erster Linie die Größe des Flankenneigungswinkels, die Zahnlänge, die Art der Klebflächenvorbereitung, der verwendete Klebstoff sowie der Bewehrungsgrad eines Bauteils.

Ziel der Bemessung von Keilzinkenverbindungen muss es sein, ein Fugensversagen zu verhindern, um letztlich ein duktileres Tragverhalten zu erreichen. Die Fugentragfähigkeit  $R_{dj}$  soll daher möglichst größer sein als die Tragfähigkeit im Zustand II  $R_{djs}$ . Insgesamt muss die Tragfähigkeit der Keilzinkenverbindung dauerhaft größer sein als die einwirkende Beanspruchung  $E_d$ . Bei einem Bemessungskonzept gilt es unter anderem auch Umwelteinflüsse oder Auswirkungen infolge von Langzeitbeanspruchung auf die Tragfähigkeit zu berücksichtigen.

$$R_{dj} > R_{djs} > E_d \quad (6.1)$$

Was die Ausführung der Klebverbindung angeht, gilt es ein entsprechendes Konzept zur Qualitätssicherung zu erarbeiten, wie dies auch vom Kleben in anderen Bereichen bekannt ist.

In Abs. 2.2.5 wurden für Verbundfugen sowie für Klebfugen im Massivbau existierende Bemessungsansätze vorgestellt. Ein Ansatz von *Mühlbauer 2012* beschränkt sich auf rein zugbeanspruchte Fugen. Die übrigen Ansätze sind ausschließlich bei schubbeanspruchten oder schub-druckbeanspruchten Klebfugen anwendbar. Für schubzugbeanspruchte Fugen, wie im Falle der Keilzinkenverbindung, stand bislang kein Bemessungsansatz zur Verfügung.

Der Einsatz eines Bruchkriteriums zur Ermittlung der Fugentragfähigkeit bei Keilzinkenverbindungen hat sich als ungeeignet herausgestellt. Als zielführend erscheint hier, ebenso wie im Hinblick auf die Ermittlung der Tragfähigkeit im Zustand II, ein empirischer Ansatz.

## 6.2 Qualitätssicherung beim Kleben mit zementgebundenen Klebstoffen

### 6.2.1 Allgemeines

Kleben ist allgemein technisch anspruchsvoll und erfordert konsequente Qualitätssicherungsmaßnahmen. Im Holzbau dürfen Klebverbindungen bei tragenden Bauteilen beispielsweise nur von zertifizierten Betrieben mit entsprechend geschultem Fachpersonal ausgeführt werden. Wie derartige Klebverbindungen letztendlich durch die bauaufsichtlich geregelt werden hängt unter anderem entscheidend vom konkreten Anwendungsfall ab.

Wie sich gezeigt hat, erfordert das Verkleben von Betonbauteilen mithilfe eines zementgebundenen Klebstoffs vom Anmischen des Klebstoffs, über die Vorbehandlung der Klebfläche bis hin zum Klebvorgang selbst, hohe Sorgfalt und unterscheidet sich damit nicht vom Kleben in anderen Bereichen. Entsprechende Qualitätssicherungsmaßnahmen sind unabdingbare Voraussetzung für einen Einsatz in der Praxis. Was die konkreten Maßnahmen angeht, gibt es jedoch teilweise Unterschiede im Vergleich zum „konventionellen“ Kleben. Die im Folgenden aufgeführten Grundsätze gilt es zu beachten. Denkbar ist, dass in der späteren Praxis eine anerkannte Überwachungsstelle einzuschalten ist, die die Einhaltung dieser Grundsätze und eventueller Vorschriften bei der Ausführung kontrolliert.

Hohe Anforderungen werden auch an den Klebstoff gestellt. Neben definierten Materialeigenschaften muss unter anderem eine gleichbleibende Verarbeitbarkeit sichergestellt sein. Zielführend erscheint hier der Einsatz von werksmäßig hergestelltem Trockenmörtel mit entsprechender Güteüberwachung. Diese zeichnen sich durch gute mechanische Eigenschaften und eine auf den jeweiligen Einsatz abgestimmte Verarbeitbarkeit aus. Man kann davon ausgehen, dass vom Hersteller ein technisches Merkblatt bereitzustellen ist, welches neben den Materialeigenschaften die Verarbeitungsvorschriften enthält und auf der Baustelle vorzuliegen hat.

### 6.2.2 Vorbehandlung der Klebfläche

Der Haftverbund zwischen zementgebundenen Schichten basiert in erster Linie auf mikromechanischen Verzahnungseffekten. Schalglatte Klebflächen müssen aus dem Grund zwingend vorbehandelt bzw. aufgeraut werden, um brauchbare Fugentragfähigkeiten zu erreichen. Auf Grund der Tatsache, dass sich die Festigkeit und Struktur des Betons im oberflächennahen Bereich bei Fertigteilen aus Hochleistungsbeton mit geschalter Oberfläche nicht wesentlich von der des Kernbetons unterscheiden, muss der Grobzuschlag nicht zwingend freigelegt werden. Durch Schneiden erzeugte Klebflächen oder geschliffene Klebflächen sind daher geeignete Vorbehandlungsarten. Als bestmögliche Vorbehandlungsart hat sich jedoch das Feststoffstrahlen erwiesen. Ziel ist ein kuppenartig freigelegtes Größtkorn. Das „Waschen“, also ein Freilegen der Zuschlagskörner mit einer Drahtbürste ähnlich wie bei der Waschbetonherstellung, ist nur geringfügig schlechter, was die erzielbaren Haftzugfestigkeiten angeht. Denkbare Vorbehandlungsarten sind auch „Kugelstrahlen“ oder das Bearbeiten der Klebfläche mit einer Nadelpistole. Diese Methoden wurden im Rahmen der Arbeit

jedoch nicht untersucht sind aber anwendbar wenn die geforderte Haftzugfestigkeit eingehalten wird.

Ein Vornässen der Klebfuge ist zwingend erforderlich, um brauchbare Haftzugfestigkeit zu erzielen. Um weitgehend zu verhindern, dass dem Klebstoff beim Aushärten Wasser entzogen wird welches dann nicht mehr für den chemischen Prozess der Hydratation zur Verfügung steht und um das sogenannte Trocknungsschwinden des Klebstoffs zu minimieren sind die Füge Teile vor dem Verkleben mehrere Tage vorzunässen, beispielsweise durch Lagerung in einem Wasserbad. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die Klebflächen vor dem Verkleben leicht abgetrocknet sind. In keinem Fall dürfen sie feucht glänzen. Die Füge Teile sollten daher rund eine Stunde vor dem Klebvorgang aus dem Wasserbad genommen werden.

Unabhängig davon, wie die Klebflächen ausgeführt bzw. vorbehandelt werden, müssen diese in jedem Fall nochmal unmittelbar vor dem Verkleben sorgfältig gesäubert werden. Trennende Schichten, wie zum Beispiel Ausblühungen oder andere Fremdstoffe, gilt es restlos zu entfernen.

### 6.2.3 Klebearbeiten

Für das Anmischen des Klebstoffs ist eine geeignete Mischvorrichtung zu verwenden. Eine gute Durchmischung garantieren Zwangsmischer. Die in einer zuvor erstellten bzw. vom Hersteller bereitgestellten Mischanleitung vorgegebenen Mischzeiten und der Zeitpunkt der Wasserzugabe sind exakt einzuhalten. Nach dem Anmischen sollte der Mörtel in ein anderes Gefäß umgetopft und vor dem Verarbeiten einige Minuten ruhen gelassen werden, damit dieser entlüften kann. Ein hoher Luftporengehalt wirkt sich negativ auf die Festigkeit des Klebstoffs und letztendlich die Tragfähigkeit der Klebverbindung aus.

Darüber hinaus gilt es, den Klebvorgang technisch einwandfrei umzusetzen. Wie der Klebvorgang letztendlich aussieht, hängt vom jeweiligen Anwendungsfall ab. Ein einfaches Bestreichen der Klebflächen mit Klebstoff und anschließendes Zusammenpressen der Füge Teile ist für einen kleinmaßstäblichen Einsatz noch denkbar. Für einen großmaßstäblichen Einsatz in der Praxis ist jedoch eher ein Ausgießen oder Verpressen der Klebfuge denkbar. Entscheidend ist letztendlich, dass die Füge Teile vollflächig und ohne Lufteinschlüsse miteinander verklebt werden. Die Verarbeitbarkeit und die Klebtechnik gilt es entsprechend auf einander abzustimmen. Empfehlenswert ist auch eine Nachbehandlung. Bewährt hat sich hier das Abdecken mit feuchten Tüchern.

In jedem Fall müssen die möglicherweise vom Klebstoffhersteller vorgegebenen bzw. der Bauaufsichtsbehörde geforderten Anwendungsbedingungen wie beispielsweise zulässige Umgebungs- und Bauteiltemperaturen oder Luftfeuchtigkeit eingehalten werden. Diese gilt es ebenso zu protokollieren wie den Namen des Verarbeiters, die Verbrauchsmengen oder die Chargennummer des verwendeten Klebstoffs.

## 6.3 Bemessung gegen Fugensversagen

### 6.3.1 Allgemeines

Es gibt insgesamt eine Vielzahl an Einflussfaktoren auf den Haftverbund zwischen zementgebundenen Schichten. Die Haftfestigkeit streut in der Regel stark. Eine Quantifizierung der einzelnen Einflussfaktoren ist jedoch schwierig. Bisher existiert kein mechanisches Modell, welches die Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der verschiedenen Einflussgrößen zuverlässig abbildet (vgl. *Reinecke 2004*). Der Haftverbund lässt sich nur schwer planen.

Für den Fall eines Fugensversagens wird daher ein empirischer Bemessungsansatz vorgeschlagen. Auf Grundlage der in Abs. 5.2.4. beschriebenen Versuche wurden die in Abs. 6.3.2 und Abs. 6.3.3 aufgeführten abschnittsweise linearen Bemessungsgleichungen entwickelt. Mit den Gleichungen nach Abs. 6.3.2 lassen sich die übertragbaren Schnittkräfte als charakteristischer Bemessungswert in Abhängigkeit des Flankenneigungswinkels  $\alpha_j$  pro laufenden Meter Bauteilbreite berechnen. Es handelt sich dabei um 5%-Fraktilwerte bei einem Vertrauensniveau von 75 %. Diese wurden aus den vorliegenden Versuchsergebnissen nach *DIN EN 1990: 2010-12* unter der Annahme einer unbekanntenen Standardabweichung geschätzt. Neben zentrischem Zug werden die Fälle: reine Biegebeanspruchung sowie kombinierte Biege-Querkraftbeanspruchung abgedeckt.

Die Gleichungen (6.2) bis (6.4), (6.6) bis (6.8) sowie (6.9) bis (6.11), sind anwendbar für drei Zentimeter dicke Bauteile aus mikrobewehrtem Hochleistungsbeton, für Klebschichtdicken von zwei Millimetern und bei Verwendung des im Rahmen der Arbeit eingesetzten Hochfestleims. Darüber hinaus müssen die in Abs. 6.2 aufgeführten Grundsätze im Hinblick auf das Anmischen des Klebstoffs, die Vorbehandlung der Klebfläche oder aber den Klebvorgang eingehalten werden.

Zur Qualitätssicherung, um Mängel bei der Ausführung oder um Schwankungen der Klebstoffgüte feststellen zu können sind, Haftzugversuche wie in Abs. 5.1.3 beschrieben durchzuführen. Die Haftzugfestigkeit  $f_{ctk,surf}$  ermittelt in Anlehnung an *DIN EN 1542: 1999-07* lag für durch Wasserstrahlschneiden erzeugte Klebflächen bei 2,3 N/mm<sup>2</sup> (siehe Anhang D.2). Nachzuweisen ist daher eine Haftzugfestigkeit  $f_{ctk,surf}$  von mindestens 2,3 N/mm<sup>2</sup>.

Der minimale Flankenneigungswinkel für derartige Fugen wird auf 45° festgelegt. Im Falle von Winkeln kleiner als 45° ergeben sich hier keine brauchbaren charakteristischen Traglasten. Werden andere Bauteildicken oder Klebstoffe gewählt sind unter Umständen bessere Werte und damit auch kleiner Winkel möglich. Hierfür sind weitere Versuche erforderlich, in denen es diese zu ermitteln gilt.

Ab einem Flankenneigungswinkel von 75° kann für die untersuchte Klebfuge ein Fugensversagen ausgeschlossen werden, und es kommt zu einem Bewehrungsversagen. Die für einen Flankenneigungswinkel von 75° angegebenen maximalen Traglasten nach Gl. (6.3) bzw. Gl. (6.4), Gl. (6.7) bzw. Gl. (6.8) und Gl. (6.10) bzw. Gl. (6.11) gelten für mikrobewehrte Bauteile und einen effektiven Bewehrungsgehalt  $V_{eff}$  von 3,7 Vol.-%. Für geringer bewehrte Bauteile sind im Zustand II niedrigere Traglasten zu erwarten.

Aus den Versuchsergebnissen wurde der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_j$  in Anlehnung an *DIN EN 1990: 2010-12* und *DIN EN 14509* unter Annahme einer logarithmischen Normalverteilung ermittelt. Der Teilsicherheitsbeiwert wurde dabei wie in *Müller 2015* beschrieben abweichend von *DIN EN 14509* nicht mit der Standardabweichung, sondern mit dem Variationskoeffizient  $v_j$  der Prüfergebnisse ermittelt. Als Fraktilefaktor wurde  $k_n$  gleich 1,645 für 5%-Quantilen auf Basis der Grundgesamtheit angesetzt. Der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_j$  lag für die einzelnen Versuchsserien zwischen 1,2 und 1,8. Für den Fall des Fugenversagens wird daher ein Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_j$  von 1,8 vorgeschlagen. Durch den im Vergleich zu Stahlbeton (*DIN EN 1992-1-1: 2011-01*) erhöhten Teilsicherheitsbeiwert wird der Tatsache Rechnung getragen, dass der Haftverbund stark streut.

Bei dem Faktor  $k_j$  handelt es sich um einen Dauerstandsbeiwert ähnlich dem Faktor  $\alpha_{ct}$  nach *DIN EN 1992-1-1: 2011-01*. In Anlehnung an *Mühlbauer 2012* wird hierfür ein Wert von 0,6 verwendet (siehe Tab. 2.15). Durch Faktor  $k_j$  werden festigkeitsmindernde Einflüsse infolge zyklischer Beanspruchung sowie Dauerbeanspruchung berücksichtigt. Darüber hinaus gibt es keine weiteren, die Festigkeit mindernden Einflüsse, die es zu berücksichtigen gilt. Der Klebstoff und auch der Haftverbund sind relativ unempfindlich gegenüber Umwelteinflüssen, wie die Versuche von *Mühlbauer 2012* belegen.

### 6.3.2 Reine Zugbeanspruchung

Der charakteristische Wert der übertragbaren Normalkraft  $N_{Rkj}$  in Abhängigkeit des Flankenneigungswinkels  $\alpha_j$  pro laufenden Meter Bauteilbreite lässt sich für Bauteile mit einer Dicke von 30 mm wie folgt ermitteln:

$$N_{Rkj} = c_{FJ,N} + m_{FJ,N}(\alpha_j - 45^\circ) \quad \text{für } 45^\circ \leq \alpha_j < 60^\circ \quad (6.2)$$

$$N_{Rkj} = c_{FJ,N} + m_{FJ,N}(\alpha_j - 60^\circ) \quad \text{für } 60^\circ \leq \alpha_j < 75^\circ \quad (6.3)$$

$$N_{Rkj} = 278 \text{ kN/m} \quad \text{für } \alpha_j \geq 75^\circ \quad (6.4)$$

Die Parameter  $c_{FJ,N}$  und  $m_{FJ,N}$  sind fugenspezifische Werte (siehe Tab. 6.1). Diese gelten für die im Rahmen der Arbeit untersuchte Fuge und den entsprechenden Klebstoff. Es ist nachzuweisen, dass die charakteristische Haftzugfestigkeit  $f_{ctk,surf}$  größer gleich 2,3 N/mm<sup>2</sup> ist.

Der Bemessungswert der übertragbaren Normalkraft berechnet sich wie folgt:

$$N_{Rdj} = k_j \cdot \frac{N_{Rkj}}{\gamma_j} \quad (6.5)$$

Mit:

- $k_j$  Dauerstandsbeiwert für Klebverbindungen unter Verwendung eines zementgebundenen Klebstoffs gleich 0,6
- $\gamma_j$  Teilsicherheitsbeiwert für den Fall des Fugenversagens gleich 1,8

Tab. 6.1: Parameter Fugensversagen für reine Zugbeanspruchung <sup>2</sup>

Klebfuge <sup>1</sup>			$C_{FJ,N}$	$m_{FJ,N}$
$d$ [mm]	$t_j$ [mm]	$\alpha_j$ [°]	[kN/m]	[kN/m°]
30	2	45-60	65	9,9
		60-75	214	4,3

<sup>1</sup>Die Fugen müssen vorbehandelt sein, bspw. geschliffen (geschnitten) oder feststoffgestrahlt.

<sup>2</sup>Es muss nachgewiesen werden, dass die charakteristische Haftzugfestigkeit  $f_{jtK,surf} \geq 2,3 \text{ N/mm}^2$  ist. Diese ist wie in Abs. 5.1.3 beschrieben zu ermitteln.

### 6.3.3 Biegebeanspruchung und kombinierte Biege-Querkraftbeanspruchung

Die charakteristische Momententragfähigkeit  $M_{Rkj}$  als 5%-Fraktilwert in Abhängigkeit des Flankenneigungswinkels  $\alpha_j$  pro laufenden Meter Bauteilbreite lässt sich für Bauteile mit einer Dicke von 30 mm wie folgt ermitteln:

$$M_{Rkj} = c_{FJ,M} + m_{FJ,M} (\alpha_j - 45^\circ) \quad \text{für } 45^\circ \leq \alpha_j < 60^\circ \quad (6.6)$$

$$M_{Rkj} = c_{FJ,M} + m_{FJ,M} (\alpha_j - 60^\circ) \quad \text{für } 60^\circ \leq \alpha_j < 75^\circ \quad (6.7)$$

$$M_{Rkj} = 3,0 \text{ kNm/m} \quad \text{für } \alpha_j \geq 75^\circ \quad (6.8)$$

Tab. 6.2: Parameter Fugensversagen bei Biegebeanspruchung <sup>2</sup>

Klebfuge <sup>1</sup>			$C_{FJ,M}$	$m_{FJ,M}$
$d$ [mm]	$t_j$ [mm]	$\alpha_j$ [°]	[kNm/m]	[kNm/m °]
30	2	45-60	0	0,077
		60-75	1,15	0,123

<sup>1</sup> Die Fugen müssen vorbehandelt sein, bspw. geschliffen (geschnitten) oder feststoffgestrahlt.

<sup>2</sup> Es muss nachgewiesen werden, dass die charakteristische Haftzugfestigkeit  $f_{jtK,surf} \geq 2,3 \text{ N/mm}^2$  ist. Diese ist wie in Abs. 5.1.3 beschrieben zu ermitteln.

In Tab. 6.2 sind die entsprechenden fugenspezifischen Parameter  $c_{FJ,M}$  und  $m_{FJ,M}$  aufgeführt. Es gilt auch nachzuweisen, dass die charakteristische Haftzugfestigkeit  $f_{ctK,surf}$  größer gleich  $2,3 \text{ N/mm}^2$  ist.

Außer für den Fall einer reinen Biegebeanspruchung sind die Gleichungen (6.6) bis (6.8) auch für den Fall einer kombinierten Biege-Querkraftbeanspruchung anwendbar.

Die in Kombination mit einer Biegebeanspruchung vorhandene charakteristische Querkrafttragfähigkeit  $Q_{Rkj}$  als 5%-Fraktilwert in Abhängigkeit des Flankenneigungswinkels  $\alpha_j$  pro laufenden Meter Bauteilbreite lässt sich für Bauteile mit einer Dicke von 30 mm wie folgt ermitteln:

$$Q_{Rkj} = c_{FJ,M+Q} + m_{FJ,M+Q} (\alpha_j - 45^\circ) \quad \text{für } 45^\circ \leq \alpha_j < 60^\circ \quad (6.9)$$

$$Q_{Rkj} = c_{FJ,M+Q} + m_{FJ,M+Q} (\alpha_j - 60^\circ) \quad \text{für } 60^\circ \leq \alpha_j < 75^\circ \quad (6.10)$$

$$Q_{Rkj} = 29,4 \text{ kN/m} \quad \text{für } \alpha_j \geq 75^\circ \quad (6.11)$$

Die entsprechenden fugenspezifischen Parameter  $c_{FJ,M+Q}$  und  $m_{FJ,M+Q}$  sind in Tab. 6.3 aufgeführt. Auch hier gilt es nachzuweisen, dass die charakteristische Haftzugfestigkeit  $f_{ctk,surf}$  größer gleich 2,3 N/mm<sup>2</sup> ist.

Tab. 6.3: Parameter Fugenversagen für kombinierte Biege- Querkraftbeanspruchung<sup>2</sup>

Klebfuge <sup>1</sup>			$c_{FJ,M+Q}$ [kN/m]	$m_{FJ,M+Q}$ [kN/m °]
$d$ [mm]	$t_j$ [mm]	$\alpha_j$ [°]		
30	2	45-60	0	1,52
		60-75	22,8	0,44

<sup>1</sup> Die Fugen müssen vorbehandelt sein, bspw. geschliffen (geschnitten) oder feststoffgestraht.

<sup>2</sup> Es muss nachgewiesen werden, dass die charakteristische Haftzugfestigkeit  $f_{jtk,surf} \geq 2,3 \text{ N/mm}^2$  ist. Diese ist wie in Abs. 5.1.3 beschrieben zu ermitteln.

Der Bemessungswert des übertragbaren Biegemoments sowie der in Kombination übertragbaren Querkraft berechnet sich wie folgt:

$$M_{Rdj} = k_j \cdot \frac{M_{Rkj}}{\gamma_j} \quad (6.12)$$

$$Q_{Rdj} = k_j \cdot \frac{Q_{Rkj}}{\gamma_j} \quad (6.13)$$

Mit:

$k_j = 0,6$     Dauerstandsbeiwert für Klebverbindungen unter Verwendung eines zementgebundenen Klebstoffs

$\gamma_j = 1,8$     Teilsicherheitsbeiwert für den Fall des Fugenversagens

## 6.4 Bemessung gegen Bewehrungsversagen

### 6.4.1 Allgemeines

Auch für den Bemessungszustand Bewehrungsversagen wird ein empirischer Ansatz gewählt. Grundlage hierfür sind die in Abs. 5.2.6 beschriebenen Zugversuche.

Mit Hilfe von Gl. (6.14) lässt sich der bei Keilzinkenverbindungen im Fugenbereich wirksame effektive Bewehrungsgehalt  $V_{eff}$  berechnen. Auf Grundlage des effektiven Bewehrungsgehalts kann letztendlich die Tragfähigkeit, beispielsweise unter Verwendung des Bemessungsansatzes von *Hauser und Wörner 1999b*, ermittelt werden. Die Mechanismen in der Biegezugzone unterscheiden sich nicht grundlegend von denen bei rein zugbeanspruchten Keilzinkenverbindungen. Das Tragverhalten bei Vierpunktbiegeversuchen und zentrischen Zugversuchen war ähnlich und die bezogene Tragfähigkeit annähernd gleich.

Wie in Abs. 5.2.7.3 erläutert wurde, gibt es mehrere Faktoren, die letztendlich dazu führen, dass im Bereich der Keilzinkenverbindung eine reduzierte Bewehrungsquerschnittsfläche vorliegt. Die Folge ist eine im Vergleich zum ungestörten Bauteilquerschnitt verminderte Tragfähigkeit im Zustand II. Die Querschnittsfläche der Bewehrung ist zum einen durch den rein geometrischen Anteil der Fugenfläche am Bauteilquerschnitt reduziert. In Gl. (6.14) wird dies durch den Fugenfaktor  $J_{geo}$  erfasst. Dieser lässt sich mit Hilfe der Gl. (6.15) ermitteln, welche aus den geometrischen Gegebenheiten bei Keilzinkenverbindungen hergeleitet wurde.

Des Weiteren ist im Randbereich zur Fuge hin der Verbund zwischen Mikrobewehrung und Beton beeinträchtigt. Längsdrähte in Fugennähe sind teilweise gar nicht oder nur unzureichend im Beton verankert und können sich infolge dessen nicht voll am Lastabtrag beteiligen. Im Riss kann aus dem Grund nicht der volle theoretisch vorhandene Bewehrungsquerschnitt aktiviert werden. In Gl. (6.14) wird dies durch den Fugenfaktor  $J_j$  berücksichtigt. Die Werte nach Tab. 6.4 und Tab. 6.5 basieren auf den in Abs. 5.2.6 beschriebenen Versuchen. Es liegen jeweils die mittleren Traglasten, auf Maximallastniveau nach Tab. 5.10 zu Grunde.

Für den Fall des Bewehrungsversagens wird ein Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{DUC}$  von 1,15 vorgeschlagen. Dies entspricht dem Teilsicherheitsbeiwert für Bewehrungsstahl nach *DIN EN 1992-1-1: 2011-01*.

Für einen Einsatz in der Praxis erscheint es sinnvoll, im Fugenbereich eine Zulagebewehrung anzuordnen um den Einfluss der Keilzinkung auszugleichen und letztendlich den Bewehrungsgehalt im übrigen Bauteil zu erreichen.

### 6.4.2 Wirksamer effektiver Bewehrungsgehalt

Der im Fugenbereich wirksame effektive Bewehrungsgehalt  $V_{eff}$  berechnet sich wie folgt:

$$V_{eff,j} = V_{eff} \cdot J_{geo} \cdot J_j \quad (6.14)$$

Mit Fugenfaktor:

$$J_{geo} = 1 - \left( \frac{t_j}{\cos \alpha_j \cdot \ell_z} + \frac{r_i \cdot \tan \alpha_j}{\ell_z \cdot d} \right) \quad (6.15)$$

Hierbei bedeuten:

$t_j$	Fugendicke in mm
$\ell_z$	Zahnlänge in mm
$\alpha_j$	Flankenneigungswinkel in grad (°)
$d$	Bauteildicke in mm
$r_i$	Ausrundungsradius innen in mm



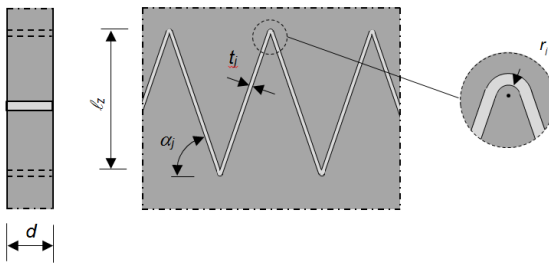


Abb. 6.1: Kennwerte der Keilzinkenverbindung

Werte für den Fugenfaktor  $J_f$  sind Tab. 6.4 und Tab. 6.5 zu entnehmen.

Tab. 6.4: Fugenfaktor  $J_f$  für einen Bewehrungsgehalt  $V_f$  von 4,2 Vol.-%

Zahnlänge $l_z$ [mm]	Flankenneigungswinkel $\alpha_j$		
	65°	75°	85°
90	0,69	0,74	0,76

Tab. 6.5: Fugenfaktor  $J_f$  für einen Bewehrungsgehalt  $V_f$  von 7,4 Vol.-%

Zahnlänge $l_z$ [mm]	Flankenneigungswinkel $\alpha_j$		
	65°	75°	85°
110	.	0,63	.

Der Flankenneigungswinkel wird nach oben hin auf 85° begrenzt, da im Falle von steilen Flankenneigungswinkeln der Anteil der Fugenfläche am Bauteilquerschnitt verhältnismäßig hoch ist. Hieraus resultiert ein geringer effektiver Bewehrungsgehalt im Fugenbereich. Den Fugenfaktor  $J_f$  für andere unter Umständen auch flachere Flankenneigungswinkel gilt es in weiteren Versuchen zu untersuchen, ebenso wie für andere Bewehrungsgrade und Zahnlängen. Für Bewehrungsgehalte zwischen 4,2 Vol.-% und 7,4 Vol.-% darf zwischen den Tabellenwerten der Tab. 6.4 und Tab. 6.5 linear interpoliert werden.

Für einen Bewehrungsgehalt  $V_f$  von 4,2 Vol.-% wird die Zahnlänge nach unten hin auf 90 mm beschränkt (siehe Tab. 6.4). So kann unter anderem ein unterkritisches Last-Verformungsverhalten ausgeschlossen werden.

### 6.4.3 Mindestbewehrung

Zur Sicherstellung eines duktilen Bauteilverhaltens ist darüber hinaus der Nachweis der Mindestbewehrung zu führen.

Die Rissnormalkraft, welches es bei der Bemessung zu berücksichtigen gilt, berechnet sich wie folgt:

$$N_{cr} = A_c \cdot f_{ctm} \quad (6.16)$$

Mit:

- $A_c$             Bruttobetonquerschnittsfläche
- $f_{ctm}$            Mittlere zentrische Betonzugfestig nach Tab. 3.4

Das zu abzutragende Rissmoment  $M_{cr}$ , welches es bei der Bemessung zu berücksichtigen gilt, berechnet sich wie folgt:

$$M_{cr} = W \cdot f_{ctm} \tag{6.17}$$

Mit:

- $W_c$             Widerstandsmoment des Bruttobetonquerschnitts

## 6.5 Rechenbeispiel

### 6.5.1 Allgemeines - System und Abmessungen

Nachfolgend wird die Bemessung mit Hilfe, des im Rahmen der Arbeit entwickelten Ansatzes für einen Vierpunktbiegeversuch der Serie B2-FJ-D2-WSG nach Abs. 5.2.5 beispielhaft vorgeführt.

In Abb. 6.2 sind das statische System und die Bauteilabmessungen dargestellt. Die Probekörper waren mit 18 Lagen Mikrobewehrung versehen. Der Bewehrungsgehalt  $V_{eff}$  betrug 3,7 %.

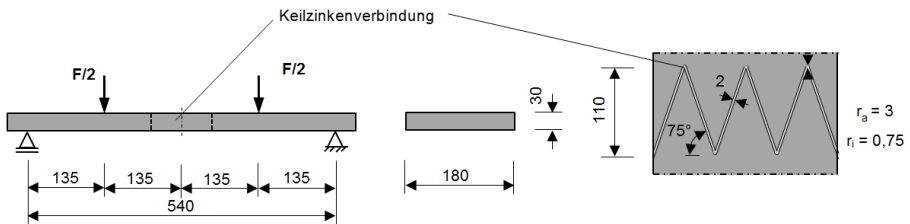


Abb. 6.2: Statisches System und Abmessungen Versuche B2-FJ-D2-WSG

Bei den Vierpunktbiegeversuchen liegt im Fugenbereich eine reine Biegebeanspruchung vor.

Im Falle der Versuche an Keilzinkenverbindungen mit einem Flankenneigungswinkel von  $75^\circ$  war letztendlich ein Fugenversagen kombiniert mit einem Bewehrungsversagen zu verzeichnen. Die mittlere Momentenragfähigkeit  $M_{j,u,m}$  betrug 0,79 kNm, die charakteristische Momentenragfähigkeit  $M_{j,u,k}$  betrug 0,54 kNm.

### 6.5.2 Nachweis gegen Fugerversagen

Gegeben:

Flankenneigungswinkel	$\alpha_j = 75^\circ$
Bauteilbreite	$b = 180 \text{ mm}$
Bauteildicke	$d = 30 \text{ mm}$
Fugendicke	$t_j = 2 \text{ mm}$

Für einen Flankenneigungswinkel von  $75^\circ$  und eine Bauteilbreite von 180 mm errechnet sich mit Hilfe von Gl. (6.8) eine charakteristische Momententragfähigkeit von:

$$M_{Rkj} = 3,0 \text{ kNm/m} \cdot 0,18 \text{ m} = \underline{0,54 \text{ kNm}}$$

Diese entspricht damit exakt der im Versuch ermittelten charakteristischen Momententragfähigkeit auf Maximallastniveau:

$$M_{Rkj} = M_{j,u,k}$$

### 6.5.3 Nachweis gegen Bewehrungsversagen

Gegeben:

Fugendicke	$t_j = 2 \text{ mm}$
Zahnlänge	$\ell_z \text{ ca. } 110 \text{ mm}$
Flankenneigungswinkel	$\alpha_j = 75^\circ$
Bauteildicke	$d = 30 \text{ mm}$
Ausrundungsradius innen	$r_i = 0,75 \text{ mm}$

Eingesetzt in Gl. (6.15) errechnet sich der Fugenfaktor  $J_{geo}$  wie folgt:

$$J_{geo} = 1 - \left( \frac{2 \text{ mm}}{\cos 75^\circ \cdot 110 \text{ mm}} + \frac{0,75 \text{ mm} \cdot \tan 75^\circ}{110 \text{ mm} \cdot 30 \text{ mm}} \right) = \underline{0,93}$$

Der Gesamtbewehrungsgehalt beträgt:

$$V_f = 2 \cdot V_{eff} = 2 \cdot 3,7 \text{ Vol.-%} = \underline{7,4 \text{ Vol.-%}}$$

Nach Tab. 6.5 ergibt sich hierfür und für einen Flankenneigungswinkel von  $75^\circ$  ein Fugenfaktor  $J_f$  von 0,63.

Damit und mit Hilfe von Gl. (6.14) errechnet sich der im Fugenbereich wirksame effektive Bewehrungsgehalt wie folgt:

$$V_{eff,f} = 3,7 \text{ Vol.-%} \cdot 0,93 \cdot 0,63 = \underline{2,17 \text{ Vol.-%}}$$

Vereinfacht erfolgt die Nachrechnung hier mit Hilfe der Bemessungstafel nach *Hauser und Wörner 1999b* sowie Gl. (2.1) nach Abs. 2.1.2.5. Für einen Bewehrungsgehalt  $V_{eff,j}$  von 2,17 Vol.-% ergibt sich nach Tab. 6.6 ein Faktor  $k$  von 7,53 N/mm<sup>2</sup>.

Das aufnehmbare Moment  $M_R$  errechnet sich damit wie folgt:

$$M_R = \frac{7,53 \text{ N/mm}^2 \cdot 180 \text{ mm} \cdot (30 \text{ mm})^2}{2} = \underline{609.930,0 \text{ Nmm}} = \underline{0,61 \text{ kNm}}$$

Der von *Hauser und Wörner 1999b* eingesetzte Beton wies eine mittlere Betondruckfestigkeit von 90 N/mm<sup>2</sup> auf. Wie die Druckfestigkeit ermittelt wurde, ist *Hauser und Wörner 1999b* und *Hauser 1999* nicht zu entnehmen. Die mittlere Betondruckfestigkeit  $f_{cm,fl}$  des im Rahmen der vorliegenden Arbeit eingesetzten Betons lag bei 126,6 N/mm<sup>2</sup>. Die Tragfähigkeit wird somit unterschätzt.

In *Hauser und Wörner 1999b* wird nicht angegeben ob oder inwieweit Teilsicherheitsbeiwerte in die Tabelle eingeflossen sind. Unklar ist auch ob der Tabelle charakteristische oder mittlere Materialfestigkeiten zu Grunde liegen. Ein Vergleich der Versuchswerte mit der rechnerischen Tragfähigkeit ist daher nicht möglich.

Mit 0,61 kNm ist das rechnerisch aufnehmbare Moment  $M_R$  größer als die charakteristische Momententragfähigkeit  $M_{j,u,k}$  mit 0,54 kNm. Die mittlere Momententragfähigkeit auf Maximallastniveau betrug jedoch 0,79 kNm. Der kleinste Einzelwert lag bei 0,72 kNm. Die Werte sind also deutlich größer als das aufnehmbare Moment  $M_R$ .

Tab. 6.6: Auszug aus der Bemessungstabelle für DUCON mit normalfestem Stahl  
 $f_{tk} = 380 \text{ N/mm}^2$  nach *Hauser und Wörner 1999b*

$V_{f,eff}$ Vol.-%	$T_{D1}$ -	$T_{D2}$ -	$T_Z$ -	$\varepsilon_D$ ‰	$\varepsilon_Z$ ‰	$k$ N/mm <sup>2</sup>
0,48	0,074	0,000	0,043	2,00	25,00	1,83
0,54	0,077	0,000	0,043	2,10	25,00	2,02
0,59	0,081	0,000	0,043	2,20	25,00	2,23
0,65	0,084	0,000	0,043	2,30	25,00	2,45
0,72	0,088	0,000	0,043	2,40	25,00	2,68
0,79	0,091	0,000	0,043	2,50	25,00	2,93
0,86	0,094	0,000	0,042	2,60	25,00	3,19
0,94	0,097	0,000	0,042	2,70	25,00	3,46
1,02	0,101	0,000	0,042	2,80	25,00	3,75
1,11	0,104	0,000	0,042	2,90	25,00	4,05
1,17	0,107	0,123	0,042	3,00	25,00	4,31
1,29	0,110	0,121	0,042	3,10	25,00	4,72
1,40	0,113	0,119	0,042	3,20	25,00	5,13
1,51	0,117	0,117	0,041	3,30	25,00	5,53
1,63	0,120	0,115	0,041	3,40	25,00	5,93
1,74	0,123	0,113	0,041	3,50	25,00	6,33
1,86	0,126	0,111	0,041	3,60	25,00	6,73
1,97	0,129	0,109	0,041	3,70	25,00	7,13
<b>2,09</b>	<b>0,132</b>	<b>0,106</b>	<b>0,041</b>	<b>3,80</b>	<b>25,00</b>	<b>7,53</b>
2,21	0,135	0,104	0,041	3,90	25,00	7,92
2,33	0,138	0,102	0,040	4,00	25,00	8,31
2,47	0,141	0,101	0,040	4,10	25,00	8,61

### 6.5.4 Überprüfung der Mindestbewehrung

Für das Bauteil mit einer Breite von 180 mm und einer Dicke von 30 mm errechnet sich ein Widerstandsmoment bezogen auf den Bruttobetonquerschnitts von:

$$W_c = \frac{180 \text{ mm} \cdot (30 \text{ mm})^2}{2} = \underline{81.000,0 \text{ mm}^3}$$

Bei der Versuchsserie B2-FJ-D2-WSG betrug die mittlere Biegezugfestigkeit  $f_{ctm,fl}$  ermittelt an Prismen nach *DIN 18555-3: 1982-09* 14,2 N/mm<sup>2</sup>. Nach Gl. (3.9) ergibt sich eine zentrische Zugfestigkeit von:

$$f_{ctm} = 0,5 \cdot 14,2 \text{ N/mm}^2 = \underline{7,1 \text{ N/mm}^2}$$

Mit Hilfe der zentrischen Zugfestigkeit und unter Verwendung von Gl. (6.17) berechnet sich das Rissmoment wie folgt:

$$M_{cr} = 81.000 \text{ mm}^3 \cdot 7,1 \text{ N/mm}^2 = \underline{575.100 \text{ Nmm}} = \underline{0,57 \text{ kNm}}$$

Nach Gl. (2.9) ergibt sich ein  $k$ -Faktor von:

$$k = \frac{2 \cdot 570000 \text{ Nmm}}{(30 \text{ mm})^2 \cdot 180 \text{ mm}} = \underline{7,04 \text{ N/mm}^2}$$

Der erforderliche Mindestbewehrungsgehalt  $V_{eff,i,erf.}$  beträgt nach Tab. 6.6 1,97 Vol.-% und ist damit geringer als der vorhandene Bewehrungsgehalt  $V_{eff,vorh.}$  von 2,17 Vol.-%.

## 6.6 Fazit

Im Rahmen der Arbeit wurde auf Grundlage von experimentellen Untersuchungen ein Bemessungsansatz für zugbeanspruchte, biegebeanspruchte sowie biegequerkraftbeanspruchte Keilzinkenverbindungen entwickelt.

Darüber hinaus gibt es weitere Lastfälle, die im Hinblick auf eine Anwendung in der Praxis von Bedeutung sind. In Plattenbauteilen herrschen beispielweise mehraxiale Beanspruchungszustände. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Bei dem entwickelten Ansatz wird zwischen zwei Versagensfällen unterschieden: einem Fugenversagen und einem Bewehrungsversagen.

Insbesondere, für den Fall des Fugenversagens besteht weiterer Forschungsbedarf. Die Bemessungsgleichungen sind ausschließlich für drei Zentimeter dicke Bauteile aus mikrobewehrtem Hochleistungsbeton, in Verbindung mit dem im Rahmen der Arbeit eingesetzten Klebstoff und Fugen mit einer Stärke von 2 mm anwendbar. Um diese auf andere Bauteildicken, Klebstoffe oder Fugenstärken zu erweitern müssen weitere Versuche wie in Abs. 5.2 beschrieben durchgeführt werden. Auf Grundlage dieser Versuche lassen sich dann analog zum Vorgehen in diesem Abschnitt Bemessungsgleichungen entwickeln.

Anzumerken bleibt, dass die Versuche an 180 mm breiten Probekörpern durchgeführt worden sind. Die hier aufgeführten Bemessungswerte sollten in großmaßstäblichen Versuchen überprüft werden um Maßstabeffekte ausschließen zu können.

Mit dem Aufreißen finden bei Keilzinkenverbindungen im Fugenbereich Umlageungsvorgänge statt. Ähnlich wie bei Übergreifungsstößen stellen sich schräge Druckstreben ein. In ausgedehnten Bauteilen stehen diese Kräfte mit den Druckstreben aus dem Nachbarzahn im Gleichgewicht. Bei den Versuchen wurden diese von der Verspannung aufgenommen. Die Bemessungsgleichungen dürfen daher nur bei Plattenbauteilen angewendet werden. Im Randbereich der Platten müssen Laschen angeordnet werden, die ein Ausbrechen der Zähne verhindern.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassung

Auf Grundlage von in erster Linie experimentellen Untersuchungen wurden im Rahmen der Arbeit Keilzinkenverbindungen zum Fügen dünner Bauteile aus mikrobewehrtem Hochleistungsbeton erforscht. Ziel war es, eine möglichst einfache, praxistaugliche Klebverbindung für dünne Platten- und Scheibenbauteile aus Hochleistungsbeton zu entwickeln. Als Klebstoff sollte hierbei ein zementgebundener Klebstoff verwendet werden, der vor allem den Vorteil hat, dass er weitestgehend unempfindlich gegenüber Umwelteinflüssen und Alterung ist.

Im Vorfeld wurde ein umfassendes Literaturstudium zu den Themen „Konstruktives Kleben im Massivbau“, „Verbund zwischen zementgebundenen Schichten“ sowie Hochleistungsmörtel vorgenommen und so die Grundlagen gelegt.

Beim Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung kommen Reaktionsharzklebstoffe zum Einsatz. Auch an Betonverklebungen mit Reaktionsharzklebstoffen wurde weltweit intensiv geforscht. Die existierenden Bemessungsansätze sind jedoch nicht auf das Fügen mit einem Klebstoff auf Zementbasis übertragbar. Ein entscheidender Unterschied ist, dass beim Kleben mit Klebstoffen auf Zementbasis kein verschieblicher, sondern ein starrer Verbund vorliegt.

Der Haftverbund zwischen zementgebundenen Schichten spielt im Massivbau unter anderem bei der Halbfertigteilbauweise eine Rolle. Dieser wird durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst, welche sich jedoch im Einzelnen nur schwer quantifizieren lassen. Betonverklebungen mit einem zementgebundenen Klebstoff wurden erstmals von *Mühlbauer 2012* erforscht. Er untersuchte die Verbundfestigkeit unter reiner Zugbeanspruchung sowie unter kombinierter Schub-Druckbeanspruchung und formulierte entsprechende Bemessungsansätze. Für den Fall einer Schub-Zugbeanspruchung existierte bislang kein Bruchkriterium, mit dem die Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen hätte ermittelt werden können.

Auf dem Markt sind leistungsfähige Fertigmörtel für verschiedenste Anwendungen, die im Hinblick auf das Kleben eine praxistaugliche Alternative zu dem von *Mühlbauer 2012* entwickelten RPC-Klebstoff darstellen. Sie zeichnen sich neben guten mechanischen Eigenschaften auch durch eine einfache Handhabung aus. Durch eine Güteüberwachung bei der Produktion ist eine gleichbleibende Qualität sichergestellt, was eine unabdingbare Voraussetzung in Hinblick auf konstruktives Kleben ist. Im Rahmen der Arbeit wurden zwei Hochleistungsmörtel eingesetzt, die auf der von *Mühlbauer 2012* entwickelten Rezeptur des RPC Klebstoffs basieren, sowie ein kommerzieller Werkrockenmörtel.

In einem ersten Schritt wurden verschiedene Voruntersuchungen durchgeführt. Unter anderem wurde der Einfluss der Klebflächenvorbehandlung auf den Haftverbund untersucht. Des Weiteren wurden Tastversuche mit unterschiedlichen Fugenvarianten absolviert. Neben Mikrobewehrung kam hierbei auch Stabstahlbewehrung zum Einsatz. Das Versuchsprogramm sah unterschiedliche Fugengeometrien sowie ver-

schiedene Lastfälle vor. Ergänzend zu den experimentellen Untersuchungen wurden numerische Berechnungen durchgeführt.

Insgesamt hat sich bei den Untersuchungen gezeigt, dass das Verkleben von Betonbauteilen mit Hilfe eines zementgebundenen Klebstoffs vom Anmischen des Klebstoffs, über die Vorbehandlung der Klebfläche bis hin zum Klebvorgang selbst viel Know-how erfordert. Bei geschalteten Fugengeometrien müssen die Klebflächen allgemein nachbearbeitet werden, was sich bei komplexen Fugengeometrien schwierig gestaltet. Als eine praktikable Möglichkeit, Fugen bei mikrobewehrten Bauteilen zu realisieren, hat sich das Schneiden mittels Hochdruckwasserstrahl erwiesen, wenn auch das Verfahren relativ teuer ist. Unter den verschiedenen untersuchten Fugengeometrien hat sich die Keilgeometrie oder Keilzinkenverbindung, wie man sie aus dem Holzbau kennt, als beste Variante herauskristallisiert. Neben einer entsprechend hohen Traglast weist diese weitere positive Eigenschaften auf. Unter anderem lässt sich die Keilgeometrie beispielsweise mit einer herkömmlichen Steinsäge kostengünstig realisieren. Aus diesen Gründen wurde sich bei den weiteren Untersuchungen auf die Keilzinkenverbindung konzentriert.

Wie sich gezeigt hat, lassen sich mit stabstahlbewehrten Klebverbindungen hohe Tragfähigkeiten erzielen. Für Anwendungsfälle, bei denen höhere Schnittkräfte übertragen werden sollen, sind deshalb Klebverbindungen mit diskreter Bewehrung möglicherweise zu bevorzugen. Das Versagen hat sich tendenziell als schlagartig herausgestellt. Dies gilt es im Hinblick auf ein Bemessungskonzept zu berücksichtigen oder durch konstruktive Maßnahmen zu verbessern.

Auf Grundlage von umfangreichen experimentellen Untersuchungen wurden in einem nächsten Schritt entsprechende Bruchkriterien für Klebverbindungen mit einer Klebschichtdicke von zwei Millimetern und unterschiedlichen Arten der Oberflächenvorbehandlung entwickelt, mit denen sich die Fugentragfähigkeit sowohl für eine kombinierte Schub-Druck- als auch Schub-Zugbeanspruchung ermitteln lässt. Die Fugfestigkeit kann allgemein am besten durch ein Polynom zweiten Grades, also ein quadratisches Bruchkriterium, beschrieben werden. Für den Fall einer Schub-Zugbeanspruchung, wie er bei Keilzinkenverbindung vorliegt, eignet sich alternativ ein lineares Bruchkriterium.

In einer umfangreichen Versuchsserie wurde schließlich das Tragverhalten von Keilzinkenverbindungen näher untersucht. Die Klebschichtdicke betrug generell zwei Millimeter. Das Versuchsprogramm sah Zugversuche, sowie Drei- und Vierpunktbiegeversuche vor.

Wie sich hierbei gezeigt hat, hängt das Tragverhalten hauptsächlich von der Größe des Flankenneigungswinkels, der Zahnlänge sowie vom Bewehrungsgrad eines Bauteils ab. Einflussfaktoren sind weiterhin die Art der Klebflächenvorbereitung und der verwendete Klebstoff. Das Versagen lässt sich in ein Fugenversagen, ein Bewehrungsversagen sowie ein kombiniertes Versagen unterteilen. Durch einen schlagartigen Lastabfall ist das Fugenversagen gekennzeichnet. Dies gilt es durch eine fachgerechte Konstruktion und Ausführung von Keilzinkenverbindungen zu verhindern. Ziel muss ein Bewehrungsversagen und damit duktiler Tragverhalten sein.



Wird der Flankenneigungswinkel steil genug gewählt, kann die Last gesteigert werden, bis sich im Fugenbereich Querrisse bezogen auf die Beanspruchungsrichtung bilden, bevor es schließlich zu einem Versagen der Bewehrung im Fugenbereich kommt. Die Rissbreiten bei Erreichen der Streckgrenze war kleiner 0,1 mm. Entscheidend, im Hinblick auf die Tragfähigkeit, ist in dem Fall der im Versagensschnitt befindliche effektive Bewehrungsgehalt. Es gibt mehrere Faktoren, die letztendlich zu einer Verminderung der Tragfähigkeit im Vergleich zum ungestörten Bauteilquerschnitt beitragen. Eine entscheidende Rolle spielt hier der rein geometrische Anteil der Fugenfläche am Bauteilquerschnitt. Zu einer Verminderung der Tragfähigkeit trägt weiterhin bei, dass im Randbereich zur Fuge hin die Bewehrungsdrähte nicht ausreichend im Beton verankert sind. Im Riss kann aus dem Grund nicht der volle theoretisch vorhandene Bewehrungsquerschnitt aktiviert werden. Für den Fall eines kombinierten Versagens ist der Bewehrungsquerschnitt zusätzlich dadurch reduziert, dass der Versagensriss nicht geradlinig verläuft, sondern zwischen zwei Querrissen springt.

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurde in einem letzten Schritt ein Bemessungskonzept für zugbeanspruchte, biegebeanspruchte sowie biege-querkraftbeanspruchte Keilzinkenverbindungen entwickelt. Hierbei wird zwischen zwei Versagenszuständen unterschieden: einem Fugenversagen und einem Bewehrungsversagen. Mit Hilfe von entsprechenden Bemessungsgleichungen lässt sich die Fugentragfähigkeit in Abhängigkeit des Flankenneigungswinkels und der Zahnlänge ermitteln. Der Klebstoff oder auch die Art der Klebflächenvorbehandlung werden hier über einen Nachweis der Haftzugfestigkeit berücksichtigt. Für den konkreten Anwendungsfall gilt es am Bauteil eine charakteristischen Haftzugfestigkeit  $f_{ctk,surf}$  von 2,3 N/mm einzuhalten. Was den Bemessungszustand „Bewehrungsversagen“ angeht, wurden Formeln entwickelt, mit denen sich der bei Keilzinkenverbindungen im Fugenbereich wirksame effektive Bewehrungsgehalt  $V_{eff,j}$  in Abhängigkeit der verschieden Einflussgrößen bestimmen lässt. Daraus kann die Tragfähigkeit der Verbindung mit vorhandenen Bemessungsmodellen für mikrobewehrten Hochleistungsbeton ermittelt werden.

Für den Bemessungszustand „Bewehrungsversagen“ wird ein Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_s$  von 1,15 vorgeschlagen, für den Bemessungszustand „Fugenversagen“ ein Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_f$  von 1,8. Was die Fugentragfähigkeit angeht werden Festigkeitsmindernde Einflüsse infolge zyklischer Beanspruchung sowie Dauerbeanspruchung durch einen Faktor  $k_j$  berücksichtigt.

## 7.2 Ausblick

In Bezug auf das entwickelte Bruchkriterium für die Klebfuge bleibt anzumerken, dass für den Bereich geringer Druck- oder Zugnormalspannungen relativ wenige Versuchsergebnisse vorliegen. Die Fugentragfähigkeit wird durch das lineare Bruchkriterium möglicherweise etwas unterschätzt. Als vielversprechende Alternative, um Klebverbindungen wirtschaftlicher bemessen zu können, erscheint hier ein parabolischer Ansatz in Anlehnung an *Bay 1943*. Um das Bruchkriterium weiter zu verbessern, sind weitere Versuche für diesen Bereich beispielsweise mit Hilfe einer Torsionsapparatur, wie von *Franke und Deckelmann 1989* beschrieben, erforderlich. Wie

sich herausgestellt hat, ist die Höhe der Fugenfestigkeit von den Abmessungen der Klebfuge abhängig. In diesem Punkt besteht ebenfalls weiterer Forschungsbedarf.

Zementgebundene Klebstoffe besitzen ein großes Entwicklungspotential. Hier sind die Werkstoffwissenschaften und Mörtelhersteller gefordert. Neben der Adhäsionsfestigkeit gilt es die Verarbeitbarkeit zu optimieren und auf den jeweiligen Einsatzfall abzustimmen.

Weiterer Forschungsbedarf besteht rund um das Thema Keilzinkenverbindungen. Die Bemessungsgleichungen, was den Bemessungszustand „Fugenversagen“ angeht, sind ausschließlich für drei Zentimeter dicke Bauteile und für Klebschichtdicken von zwei Millimetern anwendbar. In möglichen weiterführenden Forschungsvorhaben gilt es andere Bauteildicken, Klebschichtdicken oder auch Zahnlängen zu untersuchen. Ebenso vorstellbar sind Keilzinkenverbindungen als Fügetechnik für Textilbeton- oder Faserbetonbauteile. Nicht untersucht wurde bislang auch der Einfluss des Klebstoffs auf die Tragfähigkeit. Neben verbesserten Zementklebstoffen ist unter anderem der Einsatz von kunststoffmodifizierten Zementklebstoffen oder Reaktionsharzklebstoffen bei Keilzinkenverbindungen denkbar. Außer den untersuchten gibt es weitere Beanspruchungsarten, die im Hinblick auf eine Anwendung in der Praxis von Bedeutung sind. Weiter erforscht werden sollten beispielsweise mehraxiale Beanspruchungszustände, wie sie in Plattenbauteilen vorkommen können.

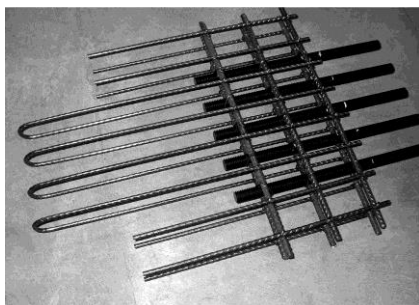


Abb. 7.1: Schlaufenförmige Stabstahlbewehrung



Abb. 7.2: Stabstahlbewehrung und gerade Stabenden

Gelingt es, das Tragverhalten zu verbessern, sind Klebverbindungen mit Stabstahlbewehrung für Anwendungsfälle, bei denen höhere Schnittkräfte übertragen werden sollen möglicherweise eine vielversprechende Alternative zu Keilzinkenverbindungen. Zusätzlich zu den in dieser Arbeit vorgestellten Versuchen wurden in einer umfangreichen Versuchsserie Klebverbindungen mit diskreter Bewehrung und unterschiedliche Beanspruchungsarten untersucht. Als Bewehrung kam in erster Linie Stabstahl mit einem Durchmesser von 6 mm zum Einsatz. Neben schlaufenförmiger Ausbildung (siehe Abb. 7.1) wurden vor allem Verbindungen mit geradem Stabende untersucht. Als Referenzversuche wurden Versuche ohne Klebfuge durchgeführt (siehe Abb. 7.2), was de facto einem Übergreifungsstoß entspricht. Erste Ergebnisse der Versuche wurden in *Kohlmeyer und Oster 2014* vorgestellt.

Geeignete Fügeverfahren sind eine unabdingbare Voraussetzung, um aus Betonfertigteilen größere Strukturen realisieren zu können. Die Keilzinkenverbindung stellt hier insbesondere für dünne Bauteile aus Hochleistungsbeton einen vielversprechenden Ansatz dar. Es gibt eine Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten.

Ein Anwendungsfall sind beispielsweise aus Einzelementen zusammengesetzte Fertigteilschalen. In einem an der TU München von *Breitenberger und Bletzinger 2014* durchgeführten Forschungsvorhaben wird zurzeit daran gearbeitet, das Fugenmuster dahingehend zu optimieren, dass sich in der Fuge minimale Schnittgrößen ergeben.

Denkbar sind auch segmentierte Fertigteilbodenplatten oder überdimensionale Fliesen aus mikrobewehrtem Hochleistungsbeton. Unter Verwendung der Keilzinkenverbindung lassen sich so in kurzer Zeit hochbeanspruchbare und flüssigkeitsdichte Böden bzw. Behälter in beliebiger Größe realisieren. Mögliche Anwendungsgebiete sind beispielsweise die Instandsetzung von hochbeanspruchten Industrieböden oder die Instandsetzung von Behältern im industriellen Bereich.

## 8 Literatur

- Alff und Stallmann 2015** Alff, M.; Stallmann, T.: Experimentelle Untersuchungen zur Zugtragfähigkeit einer Keilzinkenverbindung für mikrobewehrte Bauteile aus Hochleistungsbeton. Studienarbeit. Kaiserslautern, 2015.
- Andrä et al 2014** Andrä, H.; Shklyar, I.; Schneider, M.; Zangmeister, T.: Zur Simulation von Klebverbindungen für Scheibenbauteile mit Level-Set-Funktionen und erweiterte Finite-Elemente-Methode. In: Silke Scheerer, Manfred Curbach (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton. Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, 2014, S. 254–261.
- Azizinamini et al 1993** Azizinamini, A.; Stark, M.; Roller, J.; Ghosh, S.: Bond Performance of Reinforcing Bars Embedded in High-Strength Concrete. ACI structural journal, volume 90, Nr. 5, 1993, S. 554–561.
- Bastert et al 2011** Bastert, H.; Dickhaut, H. D.; Eßer, A.; Hintzen, W.; Hohberg, I.; Kühne, H.-C.; Kühner, S.; Meyer, L.; Raupach, M.; Westendarp, A.; Wiens, U.: Überarbeitung der DAfStb-Richtlinie Instandsetzung - Statusbericht. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 106, Nr. 7, 2011, S. 501–510.
- Baumert und Garrecht 2010** Baumert, C.; Garrecht, H.: Mischen von Hochleistungsbetonen. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 105, Nr. 6, 2010, S. 371–378.
- Bay 1943** Bay, H.: Scherbeanspruchung und Scherfestigkeit beim Beton. Ingenieur-Archiv, Vol. 14, Nr. 4, 1943, S. 267–276.
- Bergmeister 2001** Bergmeister, K.: Kleben im Betonbau - Theoretische Grundlagen und Bemessungsvorschläge. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 96, Nr. 10, 2001, S. 625–633.
- Beushausen 2005** Beushausen, H.: Longterm Performance of Bonded Concrete Overlays Subjected to Differential Shrinkage. Dissertation. South Africa, 2005.
- Breitenbücher et al 2008** Breitenbücher, R.; Wiens, U.; Siebert, B.: Herstellung und Verwendung von zementgebundenem Vergussbeton und Vergussmörtel. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 103, Nr. 9, 2008, S. 639–644.
- Breitenbücher 2014** Breitenbücher, R.: Neues aus der Betonnormung. 2. Jahrestagung mit 55. Forschungskolloquium. Düsseldorf.
- Burkhardt 2000** Burkhardt, C. J.: Zum Tragverhalten von Übergreifungsstößen in hochfestem Beton. Dissertation. Aachen, 2000.
- Curbach und Speck 2007** Curbach, M.; Speck, K.: Versuchstechnische Ermittlung und mathematische Beschreibung der mehraxialen Festigkeit von Hochleistungsbeton. Arbeitsbericht an die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) zum Forschungsvorhaben CU 37/6-1. Dresden, 2007.
- Dehn 2005** Dehn, F.: Qualitätssicherung bei der Verwendung von hochfestem Beton. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 100, Nr. 2, 2005, S. 100–105.

- DAfStb Heft 229** Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V., Heft 229: Das Verhalten von Beton unter mehraxialer Kurzzeitbelastung unter besonderer Berücksichtigung der zweiaxialen Beanspruchung. Berlin, 1973.
- DAfStb Heft 331** Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V., Heft 331: Kleben im Konstruktiven Ingenieurbau. Berlin, 1982.
- DAfStb Heft 499** Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V., Heft 499: Tragverhalten von stumpf gestoßenen Fertigteilstützen aus hochfestem Beton. Berlin, 2000.
- DAfStb -RiLi SIB** Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V., -RiLi SIB: Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungs-Richtlinie). Berlin, 2001.
- DAfStb Heft 528** Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V., Heft 528: Schubtragfähigkeit von Betonergänzungen an nachträglich aufgerauten Betonoberflächen bei Sanierungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen. Berlin, 2002.
- DAfStb -RiLi VGM** Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V., -RiLi VGM: Herstellung und Verwendung von zementgebundenem Vergussbeton und Vergussmörtel. Berlin, 2011.
- DAfStb Heft 591** Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V., Heft 591: Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung. Berlin, 11/2011.
- DAfStb -RiLi VBgB** Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V., -RiLi VBgB: Verstärken von Bauteilen mit geklebter Bewehrung. Berlin, 2012.
- Z-31.10-182 6/2014** DIBt: Z-31.10-182 6/2014: Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit TUDALIT (Textilbewehrter Beton), 6/2014.
- DIN EN ISO 4760: 1982-06** DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 4760: 1982-06: Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem. Berlin, 1982-06.
- ENV 1992-1-6: 1994** DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: ENV 1992-1-6: 1994: Eurocode 2: Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Regeln -Tragwerke aus unbewehrtem Beton. Berlin, 1994.
- DIN EN 447: 2008-01** DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 447: 2008-01: Einpressmörtel für Spannglieder - Allgemeine Anforderungen. Berlin, 2008-01.
- DIN EN 446: 2008-01** DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 446: 2008-01: Einpressmörtel für Spannglieder - Einpressverfahren. Berlin, 2008-01.
- DIN EN 445: 2008-01** DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 445: 2008-01: Einpressmörtel für Spannglieder - Prüfverfahren. Berlin, 2008-01.
- DIN 1045-1: 2008-08** DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 1045-1: 2008-08: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Berlin, 2008-08.

- DIN EN 12390-3: 2009-07** DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 12390-3: 2009-07: Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern. Berlin, 2009-07.
- DIN 488-1: 2009-08** DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 488-1: 2009-08: Betonstahl - Teil 1: Stahlsorten, Eigenschaften, Kennzeichnung. Berlin, 2009-08.
- DIN EN 12350-7: 2009-08** DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 12350-7: 2009-08: Prüfung von Frischbeton – Teil 7: Luftgehalt - Druckverfahren. Berlin, 2009-08.
- DIN 18218: 2010-01** DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 18218: 2010-01: Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen. Berlin, 2010-01.
- DIN EN 1990: 2010-12** DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 1990: 2010-12: Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung. Berlin, 2010-12.
- DIN EN 12350-8: 2010-12** DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 12350-8: 2010-12: Prüfung von Frischbeton – Teil 8: Selbstverdichtender Beton - Setzfließversuch. Berlin, 2010-12.
- DIN EN 1992-1-1: 2011-01** DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: 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. Berlin, 2011-01.
- DIN EN ISO 15630-1: 2011-02** DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 15630-1: 2011-02: Stähle für die Bewehrung und das Vorspannen von Beton – Prüfverfahren – Teil 1: Bewehrungsstäbe, -walzdraht und -draht. Berlin, 2011-02.
- DIN EN 12350-6: 2011-03** DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 12350-6: 2011-03: Prüfung von Frischbeton – Teil 6: Frischbetonrohddichte. Berlin, 2011-03.
- DIN EN ISO 4287: 2013-4** DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 4287: 2013-4: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit. Berlin, 2013-4.
- DIN EN ISO 6892-1: 2014-06** DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 6892-1: 2014-06: Metallische Werkstoffe-Zugversuch. Berlin, 2014-06.
- DIN 18551: 2014-08** DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 18551: 2014-08: Spritzbeton - Nationale Anwendungsregeln zur Reihe DIN EN 14487 und Regeln für die Bemessung von Spritzbetonkonstruktionen. Berlin, 2014-08.
- Drucker und Prager 1952** Drucker, D. C.; Prager, W.: Soil mechanics and plastic analysis or limit design. In: Quarterly Journal of Applied Mathematics, 1952, S. 157–165.

- Eligehausen 1979** Eligehausen, R.: Übergreifungsstöße zugbeanspruchter Rippenstäbe mit geraden Stabenden. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Berlin [West] [u.a.], 1979.
- Fiebrich 1994** Fiebrich, M.: Grundlagen der Adhäsionskunde. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. (Hrsg.): Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen unter Verwendung von Kunststoffen. Sachstandsbericht. Berlin, 1994.
- Fingerloos et al 2012** Fingerloos, F.; Hegger, J.; Zilch, K.: Eurocode 2 für Deutschland, DIN EN 1992-1-1 Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1 Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau mit nationalem Anhang ; kommentierte Fassung. Bauwesen. Berlin, 2012.
- Fitik 2012** Fitik, B.: Ermüdungsverhalten von ultrahochfestem Beton (UHPC) bei zyklischen Beanspruchungen im Druck-Zug-Wechselbereich. Dissertation. München, 2012.
- Franke und Deckelmann 1989** Franke, L.; Deckelmann, G.: Das Tragverhalten der Grenzfläche von Fugen. Bautechnik, Vol. 66, Nr. 1, 1989, S. 7–12.
- Franz et al 1980** Franz, G.; Hampe, E.; Schäfer, K.: Konstruktionslehre des Stahlbetons, Teil A: Baustoffe. Berlin u.a., 1980.
- Gross et al 2014** Gross, D.; Hauger, W.; Schnell, W.: Technische Mechanik 2, Elastostatik. Springer-Lehrbuch. Berlin [u.a.], 2014.
- Gross und Seelig 2011** Gross, D.; Seelig, T.: Bruchmechanik, Mit einer Einführung in die Mikromechanik. Berlin, 2011.
- Habenicht 2006** Habenicht, G.: Kleben, Grundlagen, Technologien, Anwendungen. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg, 2006.
- Hatfield und Azizinamini 1996** Hatfield, E.; Azizinamini, A.: Minimum Stirrups Requirements for Tension Splices in High Strength Concrete. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Utilization of High-strength/High-performance Concrete, 1996, S. 1145–1154.
- Hauser 1999** Hauser, S.: Hochfester Fasermattenbeton. SIMCON neu / DUCON. Dissertation. Darmstadt, 1999.
- Hauser und Wörner 1999a** Hauser, S.; Wörner, J. D.: DUCON, ein innovativer Hochleistungsbeton. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 94, Nr. 2, 1999, S. 66–75.
- Hauser und Wörner 1999b** Hauser, S.; Wörner, J. D.: DUCON, ein innovativer Hochleistungsbeton (Fortsetzung aus Heft 2/1999 und Schluß). Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 94, Nr. 3, 1999, S. 141–145.
- Heese 2013** Heese, C.: Simulation des rheologischen Verhaltens von zementgebundenen Feinkornsystemen. Dissertation. Kaiserslautern, 2013.

- Hegger et al 1999** Hegger, J.; Görtz, S.; Beutel, R.; König, G.; Schenck, G.; Kliver, J.: Überprüfung und Vereinheitlichung der Bemessungsansätze für querkraftbeanspruchte Stahlbeton- und Spannbetonbauteile aus normalfesten und hochfesten Beton nach DIN 1045-1, Abschlußbericht DIBt - Forschungsvorhabens IV 1-5-876 / 98, 1999.
- Jesse und Kutzner 2013** Jesse, F.; Kutzner, T.: Digitale Photogrammetrie in der Bautechnik. Bautechnik, Vol. 90, Nr. 11, 2013, S. 703–714.
- Joas und Weber 2012** Joas, T.; Weber, M.: Experimentelle und rechnerische Untersuchung des Lastverformungsverhaltens von dünnwandigen Bauteilen aus mikro- und textilbewehrtem Hochleistungsbeton unter Zug- und Biegebeanspruchung. Studienarbeit. Kaiserslautern, 2012.
- Juhart 2005** Juhart, J.: Zur Anwendung von ultrahochfestem Faserbeton (UHPFRC) in Verbundkonstruktionen. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 100, S2, 2005, S. 113–116.
- Keil und Schmitt 2010** Keil, C.; Schmitt, A.: Statische und konstruktive Bearbeitung eines Weinberghauses aus Hochleistungsbeton. Studienarbeit. Kaiserslautern, 2010.
- Kobler 2013** Kobler, M.: Ein Implantat zur Einleitung konzentrierter Lasten in Bauteile aus ultra-hochfestem Beton. Dissertation. Stuttgart, 2013.
- Kohlmeyer und Oster 2012** Kohlmeyer, C.; Oster, S.: Zugbeanspruchte Klebverbindungen für Platten- und Scheibenbauteile aus hochfestem Beton. In: N. Gebbeken, S. Holzer, M. Keuser, Mangerig, Petersen, C., G. Siebert, Ch. Thienel (Hrsg.): Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser. München, S. 273–279.
- Kohlmeyer und Oster 2014** Kohlmeyer, C.; Oster, S.: Klebverbindungen für Platten- und Scheibenbauteile aus hochfestem Beton. In: Silke Scheerer, Manfred Curbach (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton. Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, 2014, S. 140–151.
- Krampeharex 2014** Krampeharex: Produktdatenblatt Microfaser DM 6/017, 2014.
- Kurz 1997** Kurz, W.: Ein mechanisches Modell zur Beschreibung des Verbundes zwischen Stahl und Beton. Dissertation. Darmstadt, 1997.
- Lehmann 2004** Lehmann, S.: Untersuchungen zur Bewertung von Verbundbauteilen aus Brettstapelelementen im Flächenverbund mit mineralischen Deckschichten. Dissertation. Weimar, 2004.
- Lenz 2012** Lenz, P.: Beton-Beton-Verbund Potenziale für Schubfugen. Dissertation. München, 2012.
- Leonhardt 1957** Leonhardt, F.: On the Need to Consider the Influence of Lateral Stresses on Bond. In: Proceedings RILEM Symposium on Bond and Crack Formation in Reinforced Concrete, 1957.



- Lettow 2006** Lettow, S.: Ein Verbundelement für nichtlineare Finite Elemente Analysen - Anwendung auf Übergreifungsstöße. Dissertation. Stuttgart, 2006.
- Lüders 1988** Lüders, F.: Beitrag zur Untersuchung des Verbundverhaltens unterschiedlicher Betone. Dissertation. Weimar, 1988.
- Mühlbach 2011** Mühlbach, S.: Einpressmörtel haben entscheidenden Anteil an der Dauerhaftigkeit von Spannbetonkonstruktionen mit nachträglichem Verbund. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 106, Nr. 3, 2011, S. 100–105.
- Mühlbauer 2012** Mühlbauer, C.: Fügen von Bauteilen aus ultrahochfestem Beton (UHPC) durch Verkleben. Dissertation. München, 2012.
- Mühlbauer und Zilch 2007** Mühlbauer, C.; Zilch, K.: Joining of Ultra High Performance Concrete (UHPC) Members by Gluing. In: Zingoni, Alphose (Hrsg.): Proceedings of the Third international Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, 2007.
- Müller 2009** Müller, A.: Zum Zug- und Schubtragverhalten von Betonfugen. Dissertation. München, 2009.
- Müller 2015** Müller, F.: Selbsttragende Sandwichelemente mit Deckschichten aus Hochleistungsbeton und einem Kern aus extrudiertem Polystyrol. Dissertation. Kaiserslautern, 2015.
- Olsen 1990** Olsen, N. H.: The strength of overlapped deformed tensile reinforcement splices in high strength concrete. Ph. D. Thesis. Lyngby, 1990.
- Ortlepp 2007** Ortlepp, R.: Untersuchungen zur Verbundverankerung textildbewehrter Feinkornverstärkungsschichten für Betonbauteile. Dissertation. Dresden, 2007.
- Ortlepp 2014** Ortlepp, R.: Sanierung und Verstärkung von Betonbauteilen. Habilitation. Dresden, 2014.
- Oster und Kohlmeyer 2013** Oster, S.; Kohlmeyer, C.: Untersuchungen zur Formulierung eines zweiaxialen Bruchkriteriums für Klebfugen zwischen Betonbauteilen. In: Rolf Breitenbücher, Peter Mark (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAfStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium in Bochum, 2013, S. 59–65.
- Oster und Kohlmeyer 2014** Oster, S.; Kohlmeyer, C.: Experimental investigations on a finger joint for structural elements of high performance concrete. In: J. Bastien, N. Rouleau, M. Fiset, M. Thomassin (Hrsg.): Proceedings of the 10th fib international PhD Symposium in Civil Engineering, Research Centre on Concrete Infrastructure (CRIB), 2014, S. 315–320.
- Ottosen 1977** Ottosen, N. S.: A Failure Criterion for Concrete. In: Journal of the Engineering Mechanics Division, 1977, S. 527–535.
- Piegeler et al 2009** Piegeler, D.; Pak, D.; Geßler, A.; Feldmann, M.; Schoen, J.; Reisinger, U.: Kleben textildbewehrter Betonbauteile. In: 4th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS4), 2009, S. 389–408.

- Ramm 2012** Ramm, W.: Über die Anfänge des Eisenbetonbaus in Deutschland und die Pioniere der ersten Jahre. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 107, Nr. 5, 2012, S. 335–356.
- Randl und Gusella 2011** Randl, N.; Gusella, O.: Tragverhalten von Verbundankern in hoch- und ultrahochfestem Beton. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 106, Nr. 8, 2011, S. 561–573.
- Randl und Wicke 2000** Randl, N.; Wicke, M.: Schubübertragung zwischen Alt- und Neubeton. Experimentelle Untersuchungen, theoretischer Hintergrund und Bemessungsansatz. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 95, Nr. 8, 2000, S. 461–473.
- Reinecke 2004** Reinecke, R.: Haftverbund und Rißverzahnung in unbewehrten Betonschubfugen. Dissertation. München, 2004.
- Reinecke 2005** Reinecke, R.: Die Rolle der Oberflächenrauheit in der Altbetonsanierung. In: Massivbau in der ganzen Breite. Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Konrad Zilch, S. 475–485.
- Ringenspacher 2015** Ringenspacher, J.: Experimentelle Untersuchungen zur Tragfähigkeit einer Keilzinkenverbindung für mikrobewehrte Bauteile aus Hochleistungsbeton. Diplomarbeit. Kaiserslautern, 2015.
- Ritter 2014** Ritter, R.: Verformungsverhalten von Ultrahochleistungsbeton unter mehraxialer Beanspruchung. Dissertation. Dresden, 2014.
- Santos et al 2007** Santos, P.; Jülio, E.; Silva, V.: Correlation between concrete-to-concrete bond strength and the roughness of the substrate surface. In: Construction and Building Materials, 2007, S. 1688–1695.
- Schäfer et al 1996** Schäfer, H.; Block, K.; Drell, R.: Oberflächenrauheit und Haftverbund. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. (Hrsg.): Oberflächenrauheit und Haftverbund. Berlin, 1996, S. 79–132.
- Schikorr 2005** Schikorr, W.: Fügen durch Kleben. Vorlesungsskript. Stralsund, 2005.
- Schlaich und Schäfer 1998** Schlaich, J.; Schäfer, K.: Konstruieren im Stahlbetonbau. In: Josef Eibl (Hrsg.): Beton-Kalender 1998. Taschenbuch für Beton-Stahlbeton- und Spannbetonbau sowie die verwandten Fächer. Berlin, 1998, S. 721–896.
- Schmidt et al 2007** Schmidt, M.; Krelaus, R.; Teichmann, T.; Leutbecher, T.; Fehling, E.: Fügen von Bauteilen aus UHPC durch Kleben, Voruntersuchungen und Anwendung bei der Gärtnerplatzbrücke in Kasse. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 102, Nr. 10, 2007, S. 681–690.
- Schmidt 2008** Schmidt, M.: Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Berlin [u.a.], 2008.

- Schnell et al 2013** Schnell, J.; Kohlmeyer, C.; Bayer, D.; Müller, F.: Werkstoffgerechtes Konstruieren mit Hochleistungsbetonen. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 108, Nr. 6, 2013, S. 404–413.
- Schnellenbach-Held und Prager 2011** Schnellenbach-Held, M.; Prager, M.: Mikrobewehrter Ultrahochleistungsbeton. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 106, Nr. 11, 2011, S. 770–778.
- Schoening et al 2013** Schoening, J.; Della Pietra, R.; Hegger, J.; Tue, N. V.: Verbindungen von Fertigteilen aus UHPC. Bautechnik, Vol. 90, Nr. 5, 2013, S. 304–313.
- Schubert 2007** Schubert, W.: Felsmechanik und Tunnelbau. Skriptum. Graz, 2007.
- Schürmann 2007** Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Mit 39 Tabellen. VDI. Berlin, Heidelberg, New York, NY, 2007.
- Sobek et al 2011** Sobek, W.; Mittelstädt, J.; Kobler, M.: Fügung schlanker Bauteile. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 106, Nr. 11, 2011, S. 779–784.
- Spieth 2005** Spieth, H. A.: Bemessung und Anwendung von nachträglich eingemörtelten Bewehrungsanschlüssen. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 100, S1, 2005, S. 74–77.
- Tepfers 1973** Tepfers, R.: A theory of Bond Applied Tensile Reinforcement for Deformed Bars. Report 73-2. Göteborg, 1973.
- Tschegg et al 2000** Tschegg, E. K.; Catharin, A.; Stanzl-Tschegg, E.: Healing behaviour of reflective cracks. In: Abd El H., Taylor, Mohamed (Hrsg.): Proceedings PRO11. Research in Practice, 2000, S. 47–56.
- Weibull 1939** Weibull, W.: A statistical theory of the strength of materials. Dissertation, 1939.
- Wingenfeld 2013** Wingenfeld, D.: Fügetechnische Konstruktionslösungen für Bauteile aus ultrahochfestem Beton (UHPC). Dissertation. München, 2013.



Anhang

A. Versuchsreihe zur Optimierung des Haftverbunds

Zugversuch		Zugversuch						
		[mm]						
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	-						
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]						
	Klebfäche:		monolithischer Probekörper					
	Vorbehandlung:		wassergelagert					
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher					
	Versuch:		Z1M/ONO-					
			01	02	03	04	05	06
	Alter	[d]	52					
Materialigenschaften	HPC-2	Druckfestigkeit $f_{cm,t}^1$ :	125,8					
		Zugfestigkeit $f_{cm,t}^1$ :	14,0					
HPM-3		Alter:						
		Druckfestigkeit $f_{am,t}^1$ :						
Materialergebnisse		Zugfestigkeit $f_{am,t}^1$ :						
		Klebschichtdicke $t_{vor,t}^2$ :						
		Neigungswinkel $\alpha_{vor,t}^2$ :						
		Querschnittsfläche $A_{vor,t}^2$ :	798,9	804,0	794,9	875,4	830,3	797,9
		Versagenslast $F_u^2$ :	8440	8870	7550	9640	9390	9620
		Versagensart <sup>2</sup> :	b	b	b	b	b	b
		Haftfestigkeit $f_{jt,surf}^3$ :	10,56	1103	9,498	1101	1131	12,06
		Mittelwert $f_{jm,surf}^3$ :	10,91					
		Variationskoeffizient:	7,79					
		Haftfestigkeit $f_{jktz,surf}^3$ :	8,93					

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=kohäsiv; b=Betoversagen allgemein; bf=Betoversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Haftzugversuch HZ1										
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	3							
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	0							
	Klebefläche:		gewaschen							
	Vorbehandlung:		trocken							
Nachbehandlung:			trocken							
Versuch:										
HZ1-GW-D3-HPM1D/D										
Materialigenschaften	Alter	[d]	48							
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	138,4							
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	10,6							
	Alter:	[d]	27							
Materialergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	127,7							
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	15,7							
	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	3,9	3,5	-	3,5	-	3,5	-	3,4
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}$ :	[°]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	776,1	780,0	0,0	772,2	0,0	766,4		
	Versagenslast $F_{ur}$ :	[N]	400	200	-	270	-	630		
	Versagensart <sup>2</sup> :		a	a(k)	x	a	x	a(k)		
	Haftfestigkeit $f_{l,surf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,52	0,26	-	0,35	-	0,82		
Mittelwert $f_{lmsurf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,49								
Variationskoeffizient:	[%]	51,2								
Haftfestigkeit $f_{lk,surf}$ <sup>3</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	-0,18								

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=koäsiv; b=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Haftzugversuch HZ1										
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	3							
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	0							
	Klebefläche:		gewaschen							
	Vorbehandlung:		nass							
Nachbehandlung:			trocken							
Versuch:										
HZ1-GW-D3-HPM1W/D										
Materialigenschaften	Alter	[d]	48							
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	138,4							
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	10,6							
	Alter:	[d]	27							
Materialergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	127,7							
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	15,7							
	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	3,2	3,8	3,3	3,2	3,1	3,5		
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}$ :	[°]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	793,9	794,0	788,0	802,0	780,1	784,0		
	Versagenslast $F_{ur}$ :	[N]	2080	1480	1210	1640	1430	1840		
	Versagensart <sup>2</sup> :		k(a)	k(a)	k(a)	k(a)	k(a)	k		
	Haftfestigkeit $f_{l,surf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,62	1,86	1,54	2,04	1,83	2,35		
Mittelwert $f_{lmsurf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,04								
Variationskoeffizient:	[%]	19,09								
Haftfestigkeit $f_{lk,surf}$ <sup>3</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	1,13								

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=koäsiv; b=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Haftzugversuch HZ1												
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	3									
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	0									
	Klebfläche:		gewaschen									
	Vorbehandlung:		feucht									
Nachbehandlung:			feuchte Tücher									
Versuch:			HZ1-GW-D3-HPM HB/F									
Materialigenschaften	Alter	[d]	48									
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	138,4									
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	10,6									
	Alter:	[d]	27									
Versuchsergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	127,7									
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	15,7									
	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	4,0	4,2	4,4	4,5	-	4,2				
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}$ :	[°]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
Querschnittsfläche $A_{vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	795,9	742,7	794,0	779,9	0,0	802,0					
Versagenslast $F_{ur}$ :	[N]	2280	2010	510	1100	x	1390					
Versagensart <sup>2</sup> :		a	a	a	a	-	k(a)					
Haftfestigkeit $f_{l,surf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,86										
Mittelwert $f_{l,surf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	187										
Variationskoeffizient:	[%]	49,45										
Haftfestigkeit $f_{lk,surf}$ <sup>3</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	-0,41										

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=koheisiv; b=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Haftzugversuch HZ1												
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	3									
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	0									
	Klebfläche:		gewaschen									
	Vorbehandlung:		nass									
Nachbehandlung:			feuchte Tücher									
Versuch:			HZ1-GW-D3-HPM 1/WF									
Materialigenschaften	Alter	[d]	48									
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	138,4									
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	10,6									
	Alter:	[d]	27									
Versuchsergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	127,7									
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	15,7									
	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	3,7	3,4	3,4	3,5	3,2	3,1				
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}$ :	[°]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
Querschnittsfläche $A_{vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	832,3	818,1	816,0	797,9	795,9	804,0					
Versagenslast $F_{ur}$ :	[N]	2320	2350	2090	2040	2170	2140					
Versagensart <sup>2</sup> :		a	a	a	a	a	a					
Haftfestigkeit $f_{l,surf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,79	2,87	2,56	2,56	2,73	2,66					
Mittelwert $f_{l,surf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,69										
Variationskoeffizient:	[%]	4,67										
Haftfestigkeit $f_{lk,surf}$ <sup>3</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,40										

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=koheisiv; b=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Haftzugversuch HZ1													
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	3										
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	0										
	Klebefläche:		gewaschen										
	Vorbehandlung:		trocken										
	Nachbehandlung:		nass										
Versuch:		HZ1-GW-D3-HPM1D/W											
Materialeigenschaften	Alter	[d]	48										
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	138,4										
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	10,6										
	Alter:	[d]	27										
Materialergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	127,7										
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	15,7										
	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	2,3	4,7	3,8	3,6	3,7	4,0					
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}$ :	[°]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	734,4	813,9	799,8	838,4	805,8	785,5					
	Versagenslast $F_{ur}$ :	[N]	940	330	470	830	830	320					
	Versagensart <sup>2</sup> :		a(k)										
	Haftfestigkeit $f_{lsurf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	128	0,41	0,59	0,99	103	0,41					
Mittelwert $f_{lmsurf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,78											
Variationskoeffizient:	[%]	46,82											
Haftfestigkeit $f_{lksurf}$ <sup>3</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	-0,07											

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=koheisiv; b=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Haftzugversuch HZ1													
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	3										
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	0										
	Klebefläche:		gewaschen										
	Vorbehandlung:		nass										
	Nachbehandlung:		nass										
Versuch:		HZ1-GW-D3-HPM1W/W											
Materialeigenschaften	Alter	[d]	48										
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	138,4										
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	10,6										
	Alter:	[d]	27										
Materialergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	127,7										
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	15,7										
	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	3,9	3,9	3,3	4,2	4,0	3,9					
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}$ :	[°]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	809,9	811,8	820,0	776,2	800,0	798,0					
	Versagenslast $F_{ur}$ :	[N]	1740	1530	1720	1650	1370	1370					
	Versagensart <sup>2</sup> :		a(k)										
	Haftfestigkeit $f_{lsurf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,16	1,88	2,0	2,12	2,39	1,64					
Mittelwert $f_{lmsurf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,05											
Variationskoeffizient:	[%]	12,45											
Haftfestigkeit $f_{lksurf}$ <sup>3</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	1,45											

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=koheisiv; b=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen



Haftzugversuch HZ1												
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	1									
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	0									
	Klebfläche:		Schalglatt									
	Vorbehandlung:		nass									
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher									
Versuch:			HZ1-SG-D1-HPM2									
Materialeigenschaften	Alter	[d]	70									
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	125,3									
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,5									
	Alter:	[d]	27									
Versuchsergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	107,1									
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	7,3									
	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	12	2,5	2,0	1,5	-	-	-	-	-	-
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}$ :	[°]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	798,0	826,1	804,0	786,0	786,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Versagenslast $F_{ur}$ :	[N]	1992	5736	1848	2184	x	x	-	-	-	-
	Versagensart <sup>2</sup> :		a(k)	a	a+k	a+k	-	-	-	-	-	-
	Haftfestigkeit $f_{l,surf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,50	6,94	2,30	2,78	-	-	-	-	-	-
	Mittelwert $f_{l,surf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	3,63									
	Variationskoeffizient:	[%]	61,2									
Haftfestigkeit $f_{lk,surf}$ <sup>3</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	-2,32										

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=koäsiv; b=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilverwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Haftzugversuch HZ1												
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	3									
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	0									
	Klebfläche:		Schalglatt									
	Vorbehandlung:		nass									
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher									
Versuch:			HZ1-SG-D3-HPM 2									
Materialeigenschaften	Alter	[d]	70									
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	125,3									
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,5									
	Alter:	[d]	27									
Versuchsergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	107,1									
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	7,3									
	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	3,0	2,8	4,0	3,1	3,2	-	-	-	-	-
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}$ :	[°]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	812,0	808,0	830,3	832,0	784,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Versagenslast $F_{ur}$ :	[N]	5952	3000	5208	2252	2064	x	x	-	-	-
	Versagensart <sup>2</sup> :		a	a+k	a	a	a	a	-	-	-	-
	Haftfestigkeit $f_{l,surf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	7,33	3,71	6,27	2,71	2,63	-	-	-	-	-
	Mittelwert $f_{l,surf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	4,53									
	Variationskoeffizient:	[%]	47,42									
Haftfestigkeit $f_{lk,surf}$ <sup>3</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	-0,76										

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=koäsiv; b=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilverwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Haftzugversuch HZ1										
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	1							
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	0							
	Kleblfläche:		Geschnitten							
	Vorbehandlung:		nass							
Nachbehandlung:			feuchte Tücher							
Versuch:										
HZ1-GS-D1HPM2										
Materialeigenschaften	Alter	[d]	69							
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	14,19							
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,0							
	Alter:	[d]	27							
Materialergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	107,1							
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	7,3							
	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	2,0	2,1	2,3	1,2	-	-	-	-
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}$ :	[°]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	806,0	717,8	848,5	840,3	0,0	0,0	0,0	0,0
	Versagenslast $F_{ur}$ :	[N]	9792	3744	7392	8832	x	x	-	-
	Versagensart <sup>2</sup> :		b	a	a(k)	a(k)	-	-	-	-
	Haftfestigkeit $f_{l,surf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,15	5,22	8,71	10,51	-	-	-	-
	Mittelwert $f_{lmsurf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	9,15							
	Variationskoeffizient:	[%]	32,50							
Haftfestigkeit $f_{lk,surf}$ <sup>3</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	1,18								

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=koheisiv; b=Betonversagen allgemein; bf=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Haftzugversuch HZ1										
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	1							
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	0							
	Kleblfläche:		Wasserstrahgeschnitten							
	Vorbehandlung:		nass							
Nachbehandlung:			feuchte Tücher							
Versuch:										
HZ1-WSG-D1HPM2										
Materialeigenschaften	Alter	[d]	69							
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	14,19							
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,0							
	Alter:	[d]	27							
Materialergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	107,1							
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	7,3							
	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	2,0	2,5	12	18	-	-	-	-
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}$ :	[°]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	836,0	795,9	782,0	819,7	0,0	0,0	0,0	0,0
	Versagenslast $F_{ur}$ :	[N]	4488	2928	3144	8784	x	x	-	-
	Versagensart <sup>2</sup> :		a(k)	a(k)	a(k)	a(k)	-	-	-	-
	Haftfestigkeit $f_{l,surf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	5,37	3,68	4,02	10,72	-	-	-	-
	Mittelwert $f_{lmsurf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	6,59							
	Variationskoeffizient:	[%]	55,76							
Haftfestigkeit $f_{lk,surf}$ <sup>3</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	-4,98								

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; b=Betonversagen allgemein; bf=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Haftzugversuch HZ1											
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	3								
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	0								
	Klebfläche:		Wasserstrahligeschnitten								
	Vorbehandlung:		nass								
Nachbehandlung:			feuchte Tücher								
Versuch:											
			01	02	03	04	05	06			
			HZ1WSG-D3-HPM2								
Materialeigenschaften	Alter	[d]	69								
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	14,19								
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,0								
	Alter:	[d]	27								
Materialergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	107,1								
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	7,3								
	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	2,8	2,5	2,8	2,8	2,8	4,1			
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}$ :	[°]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	835,3	798,0	785,9	792,0	799,5	0,0			
	Versagenslast $F_{ur}$ :	[N]	4462	3024	4584	5496	4704	x			
	Versagensart <sup>2</sup> :		a(k)	a	a	a(k)	a(k)	-			
	Haftfestigkeit $f_{l,surf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	5,34	3,79	5,83	6,94	5,88	-			
	Mittelwert $f_{l,surf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	5,56								
	Variationskoeffizient:	[%]	20,64								
Haftfestigkeit $f_{lk,surf}$ <sup>3</sup> :		[N/mm <sup>2</sup> ]	2,73								

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=koäsiv; b=Betonversagen im allgemeinen, bf=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Haftzugversuch HZ1										
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	1							
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	0							
	Klebfläche:		maximal gesandstahl							
	Vorbehandlung:		nass							
Nachbehandlung:			feuchte Tücher							
Versuch:										
			01	02	03	04	05	06		
			HZ1SS2-D1-HPM2							
Materialeigenschaften	Alter	[d]	70							
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	125,3							
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,5							
	Alter:	[d]	27							
Materialergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	107,1							
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	7,3							
	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	2,0	2,0	2,1	1,4	2,0			
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}$ :	[°]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	833,7	784,0	836,2	830,2	820,0	0,0		
	Versagenslast $F_{ur}$ :	[N]	8112	6528	5448	8376	8712	x		
	Versagensart <sup>2</sup> :		b	a	a+k	a+k	a+k	-		
	Haftfestigkeit $f_{l,surf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	9,73	8,33	6,52	10,09	10,62	-		
	Mittelwert $f_{l,surf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	9,06							
	Variationskoeffizient:	[%]	18,28							
Haftfestigkeit $f_{lk,surf}$ <sup>3</sup> :		[N/mm <sup>2</sup> ]	4,98							

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=koäsiv; b=Betonversagen im allgemeinen, bf=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Haftzugversuch HZ 1										
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	3							
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	0							
	Klebfläche:		maximal gesandstrahlt							
	Vorbehandlung:		nass							
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher							
Versuch:			HZ1-SS2-D3-HPM2							
Materialigenschaften	Alter	[d]	70							
	HPC-2		Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	125,3					
			Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,5					
Materialergebnisse	HPM-2		Alter:	[d]	27					
			Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	107,1					
			Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	7,3					
			Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	2,7	3,8	3,0	3,0	3,0	-
		Neigungswinkel $\alpha_{vorh}$ :	[°]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		Querschnittsfläche $A_{vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	760,5	799,7	798,0	873,4	0,0	0,0	0,0
		Versagenslast $F_{ur}$ :	[N]	6792	5952	5160	5880	x	x	x
		Versagensart <sup>2</sup> :		b	a	k	a	-	-	-
		Haftfestigkeit $f_{fl,surf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	8,93	7,44	6,47	6,73	-	-	-
		Mittelwert $f_{fl,surf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	7,39						
		Variationskoeffizient:	[%]	14,95						
		Haftfestigkeit $f_{fl,surf}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	4,43						

<sup>1</sup>Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhasiv; k=kohasiv; b=Betonversagen allgemein; b=Betonversagen im fugenmahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

**B. Charakterisierung der Klebflächen**

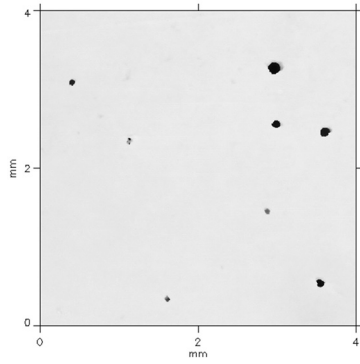


Abb. B.1: SG-01

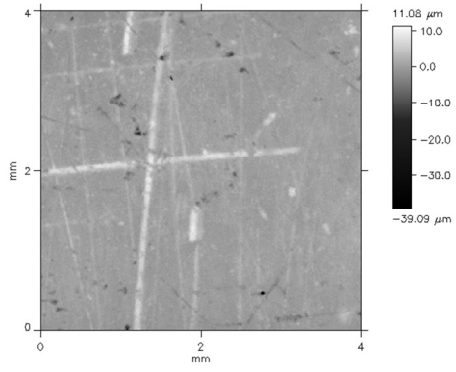


Abb. B.2: SG-02

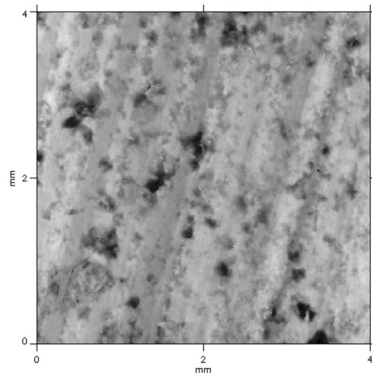


Abb. B.3: GS-01

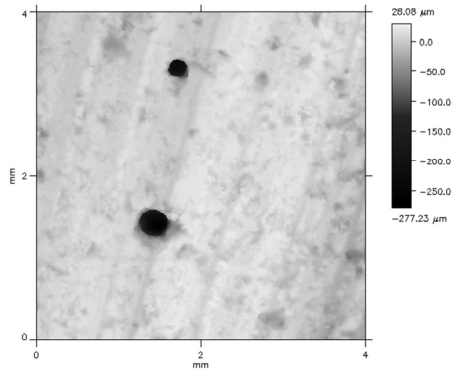


Abb. B.4: GS-02

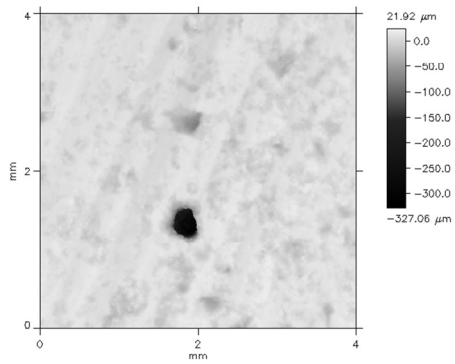


Abb. B.5: GS-03

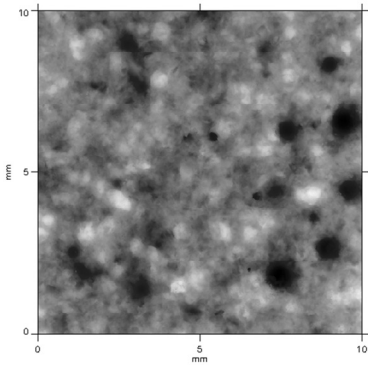


Abb. B.6: SS1-01

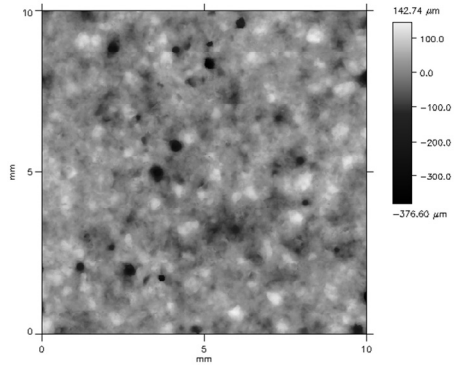


Abb. B.7: SS1-02

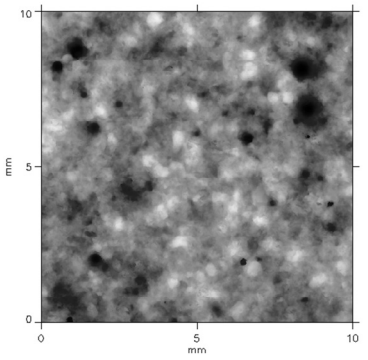


Abb. B.8: SS1-03

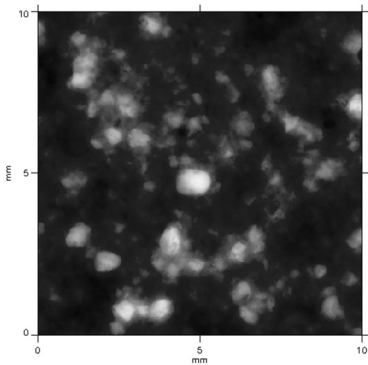


Abb. B.9: SS2-01

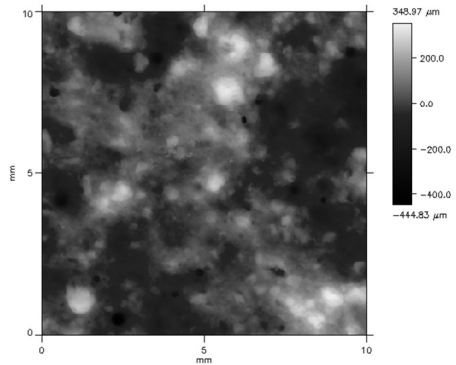


Abb. B.10: SS2-02

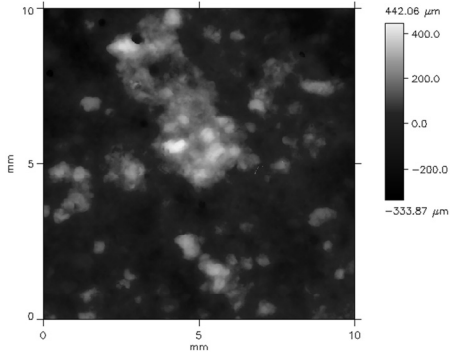


Abb. B.11: SS2-03

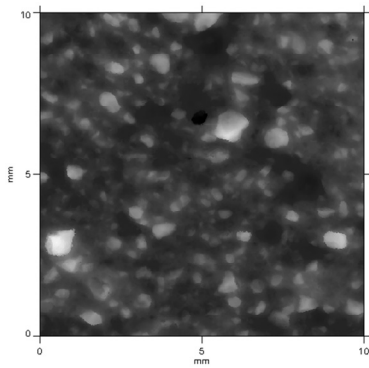


Abb. B.12: GW-01

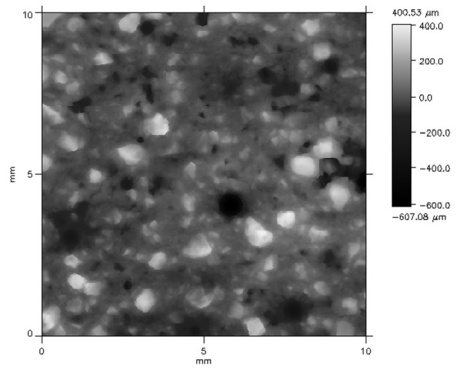


Abb. B.13: GW-02

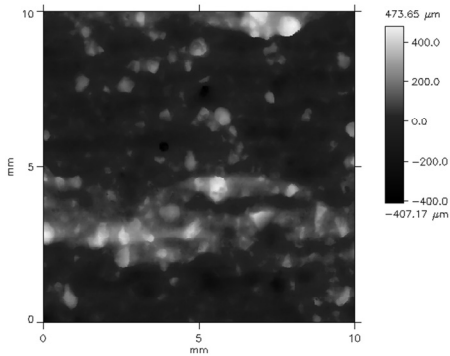
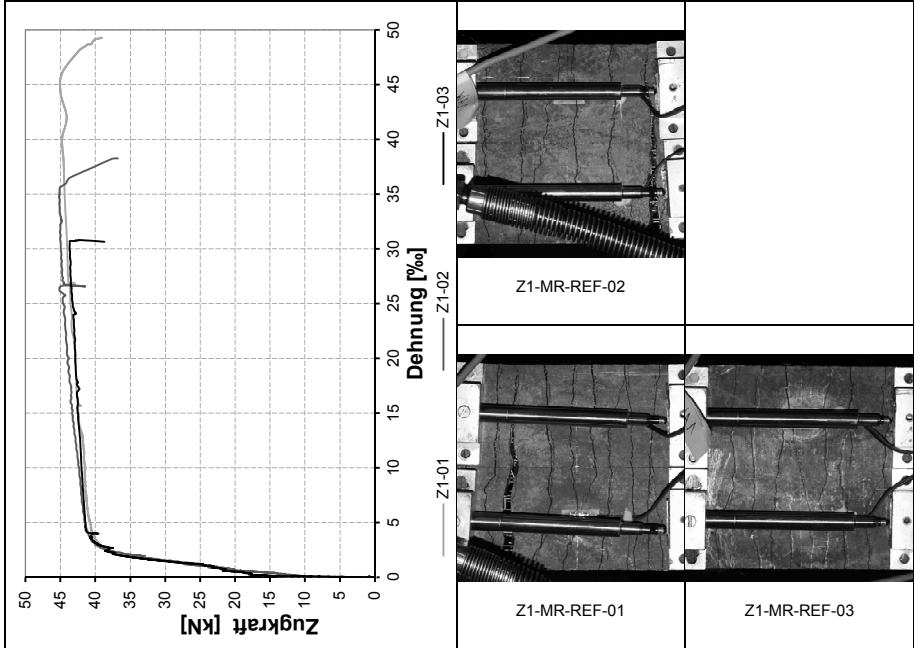


Abb. B.14: GW-03



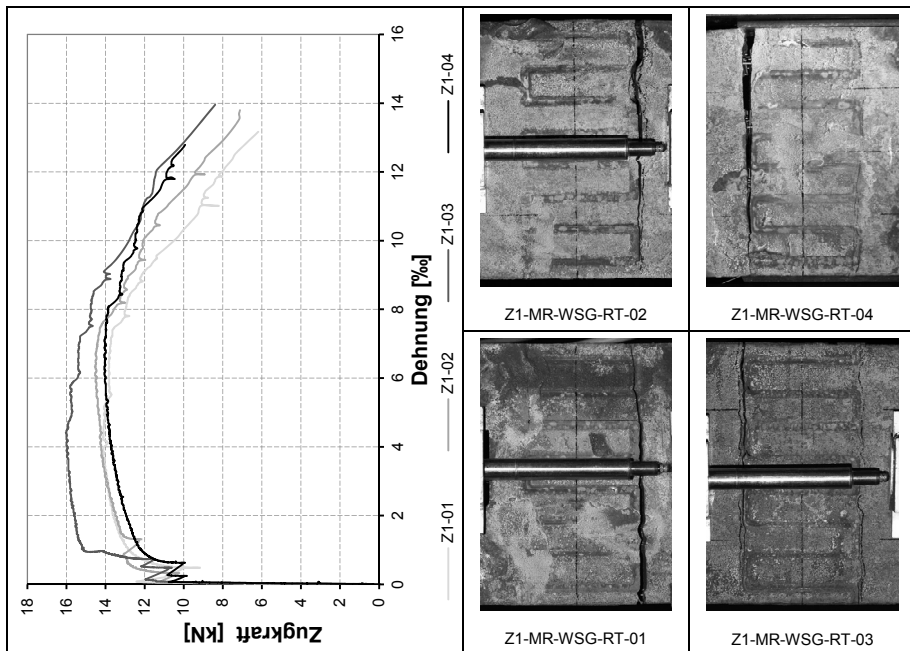


C. Tastversuche an Klebfugenvarianten



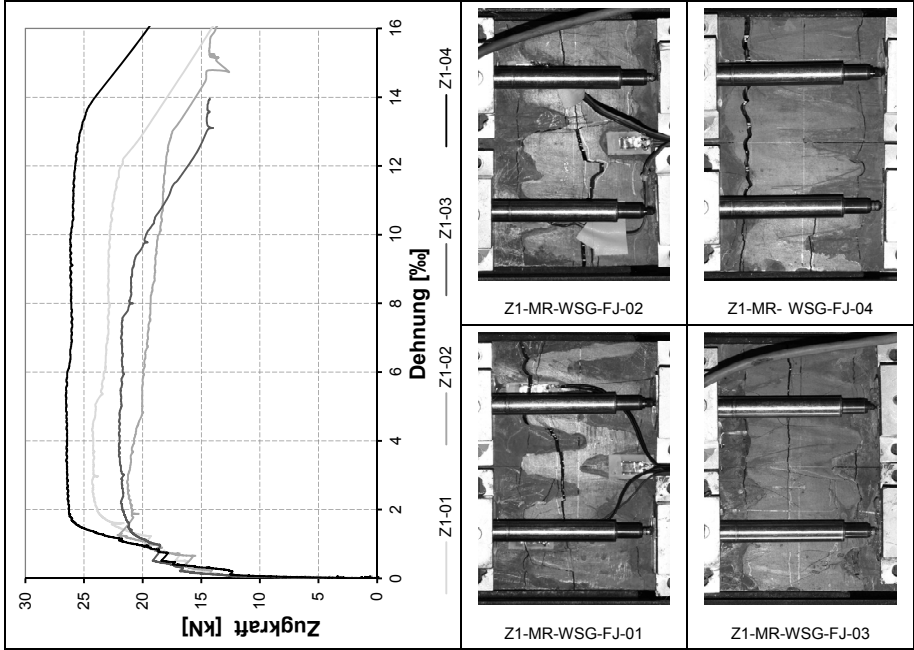
Zugversuch	
Klebschichtdicke t:	[mm] 3
Bewehrungsart:	Mikrobewehrung
Herstellungsmethode:	wasserstrahligeschnitten
Fugengeometrie:	keine; Referenzproblekö rper
Versuch:	Z1-MR-REF
Alter	01 02 03 -
Alter	39
Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 125,5
Zugfestigkeit $f_{t,airfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 12,5
Alter:	x
Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] x
Zugfestigkeit $f_{t,airfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] x
Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm] 3,3 3,1 3,0 3,2
Querschnittsfläche $A_{c,vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ] 4279 4526 4260 -
Querschnittsfläche $A_{s,airfl}^3$ :	[mm <sup>2</sup> ] 90
Versagensart <sup>2</sup> :	bew bew bew
Spannung $\sigma_{cr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 3,18 2,59 3,64
Streckgrenze $\sigma_{s,y}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 392,2 411 392,2
Dehnung $\epsilon_{s,y}$ :	[%] 2,1 2,1 2,0
Streckgrenze $\sigma_{s,y,mt}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 398,5
Rissbreite $w_{vorh}^4$ :	[mm] ~0,05
Spannung $\sigma_{s,max}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 496,67 501,11 485,56
Dehnung $\epsilon_{s,u}$ :	[%] 46,1 35,0 40,3
Spannung $\sigma_{s,max,mt}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 494,4

<sup>1</sup>Am Versuchstag  
<sup>2</sup>ad-häsiv; ke-kohäsiv; bew=Bewehrungsversagen, bf=Betonversagen im fugenmahen Bereich  
<sup>3</sup>Querschnitts Fläche der im Versagensschnitt vorhandenen und am Lastabtrag beteiligten Bewehrung  
<sup>4</sup>mittlere Rissbreite im Fugenbereich



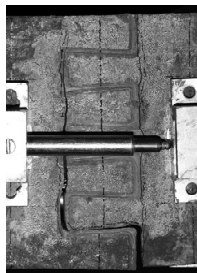
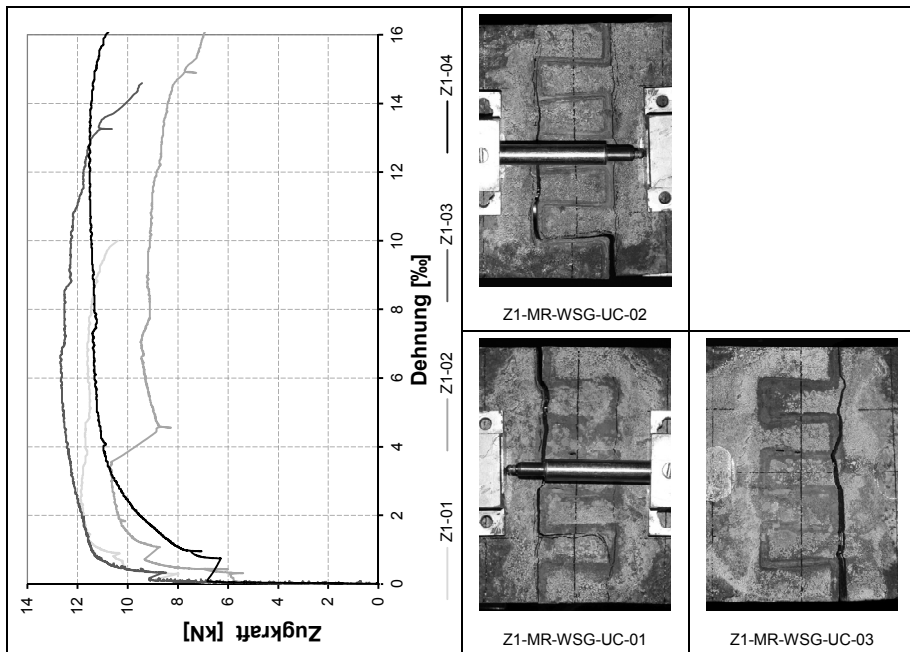
Zugversuch	
Klebschichtdicke t:	[mm] 3
Bewehrungsart:	Mikrobewehrung
Herstellungsmethode:	wasserstrahgeschnitten
Fugengeometrie:	Rechteckgeometrie
Versuch:	Z1MR-WSG-RT
	01 02 03 04
Alter	[d] 41
Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 25,4
Zugfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 12,7
Alter:	[d] 33
Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 15,0
Zugfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 9,5
Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm] 3,2 3,3 3,1 3,0
Querschnittsfläche $A_{c,vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ] 4392 0 4499 4592
Querschnittsfläche $A_{s,erf}^3$ :	[mm <sup>2</sup> ] 38
Versagensart <sup>2</sup> :	bew bew bew bew
Spannung $\sigma_{cr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 2,76 - 2,62 2,29
Streckgrenze $\sigma_{s,y}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 328,0 338,7 394,7 306,7
Dehnung $\epsilon_{s,y}$ :	[‰] 11 0,8 0,9 1,1
Streckgrenze $\sigma_{s,y,mit}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 342,0
Rissbreite $w_{vorh}^4$ :	[mm] ~0,05
Spannung $\sigma_{s,max}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 370,67 386,67 426,67 373,33
Dehnung $\epsilon_{s,u}$ :	[‰] 7,4 7,4 6,9 7,9
Spannung $\sigma_{s,max,mit}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 389,3
Versuchsergebnisse	

<sup>1</sup>Am Versuchstag  
<sup>2</sup>as=aktiv; ke=konaktiv; bew=Bewehrungsversagen; br=Betonversagen im fugenmahen Bereich  
<sup>3</sup>Querschnitts Fläche der im Versagensschnitt vorhandenen und am Lastabtrag beteiligten Bewehrung  
<sup>4</sup>mittlere Rissbreite im Fugenbereich

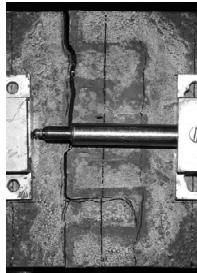


Zugversuch	
Klebschichtdicke t:	[mm] 3
Bewehrungsart:	Mikrobewehrung
Herstellungsmethode:	wasserstrahgeschnitten
Fugengeometrie:	Keilzinkengeometrie
Versuch:	Z+MR-WSG-FJ
Alter	[d] 39
Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 25,5
Zugfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 12,5
Alter:	[d] 31
Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 15,0
Zugfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 9,5
Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm] 3,6 3,7 3,3 3,0
Querschnittsfläche $A_{c,vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ] 44,7 48,05 44,94 45,34
Querschnittsfläche $A_{s,erf}$ <sup>3</sup> :	[mm <sup>2</sup> ] 64
Versagensart <sup>2</sup> :	bew bew bew bew
Spannung $\sigma_{cr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 2,81 2,93 2,65 2,69
Streckgrenze $\sigma_{s,y}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 353,1 350,0 307,8 381,3
Dehnung $\epsilon_{s,y}$ :	[‰] 16 12 10 14
Streckgrenze $\sigma_{s,y,mit}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 348,0
Rissbreite $w_{vorh}$ <sup>4</sup> :	[mm] ~0,05
Spannung $\sigma_{s,max}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 378,13 350,00 340,63 414,06
Dehnung $\epsilon_{s,u}$ :	[‰] 12,1 12,9 9,1 13,0
Spannung $\sigma_{s,max,mit}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 370,7
Versuchsergebnisse	
Materialigenschaften	
HPC-1	
HPM-1	

<sup>1</sup>Am Versuchstag  
<sup>2</sup>asadhäsiv; kekohäsiv; bew=Bewehrungsversagen, bf=Betonversagen im fugenmahen Bereich  
<sup>3</sup>Querschnitts Fläche der im Versagesschnitt vorhandenen und am Lastabtrag beteiligten Bewehrung  
<sup>4</sup>mittlere Rissbreite im Fugenbereich



Z1-MR-WSG-UC-02



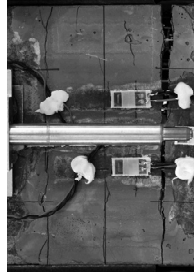
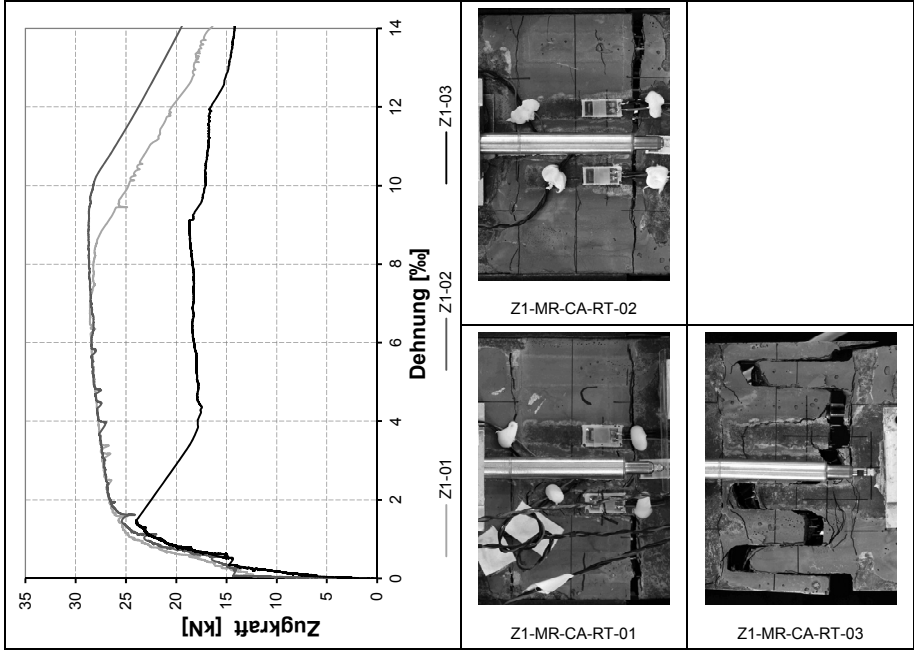
Z1-MR-WSG-UC-01



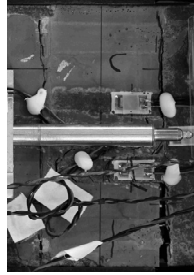
Z1-MR-WSG-UC-03

Zugversuch										
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	3							
	Bewehrungsart:	[°]	Mikrobewehrung							
	Herstellungsmethode:		wasserstrahlingsgeschnitten							
	Fugengeometrie:		Hinterschnittgeometrie							
Versuch:	Z1-MR-WSG-UC									
		01	02	03	04					
Materialigenschaften	Alter	[d]	42							
	Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	25,4							
	Zugfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,7							
	Alter:	[d]	34							
Materialergebnisse	Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	15,0							
	Zugfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	9,5							
	Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm]	3,0	3,2	3,2	3,2	3,5			
	Querschnittsfläche $A_{c,vorh}^3$ :	[mm <sup>2</sup> ]	4488	4443	4353	4304				
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{s,erf}^3$ :	[mm <sup>2</sup> ]	28							
	Versagensart <sup>2</sup> :		bew	bew	bew	bew	bew			
	Spannung $\sigma_{cr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	196	128	2,07	158				
	Streckgrenze $\sigma_{s,y}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	387,9	338,1	387,9	352,3				
	Dehnung $\epsilon_{s,y}$ :	[‰]	10	12	0,7	2,3				
	Streckgrenze $\sigma_{s,y,mit}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	366,5							
	Rissbreite $w_{vorh}^4$ :	[mm]	~0,05							
	Spannung $\sigma_{s,max}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	423,49	380,78	45196	40569				
	Dehnung $\epsilon_{s,u}$ :	[‰]	10,8	3,4	12,9	15,5				
	Spannung $\sigma_{s,max,mit}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	415,5							

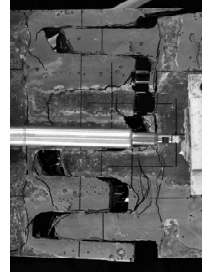
<sup>1</sup>Am Versuchstag  
<sup>2</sup>as=adhasiv; k=kohäsiv; bew=Bewehrungsversagen; bf=Betonversagen im fugenmahen Bereich  
<sup>3</sup>Querschnitts Fläche der im Versagensschnitt vorhandenen und am Lastabtrag beteiligten Bewehrung  
<sup>4</sup>mittlere Rissbreite im Fugenbereich



Z1-MR-CA-RT-02



Z1-MR-CA-RT-01



Z1-MR-CA-RT-03

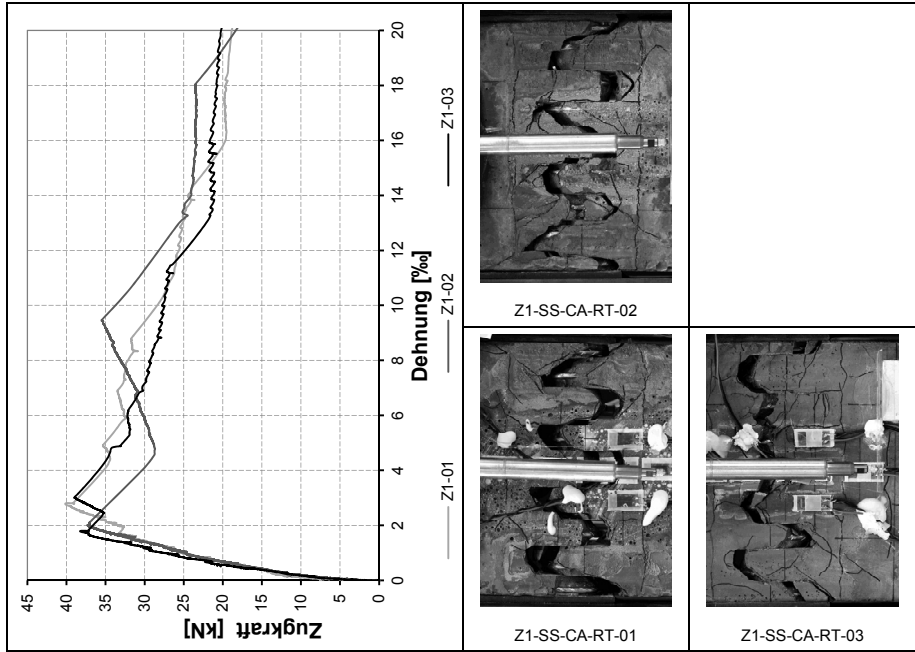
Zugversuch	
Klebschichtdicke t:	[mm] 3
Bewehrungsart:	Mikrobewehrung
Herstellungsmethode:	geschalt
Fugengeometrie:	Rechteckgeometrie
Versuch:	ZMR-CA-RT
	01 02 03 04
Alter	[d] 204
Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 134,0
Zugfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 118
Alter:	[d] 73
Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 133,1
Zugfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 116
Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm] 3,2 3,4 3,4 3,4
Querschnittsfläche $A_{c,vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ] 4281 4509 4394
Querschnittsfläche $A_{s,erf}$ <sup>3</sup> :	[mm <sup>2</sup> ] 62
Versagensart <sup>2</sup> :	bew bew bew bew
Spannung $\sigma_{cr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 2,73 3,06 3,25
Streckgrenze $\sigma_{s,y}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 383,9 380,6 369,4
Dehnung $\epsilon_{s,y}$ :	[‰] 10 11 11
Streckgrenze $\sigma_{s,y,mi}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 378,0
Rissbreite $w_{vorh}$ <sup>4</sup> :	[mm] ~0,05
Spannung $\sigma_{s,max}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 462,90 461,29 385,48
Dehnung $\epsilon_{s,u}$ :	[‰] 8,8 10,0 14
Spannung $\sigma_{s,max,mi}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 462,1
Versuchsergebnisse	

<sup>1</sup>Am Versuchstag

<sup>2</sup>asadhäsiv; kekohäsiv; bew=Bewehrungsversagen, bf=Betonversagen im fugenmahen Bereich

<sup>3</sup>Querschnitts Fläche der im Versagensschnitt vorhandenen und am Lastabtrag beteiligten Bewehrung

<sup>4</sup>mittlere Rissbreite im Fugenbereich



Zugversuch	
Klebschichtdicke t:	[mm] 3
Bewehrungsart:	Stabstahlbewehrung
Herstellungsmethode:	geschalt
Fugengeometrie:	Rechteckgeometrie
Versuch:	Z1-SS-CA-RT
Alter	01 02 03 04
Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 98
Zugfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 138,7
Alter:	73
Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 13,4
Zugfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 133,1
Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm] 116
Querschnittsfläche $A_{c,vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ] 3,2 3,0 3,0 3,7
Querschnittsfläche $A_{s,erf}$ :	[mm <sup>2</sup> ] 4290 4511 4427
Versagensart <sup>2</sup> :	a a a a
Spannung $\sigma_{cr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 1,7 1,11 0,90
Streckgrenze $\sigma_{s,y}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] - - -
Dehnung $\epsilon_{s,y}$ :	[‰] - - -
Streckgrenze $\sigma_{s,y,mit}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] - - -
Rissbreite $w_{vorh}$ <sup>4</sup> :	[mm] -0,1
Spannung $\sigma_{s,max}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 40100 37100 38800
Dehnung $\epsilon_{s,u}$ :	[‰] 2,8 2,0 3,0
Spannung $\sigma_{s,max,mit}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 386,7
Versuchsergebnisse	

<sup>1</sup>Am Versuchstag  
<sup>2</sup>arakohäsiv; k=kohäsiv; bew=Bewehrungsversagen, bf=Betonversagen im fugenmahen Bereich  
<sup>3</sup>Querschnitts Fläche der im Versagensechnitt vorhandenen und am Lastabtrag beteiligten Bewehrung  
<sup>4</sup>mittlere Rissbreite im Fugenbereich

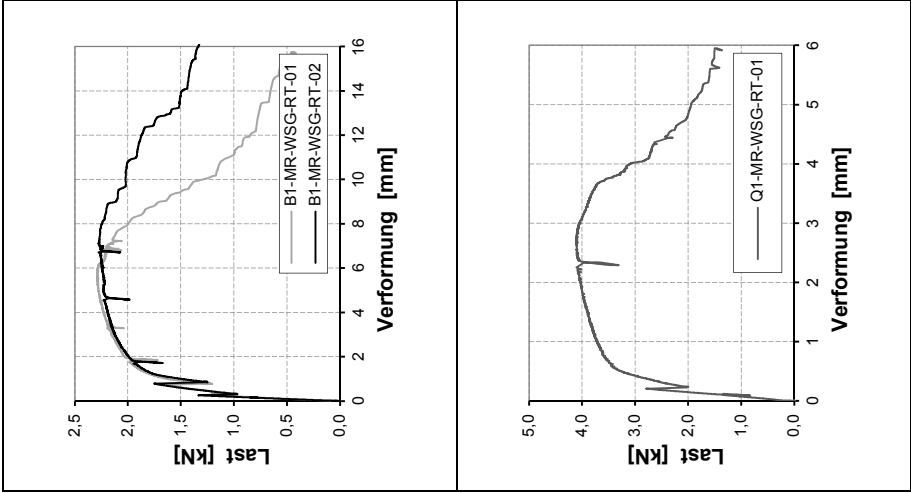
Vierpunktbiegeversuch													
Eckdaten	<table border="1"> <tr> <td>Klebschichtdicke:</td> <td>[mm]</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>Bewehrungsart:</td> <td>[°]</td> <td>Mikrobewehrung</td> </tr> <tr> <td>Herstellungsmethode:</td> <td></td> <td>wasserstrahligeschnitten</td> </tr> <tr> <td>Fugegeometrie:</td> <td></td> <td>Rechteckgeometrie</td> </tr> </table>	Klebschichtdicke:	[mm]	3	Bewehrungsart:	[°]	Mikrobewehrung	Herstellungsmethode:		wasserstrahligeschnitten	Fugegeometrie:		Rechteckgeometrie
Klebschichtdicke:	[mm]	3											
Bewehrungsart:	[°]	Mikrobewehrung											
Herstellungsmethode:		wasserstrahligeschnitten											
Fugegeometrie:		Rechteckgeometrie											
Versuch:	B1-MR-WSG-RT												
Materialeigenschaften	Alter	01	02	136									
	Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :			139,1									
	Zugfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :			13,3									
	Alter:			111									
	Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :			133,1									
	Zugfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :			116									
Versuchsergebnisse	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :		3,1	3,2	-	-							
	Querschnittsfläche $A_{c,vorh}$ :		4290	4511	-	-							
	Querschnittsfläche $A_{s,erf}$ <sup>3</sup> :				100								
	Versagensart <sup>2</sup> :		bew	bew	-	-							
	Spannung $\sigma_{gr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	4,75	4,48	-	-							
Streckgrenze $F_{s,y}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	17	17	-	-								
maximale Traglast $F_{max}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,29	2,27	-	-								

<sup>1</sup>Am Versuchstag

<sup>2</sup>ac=aktiv; k=koaktiv; bew=Bewehrungsversagen, bf=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup>Querschnitts Fläche der im Versagensschnitt vorhandenen und am Lastabtrag beteiligten Bewehrung

<sup>4</sup>mittlere Rissbreite im Fugenbereich



Dreipunktbiegeversuch			
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	3
	Bewehrungsart:	[°]	Mikrobewehrung
	Herstellungsmethode:		wasserstrahligeschnitten
	Fugegeometrie:		Rechteckgeometrie
Versuch:			Q1MR-WSG-RT
Materialigenschaften	Alter	[d]	01
	Druckfestigkeit $f_{cmf}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	136
	Zugfestigkeit $f_{amf}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	139,1
	Alter:	[d]	111
Materialergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amf}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	133,1
	Zugfestigkeit $f_{amf}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	116
	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	3,1
	Querschnittsfläche $A_{c,vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	4290
Querschnittsfläche $A_{s,erf}$ <sup>3</sup> :			100
Versagensart <sup>2</sup> :			bew
Spannung $\sigma_{er}$ :			9,20
Streckgrenze $F_{s,y}$ :			3,3
maximale Traglast $F_{max}$ :			4,10

<sup>1</sup>Am Versuchstag

<sup>2</sup>a=adhäsiv; k=kohäsiv; bew=Bewehrungsversagen, bf=Betonversagen im fugenahen Bereich

<sup>3</sup>Querschnitts Fläche der im Versagensschnitt vorhandenen und am Lastabtrag beteiligten Bewehrung

<sup>4</sup>mittlere Rissbreite im Fugenbereich



**D. Untersuchungen zur Formulierung eines Bruchkriteriums für Klebverbindungen**

**D.1 Zug- und Schub-Zugversuche SZ2**

Schub-Zugversuch SZ2									
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2						
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	0						
	Kleblfläche:		schauglatt						
	Vorbehandlung:		nass						
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher						
	Versuch:		SZ2-0-SG-D2-HFL						
			01	02	03	04	06		
Materialigenschaften	Alter	[d]	49						
	Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,3						
	Zugfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	146,7						
Materialigenschaften	Alter:	[d]	28						
	Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	118,5						
	Zugfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,8						
Versuchsergebnisse	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	2,5	2,6	2,6	2,5	3,1		
	Neigungswinkel $\alpha_{verh}$ :	[°]	0,0	0,0	0,0	10	0,0		
	Querschnittsfläche $A_{verh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	90	872	870	899	875		
	Versagenslast $F_{ir}$ :	[N]	828	201	531	117	219		
	Versagensart <sup>2</sup> :		a	a, k	a	a, k	a		
	Versagensspannung $\sigma_{uk}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,91	0,23	0,61	0,13	0,25		
	Mittelwert $\sigma_{um}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,43						
	Variationskoeffizient:	[%]	76,43						
	Hafffestigkeit $\sigma_{uk}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	-0,38						

<sup>1</sup>Am Versuchstag

<sup>2</sup>a=adhäsiiv; k=kohäsiv; b=Betonversagen allgemein; b=Betonversagen im fugenmahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktiivwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Schub-Zugversuch SZ2											
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2								
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	30								
	Klebfläche:		schalglatt								
	Vorbehandlung:		nass								
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher								
Versuch:			01	02	03	04	06				
			SZ2-30-SG-D2-HFL								
Material Eigenschaften	Alter	[d]	49								
	Druckfestigkeit $f_{\text{enfl}}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,3								
	Zugfestigkeit $f_{\text{amfl}}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	146,7								
	Alter:	[d]	28								
Material Eigenschaften	Druckfestigkeit $f_{\text{enfl}}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	118,5								
	Zugfestigkeit $f_{\text{amfl}}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,8								
Versuchsergebnisse	Klebschichtdicke $t_{\text{verh}}$ :	[mm]	2,3	2,8	2,3	2,6	2,2				
	Neigungswinkel $\alpha_{\text{verh}}$ :	[°]	26,0	26,5	27,0	26,0	26,5				
	Querschnittsfläche $A_{\text{verh}}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	873	866	910	876	846				
	Versagenslast $F_u$ :	[N]	2496	1949	2284	2189	956				
	Versagensart <sup>2</sup> :		a, (b)	a	a	a	a, (k)				
	Versagensspannung $\sigma_{\text{ut}}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,86	2,25	2,51	2,50	1,13				
	Mittelwert $\sigma_{\text{am}}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,25								
Variationskoeffizient:	[%]	29,44									
Haftfestigkeit $\sigma_{\text{uk}}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,62									

<sup>1</sup> Am Versuchstag  
<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=kohäsiv; b=Betonversagen allgemein; bf=Betonversagen im fugennahen Bereich  
<sup>3</sup> 5-%Fraktillwert bei einem Vertrauensniveau von 75%  
 x=ausgefallen

Schub-Zugversuch SZ2											
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2								
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	15								
	Klebfläche:		schalglatt								
	Vorbehandlung:		nass								
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher								
Versuch:			01	02	03	04	06				
			SZ2-15-SG-D2-HFL								
Material Eigenschaften	Alter	[d]	49								
	Druckfestigkeit $f_{\text{enfl}}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,3								
	Zugfestigkeit $f_{\text{amfl}}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	146,7								
	Alter:	[d]	28								
Material Eigenschaften	Druckfestigkeit $f_{\text{enfl}}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	118,5								
	Zugfestigkeit $f_{\text{amfl}}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,8								
Versuchsergebnisse	Klebschichtdicke $t_{\text{verh}}$ :	[mm]	2,7	2,0	2,4	2,6	2,6				
	Neigungswinkel $\alpha_{\text{verh}}$ :	[°]	110	13,0	12,0	12,0	115				
	Querschnittsfläche $A_{\text{verh}}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	878	890	861	875	878				
	Versagenslast $F_u$ :	[N]	2035	2242	2770	1596	801				
	Versagensart <sup>2</sup> :		a	a	a	a	a				
	Versagensspannung $\sigma_{\text{ut}}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,32	2,52	3,22	1,82	0,91				
	Mittelwert $\sigma_{\text{am}}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,16								
Variationskoeffizient:	[%]	39,73									
Haftfestigkeit $\sigma_{\text{uk}}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,05									

<sup>1</sup> Am Versuchstag  
<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=kohäsiv; b=Betonversagen allgemein; bf=Betonversagen im fugennahen Bereich  
<sup>3</sup> 5-%Fraktillwert bei einem Vertrauensniveau von 75%  
 x=ausgefallen

D Untersuchungen zur Formulierung eines Bruchkriteriums für Klebverbindungen

Schub-Zugversuch SZ2										
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2							
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	45							
	Klebfläche:		schalglatt							
	Vorbehandlung:		nass							
Versuch:	Nachbehandlung:		feuchte Tücher							
			SZ2-45-SG-D2-HFL							
Materialigenschaften	Alter	[d]	49							
	HPC-2									
Materialergebnisse	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,3							
	Zugfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	146,7							
	Alter:	[d]	28							
	HFL									
Versuchsergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	118,5							
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,8							
	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	2,6	3,2	3,3	2,8	2,9			
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}$ :	[°]	30,0	46,5	47,0	47,0	47,5			
	Querschnittsfläche $A_{vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	862	899	907	884	938			
	Versagenslast $F_u$ :	[N]	4008	3560	2848	3926	3377			
	Versagensart <sup>2</sup> :		b	b	a, (b)	b	a, (b,k)			
	Versagensspannung $\sigma_{ul}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	4,65	3,96	3,14	4,44	3,60			
	Mittelwert $\sigma_{min}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	3,96							
	Variationskoeffizient:	[%]	15,52							
	Haftfestigkeit $\sigma_{ult}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,44							

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv, k=kohäsiv, b=Betonversagen allgemein, bf=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktillwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Schub-Zugversuch SZ2											
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2								
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	15								
	Klebefläche:		wasserstrahlgeschnitten								
	Vorbehandlung:		nass								
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher								
Versuch:			01	02	03	04	06	SZ2-15-WSG-D2-HFL			
			49								
Materialigenschaften	Alter	[d]	49								
	Druckfestigkeit $f_{\text{entf1}}$ <sup>1</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	9,8								
	Zugfestigkeit $f_{\text{amf1}}$ <sup>1</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	108,9								
	Alter:	[d]	28								
	Druckfestigkeit $f_{\text{entf1}}$ <sup>1</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	118,5								
	Zugfestigkeit $f_{\text{amf1}}$ <sup>1</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,8								
Versuchsergebnisse	Klebschichtdicke $t_{\text{vorh}}$	[mm]	3,0	2,9	2,8	2,3	2,6				
	Neigungswinkel $\alpha_{\text{vorh}}$	[°]	15,2	13,0	16,0	115	13,0				
	Querschnittsfläche $A_{\text{vorh}}$	[mm <sup>2</sup> ]	827	867	841	878	855				
	Versagenslast $F_u$	[N]	3285	1583	5238	3564	4758				
	Versagensart <sup>2</sup> :		k, (a)	a, (b)	a, (k)	b, (k)	a, (b)				
	Versagensspannung $\sigma_{\text{ut}}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	3,97	183	6,23	4,06	5,56				
Mittelwert $\sigma_{\text{um}}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	4,33									
Variationskoeffizient:	[%]	38,15									
Haftfestigkeit $\sigma_{\text{uk}}$ <sup>3</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,27									

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv, k=kohäsiv, b=Betonversagen allgemein, bf=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktillwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Schub-Zugversuch SZ2											
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2								
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	0								
	Klebefläche:		wasserstrahlgeschnitten								
	Vorbehandlung:		nass								
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher								
Versuch:			01	02	03	04	06	SZ2-0-WSG-D2-HFL			
			49								
Materialigenschaften	Alter	[d]	49								
	Druckfestigkeit $f_{\text{entf1}}$ <sup>1</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	9,8								
	Zugfestigkeit $f_{\text{amf1}}$ <sup>1</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	108,9								
	Alter:	[d]	28								
	Druckfestigkeit $f_{\text{entf1}}$ <sup>1</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	118,5								
	Zugfestigkeit $f_{\text{amf1}}$ <sup>1</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,8								
Versuchsergebnisse	Klebschichtdicke $t_{\text{vorh}}$	[mm]	2,6	2,7	3,0	2,6	3,0				
	Neigungswinkel $\alpha_{\text{vorh}}$	[°]	10	0,0	1,5	0,0	0,0				
	Querschnittsfläche $A_{\text{vorh}}$	[mm <sup>2</sup> ]	829	849	827	841	852				
	Versagenslast $F_u$	[N]	1980	2208	1821	3744	2671				
	Versagensart <sup>2</sup> :		k	a, (b)	a, (k)	a, (k)	a				
	Versagensspannung $\sigma_{\text{ut}}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,39	2,60	2,20	4,45	3,13				
Mittelwert $\sigma_{\text{um}}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,96									
Variationskoeffizient:	[%]	30,68									
Haftfestigkeit $\sigma_{\text{uk}}$ <sup>3</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,72									

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv, k=kohäsiv, b=Betonversagen allgemein, bf=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktillwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

D Untersuchungen zur Formulierung eines Bruchkriteriums für Klebverbindungen

Schub-Zugversuch SZ2										
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2							
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	45							
	Klebfläche:		wasserstrahlingsgeschnitten							
	Vorbehandlung:		nass							
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher							
Versuch:			SZ2-45-WSG-D2-HFL							
Material Eigenschaften	Alter	[d]	49							
	Druckfestigkeit $f_{\text{entf1}}$ <sup>1</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	9,8							
	Zugfestigkeit $f_{\text{amf1}}$ <sup>1</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	108,9							
	Alter:	[d]	28							
	Druckfestigkeit $f_{\text{entf1}}$ <sup>1</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	118,5							
	Zugfestigkeit $f_{\text{amf1}}$ <sup>1</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,8							
Versuchsergebnisse	Klebschichtdicke $t_{\text{vorh}}$	[mm]	2,6	3,1	2,6	2,8	2,5			
	Neigungswinkel $\alpha_{\text{vorh}}$	[°]	48,0	4,10	49,0	39,0	46,0			
	Querschnittsfläche $A_{\text{vorh}}$	[mm <sup>2</sup> ]	852	792	849	880	829			
	Versagenslast $F_u$	[N]	6375	5274	5695	3557	5531			
	Versagensart <sup>2</sup> :		k, (b)	a, (b)	a, (b)	a, (b)	k			
	Versagensspannung $\sigma_{\text{ut}}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	7,48	6,66	6,71	4,04	6,67			
Mittelwert $\sigma_{\text{um}}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	6,31								
Variationskoeffizient:	[%]	20,85								
Haftfestigkeit $\sigma_{\text{uk}}$ <sup>3</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	3,07								

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv, k=kohäsiv, b=Betonversagen allgemein, bf=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktillwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Schub-Zugversuch SZ2										
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2							
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	30							
	Klebfläche:		wasserstrahlingsgeschnitten							
	Vorbehandlung:		nass							
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher							
Versuch:			SZ2-30-WSG-D2-HFL							
Material Eigenschaften	Alter	[d]	50							
	Druckfestigkeit $f_{\text{entf1}}$ <sup>1</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	9,8							
	Zugfestigkeit $f_{\text{amf1}}$ <sup>1</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	108,9							
	Alter:	[d]	29							
	Druckfestigkeit $f_{\text{entf1}}$ <sup>1</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	118,5							
	Zugfestigkeit $f_{\text{amf1}}$ <sup>1</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,8							
Versuchsergebnisse	Klebschichtdicke $t_{\text{vorh}}$	[mm]	3,0	2,7	2,4	2,4	2,7			
	Neigungswinkel $\alpha_{\text{vorh}}$	[°]	26,0	25,0	29,0	32,0	28,5			
	Querschnittsfläche $A_{\text{vorh}}$	[mm <sup>2</sup> ]	869	816	852	841	855			
	Versagenslast $F_u$	[N]	4855	5242	6446	5068	1145			
	Versagensart <sup>2</sup> :		k	k	k, (a)	k	a			
	Versagensspannung $\sigma_{\text{ut}}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	5,59	6,43	7,57	6,03	1,34			
Mittelwert $\sigma_{\text{um}}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	5,39								
Variationskoeffizient:	[%]	44,17								
Haftfestigkeit $\sigma_{\text{uk}}$ <sup>3</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	-0,48								

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv, k=kohäsiv, b=Betonversagen allgemein, bf=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktillwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

**D.2 Zugversuche HZ3**

Haftzugversuch 3											
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2								
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	0								
	Kleblfläche:		geschnitten								
	Vorbehandlung:		nass								
Versuch:	Nachbehandlung:		feuchte Tücher								
			HZ3-GS-D2-HFL								
Materialeneigenschaften	Alter	[d]	69								
	Druckfestigkeit $f_{\text{cmtrl}}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	1419								
HFL	Zugfestigkeit $f_{\text{amtrl}}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,0								
	Alter:	[d]	27								
Materialeneigenschaften	Druckfestigkeit $f_{\text{amtrl}}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	19,8								
	Zugfestigkeit $f_{\text{amtrl}}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	124,6								
Versuchsergebnisse	Klebschichtdicke $t_{\text{vorh}}$ :	[mm]	2,8	3,8	3,0	3,2	2,5	-			
	Neigungswinkel $\alpha_{\text{vorh}}$ :	[°]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	Querschnittsfläche $A_{\text{vorh}}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	0,0	
	Versagenslast $F_{\text{v}}$ :	[N]	5301	12776	14699	7663	9109	x			
	Versagensart <sup>2</sup> :		a	a	a	a	a	a	a	-	
	Haftfestigkeit $f_{\text{jsurf}}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	7,46	6,23	7,17	3,74	4,44	-			
	Mittelwert $f_{\text{jmsurf}}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	5,81								
	Variationskoeffizient:	[%]	28,45								
	Haftfestigkeit $f_{\text{jk75,surf}}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	174								

<sup>1</sup> Am Versuchstag  
<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=kohäsiv; b=Beetonversagen allgemein; bf=Beetonversagen im fugenmahen Bereich  
<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%  
 x=ausgefallen

Haftzugversuch 3											
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2								
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	0								
	Kleblfläche:		schalglatt								
	Vorbehandlung:		nass								
Versuch:	Nachbehandlung:		feuchte Tücher								
			HZ3-SG-D2-HFL								
Materialeneigenschaften	Alter	[d]	41								
	Druckfestigkeit $f_{\text{cmtrl}}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	127,3								
HFL	Zugfestigkeit $f_{\text{amtrl}}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,3								
	Alter:	[d]	27								
Materialeneigenschaften	Druckfestigkeit $f_{\text{amtrl}}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	124,6								
	Zugfestigkeit $f_{\text{amtrl}}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	19,8								
Versuchsergebnisse	Klebschichtdicke $t_{\text{vorh}}$ :	[mm]	-	17	19	14	2,0	19	-		
	Neigungswinkel $\alpha_{\text{vorh}}$ :	[°]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	Querschnittsfläche $A_{\text{vorh}}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	0,0	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	
	Versagenslast $F_{\text{v}}$ :	[N]	0	4752	6870	3724	6000	6070	-		
	Versagensart <sup>2</sup> :		-	a(b)	a	a	a	a	a	a	
	Haftfestigkeit $f_{\text{jsurf}}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	-	2,32	3,35	182	2,93	2,96	-		
	Mittelwert $f_{\text{jmsurf}}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,67								
	Variationskoeffizient:	[%]	22,64								
	Haftfestigkeit $f_{\text{jk75,surf}}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	118								

<sup>1</sup> Am Versuchstag  
<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=kohäsiv; b=Beetonversagen allgemein; bf=Beetonversagen im fugenmahen Bereich  
<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%  
 x=ausgefallen

D Untersuchungen zur Formulierung eines Bruchkriteriums für Klebverbindungen

Haftzugversuch 3												
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2									
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	0									
	Klebfläche:		maximal gesandstrahlt									
	Vorbehandlung:		nass									
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher									
Versuch:			HZ3-SS2-D2-HFL									
Material Eigenschaften	Alter	[d]	42									
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	127,3									
	Zugfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,3									
	Alter:	[d]	28									
Versuchsergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	124,6									
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	19,8									
	Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm]	2,6	2,3	2,2	2,2	2,8	2,8	2,3	3,0	3,0	0,0
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}^2$ :	[°]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{vorh}^2$ :	[mm <sup>2</sup> ]	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	
	Versagenslast $F_u$ :	[N]	1790	9557	12339	7675	7675	7675	7890	7890	7890	
	Versagensart <sup>2</sup> :		a+k	a	b	a	a	a+k	a	a	a	
	Haftfestigkeit $f_{t,surf}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	5,75	4,66	6,02	3,74	4,99	3,85	4,83	4,83	4,83	
	Mittelwert $f_{jmsurf}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]										
	Variationskoeffizient:	[%]	19,53									
Haftfestigkeit $f_{jk75,surf}^3$ :			2,63									

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=koheisiv; b=Betonversagen allgemein, bf=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Haftzugversuch 3												
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2									
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	0									
	Klebfläche:		wasserstrahligeschnitten									
	Vorbehandlung:		nass									
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher									
Versuch:			HZ3-WSG-D2-HFL									
Material Eigenschaften	Alter	[d]	70									
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	141,9									
	Zugfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,0									
	Alter:	[d]	28									
Versuchsergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	124,6									
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	19,8									
	Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm]	13	3,4	2,3	2,5	3,1	-	-	-	-	
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}^2$ :	[°]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{vorh}^2$ :	[mm <sup>2</sup> ]	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	0,0	0,0	0,0	
	Versagenslast $F_u$ :	[N]	10385	8220	8174	9782	6358	6358	x	x	x	
	Versagensart <sup>2</sup> :		a	a	a	a	a	a	a	a	a	
	Haftfestigkeit $f_{t,surf}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	5,06	4,01	3,99	4,77	3,10	-	-	-	-	
	Mittelwert $f_{jmsurf}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	4,19									
	Variationskoeffizient:	[%]	18,36									
Haftfestigkeit $f_{jk75,surf}^3$ :			2,29									

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=koheisiv; b=Betonversagen allgemein, bf=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Haftzugversuch 3											
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2								
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	0								
	Kleblfläche:		gewaschen								
	Vorbehandlung:		nass								
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher								
Versuch:			HZ3-GW-D2-HFL-2								
Material Eigenschaften	Alter	[d]	42								
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	127,3								
	Zugfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,3								
	Alter:	[d]	28								
Versuchsergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	124,6								
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	19,8								
	Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm]	12	13	2,1	16	19	15			
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}^2$ :	[°]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{vorh}^2$ :	[mm <sup>2</sup> ]	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	
	Versagenslast $F_u$ :	[N]	16340	14520	12440	11840	11840	11840	11840	13570	
	Versagensart <sup>3</sup> :		b	b	b	b	b	b	b	b	
	Haftfestigkeit $f_{jsurf}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	7,48	7,08	5,92	5,77	5,89	5,89	6,62	6,62	
Mittelwert $f_{jmsurf}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	6,46									
Variationskoeffizient:	[%]	1104									
Haftfestigkeit $f_{jk75surf}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	4,79									

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=kohäsiv; b=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Haftzugversuch 3											
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2								
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	0								
	Kleblfläche:		gewaschen								
	Vorbehandlung:		nass								
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher								
Versuch:			HZ3-GW-D2-HFL								
Material Eigenschaften	Alter	[d]	42								
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	127,3								
	Zugfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,3								
	Alter:	[d]	28								
Versuchsergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	124,6								
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	19,8								
	Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm]	12	13	2,1	16	19	15			
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}^2$ :	[°]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{vorh}^2$ :	[mm <sup>2</sup> ]	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	
	Versagenslast $F_u$ :	[N]	10792	7910	6770	9590	8010	1250			
	Versagensart <sup>3</sup> :		a(k)	a	a	a	a(k)	a	a	a	
	Haftfestigkeit $f_{jsurf}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	5,26	3,86	3,30	4,68	3,91	5,49			
Mittelwert $f_{jmsurf}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	4,41									
Variationskoeffizient:	[%]	19,60									
Haftfestigkeit $f_{jk75surf}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,39									

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=kohäsiv; b=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen



D Untersuchungen zur Formulierung eines Bruchkriteriums für Klebverbindungen

Haftzugversuch 3											
Eckdaten	Klebschichtdicke:	[mm]	2								
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	0								
	Klebfläche:		wasserstrahligeschnitten								
	Vorbehandlung:		nass								
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher								
	Versuch:		HZ3-WSG-D2-HFL-2								
Materialigenschaften	Alter	[d]	70								
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	1419								
	Zugfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	120								
	Alter:	[d]	28								
Materialergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	124,6								
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	9,8								
	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	13	3,4	2,3	2,5	3,1				
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}$ :	[°]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	Querschnittsfläche $A_{vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	2050,8	0,0	
	Versagenslast $F_{ur}$ :	[N]	12169	13709	14359	14359	14369	14369	14369	x	
	Versagensart <sup>2</sup> :		b	b	b	b	b	b	b	-	
	Haftfestigkeit $f_{l,surf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	5,93	6,68	7,00	7,47	7,01	7,01	7,01	-	
	Mittelwert $f_{l,surf}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	6,82								
	Variationskoeffizient:	[%]	8,36								
	Haftfestigkeit $f_{lk75,surf}$ <sup>3</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	5,42								

<sup>1</sup>Am Versuchstag

<sup>2</sup>a=adhäsiv; k=koheisiv; b=Beitönversagen allgemein; bf=Beitönversagen im fugenmahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

**D.3 Schub-Druckversuche**

Schub-Druckversuch												
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	1									
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	60									
	Klebfläche:		schalglatt									
	Vorbehandlung:		nass									
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher									
Versuch:			SD60-SG-D+HPM									
Material Eigenschaften	Alter	[d]	21									
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	132,5									
	Zugfestigkeit $f_{dmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	15,2									
	Alter:	[d]	14									
	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	106,0									
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	6,2									
Versuchsergebnisse	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	2,2	14	19	19	19	17	14			
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}$ :	[°]	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	
	Querschnittsfläche $A_{vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	1616	1465	1600	1600	1552	1620	1532			
	Versagenslast $F_u$ :	[kN]	87,6	43,9	64,2	44,5	34,2	48,1				
	Versagensart <sup>2</sup> :		a	a	a	a	a	a	a	a	a	
	Versagensspannung $\sigma_{ut}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	54,23	29,93	40,14	28,66	21,13	31,42				
	Mittelwert $\sigma_{umr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	34,25									
	Variationskoeffizient:	[%]	33,64									
Haftfestigkeit $\sigma_{uk}^3$ :		[N/mm <sup>2</sup> ]	7,33									

<sup>1</sup>Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv, k=kohäsiv, b=Betonversagen allgemein, bf=Betonversagen im fugenmahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktiwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Schub-Druckversuch												
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	1									
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	45									
	Klebfläche:		schalglatt									
	Vorbehandlung:		nass									
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher									
Versuch:			SD45-SG-D+HPM									
Material Eigenschaften	Alter	[d]	21									
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	132,5									
	Zugfestigkeit $f_{dmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	15,2									
	Alter:	[d]	14									
	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	106,0									
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	6,2									
Versuchsergebnisse	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	15	19	17	x	13	15-25				
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}$ :	[°]	45,0	45,0	45,0	x	45,0	45,0				
	Querschnittsfläche $A_{vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	1644	1620	1644	x	1620	1624				
	Versagenslast $F_u$ :	[kN]	77,5	78,8	49,9	x	80,8	67,2				
	Versagensart <sup>2</sup> :		a	a	a	x	a	a	a			
	Versagensspannung $\sigma_{ut}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	47,3	48,61	30,32	x	49,90	41,38				
	Mittelwert $\sigma_{umr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	43,47									
	Variationskoeffizient:	[%]	18,50									
Haftfestigkeit $\sigma_{uk}^3$ :		[N/mm <sup>2</sup> ]	23,66									

<sup>1</sup>Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv, k=kohäsiv, b=Betonversagen allgemein, bf=Betonversagen im fugenmahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktiwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

D Untersuchungen zur Formulierung eines Bruchkriteriums für Klebverbindungen

Schub-Druckversuch														
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	1											
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	60											
	Klebfläche:		gewaschen											
	Vorbehandlung:		nass											
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher											
Versuch:			SD60-GW-D+HPM											
Eckdaten	Alter	[d]	21											
			Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	132,5									
			Zugfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	16,2									
			Alter:	[d]	14									
			Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	106,0									
			Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	6,2									
Versuchsergebnisse	Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm]	2,1	18	0,4-2,2	15	19-0,9	2,2-0,8						
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}^2$ :	[°]	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0		
	Querschnittsfläche $A_{vorh}^2$ :	[mm <sup>2</sup> ]	1624	1616	1616	1673	1636	1684	1604					
	Versagenslast $F_u$ :	[kN]	109,8	112,0	121,3	94,2	116,5	140,7						
	Versagensart <sup>2</sup> :		a	a	a, (b)	a, (k,b)	a, (b)	a						
	Versagensspannung $\sigma_{ur}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	67,62	69,30	72,51	57,85	73,53	87,72						
	Mittelwert $\sigma_{umr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	71,37											
	Variationskoeffizient:	[%]	13,77											
	Haftfestigkeit $\sigma_{uk}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	48,42											

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=koheisiv; b=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Schub-Druckversuch														
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	1											
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	45											
	Klebfläche:		gewaschen											
	Vorbehandlung:		nass											
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher											
Versuch:			SD45-GW-D+HPM											
Eckdaten	Alter	[d]	21											
			Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	132,5									
			Zugfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	16,2									
			Alter:	[d]	14									
			Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	106,0									
			Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	6,2									
Versuchsergebnisse	Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm]	18	13	16	0,9	1,8	1,4						
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}^2$ :	[°]	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0		
	Querschnittsfläche $A_{vorh}^2$ :	[mm <sup>2</sup> ]	1620	1620	1620	1620	1620	1620	1620	1620	1620	1620		
	Versagenslast $F_u$ :	[kN]	183,5	183,3	183,8	157,5	182,6	175,7						
	Versagensart <sup>2</sup> :		b, (a)	b, (a)	b	b	b	b	b	b	b	b		
	Versagensspannung $\sigma_{ur}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	113,26	113,13	101,12	97,22	112,70	108,43						
	Mittelwert $\sigma_{umr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	107,64											
	Variationskoeffizient:	[%]	6,43											
	Haftfestigkeit $\sigma_{uk}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	9,149											

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=koheisiv; b=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Schub-Druckversuch												
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2									
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	55									
	Klebfläche:		schalglatt									
	Vorbehandlung:		nass									
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher									
Versuch:			SD55-SG-D2-HFL									
Material Eigenschaften	Alter	[d]	50									
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	137,8									
	Zugfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,5									
	Alter:	[d]	29									
Material Eigenschaften	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	133,2									
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,8									
	Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm]	2,7	2,7	2,7	2,7	2,4	3,6	x			
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}^2$ :	[°]	57,0	56,0	56,0	56,0	55,0	55,0	x			
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{vorh}^2$ :	[mm <sup>2</sup> ]	1664	1648	1608	1604	1652	x				
	Versagenslast $F_u$ :	[kN]	68,4	7,6	94,2	95,0	115,2	x				
	Versagensart <sup>2</sup> :		a	a	a	a	a	x				
	Versagensspannung $\sigma_{ur}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	41,12	4,63	58,62	59,23	69,70	x				
Mittelwert $\sigma_{umr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	46,66										
Variationskoeffizient:	[%]	54,94										
Haftfestigkeit $\sigma_{uk}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	-6,51										

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=kohäsiv; b=Betonversagen allgemein, bf=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Schub-Druckversuch												
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2									
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	45									
	Klebfläche:		schalglatt									
	Vorbehandlung:		nass									
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher									
Versuch:			SD45-SG-D2-HFL									
Material Eigenschaften	Alter	[d]	21									
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	132,5									
	Zugfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	15,2									
	Alter:	[d]	6									
Material Eigenschaften	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	127,9									
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	10,8									
	Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm]	12	1,1	18	17	15	13				
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}^2$ :	[°]	44,3	44,3	44,3	44,3	44,3	44,3				
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{vorh}^2$ :	[mm <sup>2</sup> ]	1628	1624	1624	1640	1652	1695				
	Versagenslast $F_u$ :	[kN]	146,4	130,5	69,1	1212	40,7	513				
	Versagensart <sup>2</sup> :		a	a, (k)	a, (k)	a, (k)	a	a				
	Versagensspannung $\sigma_{ur}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	89,92	80,36	42,57	73,91	24,61	32,15				
Mittelwert $\sigma_{umr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	57,26										
Variationskoeffizient:	[%]	48,08										
Haftfestigkeit $\sigma_{uk}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	-7,06										

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=kohäsiv; b=Betonversagen allgemein, bf=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

D Untersuchungen zur Formulierung eines Bruchkriteriums für Klebverbindungen

Schub-Druckversuch												
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2									
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	65									
	Klebfläche:		schalglatt									
	Vorbehandlung:		nass									
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher									
Versuch:			SD65-SG-D2-HFL									
Materialigenschaften	Alter	[d]	51									
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	137,8									
	Zugfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,5									
	Alter:	[d]	30									
	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	133,2									
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,8									
Versuchsergebnisse	Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm]	3,1	2,6	2,6	3,0	2,8	x				
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}^2$ :	[°]	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	x				
	Querschnittsfläche $A_{vorh}^2$ :	[mm <sup>2</sup> ]	1652	1661	1636	1636	1697	x				
	Versagenslast $F_u$ :	[kN]	38,8	37,1	72,9	84,2	64,9	x				
	Versagensart <sup>2</sup> :		a	a	a	a	a	x				
	Versagensspannung $\sigma_{ur}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	23,47	22,32	44,57	51,43	38,23	x				
	Mittelwert $\sigma_{umr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	36,01									
Variationskoeffizient:	[%]	35,69										
Haftfestigkeit $\sigma_{uk}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	4,35										

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=kohäsiv; b=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Schub-Druckversuch												
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	1									
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	60									
	Klebfläche:		schalglatt									
	Vorbehandlung:		nass									
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher									
Versuch:			SD60-SG-D1-HFL									
Materialigenschaften	Alter	[d]	21									
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	132,5									
	Zugfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	15,2									
	Alter:	[d]	6									
	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	127,9									
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	10,8									
Versuchsergebnisse	Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm]	1,1	1,3	1,6	2,0	12-2,4	2,2-0,9				
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}^2$ :	[°]	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0		
	Querschnittsfläche $A_{vorh}^2$ :	[mm <sup>2</sup> ]	1632	1656	1648	1665	1600	1673				
	Versagenslast $F_u$ :	[kN]	49,4	48,0	30,4	113,6	100,1	818				
	Versagensart <sup>2</sup> :		a	a	a, (b)	a	b	b				
	Versagensspannung $\sigma_{ur}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	30,24	28,98	18,47	68,23	62,59	48,91				
	Mittelwert $\sigma_{umr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	42,90									
Variationskoeffizient:	[%]	46,81										
Haftfestigkeit $\sigma_{uk}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	-4,01										

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=kohäsiv; b=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Schub-Druckversuch										
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2							
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	55							
	Kleblfläche:		gewaschen							
	Vorbehandlung:		nass							
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher							
Versuch:			SD55-GW-D2-HFL							
Materialeigenschaften	Alter	[d]	48							
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	10,2							
	Zugfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	9,1							
	Alter:	[d]	30							
Versuchsergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	135,5							
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	14,3							
	Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm]	17	2,4	2,7	2,2	2,0	-	-	-
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}^2$ :	[°]	54,9	55,0	55,0	54,5	54,7	-	-	-
Querschnittsfläche $A_{vorh}^2$ :	[mm <sup>2</sup> ]	1624	1670	1626	1607	1607	-	-	-	
Versagenslast $F_u$ :	[kN]	176,7	207,7	186,2	216,9	204,9	-	-	-	
Versagensart <sup>2</sup> :		b	b	b	b	b	-	-	-	
Versagensspannung $\sigma_{ur}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	108,79	124,33	114,50	134,36	127,51	-	-	-	
Mittelwert $\sigma_{umr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	121,90								
Variationskoeffizient:	[%]	8,40								
Haftfestigkeit $\sigma_{uk}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	96,67								

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=koheisiv; b=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Schub-Druckversuch										
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	1							
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	45							
	Kleblfläche:		gewaschen							
	Vorbehandlung:		nass							
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher							
Versuch:			SD45-GW-D-HFL							
Materialeigenschaften	Alter	[d]	22							
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	132,5							
	Zugfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	15,2							
	Alter:	[d]	6							
Versuchsergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	127,9							
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	10,8							
	Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm]	2,7	2,1	2,9	2,1	1,6	2,2	-	-
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}^2$ :	[°]	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0
Querschnittsfläche $A_{vorh}^2$ :	[mm <sup>2</sup> ]	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	
Versagenslast $F_u$ :	[kN]	138,5	175,8	182,6	189,2	186,7	186,9	-	-	
Versagensart <sup>2</sup> :		b	b	b	b	b	b	b	b	
Versagensspannung $\sigma_{ur}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	86,55	109,84	114,14	117,65	116,71	118,07	-	-	
Mittelwert $\sigma_{umr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	110,49								
Variationskoeffizient:	[%]	10,97								
Haftfestigkeit $\sigma_{uk}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	82,19								

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=koheisiv; b=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

D Untersuchungen zur Formulierung eines Bruchkriteriums für Klebverbindungen

Schub-Druckversuch											
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2								
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	65								
	Kleblfläche:		gewaschen								
	Vorbehandlung:		nass								
Nachbehandlung:			feuchte Tücher								
Versuch:			SD65-GW-D2-HFL								
Material Eigenschaften	Alter	[d]	48								
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	10,2								
	Zugfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	9,1								
	Alter:	[d]	30								
Versuchsergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	135,5								
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	4,3								
	Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm]	2,9	3,0	16	18	2,6	-	-	-	-
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}^2$ :	[°]	64,8	64,5	64,0	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5	-
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{vorh}^2$ :	[mm <sup>2</sup> ]	1652	1633	1613	1620	1628	1628	1628	-	-
	Versagenslast $F_u$ :	[kN]	137,7	100,6	128,2	814	148,4	-	-	-	-
	Versagensart <sup>2</sup> :		a, (b)	a, (b)	a, (b)	a, (b)	a, (b)	a, (b)	a, (b)	a, (b)	-
	Versagensspannung $\sigma_{ur}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	83,35	61,88	79,45	50,27	91,14	-	-	-	-
Mittelwert $\sigma_{umr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	73,16									
Variationskoeffizient:	[%]	22,92									
Haftfestigkeit $\sigma_{uk}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	31,84									

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=koheisiv; b=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Schub-Druckversuch											
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2								
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	60								
	Kleblfläche:		gewaschen								
	Vorbehandlung:		nass								
Nachbehandlung:			feuchte Tücher								
Versuch:			SD60-GW-D2-HFL								
Material Eigenschaften	Alter	[d]	48								
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	10,2								
	Zugfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	9,1								
	Alter:	[d]	30								
Versuchsergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	135,5								
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	4,3								
	Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm]	2,3	2,5	3,5	17	2,2	-	-	-	-
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}^2$ :	[°]	60,0	60,5	59,8	59,8	59,9	59,9	59,9	59,9	-
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{vorh}^2$ :	[mm <sup>2</sup> ]	1616	1551	1566	1586	1556	1556	1556	-	-
	Versagenslast $F_u$ :	[kN]	191,7	176,9	160,6	1810	180,6	-	-	-	-
	Versagensart <sup>2</sup> :		b	b	b	b	b	b	b	b	-
	Versagensspannung $\sigma_{ur}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	118,70	114,08	102,60	114,07	116,11	-	-	-	-
Mittelwert $\sigma_{umr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	113,11									
Variationskoeffizient:	[%]	5,46									
Haftfestigkeit $\sigma_{uk}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	97,89									

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=koheisiv; b=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Schub-Druckversuch												
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2									
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	60									
	Klebfläche:		geschnitten									
	Vorbehandlung:		nass									
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher									
Versuch:			SD60-GS-D2-HFL									
Material Eigenschaften	Alter	[d]	48									
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	10,2									
	Zugfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	9,1									
	Alter:	[d]	30									
Versuchsergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	135,5									
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	14,3									
	Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm]	2,6	14	2,3	2,4	2,9	-	-	-	-	-
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}^2$ :	[°]	60,6	60,6	60,6	60,6	60,0	-	-	-	-	
Querschnittsfläche $A_{vorh}^2$ :	[mm <sup>2</sup> ]	151	1622	1615	1616	1548	-	-	-	-		
Versagenslast $F_u$ :	[kN]	112	1374	149,2	165,6	135,6	-	-	-	-		
Versagensart <sup>2</sup> :		a, (b)	a, (b)	a, (b)	a, (b)	a, (b)	-	-	-	-		
Versagensspannung $\sigma_{ur}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	103,89	84,88	92,37	102,50	87,99	-	-	-	-		
Mittelwert $\sigma_{umr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	94,21										
Variationskoeffizient:	[%]	9,20										
Haftfestigkeit $\sigma_{uk}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	72,85										

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=koheisiv; b=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Schub-Druckversuch												
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2									
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	55									
	Klebfläche:		geschnitten									
	Vorbehandlung:		nass									
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher									
Versuch:			SD55-GS-D2-HFL									
Material Eigenschaften	Alter	[d]	48									
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	10,2									
	Zugfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	9,1									
	Alter:	[d]	30									
Versuchsergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	135,5									
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	14,3									
	Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm]	2,2	19	2,6	19	3,0	-	-	-	-	
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}^2$ :	[°]	54,8	55,5	55,0	55,0	55,0	-	-	-	-	
Querschnittsfläche $A_{vorh}^2$ :	[mm <sup>2</sup> ]	113	1606	1600	1630	1572	-	-	-	-		
Versagenslast $F_u$ :	[kN]	157,6	147,4	160,4	162,2	171,2	-	-	-	-		
Versagensart <sup>2</sup> :		b	b	a, (b)	b	b	-	-	-	-		
Versagensspannung $\sigma_{ur}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	97,66	91,76	118,98	99,60	108,87	-	-	-	-		
Mittelwert $\sigma_{umr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	103,35										
Variationskoeffizient:	[%]	10,33										
Haftfestigkeit $\sigma_{uk}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	77,04										

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=koheisiv; b=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen



Schub-Druckversuch										
Eckdaten	Klebschichtdicke:	[mm]	2							
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	65							
	Klebfläche:		geschnitten							
	Vorbehandlung:		nass							
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher							
	Versuch:		SD65-GS-D2-HFL							
Materialigenschaften	Alter	[d]	48							
	HPC-2									
HFL	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	10,2							
	Zugfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	9,1							
Materialergebnisse	Alter:	[d]	30							
	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	135,5							
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	14,3							
	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	16	2,8	2,2	19	16	-	-	-
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}$ :	[°]	65,0	64,8	64,8	64,8	64,8	64,8	-	-
	Querschnittsfläche $A_{vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	1602	1595	1628	1574	1616	-	-	-
	Versagenslast $F_{ur}$ :	[kN]	184,4	127,3	68,8	100,4	170,8	-	-	-
	Versagensart <sup>2</sup> :		a, (b)	a, (b)	a, (b)	a, (b)	a, (b)	a, (b)	-	-
	Versagensspannung $\sigma_{ur}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,137	79,82	42,24	63,75	105,73	-	-	-
	Mittelwert $\sigma_{umr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	82,58							
	Variationskoeffizient:	[%]	38,43							
	Haftfestigkeit $\sigma_{ulk}$ <sup>3</sup> :	[N/mm <sup>2</sup> ]	4,38							

<sup>1</sup>Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=kohäsiv; b=Betonversagen allgemein; bf=Betonversagen im fugenmahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktillwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Schub-Druckversuch										
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2							
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	60							
	Klebfläche:		wasserstrahligeschnitten							
	Vorbehandlung:		nass							
Nachbehandlung:			feuchte Tücher							
Versuch: SD60-WSG-D2-HFL										
Material Eigenschaften	Alter	[d]	51							
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	137,8							
	Zugfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,5							
	Alter:	[d]	30							
Versuchsergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	134,4							
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	13,5							
	Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm]	2,7	2,9	2,8	14	2,9	-	-	-
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}^2$ :	[°]	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	-
Querschnittsfläche $A_{vorh}^2$ :	[mm <sup>2</sup> ]	1652	1656	1620	1656	1620	1656	1612	-	
Versagenslast $F_{ur}^2$ :	[kN]	1212	110,0	136,6	190,3	205,1	-	-	-	
Versagensart <sup>2</sup> :		a	a	a	a	a	a	a	-	
Versagensspannung $\sigma_{ur}^2$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	73,32	66,41	84,31	114,87	127,25	-	-	-	
Mittelwert $\sigma_{umr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	93,23								
Variationskoeffizient:	[%]	28,48								
Haftfestigkeit $\sigma_{ulk}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	27,80								

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=koheisiv; b=Betonversagen allgemein, bf=Betonversagen im fugenmahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Schub-Druckversuch										
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2							
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	55							
	Klebfläche:		wasserstrahligeschnitten							
	Vorbehandlung:		nass							
Nachbehandlung:			feuchte Tücher							
Versuch: SD55-WSG-D2-HFL										
Material Eigenschaften	Alter	[d]	51							
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	137,8							
	Zugfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,5							
	Alter:	[d]	30							
Versuchsergebnisse	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	134,4							
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	13,5							
	Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm]	2,9	2,7	2,4	2,7	2,8	-	-	-
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}^2$ :	[°]	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	-
Querschnittsfläche $A_{vorh}^2$ :	[mm <sup>2</sup> ]	1661	1620	1718	1632	1628	-	-	-	
Versagenslast $F_{ur}^2$ :	[kN]	177,0	158,0	213,9	179,8	186,4	-	-	-	
Versagensart <sup>2</sup> :		a	a	a	a	a	a	a	-	
Versagensspannung $\sigma_{ur}^2$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	106,60	97,50	124,53	110,16	115,70	-	-	-	
Mittelwert $\sigma_{umr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	110,90								
Variationskoeffizient:	[%]	9,10								
Haftfestigkeit $\sigma_{ulk}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	86,03								

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=koheisiv; b=Betonversagen allgemein, bf=Betonversagen im fugenmahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

D Untersuchungen zur Formulierung eines Bruchkriteriums für Klebverbindungen

Schub-Druckversuch											
Eckdaten	Klebschichtdicke:	[mm]	2								
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	65								
	Klebfläche:		wasserstrahligeschnitten								
	Vorbehandlung:		nass								
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher								
	Versuch:		SD65-WSG-D2-HFL								
Materialigenschaften	Alter	[d]	51								
	HC2										
Materialigenschaften	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	137,8								
	Zugfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,5								
Materialigenschaften	Alter:	[d]	30								
	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	134,4								
Materialigenschaften	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	13,5								
	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	2,3	2,4	2,5	2,7	3,0				
Versuchsergebnisse	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}$ :	[°]	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0			
	Querschnittsfläche $A_{vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	1684	1612	1672	1604	1620				
	Versagenslast $F_{ur}$ :	[kN]	154,4	1319	135,7	146,2	66,7				
	Versagensart <sup>2</sup> :		a	a	a	a	a				
	Versagensspannung $\sigma_{ur}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	97,46	81,81	81,15	91,14	41,19				
	Mittelwert $\sigma_{umr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	78,55								
	Variationskoeffizient:	[%]	27,96								
	Haftfestigkeit $\sigma_{ulk}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	24,44								

<sup>1</sup>Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhasiv; k=kohäsiv; b=Betonversagen allgemein; bf=Betonversagen im fugenmahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktillwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Schub-Druckversuch												
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2									
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	60									
	Klebfläche:		gesandsstrahl									
	Vorbehandlung:		nass									
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher									
Versuch:			SD60-SA-D2-HFL									
Material Eigenschaften	Alter	[d]	48									
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	10,2									
	Zugfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	9,1									
	Alter:	[d]	30									
Material Eigenschaften	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	135,5									
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	14,3									
	Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm]	2,7	2,6	2,7	1,5	1,4	-	-	-	-	-
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}^2$ :	[°]	60,0	59,9	60,0	59,5	60,0	-	-	-	-	-
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{vorh}^2$ :	[mm <sup>2</sup> ]	1614	1552	1600	1600	1600	-	-	-	-	
	Versagenslast $F_u$ :	[kN]	197,0	197,2	172,7	185,2	140,1	-	-	-	-	
	Versagensart <sup>3</sup> :		a, b	a, b	a, b	a, b	a, b	a, b	a, b	a, b	a, b	
	Versagensspannung $\sigma_{ur}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	122,06	127,03	107,96	115,78	87,53	-	-	-	-	
Mittelwert $\sigma_{umr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	112,07										
Variationskoeffizient:	[%]	13,80										
Haftfestigkeit $\sigma_{uk}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	73,97										

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhasiv; k=koaktiv; b=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Schub-Druckversuch												
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2									
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	55									
	Klebfläche:		gesandsstrahl									
	Vorbehandlung:		nass									
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher									
Versuch:			SD55-SA-D2-HFL									
Material Eigenschaften	Alter	[d]	48									
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	10,2									
	Zugfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	9,1									
	Alter:	[d]	30									
Material Eigenschaften	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	135,5									
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	14,3									
	Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm]	16	16	2,6	18	2,1	-	-	-	-	
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}^2$ :	[°]	54,5	56,5	55,0	55,0	55,0	55,0	-	-	-	
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{vorh}^2$ :	[mm <sup>2</sup> ]	1487	1600	1696	1568	1600	-	-	-	-	
	Versagenslast $F_u$ :	[kN]	2213	227,3	175,3	237,8	205,9	-	-	-	-	
	Versagensart <sup>3</sup> :		b	b	b	b	b	b	b	b	b	
	Versagensspannung $\sigma_{ur}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	148,79	142,04	109,84	151,72	128,66	-	-	-	-	
Mittelwert $\sigma_{umr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	136,21										
Variationskoeffizient:	[%]	12,64										
Haftfestigkeit $\sigma_{uk}^3$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	93,79										

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhasiv; k=koaktiv; b=Betonversagen im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktilwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

Schub-Druckversuch												
Eckdaten	Klebschichtdicke:	[mm]	2									
	Neigungswinkel $\alpha$ :	[°]	65									
	Klebfäche:		gesandstrahlt									
	Vorbehandlung:		nass									
	Nachbehandlung:		feuchte Tücher									
Versuch:			SD65-SA-D2-HFL									
Material Eigenschaften	Alter	[d]	01	02	03	04	05	06				
	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	10,2									
	Zugfestigkeit $f_{ctmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	9,1									
Material Eigenschaften	Alter:	[d]	30									
	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	135,5									
	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	14,3									
Versuchsergebnisse	Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm]	2,0	2,0	2,7	2,5	2,1					
	Neigungswinkel $\alpha_{vorh}^2$ :	[°]	64,8	64,8	64,8	64,9	65,6					
	Querschnittsfläche $A_{vorh}^2$ :	[mm <sup>2</sup> ]	1651	1631	1632	1629	1618					
	Versagenslast $F_{ur}$ :	[kN]	88,3	165,2	142,5	1618	153,2					
	Versagensart <sup>2</sup> :		a, (b)	a, (b)	a, (b)	a, (b)	a, (b)					
	Versagensspannung $\sigma_{ur}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	53,51	10,128	87,30	99,31	94,64					
	Mittelwert $\sigma_{umr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	87,21									
	Variationskoeffizient:	[%]	22,46									
Haftfestigkeit $\sigma_{ulk}^3$ :		[N/mm <sup>2</sup> ]	38,94									

<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=adhasiv, k=koaktiv, b=Betonversagen allgemein, bf=Betonversagen im fugenmahen Bereich

<sup>3</sup> 5-%Fraktillwert bei einem Vertrauensniveau von 75%

x=ausgefallen

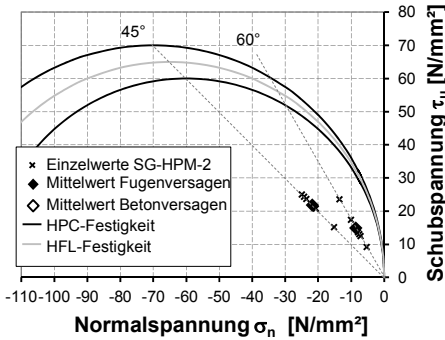


Abb. D.1: Fugenspannungen SG-HPM-2

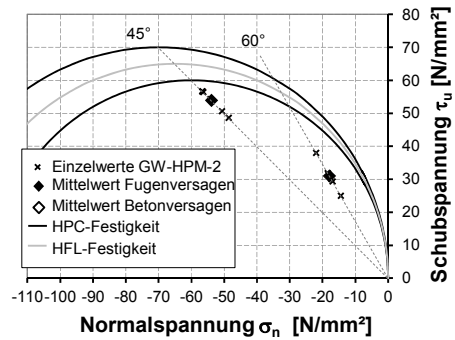


Abb. D.2: Fugenspannungen GW-HPM-2

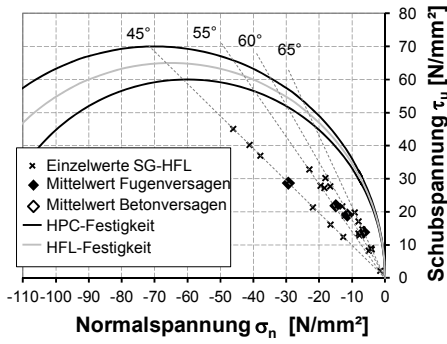


Abb. D.3: Fugenspannungen SG-HFL

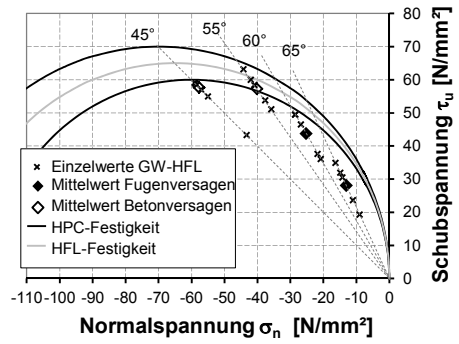


Abb. D.4: Fugenspannungen GW-HFL

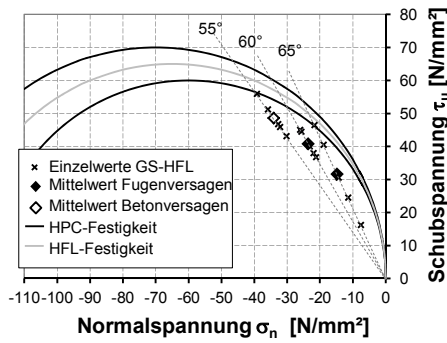


Abb. D.5: Fugenspannungen GS-HFL

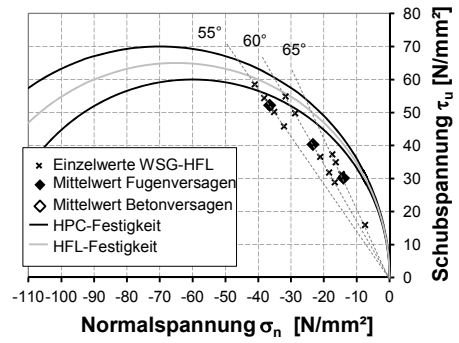


Abb. D.6: Fugenspannungen WSG-HFL

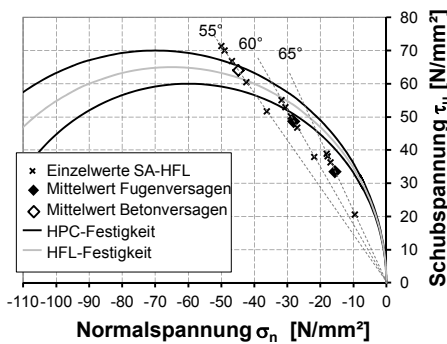
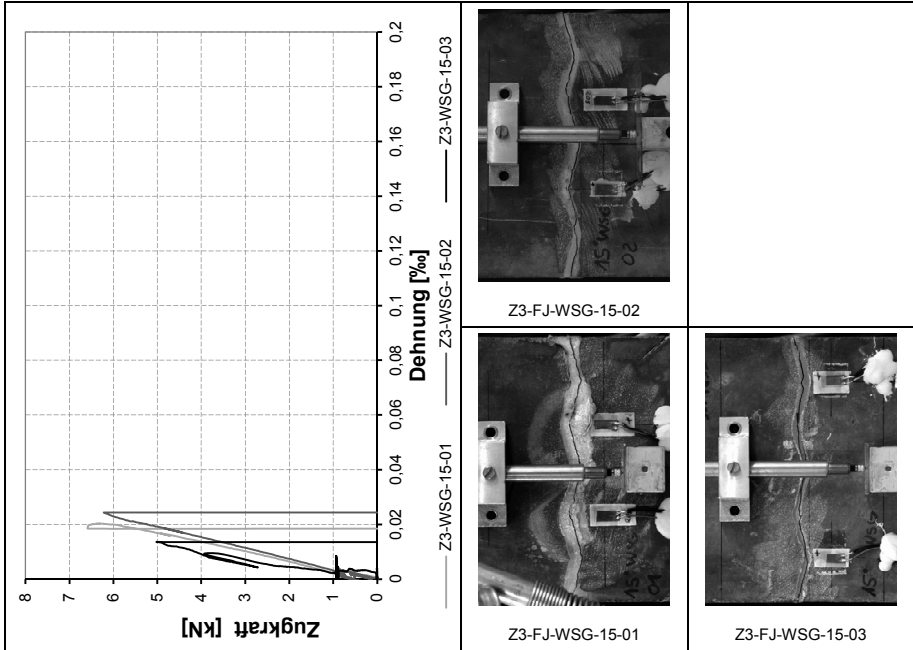


Abb. D.7: Fugenspannungen SA-HFL

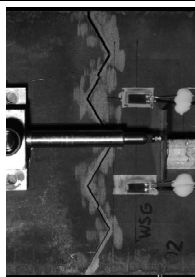
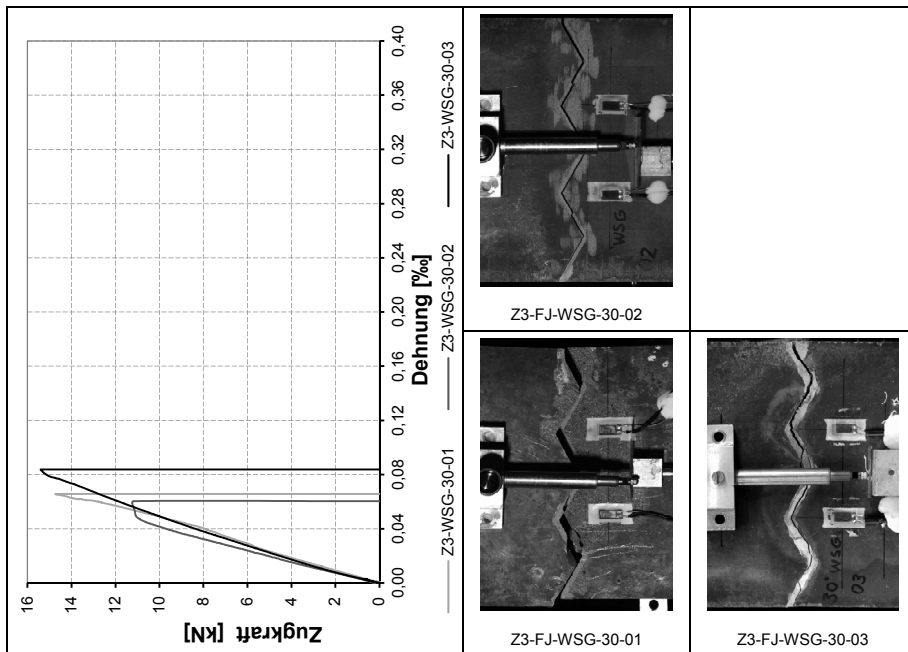
E. Untersuchungen an Keilzinkenverbindungen

E.1 Zugversuche

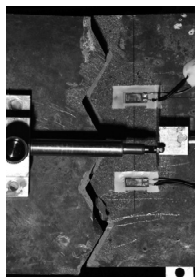


Zugversuch	
Eckdaten	Klebschichtdicke t: [mm] 2 Herstellungs-methode: wasserstrahlgeschliffen Fugengeometrie: Keilzinkenverbindung Fugenneigungswinkel [°] 15 Versuch: Z3-FJ-D2-WSG-15
Materialigenschaften	Alter HPC-2: 01 02 03 Alter HFL: 56 Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 120,8 Zugfestigkeit $f_{tm,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 9,8 Alter: 30 Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 123,6 Zugfestigkeit $f_{tm,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 13,8
	Klebschichtdicke $t_{vorh}^1$ : [mm] 2,0 2,1 2,3 Querschnittsfläche $A_{c,vorh}$ : [mm <sup>2</sup> ] 5289 5337 5235 Querschnittsfläche $A_{s,eff}^3$ : [mm <sup>2</sup> ] 202,5 Versagensart <sup>2</sup> : a a a Spannung $\sigma_{cr}$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 0,00 0,00 0,00 Streckgrenze $\sigma_{s,y}^*$ : [N/mm <sup>2</sup> ] - - - Dehnung $\epsilon_{s,y}$ : [%] - - - Streckgrenze $\sigma_{s,y,irr}$ : [N/mm <sup>2</sup> ] - - - Rissbreite $w_{vorh}^4$ : [mm] - - - Spannung $\sigma_{c,max}$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 1,23 1,15 0,98 Dehnung $\epsilon_u$ : [%] - - - Spannung $\sigma_{max,irr}$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 1,12

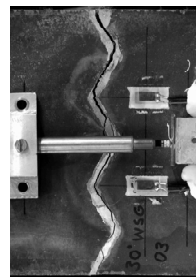
<sup>1</sup>Am Versuchstag  
<sup>2</sup>a=adhäsiv; k=kohäsiv; bew=Bewehrungsversagen,  $\sigma$ =Bet.vers. im fugenmahen Bereich  
<sup>3</sup>Querschnittsfläche der außerhalb des Fugenbereichs im Probekörper vorh. Bewehrung  
<sup>4</sup>mittlere Rissbreite im Fugenbereich bei Erreichen der Streckgrenze



Z3-FJ-WSG-30-02



Z3-FJ-WSG-30-01

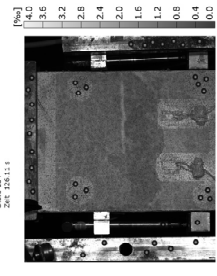
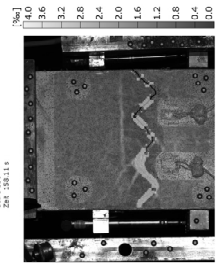
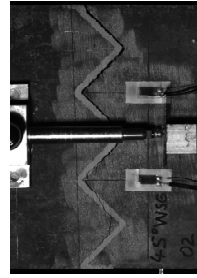
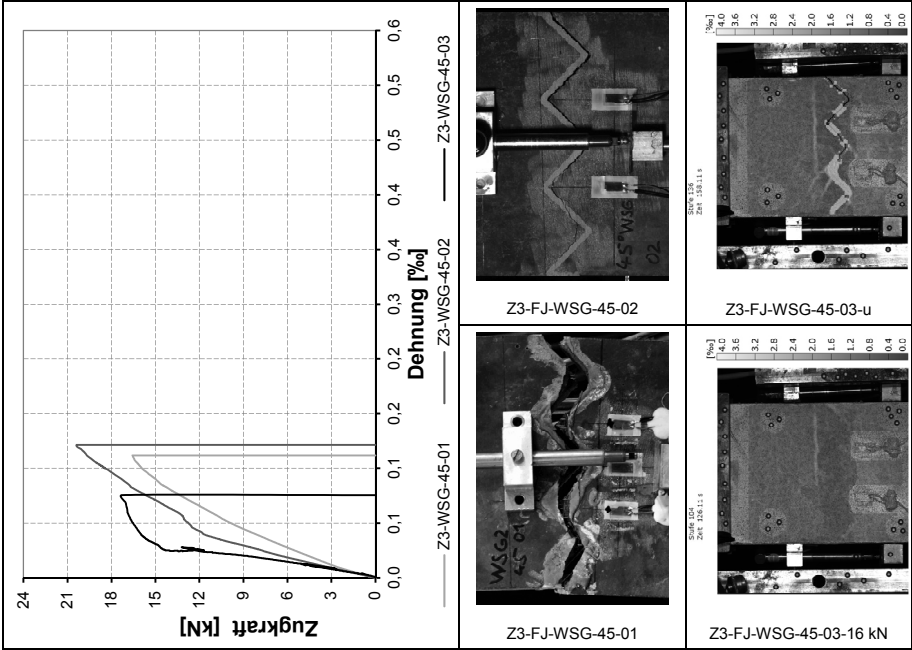


Z3-FJ-WSG-30-03

Zugversuch			
Eckdaten	Klebschichtdicke t: [mm]	2	
	Herstellungsmethode:	wasserstrahlgeschnitten	
	Fugengeometrie:	Keilzinkenverbindung	
	Fugenneigungswinkel [°]	30	
Versuch:		Z3-FJ-D2-WSG-30	
		01	02 03
Materialigenschaften	Alter	[d]	56
	Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	120,8
	Zugfestigkeit $f_{cm,t}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	9,8
	Alter:	[d]	30
Materialergebnisse	Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	123,6
	Zugfestigkeit $f_{am,t}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	13,8
	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	2,0 2,7 2,1
	Querschnittsfläche $A_{c,vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	5473 5343 5445
	Querschnittsfläche $A_{s,eff}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	202,5
	Versagensart <sup>2</sup> :		a, k, (b) a, k a (k)
	Spannung $\sigma_{gr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	- - -
	Streckgrenze $\sigma_{s,y}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	- - -
	Dehnung $\epsilon_{s,y}$ :	[%]	- - -
	Streckgrenze $\sigma_{s,y,nt}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	- - -
	Rissbreite $w_{vorh}$ <sup>4</sup> :	[mm]	- - -
	Spannung $\sigma_{c,max}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,67 2,13 2,87
	Dehnung $\epsilon_{ij}$ :	[%]	- - -
	Spannung $\sigma_{max,nt}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,55

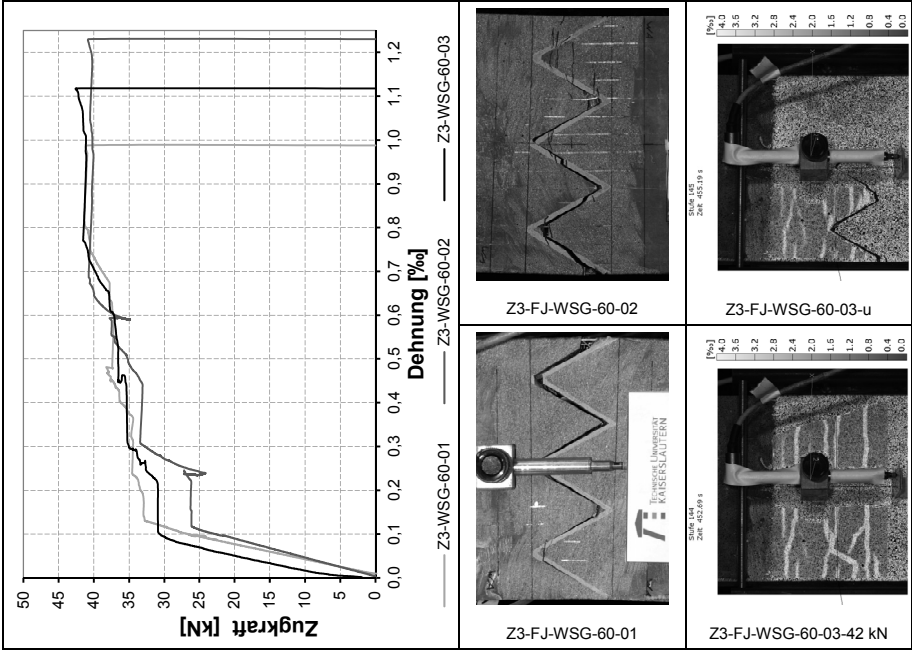
<sup>1</sup> Am Versuchstag  
<sup>2</sup> a=achsisiv; k=koehisiv; bew=Bewehrungsversagen; b=Betonvers. im fugennahen Bereich  
<sup>3</sup> Querschnittsfläche der außerhalb des Fugenbereichs im Probekörper vorh. Bewehrung  
<sup>4</sup> mittlere Rissbreite im Fugenbereich bei Erreichen der Streckgrenze





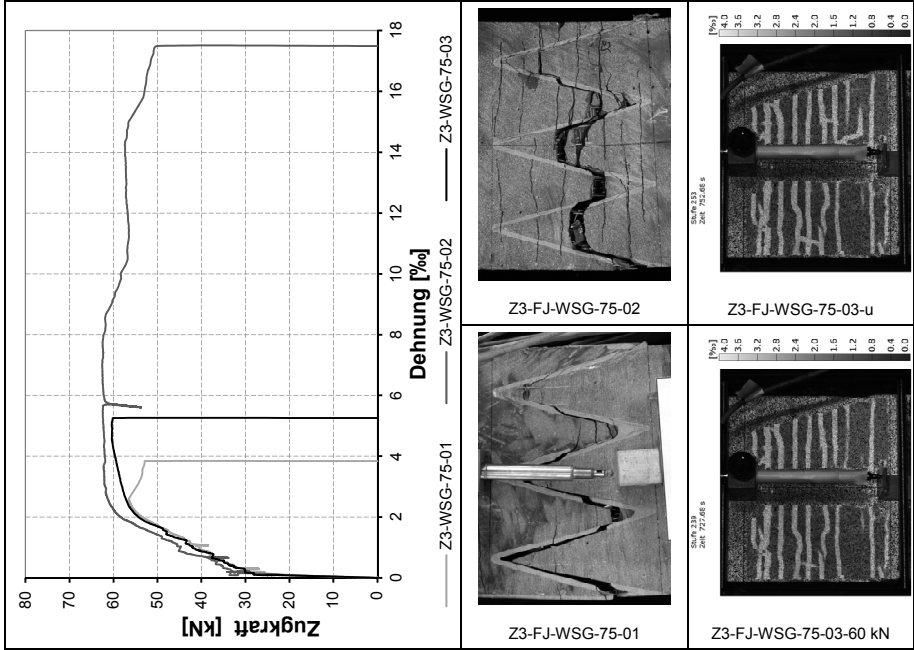
Zugversuch	
Eckdaten	Klebschichtdicke t: [mm] 2
	Herstellungsmethode: wasserstrahlgeschliffen
	Fugengeometrie: Keilzinkenverbindung
	Fugenneigungswinkel [°] 45
Versuch:	Z3-FJ-D2-WSG-45
	01 02 03
Materialigenschaften	Alter [d] 56
	Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 120,8
	Zugfestigkeit $f_{cm,t}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 9,8
	Alter: [d] 30
Materialigenschaften	Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 123,6
	Zugfestigkeit $f_{am,t}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 13,8
	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ : [mm] 2,0 2,1 2,2
	Querschnittsfläche $A_{c,vorh}$ [mm <sup>2</sup> ] 5484
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{s,eff}$ [mm <sup>2</sup> ] 202,5
	Versagensart <sup>2</sup> : a (k) a (k) a (k)
	Spannung $\sigma_{gr}$ : [N/mm <sup>2</sup> ] - - -
	Streckgrenze $\sigma_{s,y}$ : [N/mm <sup>2</sup> ] - - -
	Dehnung $\epsilon_{s,y}$ : [%] - - -
	Streckgrenze $\sigma_{s,y,nt}$ : [N/mm <sup>2</sup> ] - - -
	Rissbreite $w_{vorh}$ <sup>4</sup> : [mm] - - -
	Spannung $\sigma_{c,max}$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 3,04 3,73 3,25
	Dehnung $\epsilon_u$ : [%] - - -
	Spannung $\sigma_{max,nt}$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 3,34

<sup>1</sup> Am Versuchstag  
<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=kohäsiv; bew=Bewehrungsversagen; b=Bettonvers. im fugennahen Bereich  
<sup>3</sup> Querschnittsfläche der außerhalb des Fugenbereichs im Probekörper vorh. Bewehrung  
<sup>4</sup> mittlere Rissbreite im Fugenbereich bei Erreichen der Streckgrenze



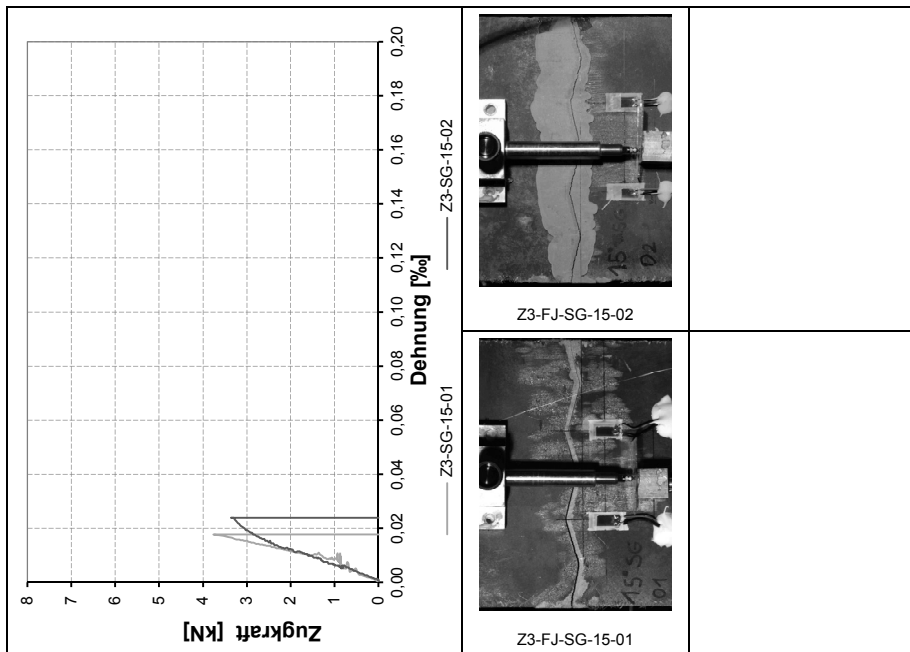
Zugversuch					
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2		
	Herstellungsmethode:		wasserstrahlingsgeschnitten		
	Fugengeometrie:		Keilzinkenverbindung		
	Fugenneigungswinkel	[°]	60		
Versuch:	Z3-FJ-D2-WSG-60				
		01	02	03	
Materialigenschaften	Alter	[d]	56		
	Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	120,8		
	Zugfestigkeit $f_{cm,t}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	9,8		
	Alter:	[d]	30		
Materialigenschaften	Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	123,6		
	Zugfestigkeit $f_{am,t}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	13,8		
	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	2,8	2,9	3,1
	Querschnittsfläche $A_{c,vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	5402	5507	5589
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{s,eff}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	202,5		
	Versagensart <sup>2</sup> :		a, b	a, b	a, b
	Spannung $\sigma_{gr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	5,93	4,62	5,43
	Spannung $\sigma_{c,max}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	7,66	7,40	7,61
	Spannung $\sigma_{s,max}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	204,35	217,96	227,70
	Spannung $\sigma_{max,m}$ :		216,7		
	Rissbreite $w_{vorh}$ <sup>4</sup> :	[mm]	-		
	Spannung $\sigma_{s,y}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	-	-	-
	Dehnung $\epsilon_{ij}$ :	[‰]	-	-	-
	Spannung $\sigma_{max,m}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	-	-	-

<sup>1</sup> Am Versuchstag  
<sup>2</sup> as=achsisiv; k=koaktiv; bew=Bewehrungsversagen; b=Bettonvers. im fugennahen Bereich  
<sup>3</sup> Querschnittsfläche der außerhalb des Fugenbereichs im Probekörper vorh. Bewehrung  
<sup>4</sup> mittlere Rissbreite im Fugenbereich bei Erreichen der Streckgrenze



Zugversuch	
Eckdaten	Klebschichtdicke t: [mm] 2
	Herstellungsmethode: wassertrahigeschnitten
Fugengeometrie: Keilzinkenverbindung	
Fugeneigungswinkel [°] 75	
Versuch:	Z3-FJ-D2-WSG-75
Materialigenschaften	Alter HPC-2
	Alter HPL
Versuchsergebnisse	Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 20,8
	Zugfestigkeit $f_{t,ctrl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 9,8
	Alter: [d] 30
	Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 23,6
	Zugfestigkeit $f_{am,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 13,8
	Klebschichtdicke $t_{vorh}^1$ : [mm] 2,8
	Querschnittsfläche $A_{c,vorh}$ : [mm <sup>2</sup> ] 5476
	Querschnittsfläche $A_{s,eff}^3$ : [mm <sup>2</sup> ] 202,5
	Versagensart <sup>2</sup> : bew, a, (k)
	Spannung $\sigma_{gr}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 4,16
Streckgrenze $\sigma_{s,y}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 267,2	
Dehnung $\epsilon_{s,y}$ : [%] 2,0	
Streckgrenze $\sigma_{s,y,nr}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 283,0	
Rissbreite $w_{vorh}^4$ : [mm] -	
Spannung $\sigma_{s,max}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 279,01	
Dehnung $\epsilon_u$ : [%] 2,6	
Spannung $\sigma_{s,max,nr}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 295,49	

<sup>1</sup> Am Versuchstag  
<sup>2</sup> asadhasiv; k=korhaus; bew=Bewehrungsversagen; b=Betonvers. im fugennahen Bereich  
<sup>3</sup> Querschnittsfläche der außerhalb des Fugenbereichs im Probekörper vorh. Bewehrung  
<sup>4</sup> mittlere Rissbreite im Fugenbereich bei Erreichen der Streckgrenze



Zugversuch			
Eckdaten	Klebschichtdicke t: [mm]	2	
	Herstellungsmethode:	schalglatt	
	Fugengeometrie:	Keilzinkenverbindung	
	Fugenneigungswinkel [°]	15	
Versuch:		Z3-FJ-D2-SG-15	
		01	02 03
Materialeigenschaften	Alter	[d]	56
	Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	137,8
	Zugfestigkeit $f_{cm,t}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,5
	Alter:	[d]	29
Materialergebnisse	Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	123,1
	Zugfestigkeit $f_{am,t}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	13,5
	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	2,1 18
	Querschnittsfläche $A_{c,vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	5593 5729
	Querschnittsfläche $A_{s,eff}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	202,5
	Versagensart <sup>2</sup> :		a a
	Spannung $\sigma_{gr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	- -
	Streckgrenze $\sigma_{s,y}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	- -
	Dehnung $\epsilon_{s,y}$ :	[%]	- -
	Streckgrenze $\sigma_{s,y,nt}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	- -
	Rissbreite $w_{vorh}$ :	[mm]	- -
	Spannung $\sigma_{c,max}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,68 0,58
	Dehnung $\epsilon_u$ :	[%]	- -
	Spannung $\sigma_{max,nt}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,63

<sup>1</sup>Am Versuchstag  
<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=kohäsiv; bew=Bewehrungsversagen; b=Betonvers. im fugennahen Bereich  
<sup>3</sup>Querschnittsfläche der außerhalb des Fugenbereichs im Probekörper vorh. Bewehrung  
<sup>4</sup>mittlere Rissbreite im Fugenbereich bei Erreichen der Streckgrenze

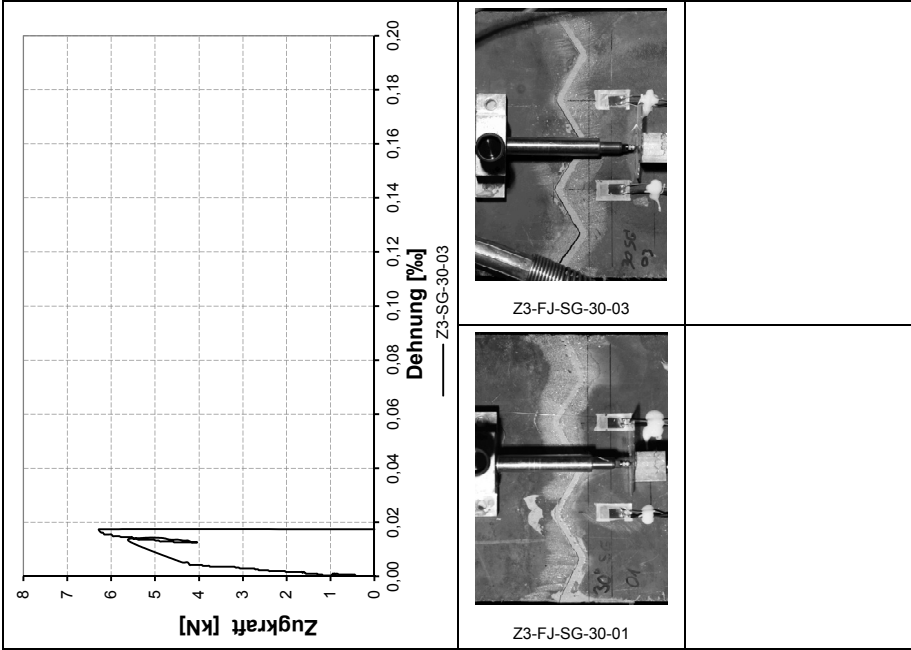
Zugversuch			
Eckdaten	Klebschichtdicke t:	[mm]	2
	Herstellungsmethode:		schalglatt
	Fugengeometrie:		Keilzinkenverbindung
	Fugenneigungswinkel	[°]	30
Versuch:			
			Z3-FJ-D2-SG-30
Materialigenschaften	Alter	[d]	01 02 03
	Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	56
	Zugfestigkeit $f_{cm,t}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	137,8
	Alter:	[d]	29
Materialigenschaften	Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	123,1
	Zugfestigkeit $f_{am,t}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	13,5
	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	19
	Querschnittsfläche $A_{c,vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	5676
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{s,eff}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	202,5
	Versagensart <sup>2</sup> :		a
	Spannung $\sigma_{gr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	-
	Streckgrenze $\sigma_{s,y}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	-
	Dehnung $\epsilon_{s,y}$ :	[%]	-
	Streckgrenze $\sigma_{s,y,nt}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	-
	Rissbreite $w_{vorh}$ <sup>4</sup> :	[mm]	-
	Spannung $\sigma_{c,max}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,17
	Dehnung $\epsilon_u$ :	[%]	-
	Spannung $\sigma_{max,nt}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,63

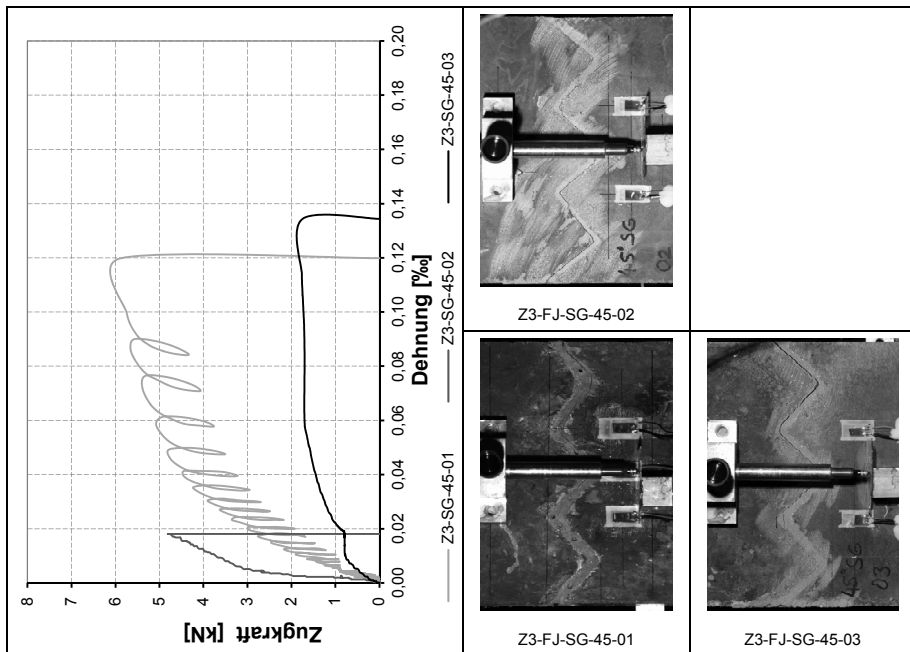
<sup>1</sup> Am Versuchstag

<sup>2</sup> a=achsisiv; k=koehisiv; bew=Bewehrungsversagen; b=Betonvers. im fugennahen Bereich

<sup>3</sup> Querschnittsfläche der außerhalb des Fugenbereichs im Probekörper vorh. Bewehrung

<sup>4</sup> mittlere Rissbreite im Fugenbereich bei Erreichen der Streckgrenze





Zugversuch			
Eckdaten	Klebschichtdicke t: [mm]	2	
	Herstellungsmethode:	schalglatt	
	Fugengeometrie:	Keilzinkenverbindung	
	Fugenneigungswinkel [°]	45	
Versuch:		Z3-FJ-D2-SG-45	
		01	02 03
Materialeigenschaften	Alter	[d]	56
	Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	137,8
	Zugfestigkeit $f_{cm,t}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,5
	Alter:	[d]	29
	Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	123,1
	Zugfestigkeit $f_{am,t}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	13,5
Versuchsergebnisse	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	2,1 2,0 18
	Querschnittsfläche $A_{c,vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	5853 5505 5665
	Querschnittsfläche $A_{s,eff}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	202,5
	Versagensart <sup>2</sup> :		a a a
	Spannung $\sigma_{gr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	- - -
	Streckgrenze $\sigma_{s,y}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	- - -
	Dehnung $\epsilon_{s,y}$ :	[%]	- - -
	Streckgrenze $\sigma_{s,y,nt}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	- - -
	Rissbreite $w_{vorh}$ :	[mm]	- - -
	Spannung $\sigma_{c,max}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	101 0,89 0,32
Dehnung $\epsilon_{ij}$ :	[%]	- - -	
Spannung $\sigma_{max,nt}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,74	

<sup>1</sup>Am Versuchstag

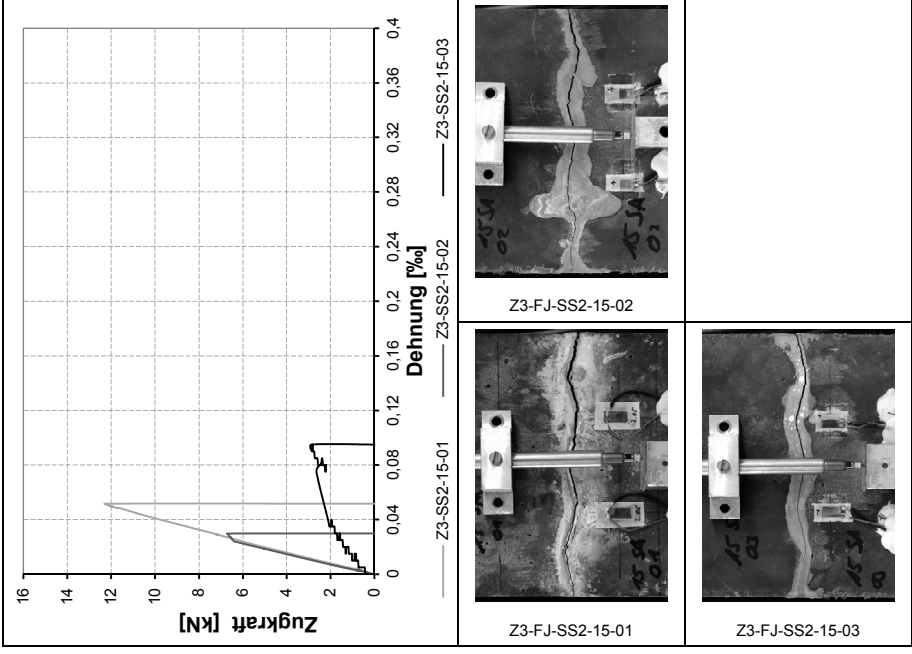
<sup>2</sup>a=achsisiv; k=koehisiv; bew=Bewehrungsversagen; b=Betonvers. im fugennahen Bereich

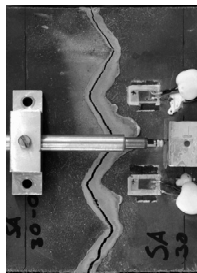
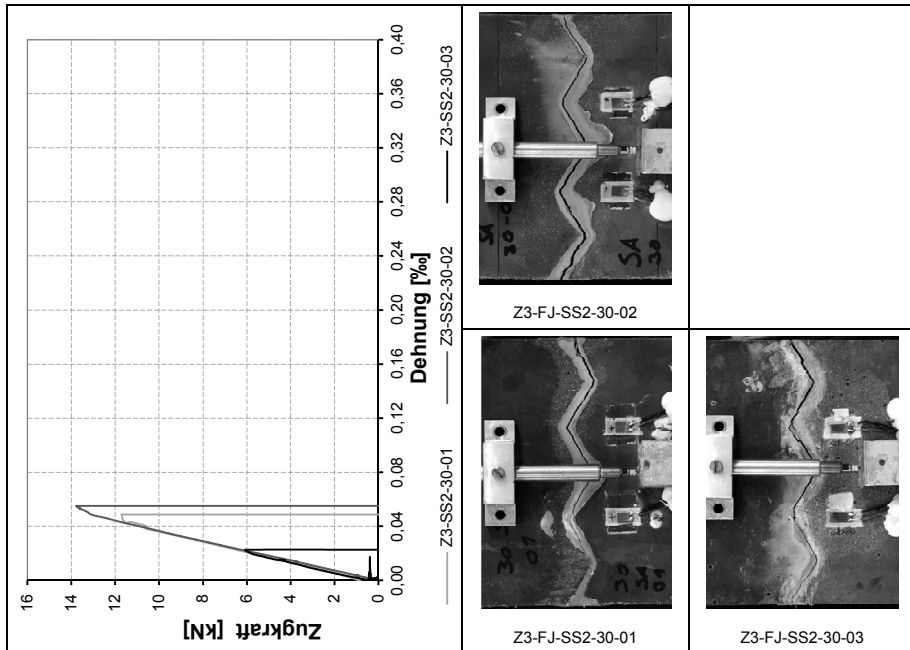
<sup>3</sup>Querschnittsfläche der außerhalb des Fugenbereichs im Probekörper vorh. Bewehrung

<sup>4</sup>mittlere Rissbreite im Fugenbereich bei Erreichen der Streckgrenze

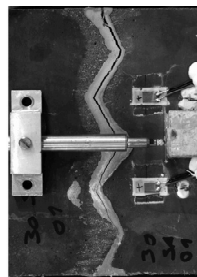
Zugversuch		
Eckdaten	Klebschichtdicke t: [mm]	2
	Herstellungsmethode:	sandgestraht
	Fugengeometrie:	Keilzinkenverbindung
	Fugenneigungswinkel [°]	15
Versuch:	Z3-FJ-D2-SS2-15	
	Alter	01 02 03
Materialigenschaften	Alter	56
	Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	137,8
	Zugfestigkeit $f_{ctm,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	12,5
	Alter:	30
Materialigenschaften	Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	123,8
	Zugfestigkeit $f_{adm,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	13,8
	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ : [mm]	16 2,0
	Querschnittsfläche $A_{c,vorh}$ : [mm <sup>2</sup> ]	5040
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{s,eff}$ : [mm <sup>2</sup> ]	202,5
	Versagensart <sup>2</sup> :	a, (k) a, (k) a, (k)
	Spannung $\sigma_{gr}$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	-
	Streckgrenze $\sigma_{s,y}$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	-
	Dehnung $\epsilon_{s,y}$ : [%]	-
	Streckgrenze $\sigma_{s,y,nt}$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	-
	Rissbreite $w_{vorh}$ <sup>4</sup> : [mm]	-
	Spannung $\sigma_{c,max}$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	2,48
	Dehnung $\epsilon_{uj}$ : [%]	-
	Spannung $\sigma_{max,nt}$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	141

<sup>1</sup> Am Versuchstag  
<sup>2</sup> a=achsisiv; k=koaktiv; bew=Bewehrungsversagen; b=Betonvers. im fugennahen Bereich  
<sup>3</sup> Querschnittsfläche der außerhalb des Fugenbereichs im Probekörper vorh. Bewehrung  
<sup>4</sup> mittlere Rissbreite im Fugenbereich bei Erreichen der Streckgrenze





Z3-FJ-SS2-30-02



Z3-FJ-SS2-30-01

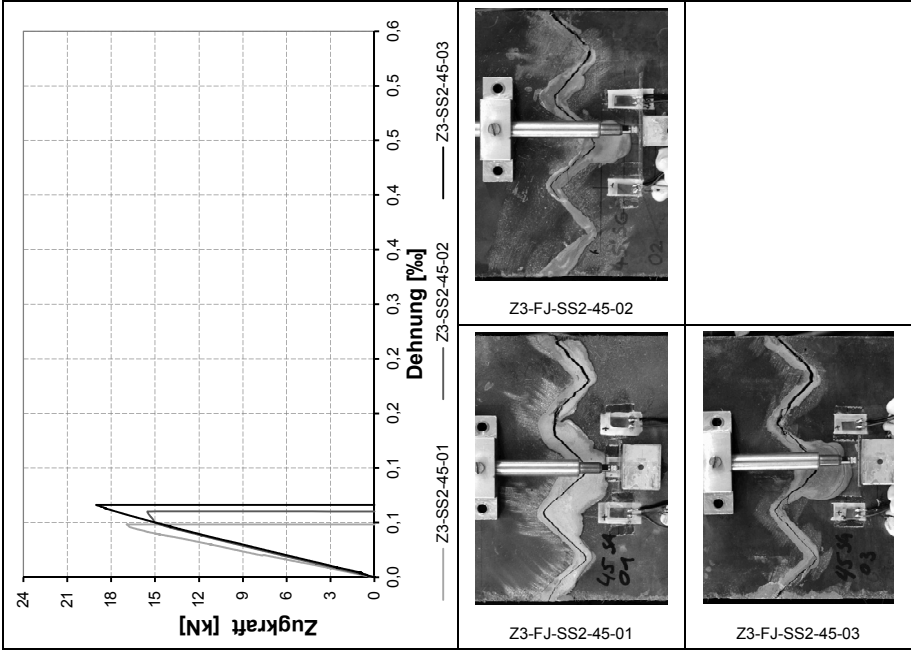


Z3-FJ-SS2-30-03

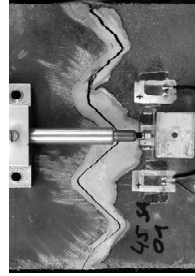
Zugversuch		
Eckdaten	Klebschichtdicke t: [mm]	2
	Herstellungsmethode:	sandgestraht
	Fugengeometrie:	Keilzinkenverbindung
	Fugenneigungswinkel [°]	30
Versuch:	Z3-FJ-D2-SS2-30	
	Alter	01 02 03
Materialigenschaften	Alter	56
	Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	137,8
	Zugfestigkeit $f_{cm,t}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	12,5
	Alter:	30
	Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	123,8
	Zugfestigkeit $f_{am,t}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	13,8
Versuchsergebnisse	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ : [mm]	2,5 2,5 16
	Querschnittsfläche $A_{c,vorh}$ : [mm <sup>2</sup> ]	5654 5562 5571
	Querschnittsfläche $A_{s,eff}$ <sup>3</sup> : [mm <sup>2</sup> ]	202,5
	Versagensart <sup>2</sup> :	a, (k) a, (b) a, (b)
	Spannung $\sigma_{gr}$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	- - -
	Streckgrenze $\sigma_{s,y}$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	- - -
	Dehnung $\epsilon_{s,y}$ : [%]	- - -
	Streckgrenze $\sigma_{s,y,nt}$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	- - -
	Rissbreite $w_{vorh}$ <sup>4</sup> : [mm]	- - -
	Spannung $\sigma_{c,max}$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	107 2,52 2,12
Dehnung $\epsilon_u$ : [%]	- - -	
Spannung $\sigma_{max,nt}$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	190	

<sup>1</sup>Am Versuchstag  
<sup>2</sup> a=achsisiv; k=koaktiv; bew=Bewehrungsversagen; b=Betonvers. im fugennahen Bereich  
<sup>3</sup>Querschnittsfläche der außerhalb des Fugenbereichs im Probekörper vorh. Bewehrung  
<sup>4</sup> mittlere Rissbreite im Fugenbereich bei Erreichen der Streckgrenze

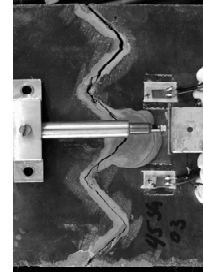




Z3-FJ-SS2-45-02



Z3-FJ-SS2-45-01

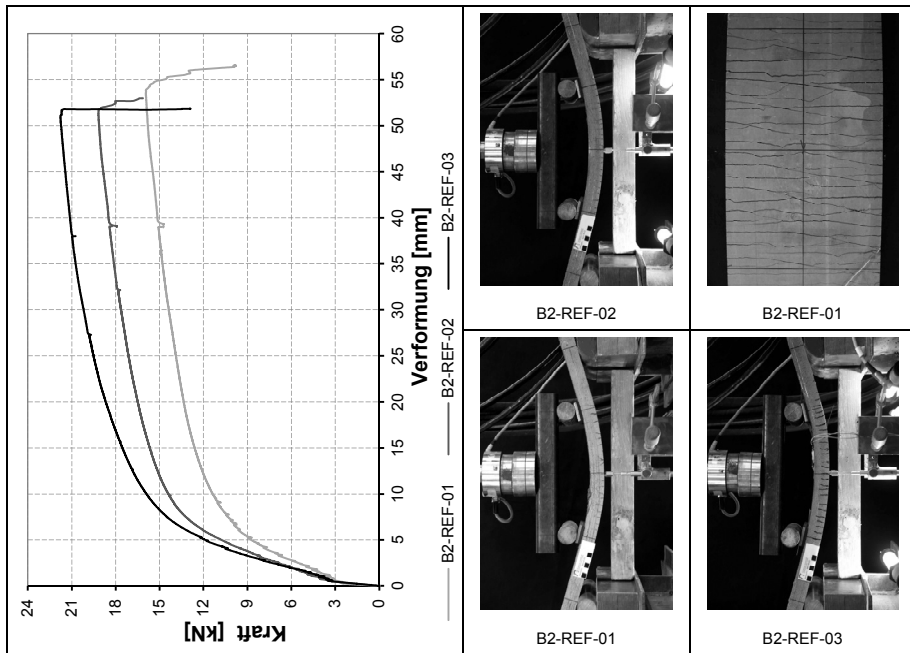


Z3-FJ-SS2-45-03

Zugversuch			
Eckdaten	Klebschichtdicke t: [mm]	2	
	Herstellungsmethode:	sandgestraht	
	Fugengeometrie:	Keilzinkenverbindung	
	Fugenneigungswinkel [°]	45	
Versuch:	Z3-FJ-D2-SS2-45		
	Alter	01 02 03	
Materialeigenschaften	Alter	[d]	56
	Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	137,8
	Zugfestigkeit $f_{ctm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,5
	Alter:	[d]	30
	Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	123,8
	Zugfestigkeit $f_{adm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	13,8
Versuchsergebnisse	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm]	1,5 18 16
	Querschnittsfläche $A_{c,vorh}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	5606 5584 5397
	Querschnittsfläche $A_{s,eff}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	202,5
	Versagensart <sup>2</sup> :		a, (k) a, (k) a, (k)
	Spannung $\sigma_{gr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	- - -
	Streckgrenze $\sigma_{s,y}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	- - -
	Dehnung $\epsilon_{s,y}$ :	[%]	- - -
	Streckgrenze $\sigma_{s,y,nt}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	- - -
	Rissbreite $w_{vorh}$ :	[mm]	- - -
	Spannung $\sigma_{c,max}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	3,04 2,82 3,54
Dehnung $\epsilon_u$ :	[%]	- - -	
Spannung $\sigma_{max,nt}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	3,13	

<sup>1</sup>Am Versuchstag  
<sup>2</sup>a=achsisiv; k=koehisiv; bew=Bewehrungsversagen; b=Betonvers. im fugennahen Bereich  
<sup>3</sup>Querschnittsfläche der außerhalb des Fugenbereichs im Probekörper vorh. Bewehrung  
<sup>4</sup>mittlere Rissbreite im Fugenbereich bei Erreichen der Streckgrenze

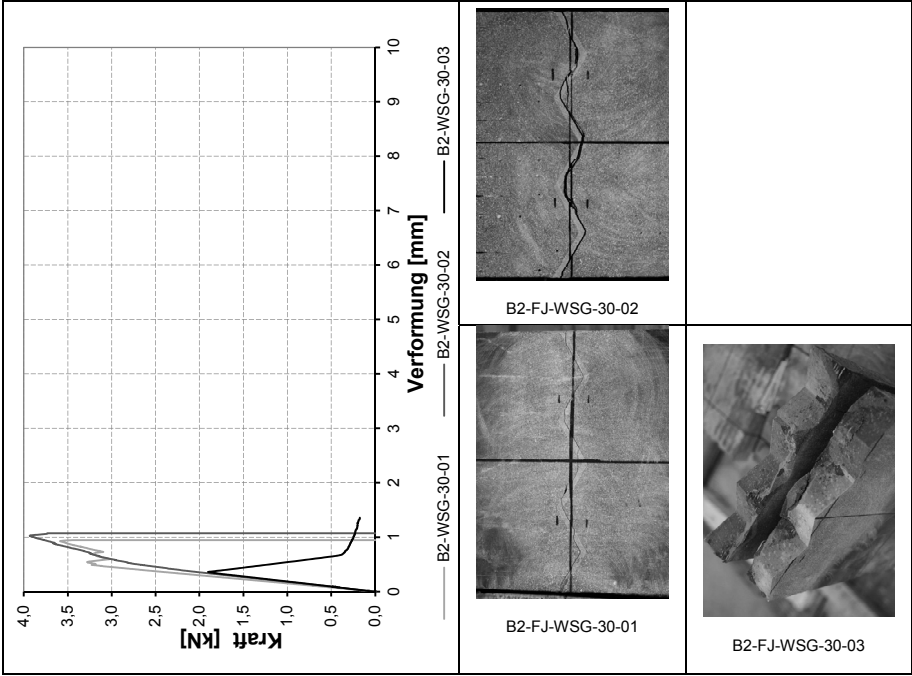
E.2 Drei- und Vierpunktbiegeversuche



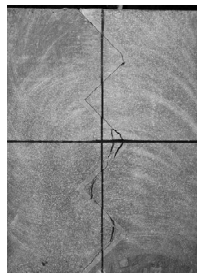
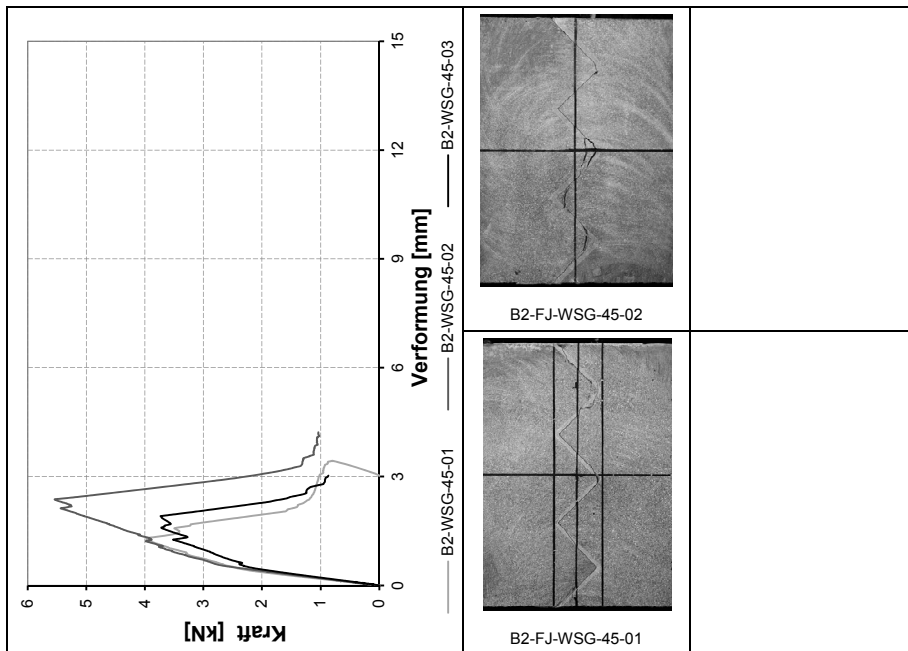
Vierpunktbiegeversuch				
Eckdaten	Klebschichtdicke t: [mm]	2		
	Herstellungsmethode:	-		
	Fugengeometrie:	-		
	Fugenneigungswinkel [°]	-		
Versuch:		B2-REF		
Material Eigenschaften	Alter	01	02	03
	Alter	71		
HPC-2	Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	13,7		
	Zugfestigkeit $f_{ctmfl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	4,2		
HFL	Alter:	-		
	Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	-		
HFL	Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	-		
	Klebschichtdicke $t_{verh}$ : [mm]	-		
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{s,eff}^3$ [mm <sup>2</sup> ]	202,5		
	Querschnittsbreite $b_{c,verh}$ : [mm]	179,3	179,5	179,8
	Querschnittshöhe $h_{c,verh}$ : [mm]	27,5	31,4	32,4
	Versagensart <sup>2</sup> :	bew	bew	bew
	Spannung $\sigma_{cr}$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	7,17	7,09	6,44
	Streckgrenze $M_{y}$ : [kNcm]	54,7	72,2	79,7
	Streckgrenze $M_{y,irr}$ : [kNcm]	68,9		
	Rissbreite $w_{verh}^4$ : [mm]	~0,1	~0,08	~0,1
	Moment $M_{max}$ : [kNcm]	107,6	129,5	147,0
	Moment $M_{max,ir}$ : [kNcm]	128,0		

<sup>1</sup> Am Versuchstag  
<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=kohäsiv; bew=Bewehrungsversagen, b=Betovers. im fugenahen Bereich  
<sup>3</sup> Querschnittsfläche der außerhalb des Fugenebereichs im Probekörper vorh. Bewehrung  
<sup>4</sup> mittlere Rissbreite im Fugenebereich bei Erreichen der Streckgrenze  
<sup>5</sup> Biegespannung

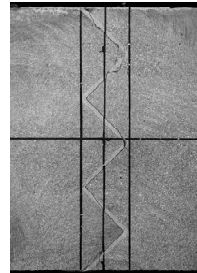
Vierpunktbiegeversuch		
Fckdaten	Klebschichtdicke t: [mm]	2
	Herstellungsmethode:	wasserstrahigeschnitten
	Fugengeometrie:	Keilzinkenverbindung
	Fugeneigungswinkel [°]	30
Versuch:		B2-FJ-D2-WSG-30
Materialigenschaften	Alter	01 02 03 71
	Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	13,7
Materialigenschaften	Zugfestigkeit $f_{tm,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	4,2
	Alter:	28
	Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	130,9
	Zugfestigkeit $f_{am,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	16,6
Versuchsergebnisse	Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ : [mm]	4,0 3,9 4,2
	Querschnittsfläche $A_{s,eff}^3$ : [mm <sup>2</sup> ]	202,5
	Querschnittsbreite $b_{c,vorh}^4$ : [mm]	179,8 181,0 180,3
	Querschnittshöhe $h_{c,vorh}^4$ : [mm]	32,4 31,0 30,5
	Versagensart <sup>2</sup> :	a (b) a a
	Spannung $\sigma_{gr}^5$ : [N/mm <sup>2</sup> ]	6,88 6,97 -
	Streckgrenze $M_y$ : [kNcm]	- - -
	Streckgrenze $M_{y,mr}$ : [kNcm]	- - -
	Rissbreite $w_{vorh}^4$ : [mm]	- - -
	Moment $M_{max}^6$ : [kNcm]	24,2 26,5 12,8
Moment $M_{max,mr}^6$ : [kNcm]	212	



<sup>1</sup>Am Versuchstag  
<sup>2</sup>a=adhasiv; k=konkret; bew=Bewehrungsversagen; b=Betonvers. im fugenmahen Bereich  
<sup>3</sup>Querschnittsfläche der auBerhalb des Fugenbereichs im Probekörper vorh. Bewehrung  
<sup>4</sup>mittlere Rissbreite im Fugenbereich bei Erreichen der Streckgrenze  
<sup>5</sup>Biegespannung  
<sup>6</sup>Biegemoment



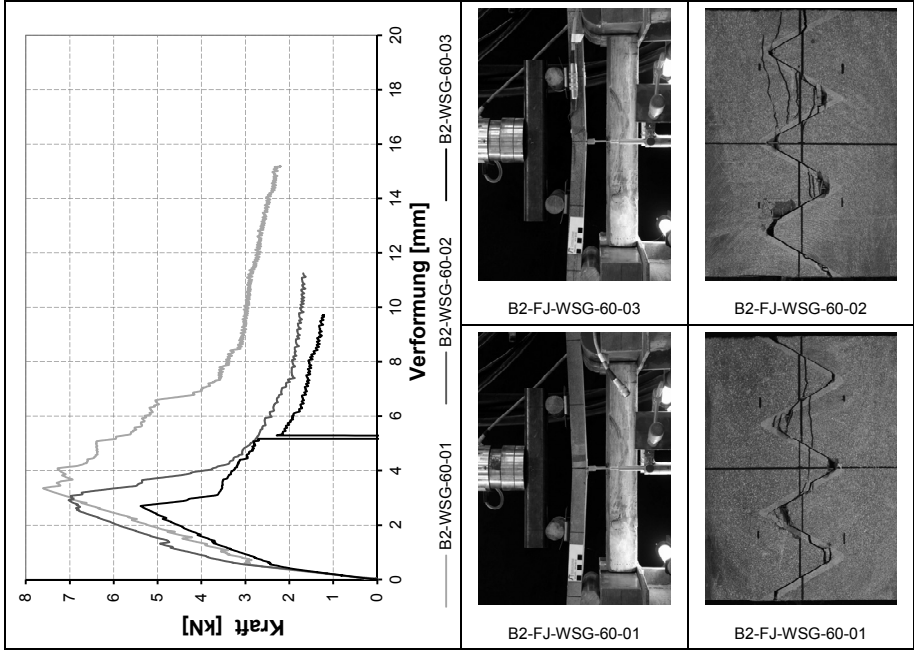
B2-FJ-WSG-45-02



B2-FJ-WSG-45-01

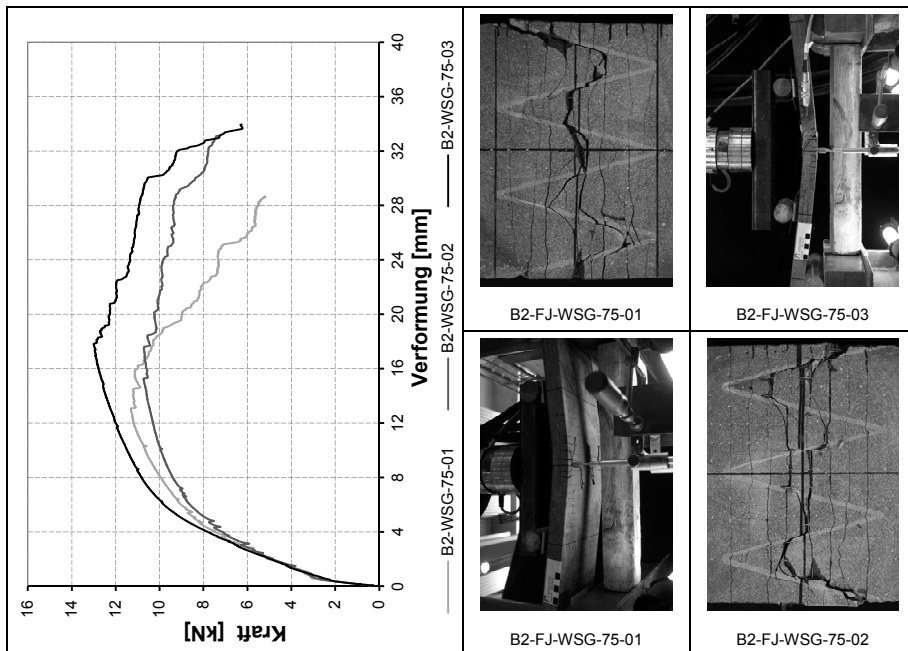
Vierpunktbiegeversuch	
Klebschichtdicke t:	[mm] 2
Herstellungsmethode:	wasserfrühgeschmitten
Fugengeometrie:	Keilzinkenverbindung
Fugenneigungswinkel	[°] 45
Versuch:	B2-FJ-D2-WSG-45
Alter	01 02 03
Alter	71
Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 13,7
Zugfestigkeit $f_{ctmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 4,2
Alter:	28
Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 134,6
Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 19,1
Klebschichtdicke $t_{verh}$ :	[mm] 2,6 3,6 3,5
Querschnittsfläche $A_{s,eff}^3$	[mm <sup>2</sup> ] 202,5
Querschnittsbreite $b_{c,verh}$ :	[mm] 180,0 179,5 179,5
Querschnittshöhe $h_{c,verh}$ :	[mm] 29,6 30,2 29,7
Versagensart <sup>2</sup> :	a a (b) a
Spannung $\sigma_{cr}^5$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] - - -
Streckgrenze $M_y$ :	[kNcm] - - -
Streckgrenze $M_{y,itr}$ :	[kNcm] - - -
Rissbreite $w_{verh}^4$ :	[mm] - - -
Moment $M_{max}^6$ :	[kNcm] 26,9 37,4 25,6
Moment $M_{max,m}^6$ :	[kNcm] 29,9
Versuchsergebnisse	

<sup>1</sup>Am Versuchstag  
<sup>2</sup>a=adhäsiv; k=kohäsiv; bew=Bewehrungsversagen, b=Betonvers. im fugennahen Bereich  
<sup>3</sup>Querschnittsfläche der außerhalb des Fugbereichs im Probekörper vorh. Bewehrung  
<sup>4</sup>mittlere Rissbreite im Fugbereich bei Erreichen der Streckgrenze  
<sup>5</sup>Biegespannung, <sup>6</sup> im Versagensschnitt



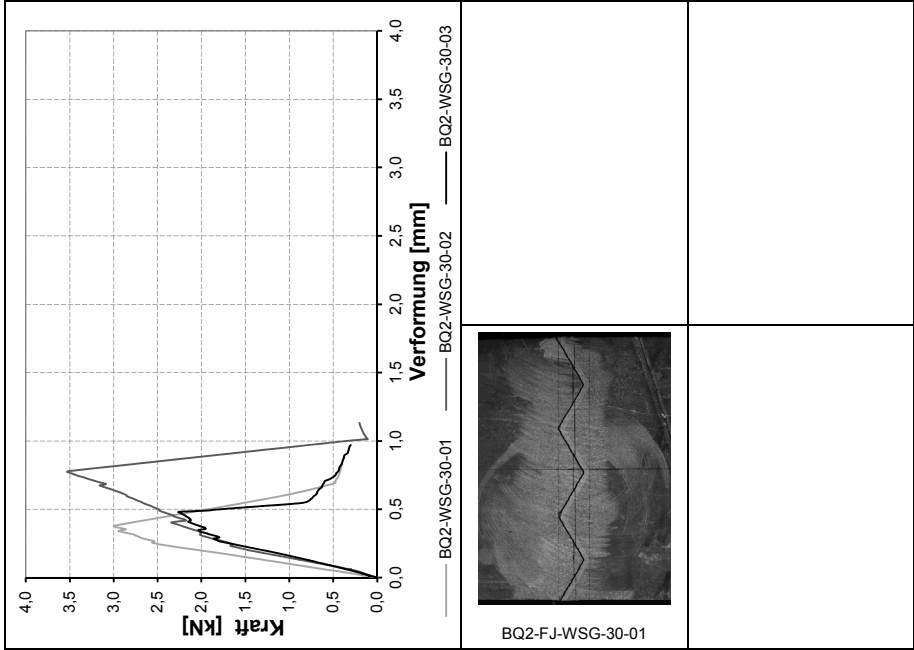
Vierpunktbiegeversuch	
Klebschichtdicke t:	[mm] 2
Herstellungsmethode:	wasserstrahlgeschmitten
Fugengeometrie:	Keilzinkenverbindung
Fugenneigungswinkel	[°] 60
Versuch:	B2-FJ-D2-WSG-60
Alter	01 02 03
Alter	71
Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 13,7
Zugfestigkeit $f_{ctmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 4,2
Alter:	28
Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 130,9
Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 16,6
Klebschichtdicke $t_{verh}$ :	[mm] 3,8 4,5 3,9
Querschnittsfläche $A_{s,eff}^3$ :	[mm <sup>2</sup> ] 202,5
Querschnittsbreite $b_{c,verh}$ :	[mm] 130,0 130,3 130,8
Querschnittshöhe $h_{c,verh}$ :	[mm] 310 30,9 29,8
Versagensart <sup>2</sup> :	a (b) a (b) a (b)
Spannung $\sigma_{cr}^5$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 6,33 7,29 6,30
Streckgrenze $M_y$ :	[kNcm] - - -
Streckgrenze $M_{y,itr}$ :	[kNcm] - - -
Rissbreite $w_{verh}^4$ :	[mm] - - -
Moment $M_{max}^6$ :	[kNcm] 51,4 47,5 36,4
Moment $M_{max,m}^6$ :	[kNcm] 45,1
Versuchsergebnisse	

<sup>1</sup> Am Versuchstag  
<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=kohäsiv; bew=Bewehrungsversagen, b=Betonvers. im fugenahen Bereich  
<sup>3</sup> Querschnittsfläche der außerhalb des Fugbereichs im Probekörper vorh. Bewehrung  
<sup>4</sup> mittlere Rissbreite im Fugbereich bei Erreichen der Streckgrenze  
<sup>5</sup> Biegespannung, <sup>6</sup> im Versagensschnitt



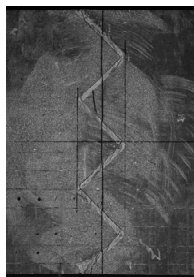
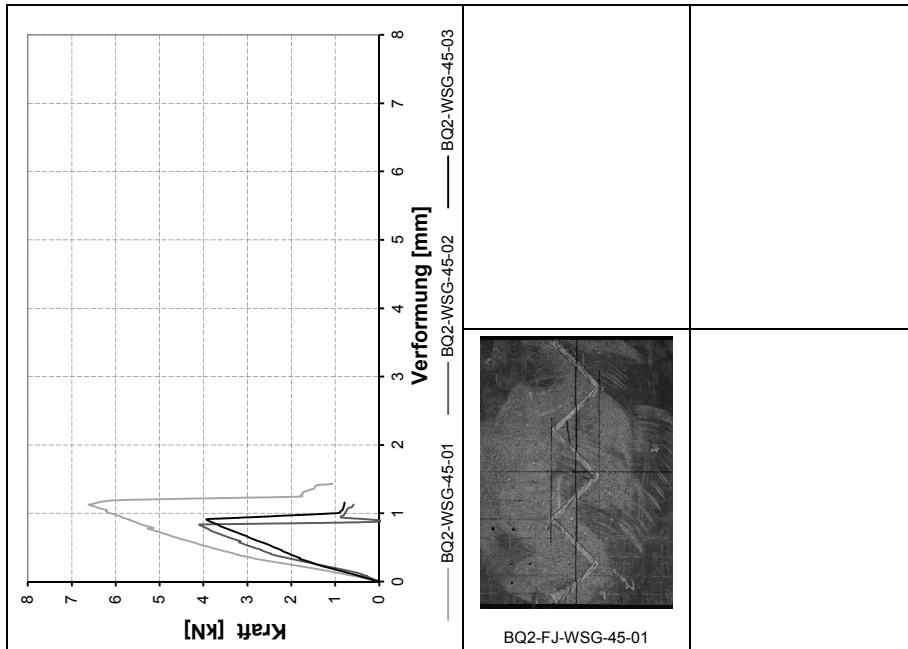
Vierpunktbiegeversuch	
Klebschichtdicke t:	[mm] 2
Herstellungsmethode:	wasserstrahlgeschnitten
Fugengeometrie:	Keilzinkenverbindung
Fugenneigungswinkel	[°] 75
Versuch:	B2-FJ-D2-WSG-75
Alter	01 02 03
Alter	71
Druckfestigkeit $f_{cmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 13,7
Zugfestigkeit $f_{ctmfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 4,2
Alter:	28
Druckfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 134,6
Zugfestigkeit $f_{amfl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 19,1
Klebschichtdicke $t_{verh}$ :	[mm] 3,0 3,4 3,7
Querschnittsfläche $A_{s,eff}^3$	[mm <sup>2</sup> ] 202,5
Querschnittsbreite $b_{c,verh}$ :	[mm] 179,3 179,0 180,0
Querschnittshöhe $h_{c,verh}$ :	[mm] 30,6 30,4 30,8
Versagensart <sup>2</sup> :	bew. a, (k) bew. a, (k) bew. a, (k)
Spannung $\sigma_{cr}^5$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 7,49 6,35 5,23
Streckgrenze $M_{y,nr}$ :	[kNcm] 54,0 52,7 54,7
Streckgrenze $M_{y,nr}$ :	[kNcm] 53,8
Rissbreite $w_{verh}^4$ :	[mm] ~0,1 ~0,1 ~0,08
Moment $M_{max}^6$ :	[kNcm] 76,3 72,4 87,7
Moment $M_{max,max}^6$ :	[kNcm] 78,8
Versuchsergebnisse	
Materialigenschaften	
HP-C-2	
HFL	

<sup>1</sup> Am Versuchstag  
<sup>2</sup> a=adhasiv; k=kohasiv; bew=Bewehrungsversagen, b=Betonvers. im fugennahen Bereich  
<sup>3</sup> Querschnittsfläche der außerhalb des Fugenbereichs im Probekörper vorh. Bewehrung  
<sup>4</sup> mittlere Rissbreite im Fugenbereich bei Erreichen der Streckgrenze  
<sup>5</sup> Biegespannung, <sup>6</sup> im Versagensschnitt



Dreipunktbiegeversuch	
Klebschichtdicke t:	[mm] 2
Herstellungsmethode:	wasserstrahlingsgeschnitten
Fugengeometrie:	Keilzinkenverbindung
Fugenneigungswinkel	[°] 30
Versuch:	BQ2-FJ-D2-WSG-30
Alter	01 02 03
Alter	71
Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 13,7
Zugfestigkeit $f_{ctm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 4,2
Alter:	28
Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 134,6
Zugfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 19,1
Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm] 4,7 4,9 4,2
Querschnittsfläche $A_{s,eff}^3$ :	[mm <sup>2</sup> ] 202,5
Querschnittsbreite $b_{c,vorh}^4$ :	[mm] 179,5 179,5 179,8
Querschnittshöhe $h_{c,vorh}^4$ :	[mm] 31,7 29,6 31,1
Versagensart <sup>2</sup> :	a a a a(k) MW:
Spannung $\sigma_{cr}^5$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 5,60 4,13 4,19 4,6
Streckgrenze $M_y$ :	[kNcm] - - - -
Streckgrenze $Q_y$ :	[kN] - - - -
Rissbreite $w_{vorh}^4$ :	[mm] - - - -
Moment $M_{max}^6$ :	[kNcm] 13,5 15,9 10,2 13,2
Querkraft $Q_{max}$ :	[kN] 15 18 1,1 1,5
Versuchsergebnisse	

<sup>1</sup> Am Versuchstag  
<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=kohäsiv; bew=Bewehrungsversagen; b=Betonvers. im fugenahen Bereich  
<sup>3</sup> Querschnittsfläche der außerhalb des Fugenbereichs im Probekörper vorh. Bewehrung  
<sup>4</sup> mittlere Rissbreite im Fugenbereich bei Erreichen der Streckgrenze  
<sup>5</sup> Biegespannung, <sup>6</sup> im Versagensschnitt

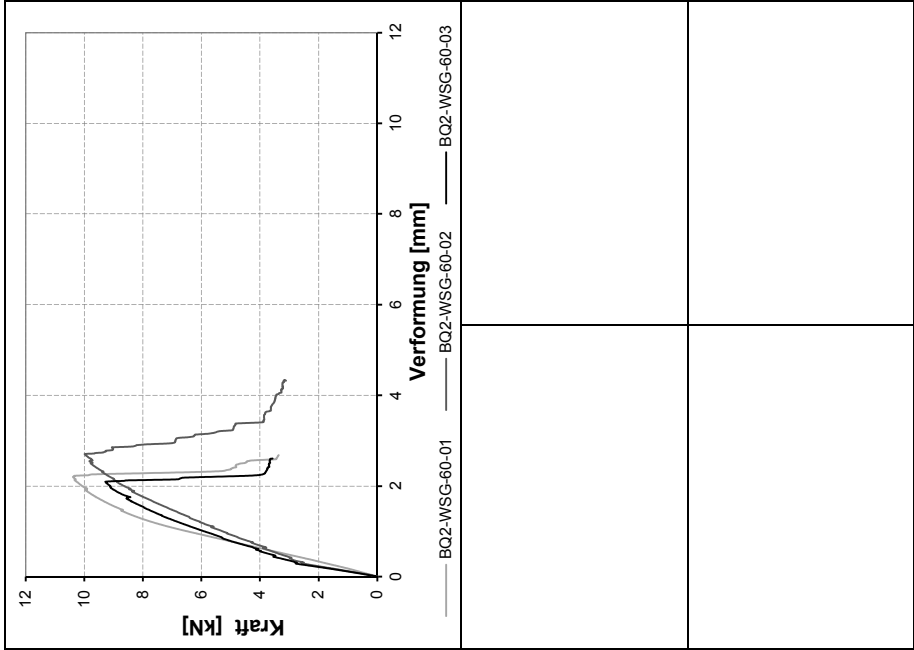


BQ2-FJ-WSG-45-01

Dreipunktbiegeversuch	
Klebschichtdicke t:	[mm] 2
Herstellungsmethode:	wasserstrahlingsgeschnitten
Fugengeometrie:	Keilzinkenverbindung
Fugenneigungswinkel	[°] 45
Versuch:	BQ2-FJ-D2-WSG-45
Alter	01 02 03
Alter HPC-2	71
Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 13,7
Zugfestigkeit $f_{ctm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 4,2
Alter:	28
Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 134,6
Zugfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 19,1
Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm] 3,6 3,6 3,6
Querschnittsfläche $A_{s,eff}^3$ :	[mm <sup>2</sup> ] 202,5
Querschnittsbreite $b_{c,vorh}^4$ :	[mm] 179,5 179,5 179,0
Querschnittshöhe $h_{c,vorh}^4$ :	[mm] 29,3 29,1 28,2
Versagensart <sup>2</sup> :	a a a
Spannung $\sigma_{cr}^5$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 7,91 6,67 5,12
Streckgrenze $M_y$ :	[kNcm] - - -
Streckgrenze $Q_y$ :	[kN] - - -
Rissbreite $w_{vorh}^4$ :	[mm] - - -
Moment $M_{max}^6$ :	[kNcm] 29,8 18,5 17,7
Querkraft $Q_{max}$ :	[kN] 3,3 2,1 2,0
Versuchsergebnisse	
MW: 6,6	

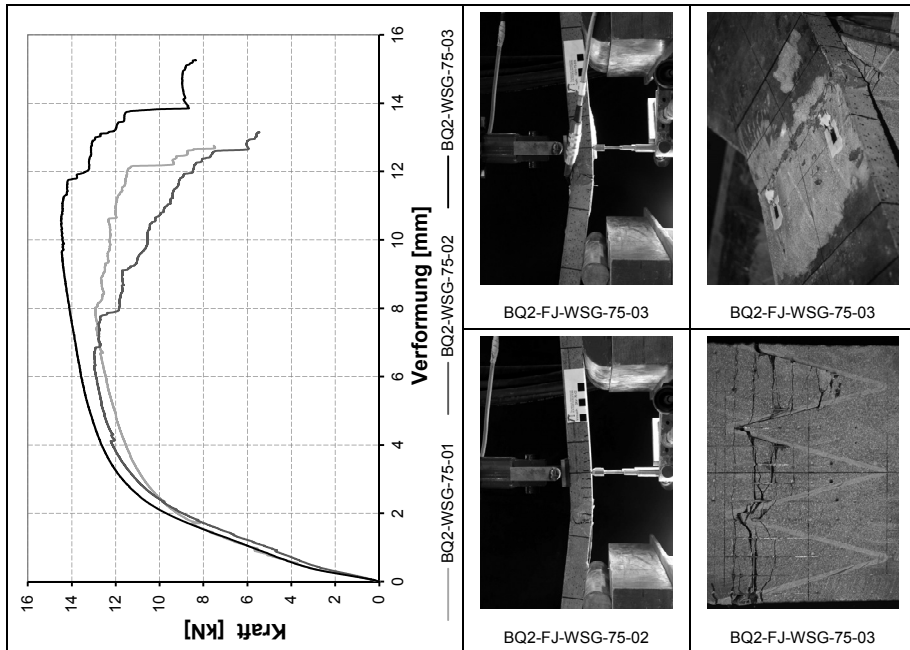
<sup>1</sup> Am Versuchstag  
<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=kohäsiv; bew=Bewehrungsversagen; b=Betonvers. im fugenmahen Bereich  
<sup>3</sup> Querschnittsfläche der außerhalb des Fugenbereichs im Probekörper vorh. Bewehrung  
<sup>4</sup> mittlere Rissbreite im Fugenbereich bei Erreichen der Streckgrenze  
<sup>5</sup> Biegespannung. <sup>6</sup> im Versagensschnitt





Dreipunktbiegeversuch	
Klebschichtdicke t:	2
Herstellungsmethode:	wassers trahgeschnitten
Fugengeometrie:	Keilzinkenverbindung
Fugeneigungswinkel	60
Versuch:	BQ2-FJD2-WSG-60
Alter	01 02 03
Alter	71
Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	13,7
Zugfestigkeit $f_{cm,t}^1$ :	4,2
Alter:	28
Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	134,6
Zugfestigkeit $f_{am,t}^1$ :	19,1
Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	3,6 3,3 3,5
Querschnittsfläche $A_{s,eff}^3$ :	202,5
Querschnittsbreite $b_{c,vorh}^2$ :	110 179,5 179,5
Querschnittshöhe $h_{c,vorh}^2$ :	29,5 28,2 29,4
Versagensart <sup>2</sup> :	a a, bew a, bew
Spannung $\sigma_{cr}^5$ :	7,73 7,09 7,30
Streckgrenze $M_y$ :	32,4 38,3 34,7
Streckgrenze $Q_y$ :	3,6 4,3 3,9
Rissbreite $w_{vorh}^4$ :	~0,1
Moment $M_{max}^6$ :	46,8 45,0 41,8
Querkraft $Q_{max}^6$ :	5,2 5,0 4,6
Versuchsergebnisse	
MW:	
7,4 35,1 3,9	
-	
44,5	
4,9	

<sup>1</sup>Am Versuchstag  
<sup>2</sup>a=adhäsiv; k=konhäsitv; bew=Bewehrungsversagen; b=Betonvers; im fugenmahen Bereich  
<sup>3</sup>Querschnittsfläche d er außerhalb d es Fug enbereichs im Probekör per vorh. Bewehrung  
<sup>4</sup>mittlere Rissbreite im Fug enbereich bei Erreichen der Streckgrenze  
<sup>5</sup>Biegespannung, <sup>6</sup> im Versagensschnitt



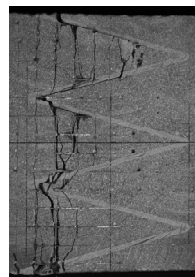
BQ2-FJ-WSG-75-03



BQ2-FJ-WSG-75-03



BQ2-FJ-WSG-75-02

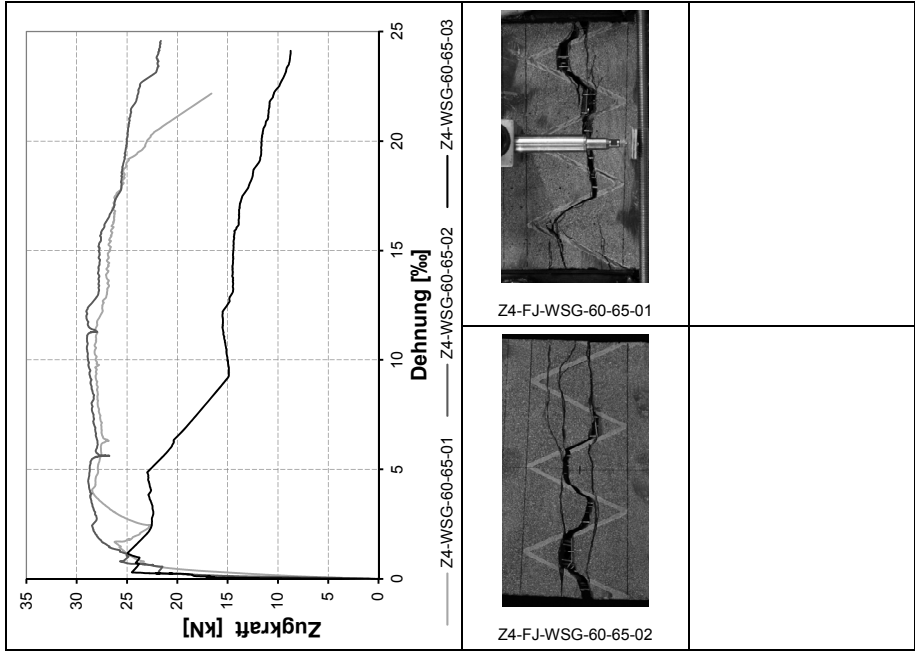


BQ2-FJ-WSG-75-03

Dreipunktbiegeversuch	
Klebschichtdicke t:	[mm] 2
Herstellungsmethode:	wasserstrahlgeschliffen
Fugengeometrie:	Keilzinkenverbindung
Fugenneigungswinkel	[°] 75
Versuch:	BQ2-FJ-D2-WSG-75
Alter	01 02 03
Alter	71
Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 13,7
Zugfestigkeit $f_{cm,t}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 4,2
Alter:	28
Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 134,6
Zugfestigkeit $f_{am,t}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 19,1
Klebschichtdicke $t_{vorh}^2$ :	[mm] 3,5 3,5 3,5 3,6
Querschnittsfläche $A_{s,eff}^3$ :	[mm <sup>2</sup> ] 202,5
Querschnittsbreite $b_{c,vorh}^4$ :	[mm] 110 179,0 179,8
Querschnittshöhe $h_{c,vorh}^4$ :	[mm] 30,7 310 315
Versagensart <sup>2</sup> :	a a bew a, bew MW:
Spannung $\sigma_{cr}^5$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 7,62 6,85 6,13 6,9
Streckgrenze $M_y$ :	[kNcm] 38,3 41,0 41,9 40,4
Streckgrenze $Q_y$ :	[kN] 4,3 4,6 4,7 4,5
Rissbreite $w_{vorh}^4$ :	[mm] ~0,1
Moment $M_{max}^6$ :	[kNcm] 84,1 81,2 97,9 87,7
Querkraft $Q_{max}$ :	[kN] 6,5 6,5 7,3 6,7
Versuchsergebnisse	

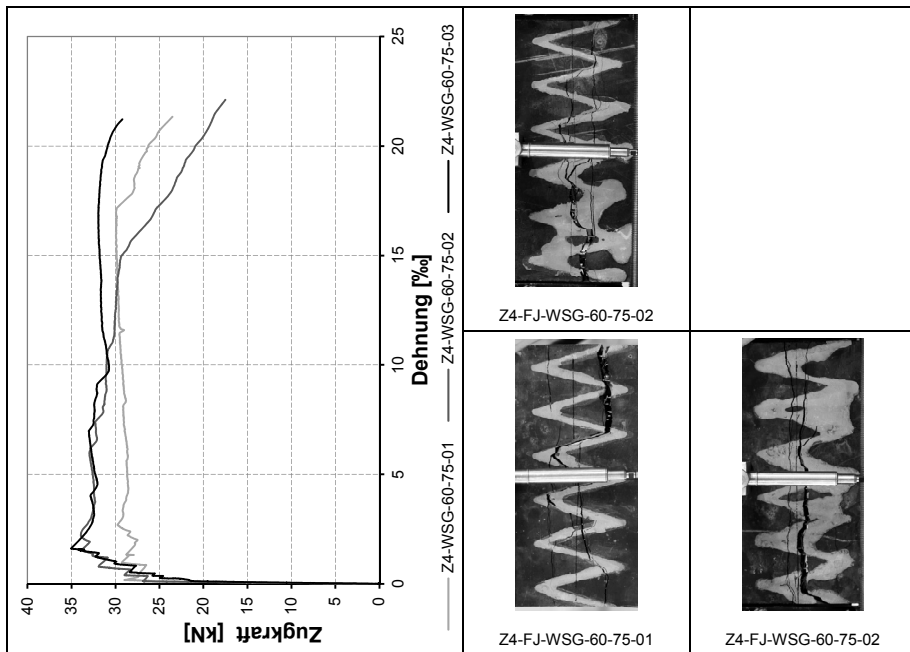
<sup>1</sup> Am Versuchstag  
<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=kohäsiv; bew=Bewehrungsversagen; b=Betonvers. im fugenahen Bereich  
<sup>3</sup> Querschnittsfläche der außerhalb des Fugenbereichs im Probekörper vorh. Bewehrung  
<sup>4</sup> mittlere Rissbreite im Fugenbereich bei Erreichen der Streckgrenze  
<sup>5</sup> Biegespannung. <sup>6</sup> im Versagensschnitt

E.3 Untersuchungen zur Bewehrungstragfähigkeit



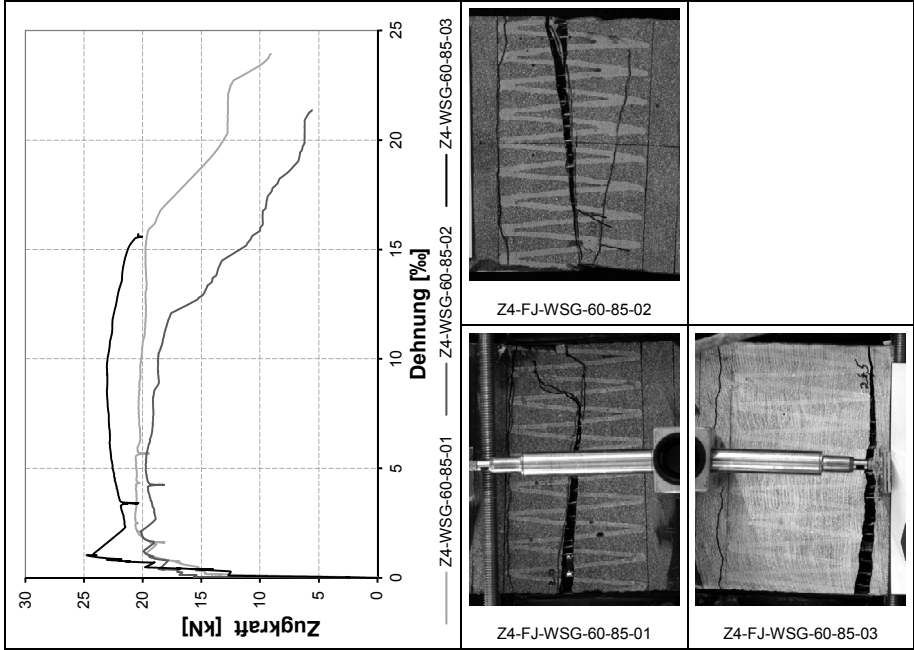
Zugversuch	
Klebschichtdicke t:	2
Herstellungsmethode:	wassers-trahgeschnitten
Fugengeometrie:	Keilzinkenverbindung
Zahnlänge:	60
Fugeneigungswinkel	65
Versuch:	Z4-FJ-D2-WSG-60-65
Alter	01 02 03
Alter	82
Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	13,0
Zugfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	15,8
Alter:	30
Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	130,4
Zugfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	18,2
Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	3,0 3,0 3,2
Querschnittsfläche $A_{s,vorh}$ :	5094 5080 5030
Querschnittsfläche $A_{s,eff}$ :	104
Versagensart <sup>2</sup> :	bew, a bew, a bew, a
Spannung $\sigma_{gr}$ :	4,53 4,29 3,46
Streckgrenze $\sigma_{s,y}$ :	222,5 240,8 -
Dehnung $\epsilon_{s,y}$ :	1,1 1,7 1,0
Rissbreite $w_{vorh}$ :	$\leq 0,1$ $\leq 0,1$ -
Spannung $\sigma_{s,max}$ :	274,47 279,87 240,27
Dehnung $\epsilon_{s,u}$ :	10,1 11,9 -
Materialeigenschaften	
HPC-2	
HFL	
Versuchsergebnisse	
MW:	
Spannung $\sigma_{gr}$ :	4,1
Streckgrenze $\sigma_{s,y}$ :	231,7
Dehnung $\epsilon_{s,y}$ :	1,3
Rissbreite $w_{vorh}$ :	-
Spannung $\sigma_{s,max}$ :	277,2
Dehnung $\epsilon_{s,u}$ :	11,0

<sup>1</sup>Am Versuchstagg  
<sup>2</sup>a=adhäsiv; k=kohäsiv; bew=Bewehrungsversagen; b=Betonvers. im fugenmahen Bereich  
<sup>3</sup>Querschnittsfläche der auferhalb des Fugbereichs im Probekörper vorh. Bewehrung  
<sup>4</sup>mittlere Rissbreite im Fugbereich bei Erreichen der Streckgrenze



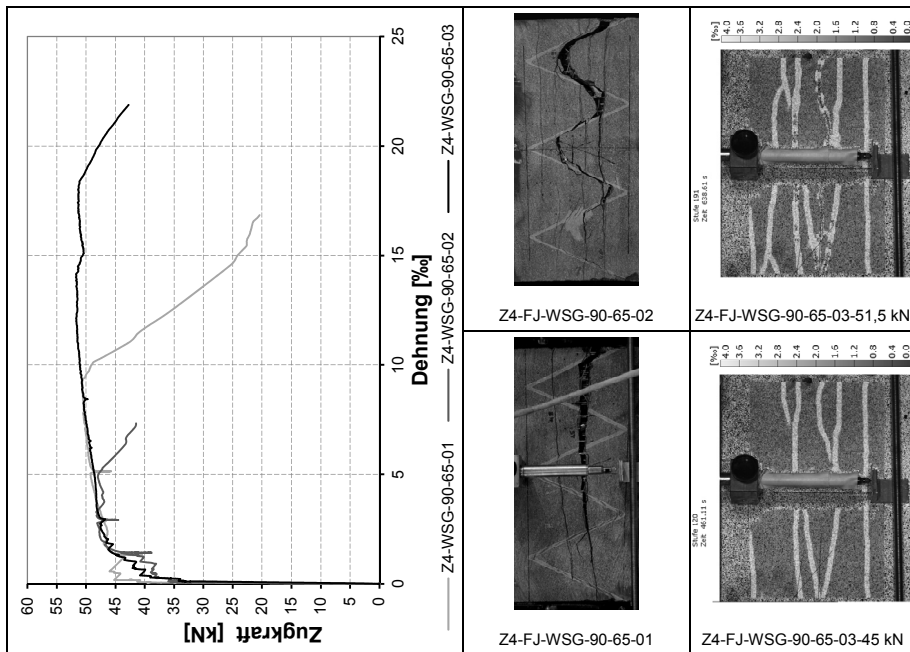
Zugversuch		
Klebschichtdicke t:	[mm] 2	
Herstellungsmethode:	wasserstrahlingsgeschnitten	
Fugengeometrie:	Keilzinkenverbindung	
Zahnlänge:	[mm] 60	
Fugeneigungswinkel	[°] 75	
Versuch:	Z4-F J-D2-WSG-60-75	
	01 02 03	
Alter	[d] 388	
Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 133,9	
Zugfestigkeit $f_{cm,t}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 16,9	
Alter:	[d] 28	
Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 1315	
Zugfestigkeit $f_{am,t}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 10,2	
Materialigenschaften	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	[mm] 3,2 3,2 3,2
	Querschnittsfläche $A_{c,verh}$ :	[mm <sup>2</sup> ] 6707 6793 6385
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{s,eff}^3$ :	[mm <sup>2</sup> ] 129
	Versagensart <sup>2</sup> :	bew, a, (k) bew, a, (k) bew, a, (k) MW:
	Spannung $\sigma_{gr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 3,86 3,87 3,21 3,6
	Streckgrenze $\sigma_{s,y}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 222,5 24,12 24,12 241,2
	Dehnung $\epsilon_{s,y}$ :	[%] - - - -
	Rissbreite $w_{vorh}^4$ :	[mm] - - - -
	Spannung $\sigma_{s,max}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ] 233,08 264,74 280,54 272,6
	Dehnung $\epsilon_{s,u}$ :	[%] 6,2 16,9 6,8 10,0

<sup>1</sup>Am Versuchstag  
<sup>2</sup>a=adhäsiv; k=kohäsiv; bew=Bewehrungsversagen; b=Betonvers; im fugenmahen Bereich  
<sup>3</sup>Querschnittsfläche der außerhalb des Fugenbereichs im Probekörper vorh. Bewehrung  
<sup>4</sup>mittlere Rissbreite im Fugenbereich bei Erreichen der Streckgrenze



Zugversuch																																																																						
Eckdaten	<table border="1"> <tr> <td>Klebschichtdicke t:</td> <td>[mm]</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Herstellungsmethode:</td> <td></td> <td>wasserstrahlingsgeschnitten</td> </tr> <tr> <td>Fugengeometrie:</td> <td></td> <td>Keilzinkenverbindung</td> </tr> <tr> <td>Zahnlänge:</td> <td>[mm]</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td>Fugenneigungswinkel</td> <td>[°]</td> <td>85</td> </tr> <tr> <td>Versuch:</td> <td></td> <td>Z4-F J D2-WSG-60-85</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>01 02 03</td> </tr> <tr> <td>Alter</td> <td>[d]</td> <td>82</td> </tr> <tr> <td>Druckfestigkeit <math>f_{cm,fl}^1</math>:</td> <td>[N/mm<sup>2</sup>]</td> <td>13,0</td> </tr> <tr> <td>Zugfestigkeit <math>f_{cm,fl}^1</math>:</td> <td>[N/mm<sup>2</sup>]</td> <td>15,8</td> </tr> <tr> <td>Alter:</td> <td>[d]</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>Druckfestigkeit <math>f_{am,fl}^1</math>:</td> <td>[N/mm<sup>2</sup>]</td> <td>130,4</td> </tr> <tr> <td>Zugfestigkeit <math>f_{am,fl}^1</math>:</td> <td>[N/mm<sup>2</sup>]</td> <td>112</td> </tr> <tr> <td>Klebschichtdicke <math>t_{vorh}^1</math>:</td> <td>[mm]</td> <td>2,0 2,4 2,6</td> </tr> <tr> <td>Querschnittsfläche <math>A_{c,ver,h}</math>:</td> <td>[mm<sup>2</sup>]</td> <td>3639 3773 3638</td> </tr> <tr> <td>Querschnittsfläche <math>A_{s,eff}^3</math>:</td> <td>[mm<sup>2</sup>]</td> <td>77</td> </tr> <tr> <td>Versagensart<sup>2</sup>:</td> <td></td> <td>bew bew bew</td> </tr> <tr> <td>Spannung <math>\sigma_{gr}</math>:</td> <td>[N/mm<sup>2</sup>]</td> <td>4,26 4,37 3,44</td> </tr> <tr> <td>Streckgrenze <math>\sigma_{s,y}^1</math>:</td> <td>[N/mm<sup>2</sup>]</td> <td>233,0 233,0 246,0</td> </tr> <tr> <td>Dehnung <math>\epsilon_{s,y}</math>:</td> <td>[%]</td> <td>~0,7 ~0,7 ~0,7</td> </tr> <tr> <td>Rissbreite <math>w_{vorh}^4</math>:</td> <td>[mm]</td> <td>≤ 0,1 ≤ 0,1 ≤ 0,1</td> </tr> <tr> <td>Spannung <math>\sigma_{s,max}^1</math>:</td> <td>[N/mm<sup>2</sup>]</td> <td>267,44 255,02 291,26</td> </tr> <tr> <td>Dehnung <math>\epsilon_{s,u}</math>:</td> <td>[%]</td> <td>15,6 4,7 8,2</td> </tr> </table>	Klebschichtdicke t:	[mm]	2	Herstellungsmethode:		wasserstrahlingsgeschnitten	Fugengeometrie:		Keilzinkenverbindung	Zahnlänge:	[mm]	60	Fugenneigungswinkel	[°]	85	Versuch:		Z4-F J D2-WSG-60-85			01 02 03	Alter	[d]	82	Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	13,0	Zugfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	15,8	Alter:	[d]	30	Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	130,4	Zugfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	112	Klebschichtdicke $t_{vorh}^1$ :	[mm]	2,0 2,4 2,6	Querschnittsfläche $A_{c,ver,h}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	3639 3773 3638	Querschnittsfläche $A_{s,eff}^3$ :	[mm <sup>2</sup> ]	77	Versagensart <sup>2</sup> :		bew bew bew	Spannung $\sigma_{gr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	4,26 4,37 3,44	Streckgrenze $\sigma_{s,y}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	233,0 233,0 246,0	Dehnung $\epsilon_{s,y}$ :	[%]	~0,7 ~0,7 ~0,7	Rissbreite $w_{vorh}^4$ :	[mm]	≤ 0,1 ≤ 0,1 ≤ 0,1	Spannung $\sigma_{s,max}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	267,44 255,02 291,26	Dehnung $\epsilon_{s,u}$ :	[%]	15,6 4,7 8,2
Klebschichtdicke t:	[mm]	2																																																																				
Herstellungsmethode:		wasserstrahlingsgeschnitten																																																																				
Fugengeometrie:		Keilzinkenverbindung																																																																				
Zahnlänge:	[mm]	60																																																																				
Fugenneigungswinkel	[°]	85																																																																				
Versuch:		Z4-F J D2-WSG-60-85																																																																				
		01 02 03																																																																				
Alter	[d]	82																																																																				
Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	13,0																																																																				
Zugfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	15,8																																																																				
Alter:	[d]	30																																																																				
Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	130,4																																																																				
Zugfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	112																																																																				
Klebschichtdicke $t_{vorh}^1$ :	[mm]	2,0 2,4 2,6																																																																				
Querschnittsfläche $A_{c,ver,h}$ :	[mm <sup>2</sup> ]	3639 3773 3638																																																																				
Querschnittsfläche $A_{s,eff}^3$ :	[mm <sup>2</sup> ]	77																																																																				
Versagensart <sup>2</sup> :		bew bew bew																																																																				
Spannung $\sigma_{gr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	4,26 4,37 3,44																																																																				
Streckgrenze $\sigma_{s,y}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	233,0 233,0 246,0																																																																				
Dehnung $\epsilon_{s,y}$ :	[%]	~0,7 ~0,7 ~0,7																																																																				
Rissbreite $w_{vorh}^4$ :	[mm]	≤ 0,1 ≤ 0,1 ≤ 0,1																																																																				
Spannung $\sigma_{s,max}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	267,44 255,02 291,26																																																																				
Dehnung $\epsilon_{s,u}$ :	[%]	15,6 4,7 8,2																																																																				
Versuchsergebnisse	<table border="1"> <tr> <td>MW:</td> <td></td> <td>bew</td> <td>bew</td> <td>bew</td> </tr> <tr> <td>Spannung <math>\sigma_{gr}</math>:</td> <td>[N/mm<sup>2</sup>]</td> <td>4,26</td> <td>4,37</td> <td>3,44</td> </tr> <tr> <td>Streckgrenze <math>\sigma_{s,y}^1</math>:</td> <td>[N/mm<sup>2</sup>]</td> <td>233,0</td> <td>233,0</td> <td>246,0</td> </tr> <tr> <td>Dehnung <math>\epsilon_{s,y}</math>:</td> <td>[%]</td> <td>~0,7</td> <td>~0,7</td> <td>~0,7</td> </tr> <tr> <td>Rissbreite <math>w_{vorh}^4</math>:</td> <td>[mm]</td> <td>≤ 0,1</td> <td>≤ 0,1</td> <td>≤ 0,1</td> </tr> <tr> <td>Spannung <math>\sigma_{s,max}^1</math>:</td> <td>[N/mm<sup>2</sup>]</td> <td>267,44</td> <td>255,02</td> <td>291,26</td> </tr> <tr> <td>Dehnung <math>\epsilon_{s,u}</math>:</td> <td>[%]</td> <td>15,6</td> <td>4,7</td> <td>8,2</td> </tr> </table>	MW:		bew	bew	bew	Spannung $\sigma_{gr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	4,26	4,37	3,44	Streckgrenze $\sigma_{s,y}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	233,0	233,0	246,0	Dehnung $\epsilon_{s,y}$ :	[%]	~0,7	~0,7	~0,7	Rissbreite $w_{vorh}^4$ :	[mm]	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	Spannung $\sigma_{s,max}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	267,44	255,02	291,26	Dehnung $\epsilon_{s,u}$ :	[%]	15,6	4,7	8,2																																		
MW:		bew	bew	bew																																																																		
Spannung $\sigma_{gr}$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	4,26	4,37	3,44																																																																		
Streckgrenze $\sigma_{s,y}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	233,0	233,0	246,0																																																																		
Dehnung $\epsilon_{s,y}$ :	[%]	~0,7	~0,7	~0,7																																																																		
Rissbreite $w_{vorh}^4$ :	[mm]	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1																																																																		
Spannung $\sigma_{s,max}^1$ :	[N/mm <sup>2</sup> ]	267,44	255,02	291,26																																																																		
Dehnung $\epsilon_{s,u}$ :	[%]	15,6	4,7	8,2																																																																		

<sup>1</sup>Am Versuchstag  
<sup>2</sup>a=adhäsiv; k=kohäsiv; bew=Bewehrungsversagen, b=Betonsvers. im fugenmahen Bereich  
<sup>3</sup>Querschnittsfläche der außerhalb des Fugenbereichs im Probekörper vorh. Bewehrung  
<sup>4</sup>mittlere Rissbreite im Fugenbereich bei Erreichen der Streckgrenze



Z4-FJ-WSG-90-65-02

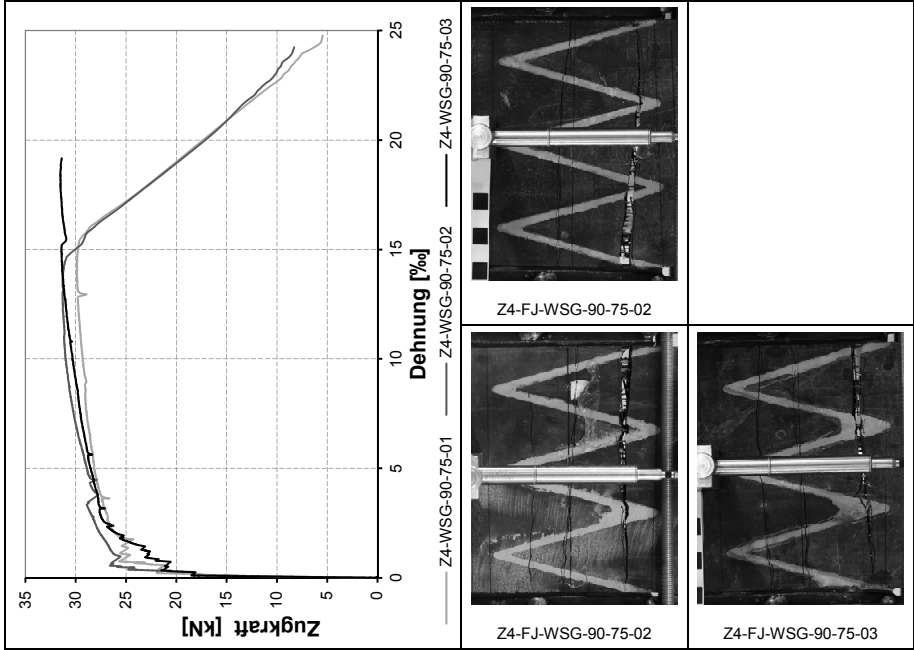
Z4-FJ-WSG-90-65-01

Z4-FJ-WSG-90-65-03-51,5 kN

Z4-FJ-WSG-90-65-03-45 kN

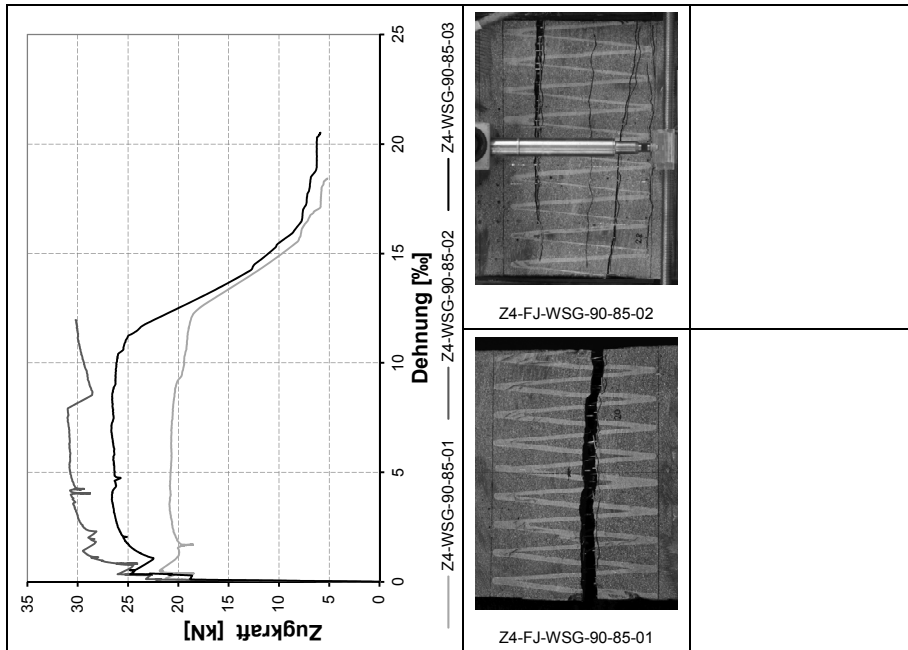
Zugversuch	
Eckdaten	Klebschichtdicke t: [mm] 2 Herstellungsmethode: wasserstrahlgeschliffen Fugengeometrie: Keilzinkenverbindung Zahnlänge: [mm] 90 Fugeneigungswinkel [°] 65 Versuchs: Z4-F J-D2-WSG-90-65 Alter: 01 02 03 Alter: 82 Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 133,6 Zugfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 15,6 Alter: 30 Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 130,4 Zugfestigkeit $f_{am,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 18,2
Materialeigenschaften	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ : [mm] 3,6 2,5 3,4 Querschnittsfläche $A_{c,ver,h}$ [mm <sup>2</sup> ] 7528 7403 7593 Querschnittsfläche $A_{s,eff}$ [mm <sup>2</sup> ] 159 Versagensart <sup>2</sup> : bew bew a bew a MW: Spannung $\sigma_{gr}$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 190 2,04 161 18 Streckgrenze $\sigma_{s,y}$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 279,2 283,6 280,4 281,1 Dehnung $\epsilon_{s,y}$ [%] ~1,5 ~1,5 ~1,5 ~1,5 Rissbreite $w_{vorh}$ : [mm] $\leq 0,1$ $\leq 0,1$ $\leq 0,1$ $\leq 0,1$ Spannung $\sigma_{s,max}$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 318,32 302,95 324,59 315,3 Dehnung $\epsilon_{s,u}$ [%] 9,1 3,2 13,9 8,7
	Versuchsergebnisse

<sup>1</sup> Am Versuchsstag  
<sup>2</sup> a=adhäsiv; k=kohäsiv; bew=Bewehrungsversagen; b=Betonsvers. im fugenmahen Bereich  
<sup>3</sup> Querschnittsfläche der außerhalb des Fugenbereichs im Probekörper vorh. Bewehrung  
<sup>4</sup> mittlere Rissbreite im Fugenbereich bei Erreichen der Streckgrenze



Zugversuch			
Klebschichtdicke t:	2		
Herstellungsmethode:	wasserstrahlgeschritten		
Fugengeometrie:	Keilzinkenverbindung		
Zahnlänge:	90		
Fugenneigungswinkel	75		
Versuch:	Z4-F J D2-WSG-90-75		
	01 02 03		
Alter	388		
Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	13,9		
Zugfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ :	15,9		
Alter:	28		
Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	13,15		
Zugfestigkeit $f_{am,fl}^1$ :	19,2		
Materialigenschaften	Klebschichtdicke $t_{vorh}$ :	3,1 3,1 3,2	
	Querschnittsfläche $A_{c,vorh}$ :	4588 4652 4633	
Versuchsergebnisse	Querschnittsfläche $A_{s,eff}^3$ :	96	
	Versagensart <sup>2</sup> :	bew bew bew	
	Spannung $\sigma_{gr}$ :	4,75 3,83 3,84	
	Streckgrenze $\sigma_{s,y}$ :	260,4 259,3 267,6	
	Dehnung $\epsilon_{s,y}$ :	2,0 0,1 2,0	
	Rissbreite $w_{vorh}^4$ :	$\leq 0,1$ $\leq 0,1$ $\leq 0,1$	
	Spannung $\sigma_{s,max}$ :	310,37 325,00 327,28	
	Dehnung $\epsilon_{s,u}$ :	13,1 12,8 18,5	
		MW:	4,1
			262,4

<sup>1</sup>Am Versuchstag  
<sup>2</sup>a=adhäsiv; k=kohäsiv; bew=Bewehrungsversagen, b=Betonvers. im fugenmahen Bereich  
<sup>3</sup>Querschnittsfläche der außerhalb des Fugenbereichs im Probekörper vorh. Bewehrung  
<sup>4</sup>mittlere Rissbreite im Fugenbereich bei Erreichen der Streckgrenze



Zugversuch	
Eckdaten	Klebschichtdicke t: [mm] 2 Herstellungsmethode: wasserstrahlgeschritten Fugengeometrie: Keilzinkenverbindung Zahnlänge: [mm] 90 Fugeneigungswinkel [°] 85 Versuchs: Z4-FJ-D2-WSG-90-85 01 02 03 82 Alter [d] Druckfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 13,6 Zugfestigkeit $f_{cm,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 15,6 Alter: [d] 30 Druckfestigkeit $f_{am,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 130,4 Zugfestigkeit $f_{am,fl}^1$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 118,2 Materialigenschaften HFC-2 HFL Klebschichtdicke $t_{vorh}$ : [mm] 3,5 2,1 3,2 Querschnittsfläche $A_{c,verh}$ [mm <sup>2</sup> ] 4885 5049 5128 Querschnittsfläche $A_{s,eff}$ <sup>3</sup> [mm <sup>2</sup> ] 106 Versagensart <sup>2</sup> : bew bew bew MW: Spannung $\sigma_{er}$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 4,46 4,52 3,53 4,2 Streckgrenze $\sigma_{s,y}$ : [N/mm <sup>2</sup> ] - 250,2 224,8 237,5 Dehnung $\epsilon_{s,y}$ [%] 16 0,9 13 13 Rissbreite $w_{vorh}$ <sup>4</sup> : [mm] $\leq 0,1$ $\leq 0,1$ $\leq 0,1$ Spannung $\sigma_{s,max}$ : [N/mm <sup>2</sup> ] 205,27 291,82 250,99 249,4 Dehnung $\epsilon_{s,u}$ [%] 8,6 7,7 8,3 8,2

<sup>1</sup>Am Versuchsstag  
<sup>2</sup>a=adhasiv; k=korhasiv; bew=Bewehrungsversagen; b=Betonvers; im fugenmahen Bereich  
<sup>3</sup>Querschnittsfläche der außerhalb des Fugenbereichs im Probekörper vorh. Bewehrung  
<sup>4</sup>mittlere Rissbreite im Fugenbereich bei Erreichen der Streckgrenze



# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name: Sebastian Peter Oster

Staatsangehörigkeit: deutsch

## Beruflicher Werdegang

Seit 10/2015 Bauleiter bei der Wayss und Freytag Ingenieurbau AG im Bereich Betoninstandsetzung, Frankfurt am Main

05/2010 – 09/2015 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Massivbau und Baukonstruktion der TU Kaiserslautern bei Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell

## Hochschulausbildung

10/2004 – 04/2010 Studium des Bauingenieurwesens an der TU Kaiserslautern, Vertiefungsfächer: Massivbau, Siedlungswasserwirtschaft, Wasserbau, Abschluss als Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

## Schulbildung

2001 – 2004 Balthasar Neumann Technikum (Technisches Gymnasium), Trier, Abschluss: Abitur

1996 – 2001 Konrad Adenauer Hauptschule Treis-Karden, Abschluss: mittlere Reife