Rissbildung und Rissbreitenentwicklung bei Stahlbetonbauteilen unter verformungsinduziertem Zwang

Daniel Gebauer, M. Sc.
Institut für Massivbau der TU Dresden, 01062 Dresden
E-Mail: daniel.gebauer@tu-dresden.de, Telefon: +49 351 463 39425

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag befasst sich – motiviert vom Detail des monolithischen Anschlusspunktes der Stützen an den Überbau semi-integraler Brücken und den damit einhergehenden Besonderheiten für den Entwurf – mit der Thematik der verformungsinduzierten Rissbildung und ihren Einflussfaktoren. Anhand zweier Versuchsreihen wird der Einfluss der geometrischen Querschnittsparameter (Bewehrungsgrad, Bewehrungsumfang und Anzahl der Bewehrungslagen) auf die Rissbildung infolge Zwangsverformung untersucht.

1 Motivation

Die integrale und semi-integrale Ausführung von Brückenbauwerken etabliert sich durch ihre Robustheit und Tragwerkseffizienz [1]–[3] zunehmend im Großbrückenbau in Deutschland [4], [5]. Gleichzeitig sind gerade die Langzeiterfahrungen sehr begrenzt bzw. unzureichend dokumentiert [6], was zu einer Unsicherheit bei den planenden Ingenieure und Ingenieurinnen führt. Der vorliegende Beitrag befasst sich vor diesem Hintergrund mit dem Aspekt der verformungsinduzierten Rissbildung bei Stützen semi-integraler Talbrücken. Hierbei wird die Definition von semi-integralen Talbrücken nach [7] verwendet. Die spezielle Kombination aus Tragwerk und Einwirkungen stellt einen Sonderfall im Brückenbau dar. Auf Seiten des Tragwerks liegt eine Konstruktion vor, welche in den meisten Kontaktpunkten zwischen Über- und Unterbau eine monolithische Verbindung aufweist. Gleichzeitig sind einige wenige Lagerpunkte verschieblich ausgeführt, sodass der Überbau den biegeweichen Stützen eine Verformung u am Stützenkopf aufzwingt. Dies ist möglich, da die Dehnsteifigkeit des Überbaus $(EA)_{\text{Überbau}}$ um Größenordnungen höher ist als die Biegesteifigkeit der monolithisch angeschlossenen Stützen $(EI)_{\text{Unterbau}}$. Im Anschlusspunkt wird ein verformungsbedingter, äußerer Zwang induziert. Bild 1 verdeutlicht diese Verformungssituation.

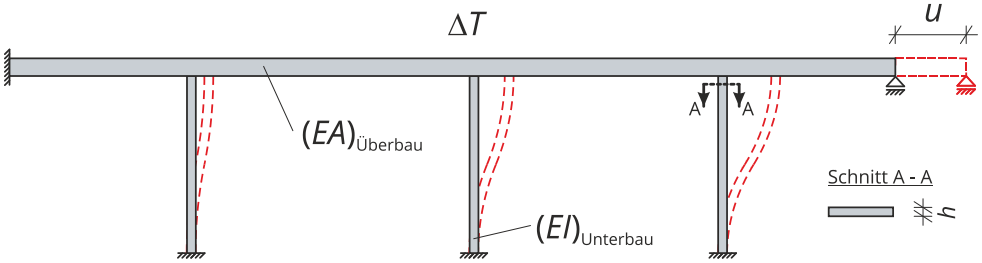

Bild 1 Verformungsfigur bei Überbauausdehnung infolge Temperaturänderung ΔT bei semi-integralen Talbrücken. Grafik: Daniel Gebauer

Die Einwirkungssituation der monolithisch angeschlossenen Stütze ist somit dominiert von einer Zwangsverschiebung bei gleichzeitiger Belastung durch eine Normalkraft. Untersuchungen zu verschiedenen Einflussgrößen auf die Querschnittstragfähigkeit in [8], [9] haben gezeigt, dass die Tragfähigkeit unter Wahrung der Duktilität maßgeblich durch die Normalkraftauslastung und die Querschnittshöhe bestimmt wird. Bleibt ein Querschnitt im Bereich von unter 30 % Normalkraftauslastung und werden die Querschnittsabmessungen so gewählt, dass die Höhe des Stützenquerschnittes h so gering wie möglich ausfällt, kann von einem hinreichend duktilen Bauteil ausgegangen werden. Eine Betrachtung des mechanischen Bewehrungsgrades zeigt unter diesen Randbedingungen, dass die Duktilität der Stütze hiervon nahezu unbeeinflusst ist. Die eigentliche Konse-

quenz eines höheren Bewehrungsgrades ist ein Anstieg der resultierenden Beanspruchung in Form des Zwangsmomentes.

Der beschriebene Umstand, dass die Bewehrung für die Tragfähigkeit eine untergeordnete Rolle spielt und die Einwirkung neben der Normalkraft rein verformungsgesteuert ist, eröffnet neue Potentiale im Umgang mit der Rissbreitenbegrenzung. Im Gegensatz zu einer Entwurfssituation unter lastinduzierten Einwirkungen, bei der die Querschnittsfläche der Bewehrung relevant für die Tragfähigkeit ist, können bei verformungsinduzierten Einwirkungen deutlich geringere Bewehrungsgrade zur Sicherstellung der Tragfähigkeit ausreichen. Die Bewehrung übernimmt in dieser Situation primär die Aufgabe, die Rissbreite zu beschränken. An dieser Stelle setzen die Untersuchungen an, die in diesem Artikel vorgestellt werden. In Tastversuchen sollen Betonquerschnitte mit unterschiedlichen Bewehrungskonfigurationen hinsichtlich ihres Rissverhaltens analysiert werden.

2 Tastversuche

Im Zusammenhang mit der Thematik wurden zwei Versuchsreihen mit insgesamt fünf Probekörpern geplant und durchgeführt. Der Entwurf der Versuchsreihen erfolgte unter der Annahme, die Bewehrung frei wählen zu können. Dabei war es das Ziel, den Einfluss geometrischer Parameter auf die Rissbildung infolge Zwangsverformung experimentell zu erfassen und Ansatzpunkte für eine gezieltere Steuerung der Rissbildung zu erhalten. Die Tastversuche betrachten die drei geometrischen Einflussgrößen Bewehrungsgrad, Verbundfläche und Mehrlagigkeit der Bewehrung. Der Bewehrungsgrad steuert hierbei maßgeblich die Größe des Kräftepaares unter vorgegebener Verformung. Die Verbundfläche, welche im Folgenden auf Querschnittsebene über das Summenverhältnis der Stabumfänge zu deren Querschnittsfläche (U_s/A_s) beschrieben wird, ist für die Übertragung der Kräfte zwischen Beton und Stahl entscheidend. Die Mehrlagigkeit wurde als zusätzliches Merkmal betrachtet. Sie ist häufig ein Resultat der üblichen Herangehensweise an die Bemessung. Es soll überprüft werden, wie groß der Einfluss der inneren Bewehrungslagen auf das Rissverhalten ist.

Die beschriebenen Überlegungen führten auf die in Bild 2 dargestellten Querschnitte. Die Basis ist ein Betonquerschnitt mit den Abmessungen 40 × 30 cm. In einer ersten Versuchsreihe wurden drei Bewehrungskonfigurationen mit unterschiedlichem Bewehrungsgrad betrachtet. Die zweite Versuchsserie bestand aus zwei Querschnitten mit demselben Bewehrungsgrad aber unterschiedlicher Konfiguration. Insgesamt wurden fünf verschiedene Bewehrungskonfigurationen mit drei geometrischen Bewehrungsgraden ρ (0,5 / 1,0 / 2,1 %) und drei unterschiedliche Verhältnisse von Umfang zu Querschnittsfläche U_s/A_s (2 / 3 / 4 $^1/_{cm}$) untersucht. Für jede Konfiguration stand ein Probekörper zur Verfügung.

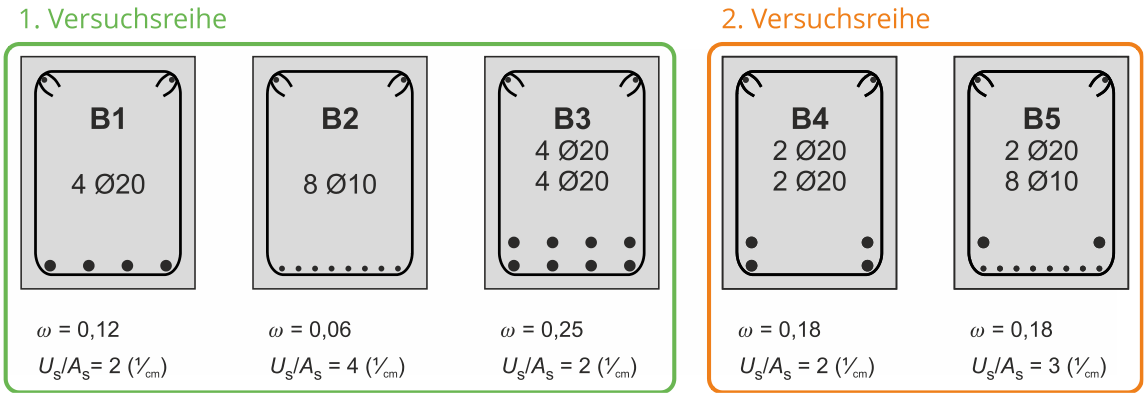

Bild 2 Querschnittsübersicht der Versuchsbalken. Grafik: Daniel Gebauer

Die beiden Versuchsserien sind untereinander nur bedingt vergleichbar. Trotz einer geplanten Festigkeit von C30/37 für beide Versuchsreihen wichen die aus Begleituntersuchungen bestimmten Druckfestigkeiten und Elastizitätsmoduln um über 30 % voneinander ab (vgl. Tabelle 1). Hierdurch

sind beim Vergleich zwischen den Versuchsserien nur qualitative Aussagen möglich. Die unterschiedlichen Druckfestigkeiten beider Versuchsreihen bedingen zudem vier verschiedene, mechanische Bewehrungsgrade ω. Diese können Bild 2 entnommen werden.

Tabelle 1 Materialparameter der ersten und zweiten Versuchsreihe (Mittelwerte)

Serie	Zylinderdruckfestigkeit	Elastizitätsmodul
1. Versuchsserie	42,7 N/mm²	30.300 N/mm²
2. Versuchsserie	28,5 N/mm²	19.600 N/mm²

Die Probekörper wurden in einem klassischen 4-Punkt-Biegeversuch getestet, wie sie üblicherweise zur Untersuchung der ungestörten Rissbildung eingesetzt werden [10]. Vorteile sind eine querkraftfreie Zone reiner Biegung, welche ohne Bügelbewehrung ausgeführt werden kann. Die Abmessungen können Bild 3 entnommen werden. Der bügelfreie gewählte mittlere Bereich ist 1 m lang, wird mit optischen Messmethoden (DIC) beobachtet und nachfolgend als Interessensbereich (IB) bezeichnet. Darüber hinaus kamen Seilzugsensoren zur Messung der Durchbiegung u, faseroptische Sensoren (FOS) zur Quantifizierung der inneren Rissbildung sowie Dehnungsmessstreifen (DMS) zur Messung der Stahlspannung zum Einsatz.

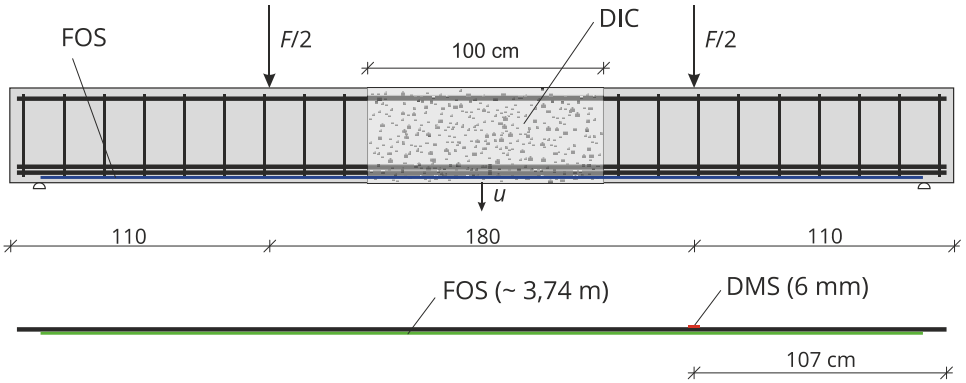

Bild 3 Probekörper mit Lagerungs- und Belastungsrandbedingungen, Bewehrungsschema, Auszug aus dem Sensorplan. Grafik: Daniel Gebauer

Das Belastungsprogramm der ersten Versuchsserie bestand aus den sechs Durchbiegungsniveaus u (2,5 / 5 / 10 / 15 / 20 / 30 mm), welche verformungsgesteuert angefahren wurden. Für jedes Verformungsniveau wurden mindestens anderthalb Hysteresen gefahren, wobei die Durchbiegungsplateaus für mindestens 30 Sekunden gehalten wurden.

In der zweiten Versuchsserie wurden Lastniveaus kraftgesteuert angefahren, welche in Anlehnung an die Stahlspannungen des vereinfachten Rissbreitennachweises nach Eurocode 2, Teil 2/NA [11] ausgewählt wurden. Jedes Lastniveau wurde hierbei mit mindestens zwei Hysteresen gefahren, wobei sie Lastplateaus ebenfalls für mindestens 30 Sekunden durch Feststellen des Prüfzylinders gehalten wurden. Durch das Halten des Zylinders war eine Entlastung durch Kriechen möglich.

3 Diskussion der Ergebnisse

3.1 Allgemeines

Zur Herstellung der Vergleichbarkeit beider Versuchsreihen werden ausgewählte Zeitpunkte der Messreihen zur Gegenüberstellung herangezogen. Gewählt werden die Zeitpunkte, bei denen jeweils das erste Mal eine Durchbiegung in Feldmitte entsprechend der planmäßigen Durchbiegungsniveaus der ersten Versuchsreihe erreicht wird. Für die erste Versuchsreihe sind dies die Zeitpunkte, an denen das Durchbiegungsplateau erstmals erreicht wird. Für die zweite Versuchsreihe liegt dieser Punkt stets in einem ansteigenden Belastungsast. Durch diese Wahl sollen Einflüsse aus Kurzzeitkriechen reduziert werden, welche sich unmittelbar entlastend auswirken, sobald ein Durchbiegungsniveau gehalten wird.

3.2 Zwangskräfte

Die Bilder 4 und 5 zeigen die resultierenden Zwangskräfte (Pressenkräfte *F*) beider Versuchsreihen auf den jeweiligen Durchbiegungsniveaus. Erwartungsgemäß sind die Zwangskräfte höher, je höher der Bewehrungsgrad ist. Der erzeugte Dehnungszustand sorgt bei höherem Bewehrungsgrad für eine größere Komponente der Stahlkraft und infolge des Gleichgewichtes für eine größere Betondruckkraft. Der Betrag der inneren Kräfte ist insgesamt größer und erzeugt ein höheres Zwangsmoment, welches sich in einer höheren Pressenkraft widerspiegelt.

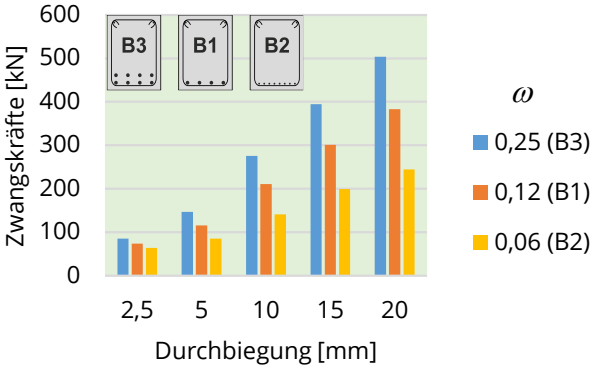

Bild 4 Zwangskräfte der 1. Versuchsreihe. Grafik: Daniel Gebauer

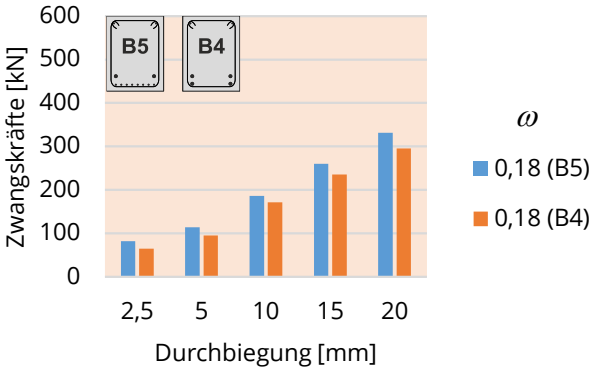

Bild 5 Zwangskräfte der 2. Versuchsreihe. Grafik: Daniel Gebauer

Die Unterschiede in der zweiten Versuchsreihe, bei gleichem Bewehrungsgrad, können ebenfalls über das innere Moment erklärt werden. Die Bewehrungskonfiguration „B5“ besitzt einen geringfügig größeren inneren Hebelarm und infolgedessen ein höheres inneres Moment.

3.3 Rissbreiten

Die Rissbreiten wurden via digitaler Bildkorrelation (DIC) ermittelt. Zunächst werden die Verläufe der Einzelrisse betrachtet. Hierzu stellt Bild 6 die Verformungs-Rissbreiten-Verläufe beider Versuchsreihen in gegenüber. Aufgeführt sind sämtliche Einzelrisse im Interessensbereich (IB) der Prüfkörper, welche zum Zeitpunkt der höchsten planmäßigen Verformungsstufe eine Rissbreite von über 0,05 mm hatten.

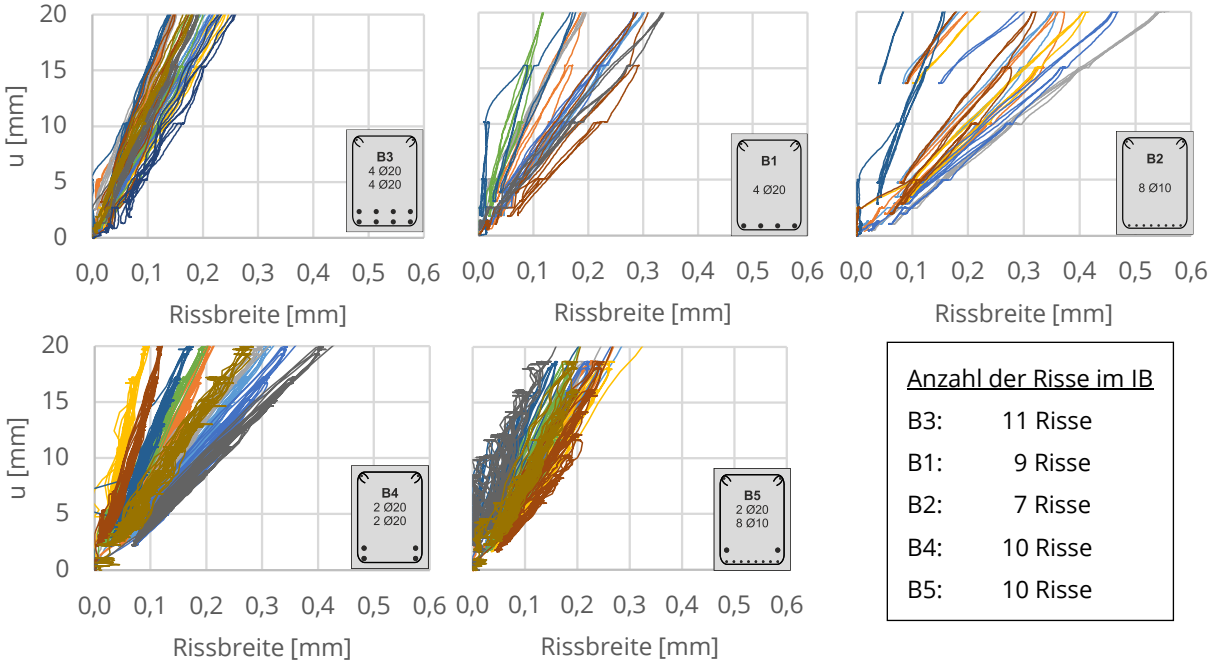

Bild 6 Durchbiegungs-Rissbreiten-Verläufe der 1. (oben) und 2. Versuchsreihe (unten). Grafik: Daniel Gebauer

Es zeigt sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Probekörpern. Die Balken B2, B3 und B5 weisen unabhängig von der absoluten Rissbreite eine relativ gleichmäßige Rissbreitenverteilung auf. Für B3 ist dies direkt aus der Kurvenschar erkennbar, während beim Balken B2 ein Riss und bei Balken B5 zwei Risse mit geringerer Rissbreite die Klarheit dieser Aussage etwas trüben. Betrachtet man hingegen die Balken B1 und besonders B4, so zeigt sich die große Streuung der einzelnen Rissbreiten. Die Gründe für dieses Phänomen werden in der Verbundfläche vermutet, welche auf Querschnittsebene über die Summe der Bewehrungsumfänge $\Sigma\, U_s$ beschrieben werden kann. Hier besitzt der Balken B3 mit 50 cm und Balken B5 mit 38 cm jeweils den größten Wert innerhalb ihrer Versuchsreihen. Die Risskraft kann – bei sonst gleichen Randbedingungen – über eine kürzere Distanz wieder in den Beton eingeleitet werden. Die Folge ist eine feinere, gleichmäßiger verteilte Rissbildung. Bei den übrigen Balken liegt der entsprechende Wert bei 25 cm. Hierdurch können ebenfalls die im Vergleich geringeren Rissbreiten von B3 und B5 erklärt werden. Die gleichmäßige Verteilung der Rissbreite bei deutlich größeren Werten des Balkens B2 kann durch sein hohes Verhältnis von Querschnittsfläche zu Umfang von 4 $^1/_{cm}$ erklärt werden. Bei gleicher Stahlspannung kann die Bewehrung mehr Kraft über den Verbund in den Beton einleiten. Insgesamt zeigt sich, dass eine große Mantelfläche und ein hohes Verhältnis von Umfang zu Durchmesser einen positiven Einfluss auf die Rissbildung und die Rissbreitenverteilung haben.

Die Tabelle 2 enthält die maximale Rissbreite auf den vier Durchbiegungsniveaus von 5 bis 20 mm für alle Probekörper. Aus der 1. Versuchsreihe (grün hinterlegt) ist direkt ersichtlich, dass die maximale Rissbreite stark vom Bewehrungsgrad ω abhängig ist. Je höher der Bewehrungsgrad, desto geringer die maximale Rissbreite. Der dominierende Einfluss lässt sich hier auf die Stahldehnung zurückführen, welche geringer ist, je höher der Bewehrungsgrad ist. Die 2. Versuchsreihe (rot hinterlegt) zeigt bei gleichem Bewehrungsgrad ebenfalls eine Tendenz. Hier liefert der Probekörper B5 eine geringere Rissbreite. Die Dehnungsunterschiede liegen hier unter 7 %. Es wird daher vermutet, dass die um 50 % höhere Verbundfläche des Balkens B5 durch bessere Rissverteilung für eine um mindestens 15 % niedrigere maximale Rissbreite sorgt.

Tabelle 2 Maximale Rissbreiten mit prozentualer Abweichung vom Wert des jeweiligen Bezugsprobekörpers je Serie (B1 bzw. B4)

Durchbiegung	Maximale Rissbreite [mm]				
	1. Versuchsreihe			2. Versuchsreihe	
	B1 (ω = 0,12; U_s/A_s = 2 $^1/_{cm}$)	**B2** (ω = 0,06; U_s/A_s = 4 $^1/_{cm}$)	**B3** (ω = 0,25; U_s/A_s = 2 $^1/_{cm}$)	**B4** (ω = 0,18; U_s/A_s = 2 $^1/_{cm}$)	**B5** (ω = 0,18; U_s/A_s = 3 $^1/_{cm}$)
5 mm	0,11	0,16 (51 %)	0,09 (–15 %)	0,13	0,11 (–15 %)
10 mm	0,22	0,29 (32 %)	0,15 (–29 %)	0,22	0,19 (–15 %)
15 mm	0,29	0,41 (40 %)	0,20 (–30 %)	0,32	0,23 (–27 %)
20 mm	0,36	0,55 (50 %)	0,26 (–28 %)	0,41	0,33 (–17 %)

Die Übersicht der mittleren Rissbreiten in Tabelle 3 zeigt bezüglich der Auswirkung des Bewehrungsgrades grundsätzlich dasselbe Verhalten. Mit zunehmendem Bewehrungsgrad sinkt die mittlere Rissbreite. Die prozentualen Differenzen liegen in vergleichbaren Größenordnungen wie die maximale Rissbreite. Auffällig ist der Unterschied bei gleichem Bewehrungsgrad innerhalb der 2. Versuchsserie. Die mittleren Rissbreiten sind hier nahezu gleich, während die maximalen Rissbreiten um bis zu 27 % größer sind. Eine Begründung kann wiederum in der besseren Rissverteilung gefunden werden, wodurch die Einzelrissbreiten des Balkens B5 eine deutlich geringere Streuung um den Mittelwert aufweisen und somit folgerichtig den niedrigeren Extremwert besitzt (vgl. Bild 6). Der Einfluss der Materialstreuung auf die Ergebnisse kann aufgrund der geringen Probenumfänge von einer Probe je Konfiguration nicht quantifiziert werden.

Tabelle 3 Mittlere Rissbreiten mit prozentualer Abweichung vom Wert des jeweiligen Bezugsprobekörpers je Serie (B1 bzw. B4)

Durchbiegung	Mittlere Rissbreite [mm]				
	1. Versuchsreihe			2. Versuchsreihe	
	B1 (ω = 0,12; U_s/A_s = 2 $^1/_{cm}$)	**B2** (ω = 0,06; U_s/A_s = 4 $^1/_{cm}$)	**B3** (ω = 0,25; U_s/A_s = 2 $^1/_{cm}$)	**B4** (ω = 0,18; U_s/A_s = 2 $^1/_{cm}$)	**B5** (ω = 0,18; U_s/A_s = 3 $^1/_{cm}$)
5 mm	0,06	0,11 (74 %)	0,05 (–20 %)	0,05	0,05 (0 %)
10 mm	0,13	0,22 (65 %)	0,11 (–20 %)	0,11	0,10 (–3 %)
15 mm	0,20	0,31 (55 %)	0,15 (–22 %)	0,15	0,15 (–0 %)
20 mm	0,25	0,38 (48 %)	0,20 (–22 %)	0,20	0,22 (12 %)

4 Fazit

Die Hypothese, dass die innenliegende Bewehrung im Vergleich zur äußeren Bewehrungslage weniger entscheidend für die Rissbildung ist, muss auf Grundlage der vorliegenden Versuche verworfen werden. In den Tastversuchen konnte gezeigt werden, dass die Wahl der Bewehrungskonfiguration einen immensen Einfluss auf die Rissbildung und die Zwangsbeanspruchung besitzt. Der zwangserhöhende Einfluss eines steigenden Bewehrungsgrades wurde bestätigt. Gleichzeitig bedeutet eine steigende Zwangsbeanspruchung keine höhere Rissbreite. Die Tastversuche zeigen hier ein gegenläufiges Ergebnis, welches mit einer sinkenden Stahlspannung bzw. -dehnung begründet werden kann. Somit lässt sich der dominante Einfluss des mechanischen Bewehrungsgrades auf die maximale und mittlere Rissbreite erkennen. Steigt der Bewehrungsgrad, so sinkt die Rissbreite. Darüber hinaus wurde bei gleichem Bewehrungsgrad der erwartbare, reduzierende Einfluss einer höheren Verbundfläche auf die maximale Rissbreite gezeigt. Interessanterweise war die mittlere Rissbreite von der höheren Verbundfläche nahezu unbeeinflusst. Eine weitere Quantifizierung der Einflüsse ist Gegenstand zukünftiger Untersuchungen.

Literatur

[1] Pötzl, M.; Schlaich, J.; Schäfer, K. (1996) *Grundlagen für den Entwurf, die Berechnung und konstruktive Durchbildung lager- und fugenloser Brücken*. DAfStb-Heft 461.

[2] Engelsmann, S.; Schlaich, J.; Schäfer, K. (1999) *Entwerfen und Bemessen von Betonbrücken ohne Fugen und Lager*. DAfStb-Heft 496.

[3] Geier, R.; Angelmaier, V.; Graubner, C.-A.; Kohoutek, J. (2017) *Integrale Brücken – Entwurf, Berechnung, Ausführung, Monitoring*. Berlin: Verlag Wilhelm Ernst & Sohn.

[4] Marx, S.; Seidl, G. (2011) *Integral Railway Bridges in Germany.* Structural Engineering International 21, H. 3, S. 332–340. https://doi.org/10.2749/101686611X12994961034534

[5] Kang, C.; Schneider, S.; Wenner, M.; Marx, S. (2018) *Development of design and construction of high-speed railway bridges in Germany.* Engineering Structures 163, S. 184–196. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.059

[6] Kaufmann, W.; Buchheister, J. (2016) *Erfahrung mit langen integralen und semi-integralen Brücken* [Abschlussbericht]. Forschungsprojekt AGB 2009/001.

[7] Marx, S.; Wenner, M. (2014) *Semiintegrale Brücken.* in: Mehlhorn, G.; Curbach, M. [Hrsg.] *Handbuch Brücken*. 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 437–461.

[8] Stümpel, M.; Haar, C. von der; Marx, S. (2016) *Zum Tragverhalten von Stützen semi-integraler Brücken*. Beton- und Stahlbetonbau 111, H. 8, S. 522–531. https://doi.org/10.1002/best.201600023

[9] Gebauer, D.; Stümpel, M.; von der Haar, C.; Marx, S. (2018) *Criteria and influencing parameters for the design of piers of semi-integral bridges*. Structural Concrete 19, H. 2, S. 625–634. https://doi.org/10.1002/suco.201700087

[10] Gribniak, V.; Caldentey, A. P.; Kaklauskas, G.; Rimkus, A.; Sokolov, A. (2016) *Effect of arrangement of tensile reinforcement on flexural stiffness and cracking*. Engineering Structures 124, S. 418–428. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.06.026

[11] DIN EN 1992-2/NA:2013-04 (2013) *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln*. Berlin: Beuth Verlag.