

Theoretische und experimentelle Untersuchung des spaltungsinduzierten Versagens von TRC Prüfkörpern

Jens Schoene¹, Uwe Reisgen², Markus Schleser³, Jakub Jeřábek⁴

Zusammenfassung: Bewehrungen mit einer hochmoduligen Polymertränkung erreichen im Betonbauteil Textilspannungen von über 1200 N/mm². Ab diesem Niveau wurden in Dehnkörperversuchen Längsrisse und Betonabplatzungen beobachtet. Für die Eingrenzung und Identifikation der elementaren, verantwortlichen Mechanismen weisen großformatige Dehnkörper störende Einflüsse von Randeffekten und Imperfektionen auf. Daher wurde ein neuer Versuchsaufbau entwickelt, bestehend aus einem in einen Betonquader eingebetteten Einzelroving. Die simple Herstellung und die Verlässlichkeit dieser Kategorie von Experimenten in Bezug auf die Reproduzierbarkeit und der geringen Streuung der Resultate machen sie zu einer robusten Grundlage für experimentelle Untersuchungen des Verhaltens von TRC. Die experimentell ermittelten Bruchlasten werden zunächst bezüglich ihrer Leistung diskutiert und dann die beobachteten Bruchvorgänge kategorisiert hinsichtlich kompatibler mechanischer Hypothesen für die Initiierung von Längsrissen und des Spaltversagen.

Summary: Reinforcements with a high-modulus, polymeric impregnation achieve textile tensions of 1200 N/mm² and more in concrete parts. Starting at this level longitudinal cracks and splitting were observed in tests. In order to isolate and identify the fundamental, responsible mechanisms large-scale specimen show an interfering impact of boundary effects and imperfections. Therefore a new test set-up was developed, consisting of a single roving embedded in a single concrete cuboid. The simplicity of production and reliability of this class of experiments in terms of repeatability and low scatter of results makes them a robust basis for experimental investigation of TRC behavior. The experimentally obtained strengths are discussed in terms of the performance, followed by the categorization of observed failure patterns with respect to the available mechanical hypotheses of the longitudinal crack initiation and splitting failure.

¹ Dipl.-Ing., Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik, RWTH Aachen University

² Prof. Dr.-Ing., Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik, RWTH Aachen University

³ Dr.-Ing., Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik, RWTH Aachen University

⁴ Dr.-Ing., Institut für Massivbau, RWTH Aachen University

1 Einleitung

Textilbewehrter Beton ist ein Verbundwerkstoff, der mit technischen Textilien auf Basis von Glas-, Carbonfasern oder Aramidfasern bewehrt wird. Durch eine Imprägnierung der textilen Bewehrung mit Polymeren wird der „innere Verbund“ zwischen den Filamenten gestärkt, wodurch der Ausnutzungsgrad der Bewehrung und damit sowohl die Garnzugfestigkeit der Bewehrung als auch die Traglasten im Verbundprüfkörper ansteigen. Der Grad der Traglaststeigerung hängt dabei maßgeblich von den Eigenschaften des Tränkungsmaterials ab. Die größten Traglaststeigerungen konnten durch den Einsatz hochmoduliger Reaktionsharzsysteme erzielt werden (SCHLESER [1]).

Einhergehend mit den hohen Lasten wurde in verschiedenen Bauteilversuchen ein verändertes Versagensbild beobachtet, das bei ungetränkten Textilien in dieser Form nicht auftrat. Vereinzelt kommt es zu großflächigen Betonabplatzungen - zum Teil kurz vor dem Bauteilversagen, zum Teil im Moment des Versagens (HEGGER ET.AL. [2], KRÜGER [3]). Die hierfür verantwortlichen Schädigungsmechanismen und maßgeblichen Einflussgrößen bislang nicht erforscht, da die bislang beobachteten Ereignisse von Abplatzungen bisher nicht gezielt versuchstechnisch berücksichtigt wurden. Hinsichtlich des maßgebenden Spannungsniveaus bzw. der Reihenfolge der Ereignisse von Bauteilversagen und Abplatzung lagen daher wenige Erkenntnisse vor.

Als Grundlage für eine genauere Dokumentation der Vorgänge im Falle von Abplatzungen wurden daher Dehnkörperversuche durchgeführt und die Rissentwicklung per Digitalkamera dokumentiert. Um einen Einfluss von 90°-Rovings auf das Rissbildungsverhalten ausschließen zu können, wurden neben Textilien zusätzlich auch Bewehrungen aus Einzelrovings derselben Querschnittsfläche eingesetzt (JERABEK ET.AL. [4]).

2 Hypothese zur Längsrissentwicklung

Die Untersuchungen zum Abplatzverhalten in Kombination mit digitaler Bilddokumentation wurden an „taillierten Streifenproben“ (TSP) verschiedener Betondeckungen und Bewehrungstypen durchgeführt. Diese haben gezeigt, dass Abplatzungen im Zusammenhang mit Längsrissen auftreten, welche ab einem Textilspannungsniveau von 1200 N/mm² beobachtet wurden (s. Bild 1). Die Längsrisse wurden unabhängig davon beobachtet, ob Dehnkörper mit Textilien oder ausschließlich mit entsprechenden Rovings in 0°-Richtung bewehrt wurden.

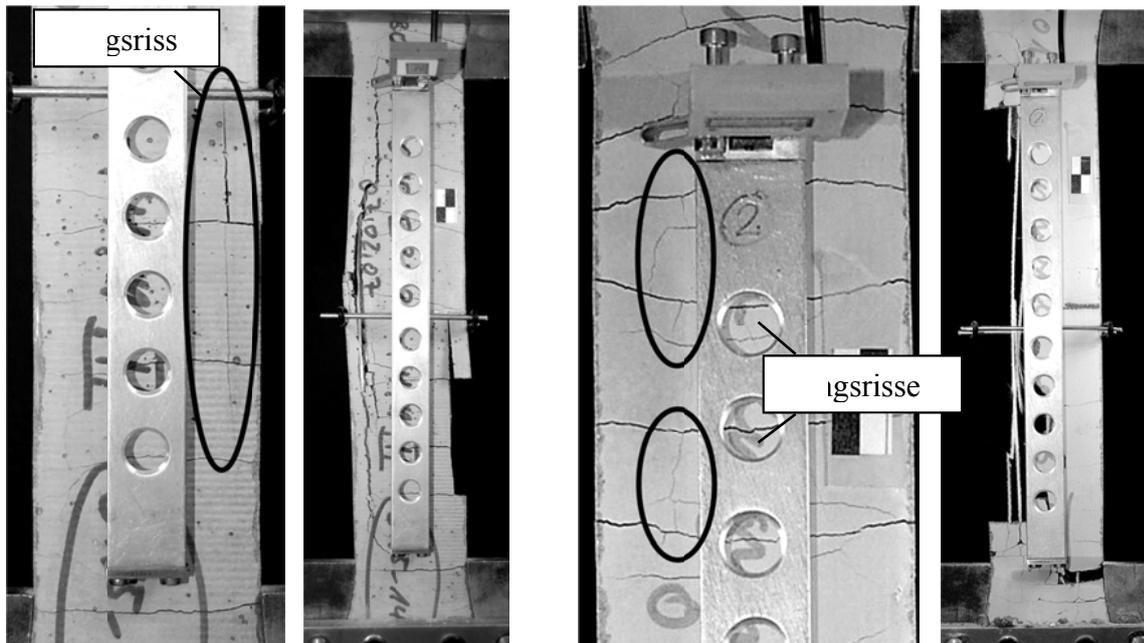


Bild 1: Dehnkörper mit Einzelgarnbewehrung, Längsriss mit anschließendem Auftreten einer Abplatzung (links Betondicke 6mm, rechts Betondicke 10mm)

Fig. 1: Specimen with single yarn reinforcement, longitudinal crack followed by Splitting (left 6mm concrete thickness, right 10mm concrete thickness)

Für stahlbewehrten Beton wurden die Längsrissentwicklung bereits von TEPFERS [5] bzw. MARTIN [6] durch Ringzugspannungen erklärt. Beide Ansätze basieren jedoch vornehmlich auf dem Verbund, den die Rippenstruktur der Bewehrungsstäbe erzeugt. Der Verbund und die Kraftübertragung zwischen den polymerimprägnierten Textilien und der Betonmatrix sind im Gegensatz dazu glatt und flächig und basieren auf chemischen Bindungen bzw. Reibung.

Zur Erklärung der Beobachtungen wurde im Rahmen der bisherigen Untersuchungen eine Hypothese zur Entwicklung von Längsrissen aufgestellt, die ebenfalls auf Ringzugspannungen basiert. Dabei wurde das Garn als homogener, elastischer Stab angenommen und das Verbundverhalten durch ein elastisch-plastisches Materialmodell abgebildet. Die Betonmatrix wird durch ein anisotropes Schädigungsmodell abgebildet. (s. JERABEK ET.AL. [4] für eine detaillierte Beschreibung). Die Idealisierung des Modells nutzt die Symmetrie zwischen den Querrissen und Längsrissen eines textilibewehrten Betonteils, sowie die Symmetrie um Längs- und Querachse des Einzelrovings (s. Bild 2 links)

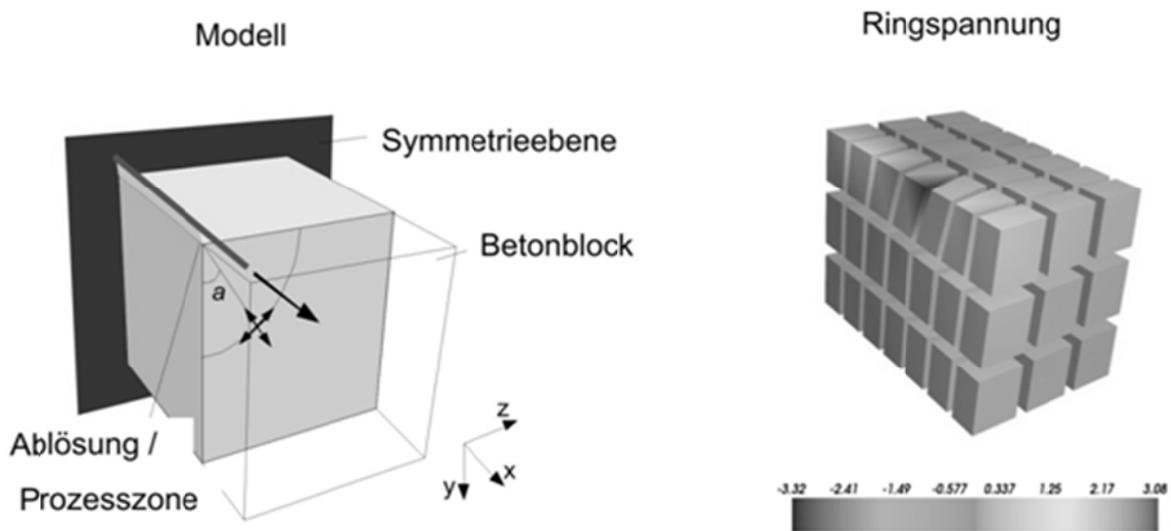


Bild 2: Idealisierung der Rissbrücke (links), simulierte Ringspannungsverteilung (rechts)

Fig. 2: Crack bridge idealization (left) and simulated ring stress distributions (right)

Bild 2 rechts zeigt die numerisch berechnete Verteilung von Ringspannungen in der Umgebung der Bewehrung. Der dunkle Bereich zeigt, dass in der Nähe der Prozesszone Ringzugspannungen entstehen, ähnlich wie für Bewehrungen mit Rippen beschrieben (TEPFERS [5], MARTIN [6]). Ausgehend von dieser Stelle entwickelt sich ein Längsris, wie die Simulation mit dem anisotropen Schädigungsmodell in Bild 3 links zeigt. Die Simulation hat gezeigt, dass für die Entstehung hoher Ringzugspannungen in der Nähe der Prozesszone keine Rippen notwendig sind. In diesem Fall entstehen die Ringzugspannungen durch die (i) lokale Verteilung der Materialien mit dem gegebenen Verhältnis von Verbund- und Materialsteifigkeit, (ii) Randbedingungen, die zu einem rotationssymmetrischen Spannungszustand führen und (iii) der Poisson-Effekt in der Betonmatrix.

3 Experimentelle Untersuchungen

Die gefundene Hypothese zur Längsrisbildung sollte durch experimentelle Untersuchungen bewertet werden. Es hat sich gezeigt, dass die existierenden Dehnkörperanordnungen zur Identifikation und isolierten Beschreibung der elementaren Mechanismen, die zur Entwicklung von Längsrissen bzw. zur Abplatzung führen, ungeeignet sind. Eine eindeutige Interpretation der Versuchsergebnisse im Hinblick auf die Abplatzungseffekte ist schwierig aufgrund der Vielzahl von Interaktionen zwischen Art der Einspannung, Inhomogenitäten im Verbundquerschnitt, Verbundwirkung, Querrissbildung und der Längsrisbildung.

Die Lasteinleitung bzw. die Einspannung ist von essentieller Bedeutung für den Spannungszustand innerhalb des Dehnkörpers. Je nach Prinzip der Lastaufbringung auf den Dehnkörper werden durch verschiedene Mechanismen dreidimensionale Spannungszustände induziert. Die Verhinderung von Querrissen im Bereich der Einspannung z.B. durch aufgeklebte oder

einbetonierte Elemente führt zu einer erhöhten Spannung in den außenliegenden Filamenten (BRUCKERMANN [7]). Lastübertragungen, die auf Coulomb'scher Reibung basieren wie Keilklemmverankerungen benötigen entsprechende Anpresskräfte und bringen damit Querpressungen ein (JESSE [8]).

Zudem liegen im Dehnkörper mehrere Rovings in Lastrichtung vor, deren Spannungs-Dehnungszustand während des Versuchs im Allgemeinen nicht als gleich angenommen werden kann. Durch diese Inhomogenitäten und die entstehenden Spannungsunterschiede im Beton werden die Längs- und Querrissentwicklung beeinflusst. Des Weiteren bildet ein Versuchskörper Querrisse nach einem in der Praxis nicht reproduzierbaren Muster aus. Diese stellen damit jeweils neue Rissbrücken dar und beeinflussen somit die Entwicklung von Längsrissen.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde daher im Einklang mit der Simulation eine Versuchsanordnung konzipiert, die der experimentellen Validierung der Hypothese zur Entwicklung der Längsrisse diene. In Anlehnung an die Idealisierung des numerischen Modells wurde der elementare Vorgang an einem repräsentativen Rissabschnitt experimentell untersucht (s. Bild 3 rechts).

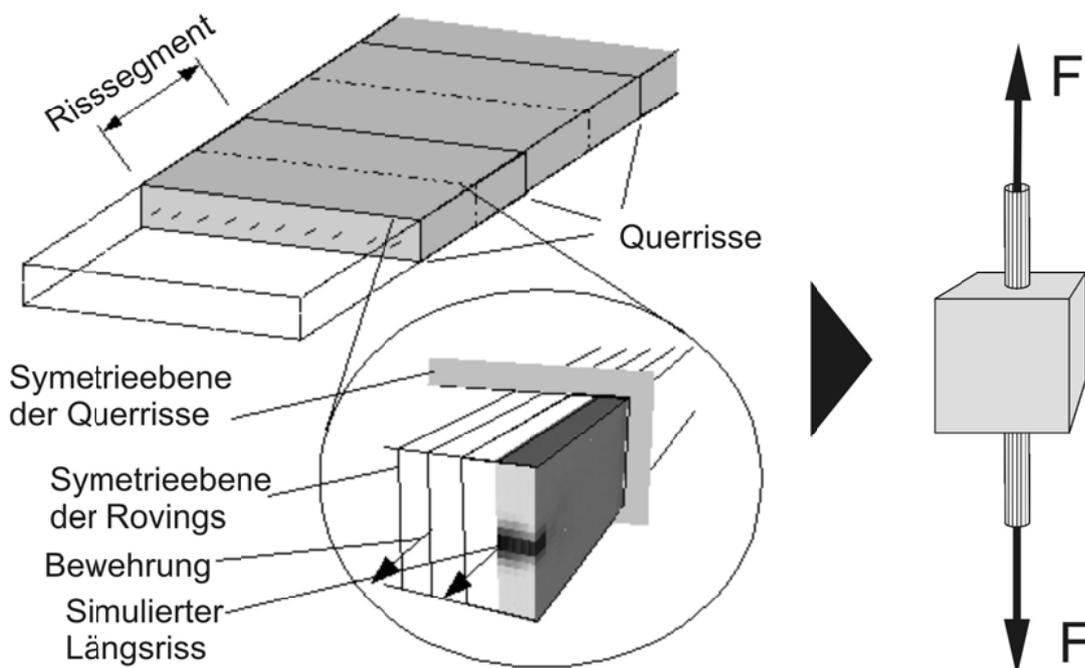


Bild 3: Idealisierung der periodischen Rissbrücke (links), Versuchsaufbau mit isoliertem Risselement (rechts)

Fig. 3: Idealization of the periodical Crack bridge (left), correlating test set-up of isolated crack element (right)

Die Versuchskörpergeometrie „A“ wurde daher wie folgt vorgesehen, s. Bild 4. Die Einspannung des Einzelgarns erfolgt in Anlehnung an Garnzugversuche durch eine Einbettung in Epoxidharz. Die freie Garmlänge des imprägnierten Rovings zwischen Einspannung und Beton wurde basierend auf Vorgaben von KONRAD [9] gewählt, um eine homogene Spannungsverteilung des Multifilamentgarnes zu erreichen. Der mittig liegende Betonwürfel wurde als isoliertes Risselement mit einer Kantenlänge von 10 mm vorgesehen, um eine dem Dehnkörper vergleichbare Betondeckung nachzubilden und gleichzeitig Querrisse zu vermeiden.

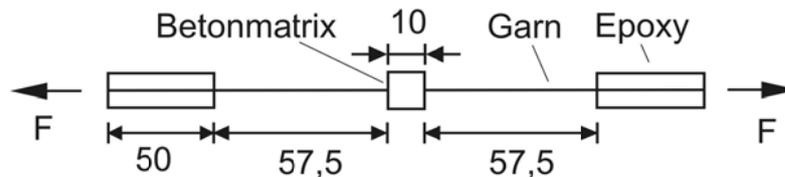


Bild 4: Versuchskörpergeometrie A ohne Querrisse (Abmaße in mm)

Fig. 4: Specimen geometry A without transversal cracks (dimensions in mm)

Auf Basis dieser Geometrie wurden zunächst Versuchsreihen mit digitalen Videoaufnahmen kombiniert. Bei dieser Geometrie zeigten sich diese Aufnahmen aufgrund der schnellen Abfolge von Rissentwicklung, Abplatzung und Bauteilversagen als nicht zielführend. Daher wurde der Versuchsaufbau für alle weiteren Versuchsreihen mit der Aufnahme durch eine Hochgeschwindigkeitskamera kombiniert (s. Bild 5, links und Mitte).

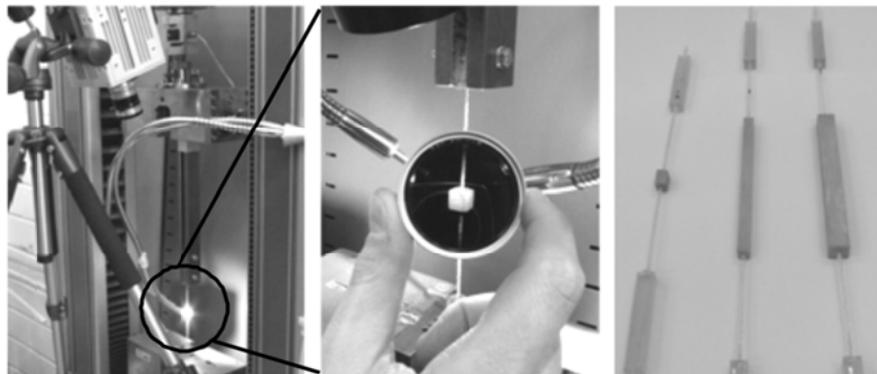


Bild 5: Versuchsaufbau mit Hochgeschwindigkeitskamera (links), Versuchskörper A (Mitte, mit Dunkelfilter), weitere Versuchskörpergeometrien (rechts)

Fig. 5: Test set-up with high-speed camera (left), specimen A (centre, through dark filter), more specimen geometries (right)

Das numerische Modell hat gezeigt, dass die Rissbildung vom Garn ausgehend nach außen abläuft. Ein Motiv war zu Beginn der Untersuchungen, durch Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit Fokus auf den Querschnitt die Rissentwicklung verfolgen zu können. Aus diesem Grund kamen neben symmetrischen Versuchskörpern mit einem mittig liegenden Roving

auch Versuchskörper mit 2 mm versetzt liegenden Rovings zum Einsatz. Auf diese Weise sollte die Rissentwicklung auf Höhe der geringsten Betondeckung forciert werden. In Bezug auf Hochgeschwindigkeitsaufnahmen bietet das den Vorteil, dass die zu betrachtende Fläche verkleinert werden kann, wodurch sich die benötigte Auflösung bzw. Pixelzahl reduziert und im Gegenzug die Anzahl der Bilder pro Sekunde gesteigert werden können.

Im Verlauf der Untersuchungen wurden zusätzliche Versuchsgeometrien eingeführt. Um den Einfluss von Querrissen zu berücksichtigen, wurde die Betonlänge auf 100 mm erhöht (s. Bild 6). Des Weiteren wurde der Einfluss der Betondeckung durch die zusätzlich eingeführte Querschnittsbreite von 6 mm untersucht. Insgesamt ergeben sich vier Geometrien. Die freie Länge des Rovings von 57,5 mm wurde konstant gehalten.

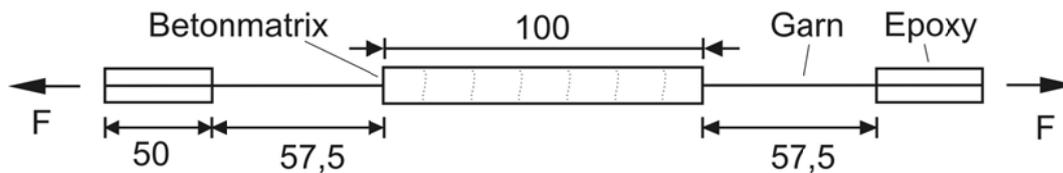


Bild 6: Versuchskörpergeometrie B mit Querrissen (Abmaße in mm)

Fig. 6: Specimen geometry B with transversal cracks (dimensions in mm)

3.1.1 Versuchstyp A

Während der ersten Versuchsreihe kamen Versuchskörper mit Betonwürfeln einer Kantenlänge von 10 mm zum Einsatz. Die Versuchsreihen der Versuchstypen waren in Hinblick auf die Längsrissentwicklung nicht zielführend. Es zeigte sich eine hohe Quote von Abplatzungen, diese waren jedoch ausschließlich in dynamischen Effekten durch das Garnversagen begründet. Von jeweils 40 Probekörpern kam es bei der symmetrischen Geometrie zu 69 %, bei der asymmetrischen Geometrie zu 87,5 % zu einer Abplatzung, die jeweils zeitgleich mit dem Versagen des Rovings einherging. Selbst bei hohen Framerraten von 120.000 Bildern pro Sekunde war es nur in Ausnahmefällen möglich, die Rissentwicklung zu verfolgen (s. Bild 7), da das spröde Materialverhalten zu extrem schnellen Rissvorgängen führt.



Bild 7: Rissentwicklung mit folgender Abplatzung, Abstand der Bilder 8,3µs

Fig. 7: Crack development followed by splitting process, time interval 8,3µs

Erst durch einen Wechsel der Kameraperspektive nahezu parallel zum Roving wie in Bild 5 links zu einer Perspektive orthogonal zum Roving wurde der maßgebliche Effekt sichtbar

gemacht, der zu den Rissentwicklung bzw. Abplatzung führt. Das Garnversagen, welches der Abplatzung vorausging, zeigt sich eindeutig durch eine schnelle Bewegung des Rovings in seiner Längsachse. Durch die Beschleunigung und die damit einhergehenden Scherkräfte versagt die Verbundfläche zwischen Roving und Beton, wie in REISGEN [10] detailliert erläutert wird. In Bild 8 ist die Relativverschiebung des Rovings gegenüber dem Würfel im Abstand von je einer 1/30 ms dargestellt. Durch die gestrichelte Linie oben soll die Bewegung des Rovings verdeutlicht werden, die untere stellt die Position des Würfels dar.

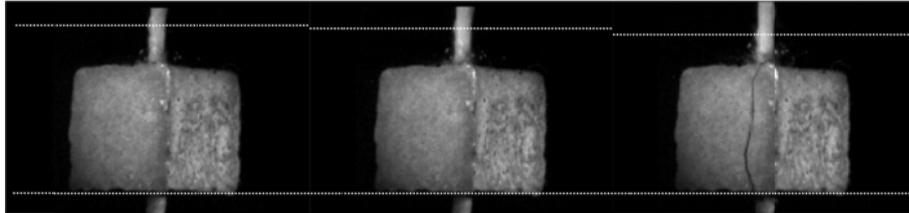


Bild 8: Relativverschiebung zwischen Roving und Betonwürfel

Fig. 8: Relative displacement of roving and concrete cube

Der maßgebliche Mechanismus ist zwar relevant als eine mögliche Ursache von Abplatzungen im Bauteil, aber nicht zielführend in Bezug auf die Hypothese der Längsrissentwicklung durch Ringzugspannungen. Aus diesem Grund wurde die Betongeometrie variiert. Zum einen wurde die Betonstärke auf 6mm reduziert, um Längsrisse zu forcieren und diese noch vor dem Rovingversagen beobachten zu können. Zum anderen wurde die Betonlänge auf 100 mm erhöht, um den Einfluss von Querrissen mit einbeziehen zu können. Die langen Versuchskörper wurden sowohl mit 10mm als auch 6mm Betonstärke ausgeführt.

Die Versuchstypen der reduzierten Betonstärke bei ebenfalls 10 mm Länge zeigten in den Aufnahmen wie die zuvor beschriebenen Würfel keinerlei Längsrisse vor dem Riss des Rovings. Hier kommt es zu einer etwas höheren Quote von Abplatzungen von 95 % nach dem Garnversagen, was sich mit dem geringeren Betonquerschnitt erklären lässt. Zum einen erhöhen sich die Beschleunigungskräfte, da sich das Verhältnis zwischen Rovinggewicht und Betongewicht verändert, zum anderen ist der tragende Querschnitt verringert.

3.1.2 Versuchstyp B

Die Versuchsreihen der 100 mm langen Betonquader wurden durchgeführt, um den Einfluss von Querrissen zu berücksichtigen. Die Geometrien mit einem Querschnitt von 10 mm x 10 mm zeigten einen mittleren Rissabstand zwischen 17 mm und 25 mm auf. Während dieser Versuche konnten vereinzelt Längsrisse zwischen 4 mm und 6 mm Länge beobachtet werden, die in einem Querriss initiiert wurden. Diese traten in keinem augenscheinlichen Zusammenhang mit dem späteren Versagen des Rovings auf. Zum Einen wurden die Ereignisse durch lange Zeiträume (>20 s) voneinander getrennt, zum Anderen gab es in keinem Fall einen Garnbruch nahe dem Längsrisses. In der Mehrzahl der Versuche

(63 %) findet das Versagen in der freien Länge statt. In 53 % der Versuche kommt es zum Abplatzen, welches durch dynamische Effekte nach dem Rovingversagen initiiert wird.

Die Versuchsreihe der 100 mm langen Betonquader mit einem Querschnitt von 6 mm x 6 mm zeigte einen verringerten Rissabstand der Querrisse, der mittlere Rissabstand lag hier zwischen 7,7 mm und 11,1 mm. Wie bei den kurzen Versuchskörpern gab es auch hier durchgehend bei allen Versuchskörpern Abplatzungen dynamischer Art, welche erst nach dem Garnversagen eintrat. In allen Versuchen konnten durchgehend zwischen ein und fünf Längsrissen auf der gefilmten Vorderseite beobachtet werden. In Bild 9 unten ist der Vergleich der durchschnittlichen Längsrissanzahl sowie der Textilspannung bei Längsrissentstehung in Abhängigkeit der Betondicke abgebildet.

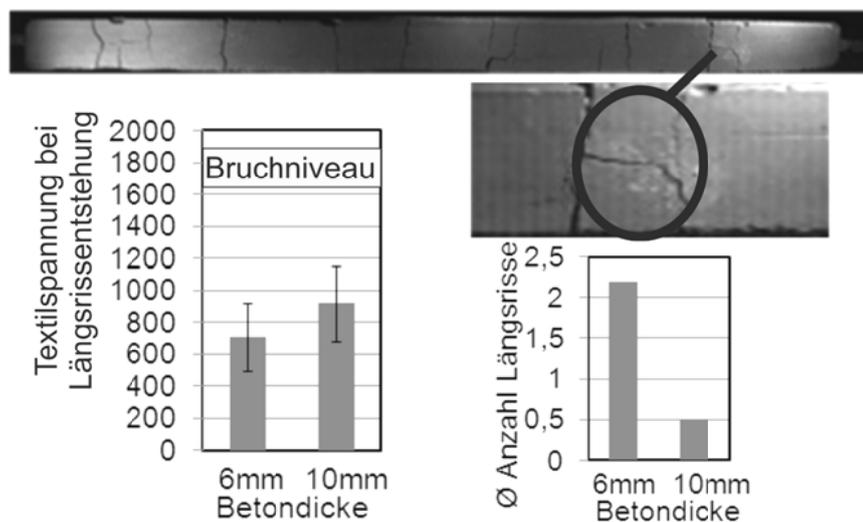


Bild 9: Oben: Längsrissentwicklung, Unten: in Abhängigkeit der Betondicke: durchschnittliche Anzahl beobachteter Längsrisse (links) und Textilspannung bei Längsrissentstehung (rechts)

Fig. 9: Above: Longitudinal crack development, below: Vs. concrete thickness: Number of observed longitudinal cracks (left) and textile tension at longitudinal crack development (right)

In dieser Versuchsreihe zeigte sich ein zusätzlicher Effekt, der mithilfe der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen beobachtet werden konnte. In 88 % der Versuche traten ein zusätzlicher Längsriss und das Garnversagen innerhalb eines kurzen Zeitrahmens, zwischen 830 μ s und 18 ms, und an derselben Position auf. Hierbei ist der Ursache-Wirkzusammenhang unklar - ob es sich um einen Effekt handelt, der durch Garnversagen eintritt oder um einen Riss in der Betonmatrix, der plötzliche Spannungsumlagerungen und damit das Garnversagen induziert. Aufgrund des abweichenden Spannungsniveaus gegenüber den zuvor entstandenen Längsrissen wird das Garnversagen als Ursache für den Riss angenommen. Aus diesem Grund ist der beschriebene „finale“ Längsriss nicht in der Statistik berücksichtigt.

In Bild 10 ist eine Gesamtübersicht des Tragverhaltens der einzelnen Versuchstypen gegeben, unter Berücksichtigung von Abplatzvorgängen. Des Weiteren sind die Ergebnisse der TSP-Dehnmessungen mit unterschiedlichen Betondeckungen aus den beschriebenen Vorversu-

chen aufgeführt. Die Textilspannungen der kleinskaligen Versuchstypen zeigen zwischen 93 % (1720 N/mm²) und 98% (1820 N/mm²) des reinen Garnzugversuchs. Die Bruchspannungen der Versuchskörper liegen damit annähernd auf dem Niveau des getränkten Garns, also führt die Längsrissentwicklung hier zu keiner signifikanten Reduktion des Tragverhaltens. Die Diskrepanz gegenüber der Bruchspannung der Dehnkörper kann neben der Lasteinleitung auf verstärkte Interaktionen zwischen Längsrissentwicklung, Verbundwirkung und Inhomogenität der Spannungsverteilung zurückgeführt werden.

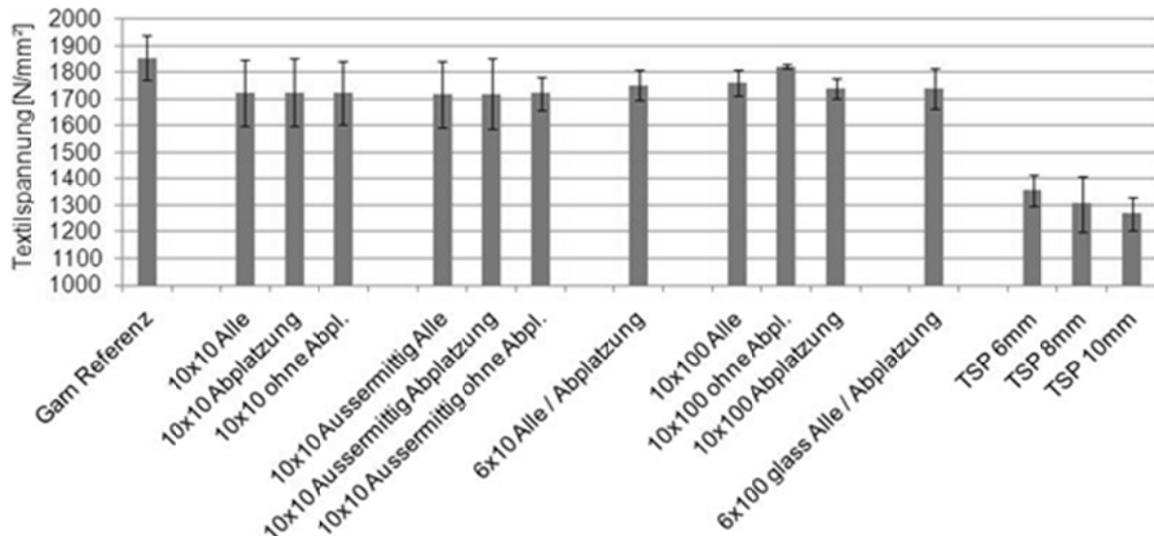


Bild 10: Übersicht Tragverhalten

Fig. 10: Overview mechanical performance

4 Fazit

Zur experimentellen Validierung der aufgestellten Hypothese zur Längsrissbildung wurde eine Versuchsanordnung konzipiert, die im Einklang mit dem Modell den Randbedingungen eines periodischen, repräsentativen Körperausschnittes entspricht. Im Rahmen der Untersuchungen wurden mehrere Versuchsserien mit Variation der Versuchsparameter geplant und durchgeführt. Dabei konnten zum einen Abplatzvorgänge beobachtet werden, deren Ursache als vornehmlich dynamische Effekte nach dem Garnversagen identifiziert wurden. Diese Vorgänge können mit hoher Wahrscheinlichkeit direkt auf Dehnkörper übertragen werden. Sie sind jedoch wenig praxisrelevant, da die Ursache das Versagen der Bewehrung und damit des Bauteils ist.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen konnte die zuvor numerisch beschriebene Quelle der Ringzugspannungen im Zusammenhang der Längsrissbildung an den kleinmaßstäblichen Proben experimentell reproduziert und bestätigt werden. Die numerischen und experimentellen Studien haben gezeigt, dass die Neigung zur Bildung der Längsrisse mit einer kleineren Betondeckung steigt. Im Bauteil entspricht der Abstand zwischen den Rovings der Betondeckung der hier durchgeführten Versuche. Analog zum Verhalten des Körperausschnittes

nimmt das Spannungsniveau, bei dem Längsrisse entstehen, mit kleineren Rovingabständen auch ab. Zusätzlich wird die Beständigkeit des Verbundquerschnittes gegenüber der Längsrisbildung auch durch den Bindungstyp stark beeinflusst.

Die numerische und experimentelle Identifizierung vom elementaren Mechanismus, der zur Längsrisbildung und dann zur Abplatzung der Matrix führt, vertiefte das Verständnis des Tragverhaltens des Verbundwerkstoffes. Die im Rahmen der Untersuchung gewonnenen Kenntnisse kamen bei der Konzipierung der Bewehrungsstruktur für den Demonstrator des SFB 532 zum Einsatz. Durch die Anpassungen der Textilgeometrie und der Bindungsart konnte das Belastungsniveau, bei dem Längsrisse entstehen, deutlich gesteigert werden und damit ein höherer Ausnutzungsgrad der Bewehrung erreicht werden.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 532 "Textilbewehrter Beton - Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie".

5 Literatur

- [1] SCHLESER, M.: *Einsatz polymerimprägnierter, alkaliresistenter Glastextilien zur Bewehrung zementgebundener Matrices*, Dissertation, Institut für Schweißtechnik und Füge-technik, RWTH Aachen, 2008
- [2] HEGGER, J., BRAMESHUBER, W., GRIES, T., NIEWELS, J., UEBACHS, S., BARLÉ, M.: *Bewehrung aus laminierten Carbonfasern zur Rissbreitenbeschränkung in Bodenplatten aus selbstverdichtendem Beton*. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben AiF 97 ZN/DBV-Nr. 246 am Institut für Massivbau der RWTH Aachen, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen, Aachen, 2006
- [3] KRÜGER, M.: *Vorgespannter Textilbewehrter Beton*. Stuttgart, Universität, Diss., 2004
- [4] JERABEK, J.; KEIL, A.; SCHOENE, J.; CHUDOBA, R.; HEGGER, J.; RAUPACH, M.: *Experimental and Numerical Analysis of Spalling Effect in TRC Specimens*. Technische Universität Dresden, 2009. - In: *Textilbeton Theorie und Praxis*. Tagungsband zum 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Sonderforschungsbereich 528 und 532, Dresden, 3.6.-5.6.2009, (Curbach, M. ; Jesse, F. (Eds.)), S. 289-300 ISBN 978-3-86780-122-5.
- [5] MARTIN, H.: *Zusammenhang zwischen Oberflächenbeschaffenheit, Verbund und Sprengwirkung von Bewehrungsstählen unter Kurzzeitbelastung*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 228, Berlin(1973)
- [6] TEPFERS, R.: *A theory of bond applied to tensile reinforcement splices for deformed bars*. PhD., Chalmers University of Technology, Göteborg (1973)

- [7] BRUCKERMANN, O.: *Zur Modellierung des Zugtragverhaltens von textildbewehrtem Beton*, Dissertation, RWTH Aachen University, 2007
- [8] JESSE, F.: *Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix*, Dissertation, TU Dresden, 2004
- [9] KONRAD, M.: *Effect of multifilament yarn crack bridging on uniaxial behavior of textile reinforced concrete*. Dissertation., RWTH Aachen, Aachen (2008)
- [10] REISGEN, U.; SCHOENE, J.; SCHLESER, M.; JERABEK, J.; KEIL, A.: *Theoretical and Experimental Investigations on Textile-Reinforced Concrete Spalling Behavior*. RILEM, 2010. - In: Proceedings of the International RILEM Conference on Materials Science (MatSci), Vol. I: 2nd ICTRC Textile Reinforced Concrete, Aachen, September 6-8, 2010, (Brameshuber, W. (Ed.)), S. 153-162 ISBN 978-2-35158-106-3.