

Bewehrte Beton-Beton-Verbundfugen bei nachträglicher Verstärkung: Ermüdungsbeanspruchung

J. Heinrich, T. Zenk, R. Maurer

ZUSAMMENFASSUNG Mit der EOTA TR 066 steht ein Bemessungskonzept für Verbundfugen bei der nachträglichen Verstärkung mit Aufbeton bei ruhenden und ermüdungswirksamen Beanspruchungen zur Verfügung. Das Bemessungskonzept hat in entsprechender Form auch im Model Code 2010 seinen Niederschlag gefunden.

Im Zuge eines Forschungsvorhabens wurden zur Validierung des Ermüdungsnachweises als Bestandteil des Bemessungskonzepts der EOTA TR 066 Bauteilversuche an der TU Dortmund unter zyklischer Belastung durchgeführt. Die Versuche bestätigten die Ergebnisse aus zuvor durchgeführten Kleinkörperversuchen an den Universitäten Innsbruck und Delft. Zudem konnte anhand von Messungen der Stahlspannungen in den Schubverbindern während der Versuchslaufzeit festgestellt werden, dass die Spannungsschwingbreiten bei sehr großer Rauigkeit ($R_t \geq 3 \text{ mm}$) der Verbundfuge und bei ausreichender Begrenzung der Schwingbreiten der zyklischen Beanspruchungen $\Delta\tau_{iu}$ so gering sind, sodass kein expliziter Nachweis gegen Ermüdung erforderlich ist.

Die Anwendung des Nachweiskonzeptes ist an zusätzliche konstruktive, betontechnische und ausführungstechnische Bedingungen geknüpft. Im Vergleich zum derzeitigen Nachweisverfahren im DIN EN 1992-2/NA liefert das Bemessungskonzept deutlich wirtschaftlichere Ergebnisse.

Interface between old and new concrete in case of subsequently strengthening: Fatigue loading

ABSTRACT The EOTA TR 066 provides a design concept for interface between old and new concrete in case of subsequently strengthening under static and fatigue loads. The design concept is also included in the Model Code 2010. In the course of a research project, tests under cyclic loading were carried out at the TU Dortmund to validate the design concept for fatigue according to the EOTA TR 066. The test results showed a good agreement with tests on small specimens previously carried out at the universities of Innsbruck and Delft. In addition, measurements of the steel stresses in the shear connectors during the tests showed that the stress ranges are small in case of adequate roughness of the interface ($R_t \geq 3 \text{ mm}$) and with sufficient limitation of the stress ranges of the cyclic loads $\Delta\tau_{iu}$. The application of the design concept is also linked to additional measures: constructional conditions, design of concrete mixture and quality of execution. Compared to the current design method in DIN EN 1992-2/NA the design concept provides significantly more economical results.

STICHWÖRTER

Versuche, Dynamik, Verstärkung, Schub

1 Einleitung

In [1] wurden die unterschiedlichen Bemessungskonzepte für die Bemessung bewehrter Beton-Beton-Verbundfugen unter statischer Belastung vorgestellt. Für vorwiegend ruhende Beanspruchungen liefern die Verfahren für die üblichen Bewehrungsgrade bei Brückenverstärkungen vergleichbare Tragwiderstände. Bei Ermüdungsbeanspruchung fordern die für Deutschland gültigen nationalen Anhänge [2], [3] jedoch, dass der Adhäsionstraganteil im Nachweisformat vollständig vernachlässigt wird ($c = 0$), sodass die Schubkraft in der Verbundfuge ausschließlich durch den Traganteil aus der die Fuge kreuzenden Verbundbewehrung aufgenommen werden muss. Aus dieser Forderung entstehen rechnerisch sehr große Verbundbewehrungsgrade, die bei Neubauten als Fertigteilkonstruktionen mit Ortbetonergänzung ohne größere Probleme realisiert werden können. Bei einer nachträglichen Verstärkung muss diese Verbundbewehrung jedoch in Bohrlöcher im bestehenden Beton eingeklebt werden, wodurch bei entsprechend

großen erforderlichen Bewehrungsgraden schnell die Grenzen der Machbarkeit beziehungsweise des wirtschaftlich Vertretbaren erreicht werden können.

Im Model Code 2010 [4] ist ein alternatives Bemessungskonzept für Ermüdungsbeanspruchungen verankert. Die Grundlage für das Bemessungskonzept bilden entsprechende Kleinkörperversuche, die an der Universität Innsbruck [5], der Universität Delft [6] sowie durch die Firma Hilti [7] durchgeführt wurden. Im Zuge der Erarbeitung der ETA-18/1022 [8] für das Schubverbindersystem HCC-B wurden an der TU Dortmund zusätzliche Bauteilversuche durchgeführt. Die Versuche unter statischer Beanspruchung wurden bereits in [1] ausführlich beschrieben. Im Folgenden werden die Versuche unter zyklischer Beanspruchung vorgestellt, die zur Validierung des Bemessungskonzepts bei Ermüdungsbeanspruchung auf Bauteilebene dienen. In diesem Zusammenhang sei auch auf die Untersuchungen von Verbundfugen unter Ermüdungsbeanspruchung in [9] und [10] hingewiesen, bei denen hochbauspezifische Bauteile betrachtet werden.

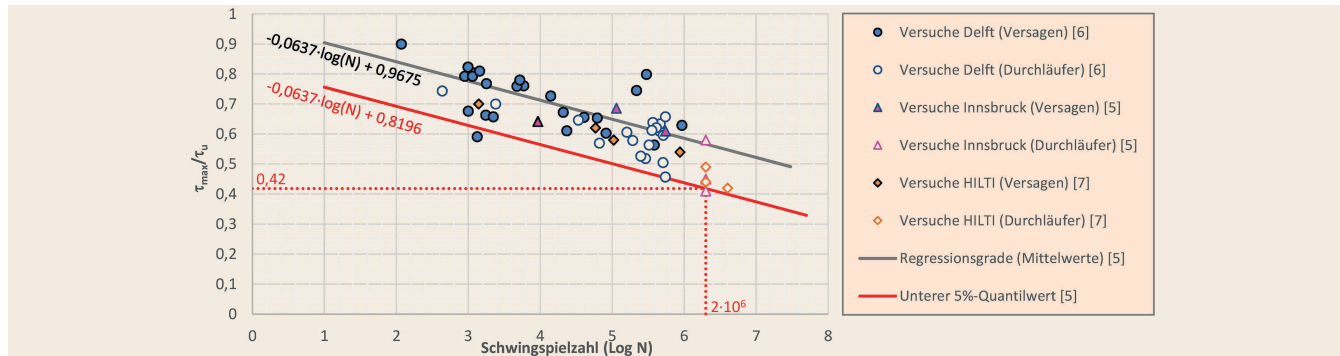


Bild 1. Übersicht der Versuchsergebnisse bei Ermüdungsbeanspruchung (bewehrte Verbundfugen) *Abb.: J. Heinrich*
Fig. 1. Test results under fatigue loading (reinforced shear interface) *Source: J. Heinrich*

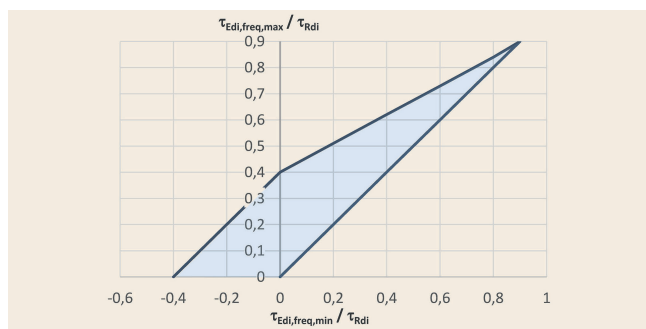


Bild 2. Weyrauch- beziehungsweise Goodman-Diagramm für bewehrte, hochdruckwassergestahlte Verbundfugen ($R_t \geq 3 \text{ mm}$) zur Ermittlung der zulässigen Schwingbreiten bei $N^* = 2 \cdot 10^6$ Lastwechseln *Abb.: J. Heinrich*
Fig. 2. Weyrauch respectively Goodman diagram for HPW-jetted, reinforced shear interface ($R_t \geq 3 \text{ mm}$) at $N^* = 2 \cdot 10^6$ *Source: J. Heinrich*

2 Bemessungskonzepte bei Ermüdungsbeanspruchung

2.1 DIN EN 1992-1-1/NA bzw. DIN EN 1992-2/NA

Für Verbundfugen unter Ermüdungsbeanspruchung ist in DIN EN 1992-1-1/NA [2] beziehungsweise DIN EN 1992-2/NA [3] kein expliziter Ermüdungsnachweis für die Verbundbewehrung aufgeführt. Der Nachweis erfolgt üblicherweise indirekt im Grenzzustand der Tragfähigkeit unter der maximalen statischen Beanspruchung (τ_{Edi}) mit dem Tragwiderstand τ_{Rdi} der Verbundfuge ohne Berücksichtigung des Traganteils aus Adhäsion ($c = 0$) nach Gleichung (1).

Da in der Regel bei der Bemessung einer nachträglichen Verstärkung durch Aufbeton keine ständig senkrecht zur Fuge wirkende Druckspannung σ_n angesetzt wird, verbleibt als Widerstand lediglich der vom Verbundbewehrungsgrad abhängige Traganteil. Zur besseren Vergleichbarkeit erfolgt nachfolgend die Schreibweise einheitlich mit der Notation des MC2010 und der EOTA TR 066.

$$\tau_{Rdi, fat} = \rho \cdot f_{yd} (1,2\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5 \cdot v \cdot f_{cd} \quad (1)$$

2.2 fib Model Code 2010

Der statische Tragwiderstand τ_{Rdi} wird nach Gleichung (2) ermittelt. Für dynamische Beanspruchungen wird die Dauerfestigkeit pauschal mit 40 % des statischen Tragwiderstands angesetzt (Gleichung 3), wodurch bei sehr großer Rauigkeit auch der

Traganteil aus der Kornverzahnung mit 40 % berücksichtigt wird [4].

$$\tau_{Rdi} = c_r \cdot f_{ck}^{\frac{1}{3}} + \kappa_1 \cdot \rho \cdot f_{yd} (\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) +$$

$$\kappa_2 \cdot \rho \cdot \sqrt{f_{yd} \cdot f_{cd}} \leq \beta_c \cdot v \cdot f_{cd} \quad (2)$$

$$\tau_{Rdi, fat} = 0,4 \cdot \tau_{Rdi} \quad (3)$$

Der Abminderungsbeiwert von 40 % wurde durch Versuche mit zyklischer Belastung in Form von Einstufenversuchen als Dauerfestigkeit ermittelt. Hierzu wurden die Ergebnisse der Kleinkörperversuche aus Delft [6] und Innsbruck [5] herangezogen. Die Versuchswerte sind in **Bild 1** grafisch aufgetragen. Unter Berücksichtigung der Versuchsergebnisse aus Innsbruck und Delft, die ein ermüdungsbedingtes Versagen aufwiesen, wurden in [5] die zugehörige Mittelwertregressionsgerade sowie die 5 %-Quantilsfunktion ermittelt. Bei einer Grenzschwingenspielzahl von $N^* = 2 \cdot 10^6$ folgte daraus ein charakteristischer Verhältniswert von 0,42 als Dauerfestigkeit, der im Weiteren auf 40 % abgerundet wurde.

In der Darstellung wurden zusätzlich die Versuche aus [7] ergänzt, die ebenfalls im Streuband der Versuche aus Delft und Innsbruck liegen.

2.3 Erweitertes Bemessungsmodell nach EOTA TR 066

Aufbauend auf den Versuchsergebnissen in Bild 1 wurde von Randl und Wicke ein Bemessungsmodell bei Ermüdungsbeanspruchungen entwickelt [11]. Im Weyrauch- beziehungsweise Goodman-Diagramm (**Bild 2**) wird der Nachweis der Verbundfuge auf den 5 %-Quantilwert der Versuchswerte bei der Grenzschwingenspielzahl $N^* = 2 \cdot 10^6$ als Dauerfestigkeit ausgelegt. Anhand dieses Diagramms beziehungsweise der Gleichungen (4) und (5) können die zulässigen Schwingbreiten der bezogenen Schubkraft beziehungsweise Schubspannung τ_{Edi} in der Verbundfuge in Abhängigkeit von Ober- beziehungsweise Unterlast ermittelt werden. Dabei erfolgt der Nachweis für die Bemessungswerte der bezogenen Schubkräfte beziehungsweise Schubspannungen in der Verbundfuge unter der häufigen Einwirkungskombination ($\tau_{Edi, freq}$).

$$\text{- für } \frac{\tau_{Edi, freq, min}}{\tau_{Edi, freq, max}} \geq 0: \quad \frac{|\tau_{Edi, freq, max}|}{|\tau_{Rdi}|} \leq 0,4 + 0,55 \frac{|\tau_{Edi, freq, min}|}{|\tau_{Rdi}|} \leq 0,9 \quad (4)$$

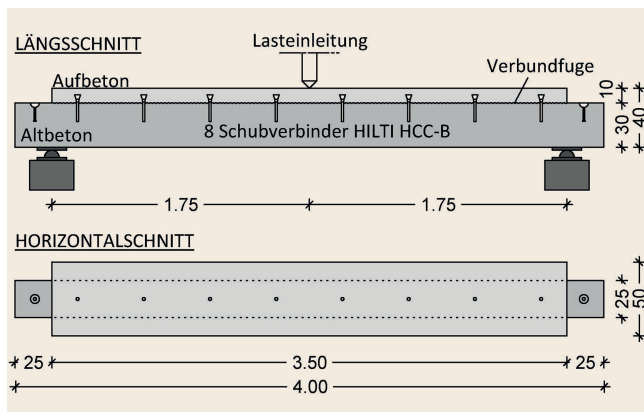


Bild 3. Versuchsträger für die Bauteilversuche mit Ermüdungsbeanspruchung, aus [1] Abb.: J. Heinrich
 Fig. 3. Test specimens for tests with fatigue loading, from [1]
 Source: J. Heinrich

$$- \text{für } \frac{\tau_{\text{Edi,freq,min}}}{\tau_{\text{Edi,freq,max}}} \leq 0: \quad \frac{|\tau_{\text{Edi,freq,max}}|}{|\tau_{\text{Rdi}}|} \leq 0,4 - \frac{|\tau_{\text{Edi,freq,min}}|}{|\tau_{\text{Rdi}}|} \quad (5)$$

Bei einer Schwellbeanspruchung mit der Unterlast aus der häufigen Einwirkungskombination $\tau_{\text{Edi,freq,min}} = 0$ beträgt die maximal ertragbare Schwingbreite in der Verbundfuge 40% der statischen Tragfähigkeit τ_{Rdi} .

Die Anwendung des Bemessungskonzeptes setzt Folgendes voraus:

- Die Oberfläche der Verbundfuge muss mittels Hochdruckwasserstrahlen (HDW) aufgeraut werden, sodass das Korngerüst freiliegt und eine mittlere Rautiefe $R_t \geq 3 \text{ mm}$ nach Kaufmann [12] erreicht wird.
- Die Verbundfuge ist kurz vor der Betonage der Aufbetonschicht von Verschmutzungen gründlich zu reinigen und anzufeuchten.
- Die Festigkeitsklasse des bestehenden Betons muss $\geq \text{C30/37}$, des Aufbetons $\geq \text{C40/50}$ betragen.
- Für den Aufbeton ist eine möglichst fließfähige und schwindarme Betonrezeptur zu verwenden. Das Ausbreitmaß sollte $F \geq 380 \text{ mm}$ besser $F \geq 450 \text{ mm}$ betragen.
- Der Aufbeton soll ein geschlossenes Gefüge durch vollständige Verdichtung aufweisen.

Tabelle 1. Übersicht der dynamischen Bauteilversuche mit zyklischer Belastung
 Table 1. Overview of dynamic tests with cyclic loading

Versuch	Oberflächen- vorbereitung	$R_{t,m}$ [mm]	ρ [‰]	Betonfestigkeitsklasse		Festigkeiten Altbeton bei Versuchsstart	
				Altbeton	Aufbeton	$f_{\text{cm,cube}}$ [MN/m ²]	$f_{\text{cm,cyl}}$ [MN/m ²]
A3	HDW	3,4	1,1	C20/25	C25/30	32,9	27,3
A4	HDW	3,9	1,1	C20/25	C25/30	39,1	32,4
A5	HDW	3,0	1,1	C20/25	C25/30	38,0	31,5
A6	HDW	3,0	1,1	C20/25	C35/45	42,2	35,0
A7	HDW	4,0	1,1	C16/20	C25/30	34,2	28,4
C2	HDW	2,5	1,1	C20/25	C35/45	39,6	32,9
C3	HDW	2,2	1,1	C20/25	C25/30	34,4	28,6

HDW = Hochdruckwassergestrahle Betonoberfläche

Das Bemessungskonzept in EOTA TR 066 [13] enthält Regelungen für Bemessung und Konstruktion im Allgemeinen. Die dazu benötigten werkstoffbezogenen produktspezifischen Angaben für die verwendeten Verbundmittel enthalten die entsprechenden ETAs (z. B. ETA-18/1022 [8] für den HCC-B Schubverbinder).

3 Experimentelle Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten

3.1 Versuchsprogramm für die Bauteilversuche an der TU Dortmund

Durch die Bauteilversuche wurde das Tragverhalten von Beton-Beton-Verbundfugen unter zyklischer Beanspruchung bei Verwendung des HCC-B Schubverbindersystems untersucht. Die Abmessungen der Versuchsträger mit Ermüdungsbeanspruchung (Bild 3) entsprechen denen der statischen Versuche aus [1].

Die Versuchsreihe A wurde, basierend auf den beiden unter statischer Belastung durchgeführten Versuchen (A1 und A2), [1] um fünf dynamische Versuche (A3 bis A7) erweitert. Die Versuchsreihe A ist durch eine HDW-gestrahle Verbundfuge mit einer mittleren Rautiefe $R_{t,m} \geq 3,0 \text{ mm}$ sowie einem Verbundbewehrungsgrad von 1,1‰ ($\cong 8 \times \text{HCC-B-Schubverbinder}$) charakterisiert.

Die Versuche C2 und C3 wurden ebenfalls unter zyklischer Belastung durchgeführt. Auch diese Versuchsträger wiesen eine HDW-gestrahle Verbundfuge auf, jedoch mit geringerer mittlerer Rautiefe $R_{t,m} = 2,2 \text{ mm}$ bis $2,5 \text{ mm}$.

Eine Übersicht der Versuchsträger unter Ermüdungsbeanspruchung enthält **Tabelle 1**. Die Betonfestigkeitsklassen wurden auf der sicheren Seite bewusst niedrig gewählt.

3.2 Ermüdungsfestigkeit des Materials für die Schubverbinder

Vor der Durchführung der Bauteilversuche in Tabelle 1 wurden zunächst der HCC-B Schubverbinder sowie die anderen Komponenten des Gesamtsystems Verbundfuge jeweils für sich hinsichtlich ihrer Ermüdungsfestigkeit untersucht. Hierfür wurden Schubverbinder freischwingend unter rein zyklischer Zugbeanspruchung in Einstufenversuchen mit jeweils konstanter Schwingbreite getestet. In der Verbundfuge erfahren die Schub-

verbinder dagegen eine kombinierte Beanspruchung aus Zug, Schub und Biegung, die jedoch versuchstechnisch schwer zu realisieren ist. Die in **Bild 4** dargestellte Ermüdungsfestigkeitskurve ist daher nur für den freischwingenden Schubverbinder HCC-B unter reiner Zugbeanspruchung gültig.

Die Ermittlung der Ermüdungsfestigkeitskurve erfolge nach dem „Interaktiven Verfahren“, welches von Block/Dreier an der TU Dortmund entwickelt wurde [14]. Hiernach konnte für den Schubverbinder für die zentrische Zugkraft ein charakteristischer Wert der Dauerfestigkeit von 10,3 kN ermittelt werden. Die dazugehörige nominelle Spannungsschwingbreite kann zu $\Delta\sigma_{D,k} = 85 \text{ N/mm}^2$ abgeschätzt werden.

3.3 Ermüdungsfestigkeit des Injektionsmörtels

Der Schubverbinder HCC-B ist gemäß ETA-18/1022 [8] ausschließlich mit dem Injektionsmörtel Hilti HIT-RE 500 V3 in ein zylindrisches Bohrloch im bestehenden Beton zu verankern. Der Injektionsmörtel ist mit der ETA-16/0142 [15] und der ETA-16/0143 [16] mit abZ Z-21.8–2064 [17] bereits für der Verwendung nachträglicher Bewehrungsanschlüsse unter nicht ruhenden Beanspruchungen zugelassen. Die ausreichende Ermüdungsfestigkeit des Injektionsmörtels wurde bereits im Zuge eines früheren Versuchsprogramms [18] an der TU Dortmund nachgewiesen. Hierfür wurden Betonstähle $\text{Ø}20 \text{ mm}$ nachträglich in Beton eingeklebt und einer zyklischen Belastung ausgesetzt. Als Ergebnis konnte festgestellt werden, dass die Proben, die eine zyklische Belastung im Bereich der Dauerfestigkeit erhalten haben, durch ermüdungsbedingten Stahlbruch und nicht im Verbund versagen.

Hieraus lässt sich ableiten, dass im Bereich der Dauerfestigkeit nicht die Ermüdungsfestigkeit des Injektionsmörtels, sondern des Verbindungsmittels selbst maßgebend wird. Dies setzt jedoch eine ausreichende Verankerungslänge des Verbindungsmittels im Altbeton voraus. Die minimale Verankerungslänge bei den Versuchen mit einem Betonstahl $\text{Ø}20 \text{ mm}$ in [18] betrug 70 mm. Der Durchmesser des HCC-B Schubverbinders beträgt 14 mm [8]. Als Mindestwert ist eine Verankerungstiefe von 90 mm vorgegeben, die in den Bauteilversuchen eingehalten wurde. Ein ermüdungsbedingtes Verbundversagen bei zyklischen Beanspruchungen ist im Injektionsmörtel somit nicht zu erwarten.

3.4 Ermüdungsversagen infolge Betonausbruch

Bei Verankerungen von Dübeln als Verbundmittel in den Schichten des Alt- und Neubetons kann neben Stahlversagen, dem Versagen des Injektionsmörtels (Herausziehen) ebenfalls der Betonuntergrund (Betonausbruch) versagen. Der Tragwiderstand infolge Betonausbruch hängt insbesondere von der Verankerungstiefe, der Betonzugfestigkeit, dem Abstand der Verbundmittel untereinander und der Anordnung einer oberflächennahen Bewehrung ab.

In den Bauteilversuchen wurde daher, wie schon im vorherigen Abschnitt beschrieben, eine ausreichende Verankerungslänge der Verbundmittel im Altbeton sowie entsprechend große Abstände gewählt. Anhand einer Vielzahl von Ermüdungsversuchen im Forschungsbereich Befestigungstechnik am Lehrstuhl Betonbau an der TU Dortmund wurde die Erfahrung gemacht, dass bei verhältnismäßig geringen Schwingbreiten, das Ermüdungsversagen infolge Betonausbruch nicht maßgebend wird. Als Erfah-

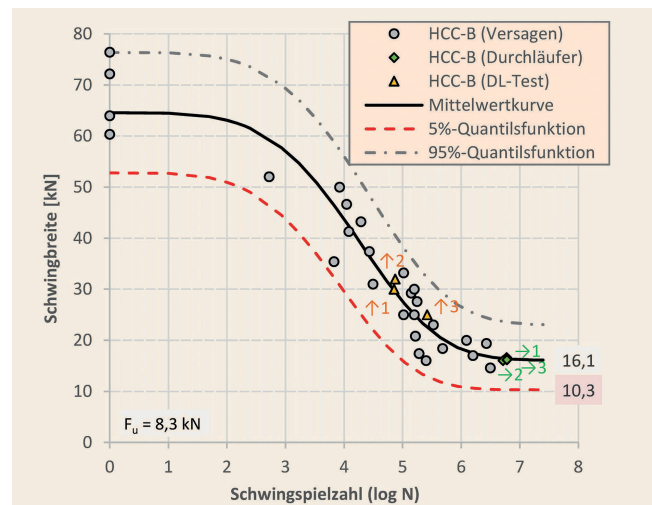


Bild 4. Ermüdungsfestigkeitskurve für den Schubverbinder HCC-B unter reiner Zugbeanspruchung *Abb.: J. Heinrich*
 Fig. 4. S-N curve of the shear connector HCC-B under pure tensile loading
 Source: J. Heinrich

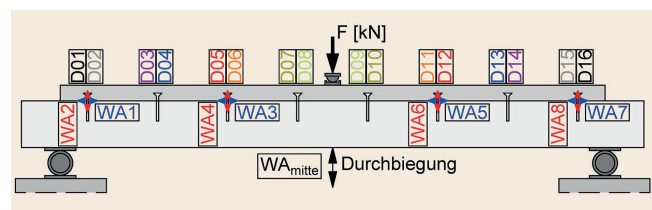


Bild 5. Übersicht über die Messstellen [1] *Abb.: J. Heinrich*
 Fig. 5. Overview of the measuring points [1] Source: J. Heinrich

rungswert aus umfangreicher Versuchserfahrung im Bereich Dübelforschung kann hier die Dauerfestigkeit mit circa 50% der statischen Tragfähigkeit abgeschätzt werden. Dieser Grenzwert wird voraussichtlich in der künftig neu erscheinenden EAD 330250–00–0601 „Post-installed fasteners in concrete under fatigue cyclic loading“ Eingang finden.

Bei den Bauteilversuchen unter Ermüdungsbeanspruchung wurde in keinem Fall Versagen infolge Betonausbruch festgestellt.

3.5 Ermüdungsfestigkeit des Gesamtsystems Verbundfuge

3.5.1 Messtechnik

Bei den Ermüdungsversuchen wurde die gleiche Messtechnik wie bei den statischen Versuchen [1] verwendet. Neben der Presskraft (F), der Durchbiegung in Feldmitte ($W_{A,mitte}$) und den horizontalen bzw. vertikalen Relativverschiebungen (WA1 bis WA8) in der Verbundfuge wurden ebenfalls die Dehnungen in den Schubverbinder mittels Dehnmessstreifen (D01 bis D16) erfasst (**Bild 5**).

3.5.2 Versuchsdurchführung

Bei den statischen Versuchen [1] wurde festgestellt, dass bei einer Laststufe zwischen 325 kN und 350 kN die Dehnungen und damit die Spannungen in den Schubdübeln schlagartig stark an-

steigen. Das gleiche Verhalten war auch bei der Aufzeichnung der Relativverschiebungen zwischen Alt- und Aufbetonschicht zu beobachten. Der plötzliche Anstieg der Messwerte in der Verbundfuge signalisiert, dass bis zum erstmaligen Erreichen dieser Beanspruchung hauptsächlich der Betontraganteil wirksam war. Nach Überschreiten dieser Laststufe ist davon auszugehen, dass sich die Fuge im gerissenen Zustand befindet. Im Folgenden wird diese Laststufe, die den Übergang zum gerissenen Zustand in der Verbundfuge kennzeichnet, als F_{cr} bezeichnet. Allerdings kommt es unter F_{cr} nicht zu einem Aufreißen über die gesamte Länge der Verbundfuge.

Eine Voraussetzung für die Durchführung der zyklischen Bauteilversuche war, dass diese für eine gerissene Verbundfuge erfolgen, da nur in diesem Fall mit nennenswert ermüdungswirksamen Spannungsschwingbreiten in den Verbunddübeln zu rechnen ist. Eine ungerissene Fuge wirkt sich äußerst günstig aus, da keine Ermüdungsbeanspruchung in den Dübeln in der Verbundfuge entsteht. Bei der Bemessung von Brückenbauwerken wird bei dem hier beschriebenen Konzept auf der sicheren Seite davon ausgegangen, dass die Verbundfuge gerissen ist. Dies kann unplanmäßig beispielsweise infolge von Verschmutzungen der Verbundfuge vor der Betonage, durch unterschiedliches Schwinden von Alt- und Aufbeton oder durch Rissbildung in der Aufbetonschicht in der Zugzone (Stützbereich) begünstigt werden.

Um Sicherzustellen, dass in der Verbundfuge vor dem Start der zyklischen Belastung keine Adhäsionskräfte wirksam sind, wurde ein Verbundbrecher verwendet, zudem wurde der Versuch einer Vorbelastung etwa bis zur Laststufe F_{cr} ausgesetzt. Die Laststufe F_{cr} variierte zwischen den Versuchen geringfügig. Daher wurde während der Vorbelastung der Verlauf der Stahldehnungen in den Verbundmitteln messtechnisch überwacht. Sobald diese deutlich angestiegen sind, wurde der Versuch auf die vorgesehene Mittellaststufe F_m gefahren und anschließend die zyklische Belastung gestartet (**Bild 6**).

Der Versuch wurde unter zyklischer Belastung entweder bis zum ermüdungsbedingten Versagen der Verbundfuge fortgesetzt oder nach dem Erreichen einer gewählten Grenzlastwechselzahl N_G als „Durchläufer“ gestoppt. Sofern der Versuch die Grenzlastwechselzahl N_G erreicht hat, wurde der Versuchsträger anschließend statisch bis zum Bruch belastet.

Für die Versuchsreihe A wurde die Grenzlastwechselzahl mit $N_G = 2 \cdot 10^6$ festgelegt. Aufgrund der sehr langen Versuchslaufzeiten wurde für die Versuchsreihe C die Grenzlastwechselzahl auf $N_G = 0,8 \cdot 10^6$ reduziert, wobei aufgrund der entsprechend groß gewählten Spannungsdifferenzen $\Delta\tau_i$ das Streuband im Bereich der Zeitfestigkeit noch erreicht wurde (Abschnitt 4.1).

3.5.3 Festlegung der Belastungsniveaus

Die Oberlast (F_{max}) der zyklischen Beanspruchung wurde in Relation zur experimentell bestimmten statischen Tragfähigkeit festgelegt. Als Bezugswert für letztere wurde der Mittelwert aus den in den statischen Versuchen erreichten Traglasten [1] nach **Tabelle 2** herangezogen. Hierfür wurden die Versuche A1, A2 und C1 berücksichtigt, da bei diesen die gleichen Versuchsbedingungen (HDW-gestahlte Oberfläche, Verbundbewehrungsgrad) galten. Obwohl die mittlere Rautiefe des Versuchs C1 mit $R_{t,m} = 2,6$ mm etwas unterhalb des Grenzwertes von 3 mm lag, wurde dieser mit berücksichtigt, da die Traglast im Bereich zwischen den beiden Versuchen A1 und A2 lag und auch ansonsten

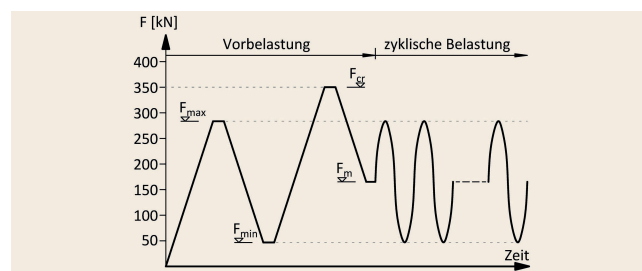


Bild 6. Schematische Darstellung des Belastungsregimes *Abb.: J. Heinrich*
 Fig. 6. Schematic representation of the load cycles *Source: J. Heinrich*

Tabelle 2. Mittelwert der statischen Tragfähigkeit
 Table 2. Mean value of the static load capacity

Versuch	$F_{u,test}$ [kN]	$\tau_{ij,test}$ [kN/m ²]
A1	487,8	3252
A2	424,4	2829
C1	463,2	3088
Mittelwert ($F_{u,test}$)	458,5	3056

kein negativer Einfluss aus der geringen Unterschreitung von $R_{t,m} = 3$ mm festzustellen war.

Der Mittelwert der statischen Versuchstraglasten beträgt $F_{u,test} = 458,5$ kN. Die Oberlast F_{max} der zyklischen Belastung wurde anschließend nach Gleichung (6) im Verhältnis zu $F_{u,test}$ angegeben. Dieses Verhältnis wird im Folgenden mit α bezeichnet. Die Unterlast der zyklischen Belastung F_{min} wurde nach Gleichung (7) mit 20% der Oberlast angesetzt. Der Ansatz einer geringen Unterlast hatte einen positiven versuchstechnischen Effekt, da hierdurch abhebende Lasten verhindert wurden.

$$F_{max} = \alpha \cdot F_{u,test} \tag{6}$$

$$F_{min} = 0,20 \cdot F_{max} \tag{7}$$

Eine Übersicht von allen Bauteilversuchen mit zyklischer Beanspruchung ist **Tabelle 3** zu entnehmen. Neben der Laststufe F ist auch die zugehörige rechnerische Schubspannung in der Verbundfuge τ_i angegeben. Diese wurde gemäß Gleichung (8) wie üblich als Nennwert nach technischer Biegelehre (Ebenbleiben der Querschnitte) ermittelt. Hierbei wurde die Breite der Schubfuge von $b_w = 0,25$ m und ein gleichbleibender innerer Hebelarm von $z = 0,9 \cdot d = 0,30$ m verwendet.

$$\tau_i = \frac{(F/2)}{(z \cdot b_w)} \tag{8}$$

4 Diskussion der Ergebnisse

4.1 Wöhlerlinie Gesamtsystem Verbundfuge

In **Tabelle 4** sind die Versuchsergebnisse der beiden Versuchsreihen aufgeführt. Die Versuche A5 ($\alpha = 0,74$) und A7 ($\alpha = 0,65$) versagten deutlich vor dem Erreichen der Grenzschwingspielzahl $N_G = 2 \cdot 10^6$. Ursache war das Versagen der Verbundfuge. In **Bild 7** ist stellvertretend für beide Versuche das Rissbild des Versuchsträgers A7 im Zustand des ermüdungsbedingten Versagens dargestellt. Dargestellt ist ein Ausschnitt unmittelbar nach Versuchsende, in dem der horizontale Rissverlauf in der Verbundfuge zu erkennen ist. Insgesamt verlief dieser ver-

Tabelle 3. Übersicht über die dynamischen Bauteilversuche
 Table 3. Overview of cyclic component tests

Versuch	α	Laststufe Vorbelastung F_{cr} [kN]	Oberlast		Unterlast		Schwingbreite	
			F_{max} [kN]	$\tau_{i,max}$ [kN/m ²]	F_{min} [kN]	$\tau_{i,min}$ [kN/m ²]	ΔF [kN]	$\Delta \tau_i$ [kN/m ²]
A3	0,56	350	254,6	1 697	50,9	339	203,7	1 358
A4	0,37	321	169,8	1 132	34,0	227	135,8	905
A5	0,74	348	339,5	2 263	67,9	453	271,6	1 811
A6	0,50	350	229,3	1 529	45,9	306	183,4	1 223
A7	0,65	357	298,0	1 987	49,6	397	238,4	1 589
C2	0,60	351	275,1	1 834	55,0	367	220,1	1 467
C3	0,63	369	288,9	1 926	57,8	385	231,1	1 541

Tabelle 4. Ergebnisse der dynamischen Bauteilversuche
 Table 4. Results of cyclic tests

Versuch	α	Prüffrequenz [Hz]	Lastwechselzahl	Ursache des Versagens	stat. Bruchlast nach der zyklischen Belastung	
					$F_{u,test}$ [kN]	$\tau_{ui,test}$ [kN/m ²]
A3	0,56	0,7	1 924 421	Ermüdungsbruch der Längsbewehrung	-	-
A4	0,37	0,8	2 011 829	kein Versagen, Versuch gestoppt	522,0	3 480
A5	0,74	0,4	136 459	ermüdungsbedingtes Versagen in der Verbundfuge	-	-
A6	0,50	0,7	2 029 343	kein Versagen, Versuch gestoppt	559,5	3 730
A7	0,65	0,4	90 100	ermüdungsbedingtes Versagen in der Verbundfuge	-	-
C2	0,60	0,4	821 903	kein Versagen, Versuch gestoppt	445,8	2 972
C3	0,63	0,4	860 527	kein Versagen, Versuch gestoppt	513,4	3 422

sagensauslösende Trennriss in der Verbundfuge über eine Länge von circa 50 cm. Das ermüdungsbedingte Versagen der Verbundfuge geht mit überproportional angestiegenen Relativverschiebungen einher.

Der Versuch A3 ($\alpha = 0,56$) versagte kurz vor dem Erreichen der Grenzwahrschwingzahl nach circa 1,9 Millionen Lastwechseln. Allerdings war hier kein ermüdungsbedingtes Versagen der Verbundfuge, sondern ein Ermüdungsbruch der Längsbewehrung die Ursache. Die Spannungsschwingbreite lag bei Versuchs A3 rechnerisch bei circa $\Delta\sigma_s = 200 \text{ N/mm}^2$ und somit oberhalb der charakteristischen Dauerschwingfestigkeit $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ bei $N^* = 10^6$ Lastwechseln nach DIN EN 1992-1-1 [2]. Der Ermüdungsbruch der Längsbewehrung war somit nicht überraschend. Die Bauteilversuche A3, A5 und A7 mit ermüdungsbedingtem Versagen wiesen relativ große Schwingbreiten bei den Schubspannungen ($\Delta\tau_i$) in der Verbundfuge auf.

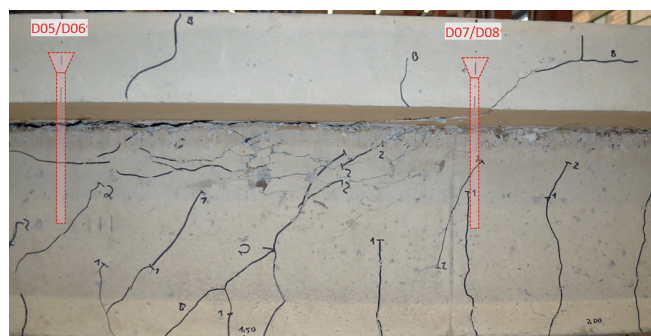


Bild 7. Trennriss der Verbundfuge (Ausschnitt zwischen den Messstellen D05/06-D07/08), Versuchsträger A7 Abb.: J. Heinrich
 Fig. 7. Cracking of the interface (section between measuring points D05/06-D07/08), test specimen A7 Source: J. Heinrich

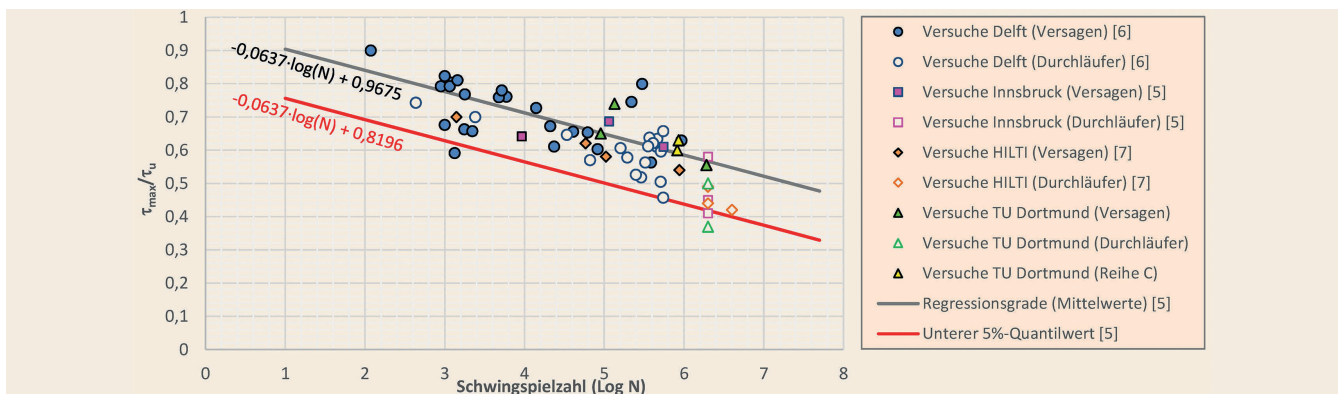


Bild 8. Versuchsergebnisse aus Bild 1 ergänzt durch die Versuche an der TU Dortmund Abb.: J. Heinrich
 Fig. 8. Test results from Fig. 1 supplemented by the tests results from TU Dortmund University Source: J. Heinrich

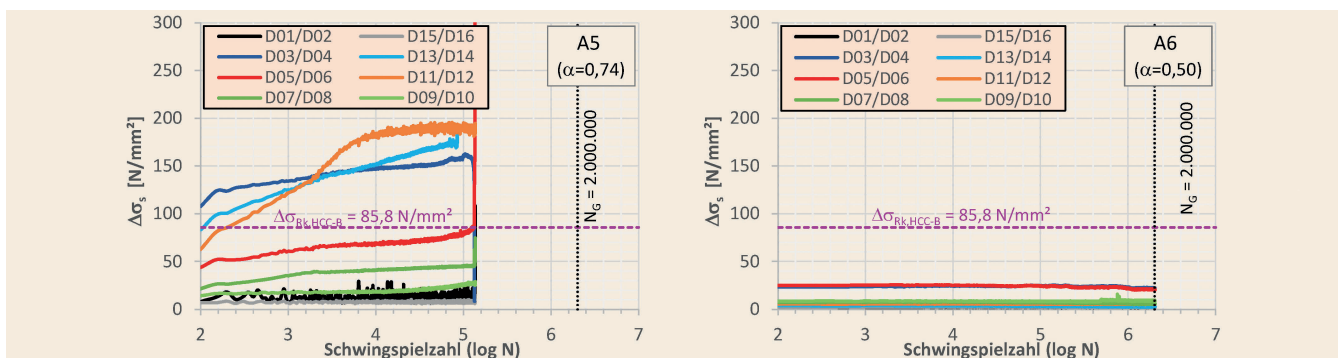


Bild 9. Verläufe der Spannungsschwingbreiten (zentrische Zugspannungen) in den Schubverbindern (Versuche A5 und A6, $R_t \geq 3$ mm) Abb.: J. Heinrich
 Fig. 9. Stress ranges (centric tensile stresses) in the shear connectors (tests A5 and A6, $R_t \geq 3$ mm) Source: J. Heinrich

Die Versuche A4 ($\alpha = 0,37$) und A6 ($\alpha = 0,50$) wurden nach Erreichen der Grenzschwingspielzahl $N_G = 2 \cdot 10^6$, die Versuche C2 ($\alpha = 0,60$) und C3 ($\alpha = 0,63$) vor einem ermüdungsbedingten Versagen gestoppt. Wie schon in Abschnitt 3.5.2 beschrieben, wurde die Grenzschwingspielzahl für die Versuchsreihe C auf $N_G = 800\,000$ reduziert. Begründet war diese Maßnahme darin, dass im Hinblick auf die langen Versuchsdauern bereits der Erwartungswert aus der Regressionsgeraden überschritten wurde. In **Bild 8** wurden die Versuchsergebnisse der Versuchsreihen A und C in die Darstellung aus Bild 1 zusätzlich übernommen. Hieraus ist zu erkennen, dass die Versuche der Reihe C oberhalb der Regressionsgerade für die Mittelwerte liegen.

4.2 Stahlspannungen

Nachfolgend werden beispielhaft anhand der Versuche A5 (Versagen der Verbundfuge infolge Ermüdung) und A6 (Durchläufer) die über die Versuchslaufzeit gemessenen Stahlspannungen in den Schubverbindern dargestellt. Die Verläufe der gemessenen Spannungsschwingbreiten in den Schubverbindern sind in **Bild 9** als zentrische Zugspannung (Mittelwert der gemessenen Randspannungen), in **Bild 10** als Randspannungen infolge zusätzlicher Biegung für die Versuche A5 und A6 und in **Bild 11** als zentrische Zugspannung für die Versuchsreihe C über die jeweilige Anzahl der Lastwechsel aufgetragen. Die Spannungen konnten mit dem bekannten E-Modul aus den mittels Dehnmessstreifen (DMS) gemessenen Stahldehnungen rechnerisch ermittelt werden. Deutlich zu erkennen ist anhand der blauen Pfeile in

Bild 10 die zusätzliche Beanspruchung der Dübel auf Biegung (z.B. liegen D03 und D04 sowie D13 und D14 jeweils an einem Dübelschaft gegenüber etc.). Zusätzlich ist die in Abschnitt 3.2 ermittelte nominelle Dauerfestigkeit der freischwingend getesteten Schubverbinder aufgetragen.

Aus den Verläufen der Spannungsschwingbreiten in den Schubverbindern des Versuchs A6 (Durchläufer, $N \geq N_G$) ist zu erkennen, dass die max. Stahlspannungen bei maximal circa 25 N/mm² und somit noch weit unterhalb der charakteristischen Dauerfestigkeit aus Abschnitt 3.2 liegen. Zudem ist festzustellen, dass die Schwingbreiten über den gesamten Versuchszeitraum stabil verlaufen. Die Traglast, die bei der statischen Belastung nach Beendigung der zyklischen Belastung erreicht werden konnte, liegt oberhalb des rechnerischen Mittelwerts $F_{um, test}$. Diese Tatsache deutet darauf hin, dass die Verbundfuge möglicherweise einen „Trainier-Effekt“ erfahren hat. Die zyklische Belastung auf verhältnismäßig geringem Belastungsniveau kann durchaus eine tragfähigkeitssteigende Wirkung auf die Verbundfuge haben. Durch den wiederholten Be- und Entlastungsvorgang können beispielsweise lokale Spannungskonzentrationen in der Verbundfuge durch Umlagerungen abgebaut und die Beanspruchungen vergleichmäßigt werden. Die geringen Stahlspannungen zeigen zudem, dass der Betontraganteil aus Kornverzahnung maßgeblich an dem Lastabtrag beteiligt ist. Bei entsprechend großer Rauigkeit ($R_t \geq 3$ mm), geeigneter Beschaffenheit der Aufbetonschicht sowie ausreichender Begrenzung der Schwingbreite $\Delta\tau_{E, di}$ auf maximal 40 % der statischen Tragfähigkeit $\Delta\tau_{R, di}$ sind die Dübel nicht durch Materialermüdung gefährdet.

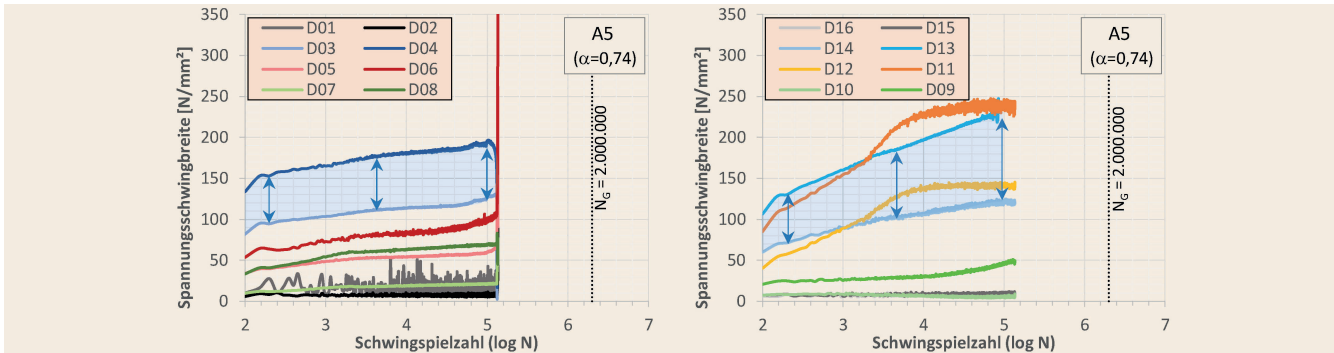


Bild 10. Verläufe der gemessenen Schwingbreiten der Randspannungen in den Schubverbindern infolge Zugkraft und Biegung (Versuch A5) *Abb.: J. Heinrich*
Fig. 10. Boundary stress ranges in the shear connectors due to tensile force and bending (test A5) *Source: J. Heinrich*

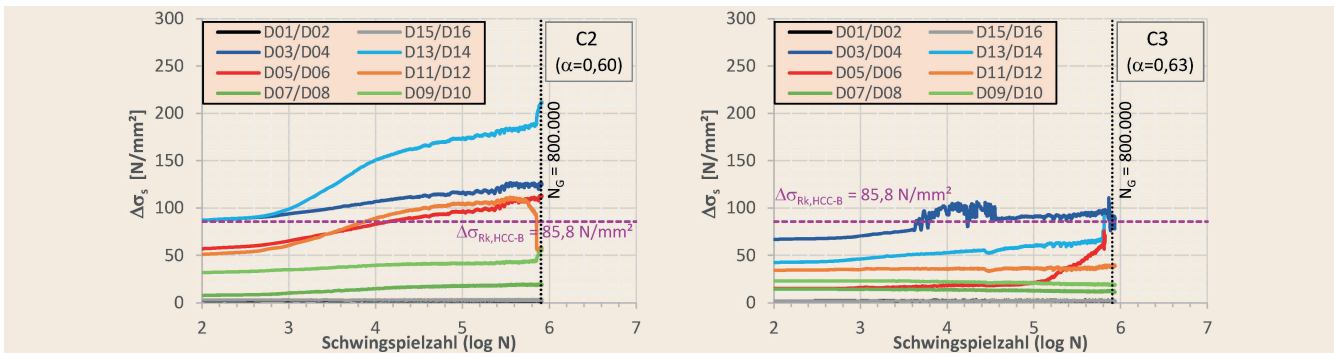


Bild 11. Verläufe Spannungsschwingbreiten (zentrische Zugspannungen) in den Schubverbindern (Versuchsreihe C, $R_t < 3 \text{ mm}$) *Abb.: J. Heinrich*
Fig. 11. Stress ranges (centric tensile stresses) in the shear connectors (test series C, $R_t < 3 \text{ mm}$) *Source: J. Heinrich*

Der Versuch A5 dagegen zeigt instabil anwachsende Spannungsschwingbreiten in den Schubverbindern bis zum vorzeitigen ($N < N_G$) ermüdungsbedingten Versagen in der Beton-Beton-Verbundfuge.

Einen Sonderfall stellt der Versuch A3 dar, der infolge des Ermüdungsbruchs der Längsbewehrung nach circa 1,9 Millionen Lastwechseln versagte. Nach circa 30 000 Lastwechseln war bei A3 bereits eine Zunahme der Spannungsschwingbreite im Schubverbinder mit den DMS D13/D14 auf circa 75 N/mm^2 festzustellen. Dieser Wert blieb bis zum Versuchsende stabil.

4.3 Relativverschiebungen

Wie aus **Bild 12** eindeutig hervorgeht, nehmen die Relativverschiebungen in der Verbundfuge mit zunehmender Schwingbreite der Schubspannungen $\Delta\tau_i$ deutlich zu. Bei dem Versuch A6 ($\alpha = 0,50$) sind die Relativverschiebungen sowohl aus Gleitung als auch aus Rissöffnung in ihrem Verlauf stabil, wobei die maximalen Werte etwa $0,1 \text{ mm}$ betragen. Dagegen steigen die Relativverschiebungen bei dem Versuch A5 ($\alpha = 0,74$) bereits unter $100\,000$ Lastwechseln stark überproportional an und leiten so frühzeitig das ermüdungsbedingte Versagen des „Gesamtsystems Verbundfuge“ und das der Verbunddübel ein. Hier betragen die maximal gemessenen Werte der Relativverschiebungen $0,5 \text{ mm}$ bis $1,0 \text{ mm}$.

Die Relativverschiebungen charakterisieren das Ermüdungsverhalten der Verbundfuge. Sind die Relativverschiebungen über die Anzahl der Lastwechsel ausreichend klein und in ihrem Ver-

lauf stabil, sind die Spannungsschwingbreiten in den Verbundmitteln unkritisch und brauchen daher nicht explizit nachgewiesen zu werden.

Daraus folgt unmittelbar der maßgebliche Einfluss aus der Beschaffenheit der Verbundfuge (Rauigkeit $R_t \geq 3 \text{ mm}$) und des Aufbetons (Konsistenz des Frischbetons, Gefüge- und Festigkeitseigenschaften den erhärteten Betons). Mit zunehmenden Relativverschiebungen steigen zusätzlich die Biegebeanspruchungen und damit die Stahlspannungen in den Verbunddübeln stark an, sodass letztendlich das Ermüdungsversagen erfolgt.

4.4 Durchbiegungsverhalten

Die Versuche A4 und A6 zeigen gegenüber den anderen Versuchen über die gesamte Versuchsdauer bis circa $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel einen relativ stabilen Verlauf beim Zuwachs der gemessenen Durchbiegungen (**Bild 13**). Die über die gesamte Versuchslaufzeit gemessenen maximalen Durchbiegungen des Versuchsträgers A3 mit Ermüdungsbruch der Längsbewehrung zeigen, dass nach circa $1,0$ Millionen und $1,8$ Millionen Schwingspielen jeweils eine deutliche Zunahme der Durchbiegung über jeweils nur ein paar 100 Schwingspiele hinweg erfolgte. Gleichzeitig ist eine geringfügige Erhöhung der Schwingbreiten im Schubverbinder mit den DMS D09/D10 zu beobachten gewesen. Die Versuche A5 und A7 zeigen bereits bei circa $100\,000$ Lastwechseln eine überproportionale Zunahme der Durchbiegungen, infolge ermüdungsbedingten Versagens der Verbundfuge.

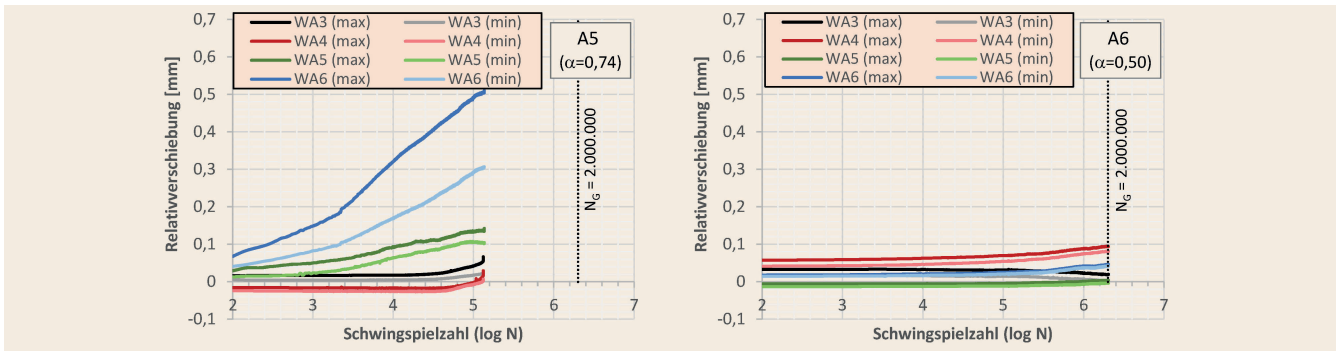


Bild 12. Gemessene Relativverschiebungen (horizontal und vertikal) in der Verbundfuge, beispielhaft für A5 und A6 *Abb.: J. Heinrich*
 Fig. 12. Measured relative displacements (horizontal and vertical) in the interface, exemplary for tests A5 and A6 *Source: J. Heinrich*

Die Versuche C2 und C3 mit geringeren Rauigkeiten ($R_t < 3 \text{ mm}$) zeigen bis zum Versuchsende gegenüber A4 und A6 ($R_t \geq 3 \text{ mm}$) größere Durchbiegung und Spannungsschwingbreiten in den Schubverbindern. Insbesondere bei den Spannungsschwingbreiten sind kurz vor dem Ende des Versuchs deutliche Zuwächse zu erkennen. Diese deuten darauf hin, dass ein ermüdungsbedingtes Versagen kurz bevorstand.

4.5 Allgemeine Erkenntnisse zum Ermüdungsverhalten von Verbundfugen

Das Tragverhalten einer Verbundfuge bei Ermüdungsbeanspruchung wird bei geeigneter Zusammensetzung, vollständiger Verdichtung beim Einbau und ausreichender Festigkeit des Aufbetons wesentlich von der Rauigkeit und Festigkeit der Oberfläche des Altbetons und bei gerissener Fuge vom Verbundbewehrungsgrad beeinflusst. Die maximale Rautiefe wird vom Abstand zwischen den höchsten und tiefsten Punkten des Rauigkeitsprofils entlang der Messstrecke bestimmt.

In ungerissenen Verbundfugen werden die Schubspannungen durch Haftverbund übertragen. Dabei handelt es sich um chemisch-physikalische Bindungskräfte im Zusammenwirken mit mikromechanischer Verzahnung.

In gerissenen Verbundfugen kann die Tragwirkung anschaulich mit der „Schubreibungstheorie“ beschrieben werden. Bei entsprechend großer Rauigkeit und begrenzter Fugenöffnung erfolgt die Übertragung der Schubbeanspruchung durch Spannungen an den Kontaktstellen. Die Größe der Spannungen an den Kontaktstellen ist abhängig von der Größe der zu übertragenden Schubkraftbeanspruchung und der Größe der horizontalen und vertikalen Relativverschiebungen in der Verbundfuge, welche die Größe der insgesamt anliegenden Kontaktflächen beeinflussen, wie die Darstellung des idealisierten Sägezahnmodells (**Bild 14**) anschaulich verdeutlicht. Sind die Spannungen klein, treten an den Kontaktstellen nur Beanspruchungen im elastischen Bereich auf. Steigen die Relativverschiebungen und Spannungen an, kommt es zur Ermüdungsschädigung durch zunehmende plastische Verformungen sowie Materialabtrag durch Reibung und Verschleiß. Die Relativverschiebungen und Beanspruchungen auf Biegung und Zug in den Stahldübeln nehmen in der Folge zunächst stabil und schließlich überproportional zu, bis es zum ermüdungsbedingten Versagen kommt. Hohe Betonfestigkeitsklassen sind daher von günstigem Einfluss.

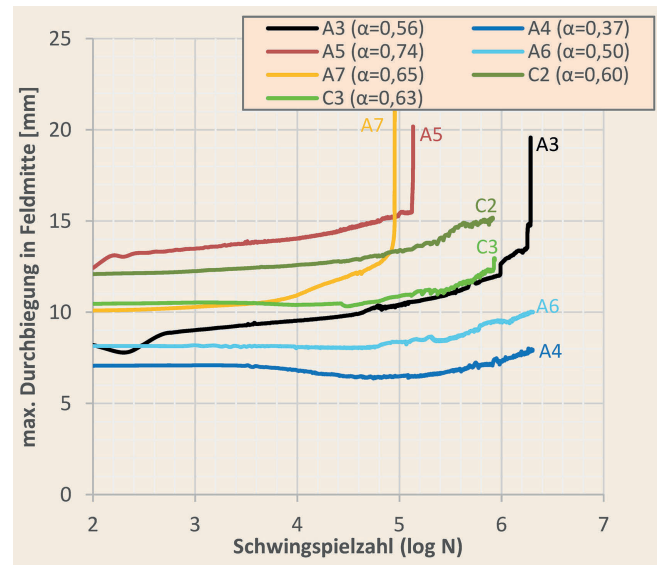


Bild 13. Verläufe der maximalen Durchbiegungen in Feldmitte über die Schwingspielzahl *Abb.: J. Heinrich*
 Fig. 13. Curves of maximum deflections in midspan versus number of cycles *Source: J. Heinrich*

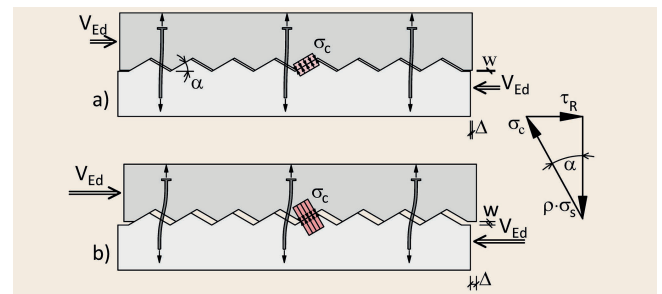


Bild 14. Idealisiertes Sägezahnmodell nach der „Schubreibungstheorie“ zur Übertragung der Schubbeanspruchung bei glatten Kontaktflächen *Abb.: J. Heinrich*
 a) kleine Schubbeanspruchung V_{Ed} , große Kontaktflächen: kleine lokale Spannungen σ_c
 b) größere Schubbeanspruchung V_{Ed} , kleinere Kontaktflächen: große lokale Spannungen σ_c
 Fig. 14. Idealized model based on “shear friction theory” for transmission of shear *Source: J. Heinrich*
 a) small shear forces V_{Ed} , large contact areas: small local stresses σ_c
 b) larger shear forced V_{Ed} , smaller contact areas: large local stresses σ_c

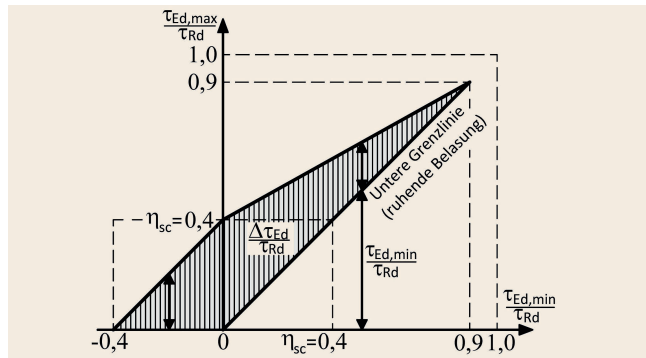


Bild 15. Goodman-Diagramm für den Nachweis bei Ermüdungsbeanspruchung $\Delta\tau_{Ed}$ in der Schubfuge Abb.: Firma Hilti
 Fig. 15. Goodman diagram for verification against fatigue in interface
 Source: Firma Hilti

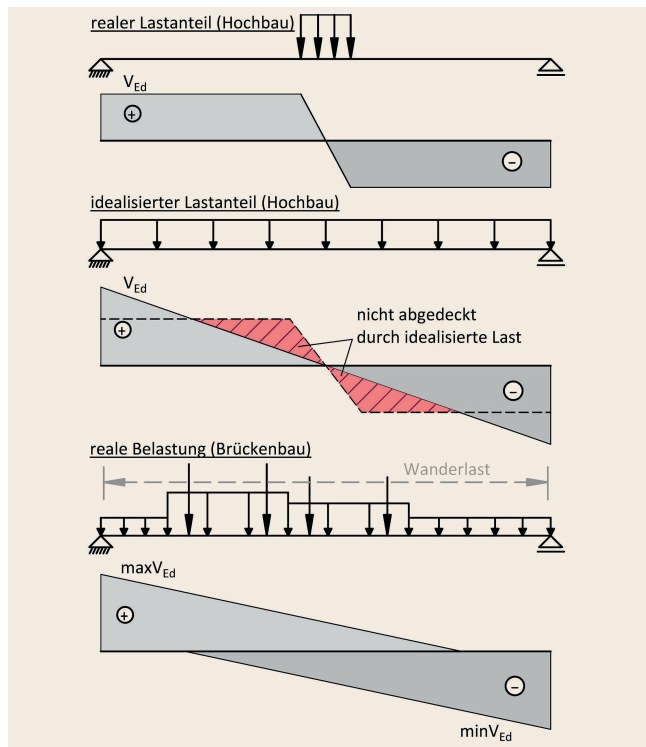


Bild 16. Gegenüberstellung der idealisierten Beanspruchungen im Hoch- und Brückenbau als Begründung für den Ansatz einer Mindestschubbewehrung Abb.: J. Heinrich
 Fig. 16. Comparison of the idealized load effects in building and bridge engineering as reason for the minimum shear reinforcement
 Source: J. Heinrich

5 Bemessung nach ETA-18/1022 und EOTA TR 066

In [1] wurde bereits über die Einführung der Europäischen Technischen Bewertung ETA-18/1022 [8] ausführlich berichtet. Das Bemessungskonzept zur Anwendung der Schubverbinder HCC-B ist im EOTA TR 066 [13] geregelt. Insbesondere ist auch ein Nachweis bei Ermüdungsbeanspruchung implementiert.

Die Bezugsgröße für das Bemessungskonzept bei Ermüdungsbeanspruchung stellt die statische Tragfähigkeit in der Verbundfuge als Bemessungswert τ_{Rd} , dar, der nach Gleichung (10) bestimmt wird. Da in der Regel bei einer nachträglichen Verstär-

kung für eine Verbundbewehrung nach den Regeln der Stahlbetonbauweise keine ausreichende Verankerungslänge vorhanden ist, muss ein Dübelnachweis erfolgen. Wie bereits in [1] beschrieben, werden im Unterschied zur Bemessungsformel nach MC2010 die Faktoren α_{k1} und α_{k2} als produktspezifische Beiwerte für die Verbunddübel eingeführt, die von dem jeweiligen Dübeltyp abhängig sind. Diese können der entsprechenden ETA entnommen werden.

$$\tau_{Rd} = c_r \cdot f_{ck}^{\frac{1}{3}} + \mu \cdot \sigma_n + \mu \cdot \kappa_1 \cdot \rho \cdot \sigma_s + \kappa_2 \cdot \alpha_{k2} \cdot \rho \cdot \sqrt{\frac{f_{yk}}{\gamma_s} \cdot \frac{0,85 \cdot f_{ck}}{\gamma_c}} \leq \beta_c \cdot v \cdot \frac{0,85 \cdot f_{ck}}{\gamma_c} \quad (10)$$

$$\text{mit } \sigma_s = N_{Rd}/A_s \leq f_{yk}/\gamma_s$$

Für den Ermüdungsnachweis wird der Abminderungsbeiwert η_{sc} für das Gesamtsystem Verbundfuge eingeführt. Dieser ist ebenfalls in der ETA definiert und beschreibt die Abminderung der statischen Tragfähigkeit τ_{Rd} in der Schubfuge unter zyklischer Beanspruchung. Für den Schubverbinder HCC-B beträgt $\eta_{sc} = 0,4$. Der Nachweis wird unter der häufigen Einwirkungskombination mithilfe eines Goodman-Diagramms (**Bild 15**) geführt. Dabei sind drei verschiedene Fälle zu unterscheiden, die von der Höhe der Unterlast abhängen.

– Fall 1: $\tau_{Ed,min} = 0, \Delta\tau_{Ed} = \tau_{Ed,max}$

$$\frac{\Delta\tau_{Ed}}{\tau_{Rd}} \leq \eta_{sc} \quad (11)$$

– Fall 2: $\tau_{Ed,min} > 0, \Delta\tau_{Ed} = \tau_{Ed,max} - \tau_{Ed,min}$

$$\frac{|\tau_{Ed,max}|}{\tau_{Rd}} \leq \eta_{sc} + 0,55 \cdot \frac{|\tau_{Ed,min}|}{\tau_{Rd}} \leq 0,9 \quad (12)$$

– Fall 3: $\tau_{Ed,min} < 0, \Delta\tau_{Ed} = \tau_{Ed,max} - \tau_{Ed,min}$

$$\frac{|\tau_{Ed,max}|}{\tau_{Rd}} \leq \eta_{sc} - \frac{|\tau_{Ed,min}|}{\tau_{Rd}} \quad (13)$$

Im EOTA TR 066 sind zudem basierend auf der Risskraft Mindestbewehrungsgrade für die Verbundbewehrung vorgegeben [19], wobei nach Balken- und Plattentragwerken differenziert wird.

$$\text{Balken: } \rho_{min} = 0,2 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \geq 0,001 \quad (14)$$

$$\text{Platten: } \rho_{min} = 0,12 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \geq 0,0005 \quad (15)$$

Die Vorgabe des Mindestwerts der Verbundbewehrung ist insbesondere bei Bauteilen berechtigt, bei denen die Lastmodelle stark idealisiert sind. Dies ist beispielsweise im Hochbau der Fall, da hier üblicherweise vereinfacht mit idealisierten Gleichstreckenlasten gerechnet wird, die feldweise ungünstig aufgebracht werden. Damit ungünstigere Schubbeanspruchungen aus Querkraft infolge realer Beanspruchungen zum Beispiel anteilig auch aus Einzellasten abgedeckt werden, empfiehlt sich hier der Ansatz einer Mindestbewehrung. Im Brückenbau werden dagegen die Querkräfte auf der Grundlage von Einflusslinien/Einflussflächen basierend auf exakten Verfahren sehr viel genauer berechnet. Die Verkehrslastmodelle aus Tandemlast (TS) und Flächenlasten (UDL) sind zudem realitätsnäher. Lastbilder werden über das Tragwerk in die für jede Nachweisstelle ungünstigste Position geschoben, wo-

durch die tatsächliche Querkraftgrenzlinie ermittelt werden kann (**Bild 16**). Im EOTA TR 066 ist entsprechend der Hinweis gegeben, dass bei Bemessung der Verbundfuge für die Querkraftgrenzlinie aus den ungünstigsten Verkehrslaststellungen entsprechend von Einflusslinien/Einflussflächen auf die Mindestbewehrung verzichtet werden kann. Eine analoge Vorgabe ist in der Nachrechnungsrichtlinie [20], Absatz 12.4.3.3 (4) für die Mindestquerkraftbewehrung enthalten.

Die Anwendung des HCC-B Schubverbindersystems mit dem zugehörigem Bemessungskonzept ist an zusätzliche konstruktive, betontechnische und ausführungstechnische Bedingungen geknüpft, die bereits in Abschnitt 2.3 aufgeführt wurden.

6 Schlussbemerkungen

Mit Veröffentlichung der ETA-18/0122, Ausgabe März 2019 in Verbindung mit dem EOTA TR 066, Ausgabe April 2019 steht mit den HCC-B Schubverbindern ein System zur Verbundsicherung bei einer nachträglichen Verstärkung durch Aufbeton auch bei Ermüdungsbeanspruchung zur Verfügung. Das hierin enthaltene Bemessungskonzept entspricht weitestgehend dem Konzept nach MC2010, wurde aber mittels produktspezifischer Beiwerte für den HCC-B Schubverbinder angepasst, da die Verbundbewehrung bei nachträglicher Verstärkung in der Regel als Dübel bemessen werden muss. Im Gegensatz zum Bemessungskonzept nach EC2 wird hier bei Ermüdungsbeanspruchung ein expliziter Nachweis als „Gesamtsystem Verbundfuge“ mithilfe eines Goodman-Diagramms geführt.

Liegt das Verhältnis der Höhe der Ermüdungsbeanspruchung in der Verbundfuge zur statischen Tragfähigkeit unterhalb eines bestimmten Grenzwertes, ist nicht mit einem ermüdungsbedingtem Versagen der Verbundfuge zu rechnen. Diese Aussage konnte unter anderem an der TU Dortmund anhand von Bauteilversuchen mit Verbundfugen der Rauigkeitskategorie „verzahnt“ ($R_t \geq 3 \text{ mm}$) und einem entsprechenden Verbundbewehrungsgrad bestätigt werden. Ferner konnte gezeigt werden, dass bei ausreichend begrenzten Ermüdungsbeanspruchungen so kleine Relativverformungen zwischen der alten und neuen Betonschicht und damit einhergehend so geringe Stahlspannungen in den Schubverbindern entstehen, dass auf einen expliziten Nachweis der Verbundmittel gegen Ermüdung verzichtet werden kann.

Die Fugenrauigkeit hat sich neben der Festigkeit des Betons als maßgebende Größe für den Tragwiderstand in der Verbundfuge insbesondere bei Ermüdungsbeanspruchung herausgestellt. Daher werden bei der Verstärkung von Bauteilen, die eine Ermüdungsbeanspruchung erfahren (z. B. Brücken, Parkdecks, ...), eine Mindestrautiefe von $R_t \geq 3 \text{ mm}$ (Kategorie: „verzahnt“), sowie weitere konstruktive und betontechnische Maßnahmen vorausgesetzt.

Literatur

- [1] Heinrich, J.; Zenk, T.; Maurer, R.: Versuche zum Tragverhalten und Bemessungskonzept für Beton-Beton-Verbundfugen bei nachträglicher Verstärkung (Teil 1 – Statische Tragfähigkeit). In: Bauingenieur 94 (2019), Heft 11, S. 425-435.
- [2] DIN EN 1992-1-1 – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau und Nationaler Anhang DIN EN 1992-2/NA, Ausgabe Januar 2011.
- [3] DIN EN 1992-2:2010-12 – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln, Ausgabe Dezember 2010 und Nationaler Anhang DIN EN 1992-2/NA, Ausgabe April 2013.
- [4] International Federation for Structural Concrete (fib) – fib Model Code for Concrete Structures 2010, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2013.
- [5] Randl, N.; Wicke, M.: Auswertung der dynamischen Versuche Verbund Alt-Neubeton, Projekt „CCLT-Fatigue“ Institut für Betonbau – Universität Innsbruck, Mai 2000, 8 S., (unveröffentlicht).
- [6] Pruijssers, A. F.: Aggregate Interlock and Dowel Action under Monotonic and Cyclic Loading. Delft, Delft University of Technology, Dissertation, 1988.
- [7] Hilti New Business & Technology, Test Report TWU 08/02, 2002.
- [8] European Technical Assessment ETA-18/1022: Verbinder zur Verstärkung bestehender Betonkonstruktionen durch Aufbeton. Deutsches Institut für Bautechnik, März 2019.
- [9] Wieneke, K.; Claßen, M.; Hegger, J.: Elementdecken mit Gitterträgern unter zyklischer Belastung. In: Beton- und Stahlbetonbau 112 (2017), Heft 9, S. 579-588.
- [10] Wieneke, K.; van Elten, L.; Claßen, M. et al.: Ermüdung von Elementdecken mit Gitterträgern. In: Beton- und Stahlbetonbau 112 (2017), Heft 11, S. 723-733.
- [11] Randl, N.; Münger, F.; Wicke, M.: Verstärkung von Betonbauwerken durch Aufbeton. In: Bauingenieur 80 (2005), Heft 4, S. 207-214.
- [12] Kaufmann, N.: Das Sandflächenverfahren. In: Straßenbautechnik 24 (1971), Heft 3, S. 131-135.
- [13] EOTA Technical Report TR 066: Design and requirements for construction works of post-installed shear connection for two concrete layers. Ausgabe April 2019.
- [14] Block, K.; Dreier, F.: Die Ermüdungsfestigkeit zuverlässig und kostengünstig ermitteln – Das Interaktive Verfahren. In: Materialprüfung 40 (1998), Heft 3, S. 73-77.
- [15] [15] European Technical Assessment ETA-16/0142: Injection system Hilti HIT-RE 500 V3 for rebar connection. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Ausgabe Juli 2015.
- [16] Europäische Technische Bewertung ETA-16/0143: Injektionssystem Hilti HIT-RE 500 V3, Verbunddübel mit Verbunddübel mit Gewindestangen, Betonstahl, Innengewindehülse und Hilti Zuganker HZA zur Verankerung in Beton. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Ausgabe April 2016.
- [17] Hilti Deutschland AG: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-21.8-2064: Bewehrungsanschluss mit Injektionsmörtel Hilti HIT-RE 500 V3. Ausgabe Juli 2015.
- [18] Block, K.; Machoczek, D.: Investigations on Fitness for Use of the Injection System Hilti HIT-RE 500 V3 for Rebar Connection under Fatigue-induced Cyclic Loading. Test Report No. 16.02.01, Technische Universität Dortmund, April 2016, 26 S. (unveröffentlicht).
- [19] Randl, N.: Zur Frage der Mindestbewehrung bei Aufbeton-Verbundfugen. In: Beton- und Stahlbetonbau 105 (2010), Heft 9, S. 608-611.
- [20] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie) – 1. Ergänzung. Ausgabe April 2015.



Dipl.-Ing. Jens Heinrich

jens.heinrich@tu-dortmund.de
Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl Betonbau
August-Schmidt-Straße 8, 44227 Dortmund

Abb.: Michael Wimmersdorf

Dipl.-Ing. Thomas Zenk

thomas.zenk@hilti.com
Hilti Entwicklungsgesellschaft mbH
Hiltistraße 6, 86916 Kaufering

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer

reinhard.maurer@tu-dortmund.de
Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl Betonbau
August-Schmidt-Straße 8, 44227 Dortmund