

Tragverhalten von Textilbeton mit Kurzfasern

Wolfgang Brameshuber¹, Marcus Hinzen²

Zusammenfassung: Das Tragverhalten von Textilbeton kann durch den Einsatz von Kurzfasern erheblich verbessert werden. Untersuchungen zeigen eine Anhebung der Erstrisslast, ein dehnungsverfestigendes Verhalten, eine Verfeinerung des Rissbildes sowie eine Anhebung der maximalen Tragfähigkeit. Unklar sind bisher noch die genauen Mechanismen, die eine gezielte Einstellung des Tragverhaltens ermöglichen. Der Beitrag fasst die Untersuchungen zu den einzelnen Bereichen der Spannungs-Dehnungslinie von Textilbeton mit Kurzfasern zusammen und versucht möglichst allgemeingültige Zusammenhänge darzustellen. Dabei werden die Erhöhung der Erstrisslast, die Rissüberbrückung und die Auswirkungen auf das Gesamttragverhalten betrachtet. Abschließend wird das zyklische Biegetragverhalten von Textilbeton mit Kurzfasern im gerissenen Zustand dargestellt.

Summary: The load bearing behaviour of textile reinforced concrete can be significantly improved by the addition of short fibres. Investigations show an increase of the first crack strength, a strain-hardening behaviour, a better crack pattern distribution as well as an increase of the load carrying capacity. However, the exact mechanisms leading to this behaviour are not yet known such that a prediction of the load bearing behaviour is not possible. This paper summarises the investigations on the different parts of the stress-strain curve of textile reinforced concrete with short fibres and tries to describe general relationships. In this context the increase of the first crack stress, the crack bridging behaviour and the influence on the load-bearing behaviour in general are considered. Finally, the dynamic flexural behaviour of textile reinforced concrete with short fibres in state II is presented.

¹ Prof. Dr.-Ing., Institut für Bauforschung, RWTH Aachen University

² Dipl.-Ing., Institut für Bauforschung, RWTH Aachen University

1 Einleitung

Das Tragverhalten von Textilbeton kann durch den Einsatz von Kurzfasern erheblich verbessert werden. Untersuchungen zeigen eine Anhebung der Erstrisslast, ein dehnungsverfestigendes Verhalten bei deutlich geringerem Steifigkeitsverlust, eine Verfeinerung des Rissbildes sowie eine Anhebung der Tragfähigkeit, meist über den gesamten Bereich der Spannungs-Dehnungslinie. Die meisten Berichte beschränkten sich bisher auf die phänomenologische Beschreibung des Tragverhaltens. Noch unklar sind die genauen Mechanismen, die eine gezielte Einstellung des Tragverhaltens ermöglichen. Nur wenige Forscher [1, 2, 3] haben sich bisher mit dem Thema beschäftigt und kommen zu grundsätzlich ähnlichen Beobachtungen. In [4] wurde das Tragverhalten von Textilbeton mit Kurzfasern schematisch wie folgt definiert:

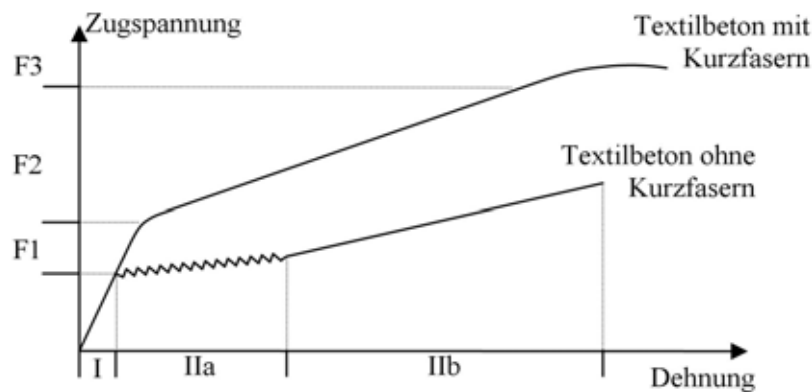


Bild 1: Schematischer Verlauf der Spannungs-Dehnungslinie von Textilbeton mit Kurzfasern [4]

Fig. 1: Schematic course of the stress-strain behaviour of textile reinforced concrete with short fibres [4]

Der erste Abschnitt F1 beschreibt den Beitrag der Kurzfasern zu einer höheren Erstrisslast des Betons. Der Abschnitt F2 kennzeichnet ein dehnungsverfestigendes Verhalten mit anfänglicher Rissbildung. Während dieser Rissbildungsphase helfen die Kurzfasern bei der Überbrückung der Rissufer und verfeinern das Rissbild. Durch die effektive Erhöhung des Bewehrungsgrades können die Steifigkeit und das Lastniveau gegenüber reinem Textilbeton erhöht werden. Der Übergang von F2 zu F3 beschreibt den maximalen Beitrag der Kurzfasern. Sobald der Haftverbund der Fasern in einen Reibverbund übergeht oder Kurzfasern reißen, reduziert sich der Traganteil der Kurzfasern und die Steifigkeit nimmt ab. Die Kurzfasern werden ausgezogen und der Verlauf der Spannungs-Dehnungslinie nähert sich dem ursprünglichen Textiltragverhalten. In früheren Untersuchungen [5] hat sich jedoch gezeigt, dass vor dem Übergang von F2 zu F3 ein Versagen des Glastextils eintritt, wenn hochfeste Kurzfasern mit gutem Verbund verwendet werden. In diesem Fall führt der Zusatz von Kurzfasern über den gesamten Verlauf der Spannungs-Dehnungslinie zu einem erhöhten Lastniveau.

Im vorliegenden Beitrag wird zunächst auf die einzelnen Bereiche gemäß Bild 1 eingegangen. Im Bereich F1 wird der Einfluss von Kurzfasern, von Textilien und einer Kombination aus beidem auf die Rissfestigkeit des Betons auszugswise dargestellt. Ein wesentliches Problem bei Textilbeton ist der Übergang vom Bereich F1 nach F2, der zu starken Steifigkeitsverlusten führen kann. Der Steifigkeitsverlust wird definiert und es werden erste Ansätze zur gezielten Verbesserung des Tragverhaltens in diesem Bereich vorgestellt. Für den Bereich F2 werden auszugswise Versuchsserien vorgestellt, die den Einfluss von Kurzfasersteifigkeit und –gehalt beschreiben. Abschließend wird eine Versuchsreihe zur zyklischen Biegebeanspruchung von Textilbeton im Zustand II und insbesondere zum Einfluss der Kurzfasern vorgestellt. Alle Untersuchungen wurden im Rahmen des SFB 532 durchgeführt.

2 Prüfkörper, Ausgangsstoffe und Herstellung

Die Zugversuche erfolgten an taillierten Dehnkörpern gemäß [6]. Diese wurden grundsätzlich im Laminierverfahren hergestellt bei dem sowohl Faserbeton als auch Textilien lagenweise eingebracht wurden. Probekörper in Kapitel 3 und 5 wurden mit ausgerichteten Textilien und einer leichten händischen Vorspannung hergestellt. Als Feinbetongrundmischung wurde die speziell für den Einsatz von Kurzfasern entwickelte Mischung Fil-10-09 [7] verwendet. Die verwendeten Textilien waren 1200 tex Textilien mit Trikotbindung und 2400 tex Textilien mit Fransebindung aus AR-Glas. Als Kurzfasern wurden integrale Glasfasern mit einer Länge von 6 mm eingesetzt. Feuchte Proben wurden 28 Tage bis unmittelbar vor der Prüfung unter Wasser gelagert. Hier als trocken bezeichnete Proben lagerten 21 Tage unter Wasser und 7 Tage im Normklima bei 20°C und 65 % rel. Feuchte. Zugfestigkeiten und Spannungs-Dehnungslinien von Dehnkörpern wurden an einer Universalprüfmaschine im traversengeregelten Versuch mit einer Wegrate von 1 mm/m geprüft.

3 Erhöhung der Erstrissfestigkeit im Bereich F1

Die Untersuchungen zur Erhöhung der Erstrissfestigkeit von Textilbeton sind von besonderer Bedeutung, da Textilbetonbauteile häufig in Sichtbetonqualität ausgeführt werden und deshalb im Gebrauchszustand ungerissen bleiben sollen. Eine Anhebung der Rissfestigkeit der Matrix bietet so zusätzlichen Spielraum bei der Bemessung. Im Folgenden werden die Beiträge zur Erhöhung der Rissfestigkeit getrennt nach Kurzfasern und Textilien untersucht und diese einer Kombination aus beidem gegenüber gestellt. Zur Vermeidung von Trocknungseinflüssen wurden alle Versuche an nassen Probekörpern durchgeführt.

3.1 Einfluss von Kurzfasern und Textilien

Kurzfasern und insbesondere dispersible Mikrofasern können die Zugfestigkeit der Matrix deutlich erhöhen [4]. Der Lufteintrag beim Mischen und in dem Zusammenhang auch die Wahl des Fließmittels bzw. Entschäumers können die Zugfestigkeit jedoch gleichzeitig reduzieren. Der einfache Nachweis einer vom Fasergehalt abhängigen Festigkeitszunahme wird daher bei dispersiblen Mikrofasern aufgrund der Verschlechterung der Verarbeitbarkeit erschwert. Für die Untersuchung der prinzipiellen Zusammenhänge wurde daher auf integrale Glasfasern mit einem vergleichsweise geringen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit zurückgegriffen. Die nur geringe Erhöhung der Rissfestigkeit der Matrix durch Glasfasern bei feuchten Proben ist in Bild 2, links exemplarisch dargestellt. Der Einfluss der Textilbewehrung auf eine Anhebung der Rissfestigkeit wurde in der Vergangenheit nicht immer einheitlich dargestellt. Shah [8] stellte fest, dass Längsrovings aus Glas einen großen Einfluss auf die Rissfestigkeit von Beton haben. Jesse [9] berichtet über biaxiale Textilien, dass sich der positive Beitrag der Längsrovings und die Querschnittsschwächung durch Querrovings ausgleichen. Eine Anhebung der Betonzugfestigkeit konnte nicht beobachtet werden. Voss [10] untersuchte auch 1200 tex Textilien mit Trikotbindung, die einen guten Verbund zum Beton aufweisen und stellte einen positiven Einfluss der Textilbewehrung fest. Die eigenen Untersuchungen bestätigen diesen Sachverhalt bei feuchten Proben sowohl für 1200 tex als auch für 2400 tex Textilien in der Tendenz (siehe Bild 2, rechts).

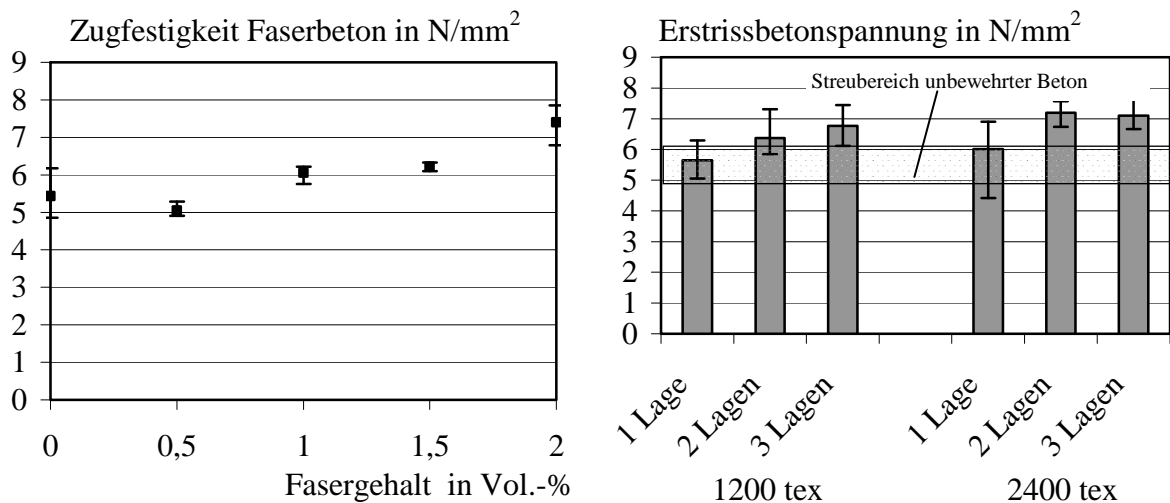


Bild 2: Einfluss von integralen Glasfasern auf die Zugfestigkeit von wassergelagerten Betonproben (links), Einfluss des Textilbewehrungsgrades auf die Zugfestigkeit von wassergelagerten Betonproben (rechts)

Fig. 2: Influence of integral glass fibres on the tensile strength of water stored specimens (left), influence of textile reinforcement degree on the tensile strength of water stored specimens (right)

3.2 Kombinerter Einfluss von Textilien und Kurzfasern

Neben der Frage nach einer Erhöhung der Rissfestigkeit von Feinbeton durch Kurzfasern und Textilien ist vor allem das Zusammenspiel von Kurzfasern und Textil von Interesse. Hinsichtlich möglicher Synergieeffekte zwischen Kurzfasern und Textilien ergaben sich in eigenen früheren Untersuchungen [5] nicht immer einheitliche Zusammenhänge. Während in vereinzelt Versuchsreihen noch Synergieeffekte zwischen Kurzfasern und Textilien bei der Erstrisslast auftraten, konnten diese in den jüngsten Untersuchungen mit der neuen Fasergrundmischung Fil-10-09 [7] und feuchten Proben nur noch in kleinerem Ausmaß festgestellt werden. Bild 3, links zeigt die Erstrissfestigkeiten von textilbewehrten Dehnkörpern, die gegenüber Bild 2, rechts mit einer zusätzlichen Kurzfaserbewehrung von 1,5 Vol.-% hergestellt wurden. Der Zuwachs durch die Kurzfasern ist schwarz markiert und fällt ungefähr gleich aus. Die mittlere Festigkeitssteigerung beträgt $1,15 \text{ N/mm}^2$. Vergleicht man die mittleren Festigkeitssteigerungen durch Textil und Kurzfasern mit den Ergebnissen in Bild 3, links, zeigen sich noch leichte Synergieeffekte bei der Kombination. Die Überlappung der Streubreiche macht eine pauschale Aussage jedoch schwierig.

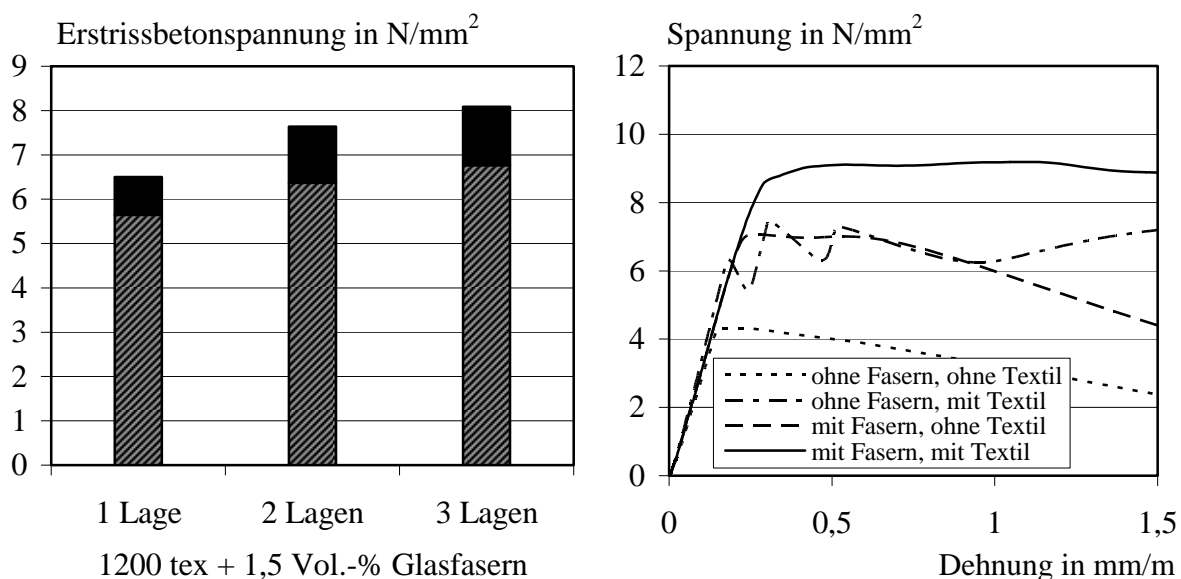


Bild 3: Kombinerter Einfluss von Glasfasern und Textilbewehrung auf die Zugfestigkeit von wassergelagerten Betonproben (links), Spannungs-Dehnungsverhalten von Dehnkörpern im Anfangsbereich (rechts)

Fig. 3: Combined influence of glass fibres and textile reinforcement on the tensile strength of water stored specimens (left), stress-strain curves of specimens in the area of matrix cracking (right)

Bild 3, rechts zeigt eine ältere Versuchsreihe mit Dehnkörpern ohne Bewehrung, nur mit 2 Vol.-% Kurzfasern, nur mit 2 Lagen Textil und mit einer Kombination aus beidem. Zur Beur-

teilung der Erstrissfestigkeiten ist nur der Anfangsbereich der Spannungs-Dehnungslinie dargestellt. Im feuchten Zustand zeigte sich eine Steigerung der Rissfestigkeit durch das Textil von ca. 45 %. Durch die Kurzfasern wurde die Rissfestigkeit um ca. 60 % erhöht. Gemeinsam wurde eine Steigerung von ca. 100 % erreicht. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass sich die Festigkeitsbeiträge von Kurzfasern und Textilien mindestens addieren lassen.

4 Lastübergang vom Beton auf die Bewehrung (F1 - F2)

4.1 Beschreibung des Steifigkeitsabfalls

Beim konventionellen Tragverhalten von Textilbeton ist der Übergang vom Zustand I zum Zustand IIa durch einen starken Abfall der Steifigkeit geprägt (siehe Bild 4, links). Ein wesentliches Ziel beim Einsatz von Kurzfasern ist es, ein kontinuierlich dehnungsverfestigendes Tragverhalten nach dem Riss der Matrix zu erreichen (vgl. Bild 1). Zahlreiche Versuche haben gezeigt, dass dies mit vielen Kurzfaserdosierungen erreicht werden kann [5]. Im Rahmen verschiedener Versuchsreihen wurde versucht, Ansätze zu erarbeiten, die eine rechnerische Abschätzung des dazu erforderlichen Fasergehaltes ermöglichen.

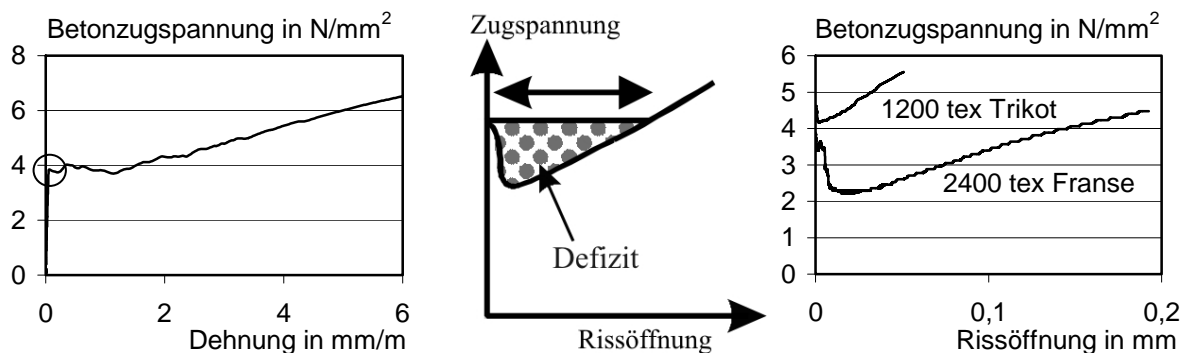


Bild 4: Steifigkeitsabfall der Spannungs-Dehnungslinie durch Rissbildung (links), Spannungsabfall bei Rissöffnung schematisch dargestellt (Mitte), Experimentell bestimmter Spannungsabfall zweier Textilvarianten bei Rissöffnung (rechts)

Fig. 4: Stiffness reduction of the stress-strain curve due to cracking (left), schematic stress decrease at crack-opening (center), experimentally determined stress decrease of specimens with two textile types at crack opening (right)

Die Grundidee dazu ist, nur den ersten aufgehenden Riss der Matrix (Bild 4, links) zu betrachten und den durch die Rissbildung verursachten Spannungsabfall mit zusätzlicher Textil- oder Kurzfaserbewehrung abzufangen. Dazu wurde ein Prüfverfahren entwickelt, welches die Ermittlung einer Spannungs-Rissöffnungsbeziehung an gekerbten TSP-Proben erlaubt ohne dass ein zweiter Riss entsteht. Führt man einen solchen Versuch an Proben mit einem regulären Textilgehalt von 1 - 2 Lagen durch, erhält man eine Spannungs-Riss-Öffnungsbeziehung,

wie sie schematisch in Bild 4, Mitte dargestellt ist. Aufgrund des beeinträchtigten Verbundes zwischen Textil und Matrix im unmittelbaren Rissbereich und der nicht gleichzeitigen Aktivierung aller Filamente benötigt das Textil eine gewisse Rissöffnung, bis die freigewordenen Kräfte aufgenommen werden können. Dieser Sachverhalt führt im weggeregelten Versuch bei jedem Riss zu einem Lastabfall und verursacht den starken Steifigkeitsabfall in der Rissbildungsphase IIa. Der markierte Bereich wird als Bewehrungsdefizit definiert. In Bild 4, rechts sind exemplarisch entsprechende Verläufe aus dem Experiment für ein 1200 tex Trikot-Textil und ein 2400 tex Franse-Textil dargestellt. Erwartungsgemäß ergeben sich beim 1200 tex Textil wegen des besseren Verbundes kleinere Lastabfälle.

Durch die verschiedenen Textilarten wird auch die Erstrissfestigkeit der Matrix beeinflusst. Ein Textil mit Trikotbindung ist aufgrund des besseren Verbundes zur Matrix eher in der Lage die Erstrissfestigkeit anzuheben. Dies ist auch in Bild 4, rechts ersichtlich. Die Erstrissfestigkeit und damit einhergehend auch die bei der Rissbildung frei werdende Energie beeinflusst wiederum die Größe des Defizits. Eine Auswertung aller Versuche mit einem 1200 tex Textil ergab den in Bild 5, links angedeuteten Zusammenhang zwischen der Erstrissfestigkeit und der erforderlichen Rissöffnung zur vollständigen Lastübertragung auf das Textil.

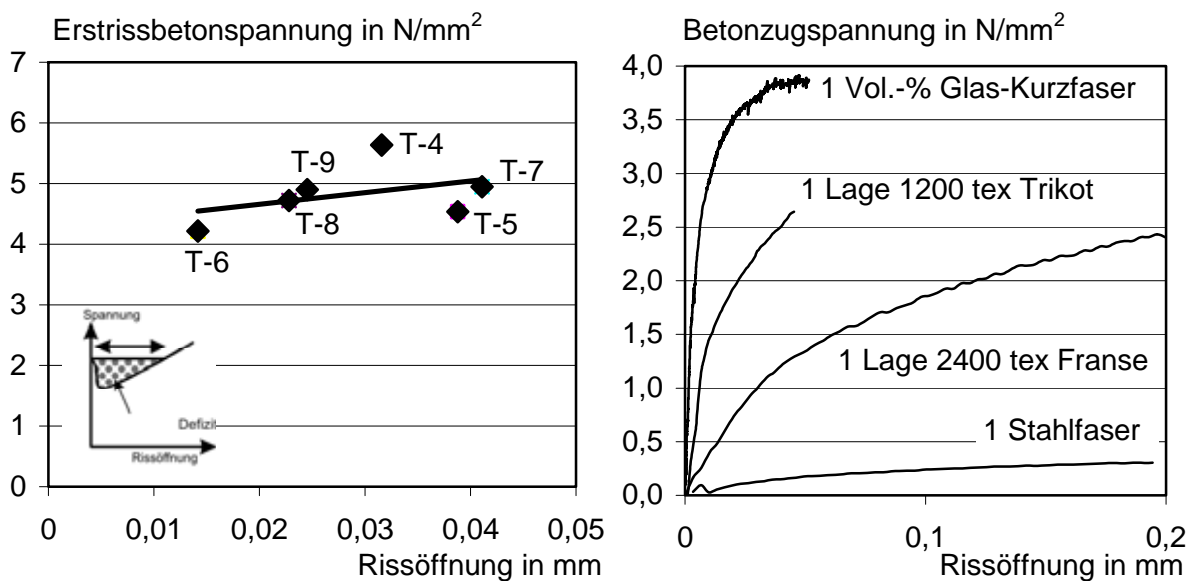


Bild 5: Erforderliche Rissöffnung zur vollständigen Lastübertragung auf das verwendete 1200 tex Textil in Abhängigkeit der Erstrisslast (links); Doppelseitiges Auszugverhalten von einzelnen Textillagen und Kurzfasern (rechts)

Fig. 5: Crack opening displacement needed for a full load transfer from concrete to used 1200 tex textile (left), double-sided pull-out behaviour for different types of reinforcement

4.2 Ansätze für eine gezielte kontinuierliche Dehnungsverfestigung

Ist bei einer bestimmten Bewehrungskonfiguration das zuvor definierte Bewehrungsdefizit bekannt, kann die erforderliche zusätzliche Bewehrung zum Ausgleich dieses Defizits berechnet werden. Dazu müssen die Traganteile der verschiedenen Bewehrungsarten im aufgehenden Riss bekannt sein. Im ersten Schritt wurden im Rahmen der Versuchsreihe Textilien mit 1200 tex und 2400 tex sowie einzelne Stahlfasern und ein Einheitsfasergehalt an Glasfasern untersucht. Es wurden Dehnkörper mit entweder einer Lage Textil, einer einzelnen Stahlfaser oder einem Faserbeton mit 1 Vol.-% Glasfasern präpariert. Die Stahlfaser wurde gezielt im Bereich der Kerbe in Querschnittsmittelpunkt platziert.

Die sich im Versuch einstellenden Rissöffnungsbeziehungen entsprechen qualitativ dem Verlauf in Bild 4, rechts. Um den reinen Bewehrungstraganteil ermitteln zu können, muss von diesen Spannungs-Rissöffnungskurven der Betontraganteil, der separat bestimmt wird, abgezogen werden. Die daraus resultierenden Beziehungen, die einem doppelseitigen Faserausgang entsprechen, sind für die jeweiligen Bewehrungsarten in Bild 5, rechts dargestellt. Diese Kurven werden mit denen in Bild 4, rechts angegebenen Rissöffnungsbeziehungen überlagert. Je nach Größe des Defizits ergibt sich eine bestimmte Anzahl an Textillagen oder Stahlfasern, die im Riss zusätzlich erforderlich sind, um das Bewehrungsdefizit auszugleichen.

Aus der Gegenüberstellung der Bewehrungsarten können auch die jeweiligen Wirksamkeiten abgelesen werden. Es bestätigt sich, dass der 1200 tex Roving mit Trikotbindung trotz des halben Flächengewichts besser zur Rissüberbrückung geeignet ist als der 2400 tex Roving mit Fransebindung. Ein Einheitsfasergehalt von 1 Vol.-% Glasfasern wirkt am effektivsten im aufgehenden Riss, da die vergleichsweise große Verbundfläche zu kurzen Lasteinleitungslängen führt. Da die Ermittlung der Traganteile der Bewehrung durch Subtraktion des Betonanteils aufwändig ist, wurden die Ergebnisse mit direkten Ausziehversuchen verglichen. Es zeigte sich, dass die Traganteile der jeweiligen Bewehrungsarten, sofern prüftechnisch möglich, auch in praktikableren Ausziehversuchen ermittelt werden können.

Das beschriebene Vorgehen setzt allerdings voraus, dass die Rissöffnungsbeziehungen der Bewehrungskomponenten superponierbar sind. In weiteren Untersuchungen wurde daher auch die Superponierbarkeit der Rissöffnungsbeziehungen von Kurzfasern und Textilien nachgewiesen.

5 Rissbildungsphase (F2)

Der Bereich F2 gemäß Bild 1 beschreibt die Phase der Rissbildung, die nach dem Erstriss der Matrix einsetzt. Im Gegensatz zu herkömmlichem Textilbeton ist der Abschluss der Rissbildung im Verlauf der Spannungs-Dehnungslinie des Textilbetons mit Kurzfasern häufig nicht mehr klar erkennbar. Während der Rissbildungsphase interagieren die im aufgehenden Riss vorhandenen Kurzfasern mit dem Textil. Es ist zu vermuten und aus Vorversuchen auch im

Ansatz erkennbar, dass diese Interaktion sowohl die Steifigkeit des Textilbetons im Zustand II als auch das Lastniveau beeinflusst.

Um dies näher zu untersuchen, wurde eine Reihe von Versuchen durchgeführt bei denen der Gehalt und die Steifigkeit der Kurzfasern variiert wurden. In einer Versuchsserie, die hier exemplarisch dargestellt wird, kamen Stahlfasern als Vertreter für besonders steife Kurzfasern und PVA-Fasern als Vertreter für besonders weiche Kurzfasern zum Einsatz. Es wurde jeweils ein kleiner Fasergehalt (0,75 Vol.-%) und ein größerer Fasergehalt (1,5 Vol.-%) eingesetzt. Als Textilbewehrung wurden grundsätzlich 2 Lagen des 1200 tex Textils verwendet.

5.1 Einfluss der Kurzfasern auf die Steifigkeit und Festigkeit im Zustand F2

Bild 6 zeigt Zugspannungs-Dehnungslinien von Textilbetonproben mit verschiedenen Kurzfasergehalten (links) und –steifigkeiten (rechts). Bild 6, rechts enthält aus Gründen der besseren Übersicht je Variante nur eine exemplarische Spannungs-Dehnungslinie. Es zeigen sich drei Effekte. Die Zugabe von Kurzfasern bewirkt bei den meisten Varianten eine Erhöhung der Erstrissfestigkeit des Betons und eine Parallelverschiebung des Kurvenverlaufs. Bei einigen Varianten wird die Steifigkeit der Spannungs-Dehnungslinie im Bereich IIb (vgl. Bild 1) verändert.

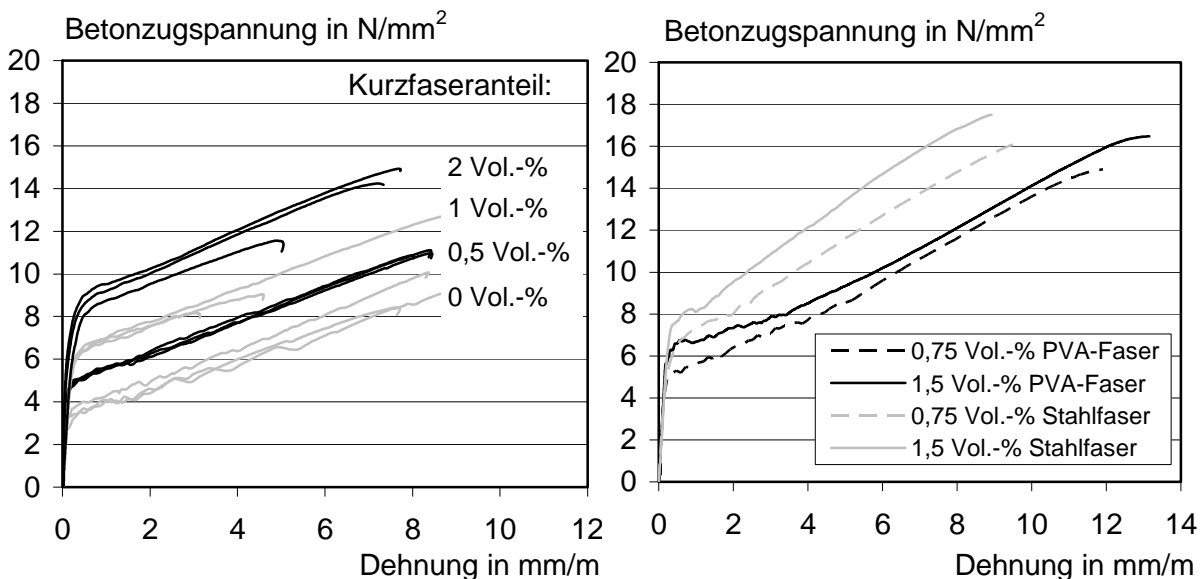


Bild 6: Einfluss von Kurzfasergehalt (links) und Kurzfasersteifigkeit (rechts)

Fig. 6: Influence of short fibre content (left) and short fibre stiffness (right)

Sowohl die Erhöhung der Erstrissfestigkeit des Betons als auch die Parallelverschiebung der Spannungs-Dehnungslinie gehen mit einer Erhöhung des Fasergehaltes einher (siehe Bild 6, links). Dabei entspricht die Differenz der Erstrissfestigkeit der Parallelverschiebung. Die Er-

höhung des Fasergehaltes führt also nicht wie zunächst erwartet zu einem steiferen Verlauf der Spannungs-Dehnungslinie. In Bild 6, rechts deutet sich an, dass die Verwendung von besonders steifen Kurzfasern (Stahl gegenüber PVA) bei gleichem Fasergehalt die Steifigkeit der Spannungs-Dehnungslinie leicht erhöht.

Die Beobachtungen lassen darauf schließen, dass die Steifigkeit der Spannungs-Dehnungslinie von einem Zusammenspiel von Bewehrungsgrad und Rissanzahl beeinflusst wird. Mit einer Verdopplung des Kurzfasergehaltes verdoppelte sich auch die Anzahl der augenscheinlich festgestellten Risse. Die Parallelverschiebung ließe sich dann so erklären, dass sich Steifigkeitseinflüsse, die sich aus Rissanzahl und Bewehrungsgrad ergeben, ausgleichen. Weitere Versuchsreihen mit exakter Rissdokumentation werden derzeit durchgeführt.

6 Zyklisches Biegetragverhalten mit und ohne Kurzfasern

Die Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten verfolgten mehrere Ziele. Grundsätzlich war die Frage zu klären, wie sich Textilbeton im Zustand II bei zyklischer Beanspruchung verhält. Eine ähnliche Untersuchung erfolgte bereits in [10], bei der festgestellt wurde, dass Textilbeton bis zu einer Oberlast von 70 % der Festigkeit mindestens 90 Lastzyklen schadensfrei übersteht. Die hier durchgeführten Untersuchungen sollten die Frage klären, in wieweit Kurzfasern das zyklische Tragverhalten verbessern. Im Rahmen der Untersuchungen wurden 3 Serien betrachtet. Eine Serie bestand aus 2 Lagen Textil und stellt die Referenz dar. In einer zweiten Serie wurde eine Lage Textil durch eine äquivalente Menge Kurzfasern ausgetauscht, so dass die Bewehrungsgrade vergleichbar sind. So sollte die Frage geklärt werden, ob sich Kurzfasern bei gleichem Bewehrungsgehalt günstiger unter zyklischer Beanspruchung verhalten als Textilien. In einer dritten Serie wurden Kurzfasern zusätzlich zu den 2 Lagen Textil zugegeben, um die Verbesserung des zyklischen Tragverhaltens durch Kurzfasergänzung zu bewerten.

Für die Versuche wurden Textilbetonplatten mit einer Fläche von 700 x 800 mm² und einer Dicke von 2 cm hergestellt. Die Herstellung erfolgte im Laminierverfahren. Nach einer Lagerungsdauer von 28 Tagen wurden je Platte 4 Biegeplatten mit einer Länge von 800 mm und einer Breite von 150 mm ausgesägt. Eine Biegeplatte stand jeweils für den statischen Referenzversuch zur Verfügung um die Oberlasten festzulegen. Dabei wurde wie folgt vorgegangen. Bei der Referenzplatte ohne Kurzfasern (Serie 1) wurden Oberlasten von 0,26 kN, 0,43 kN und 0,60 kN festgelegt. Damit wird der Bereich direkt nach dem Riss der Matrix bis zu einer Belastung von ca. 60 % der Maximallast abgedeckt. Für die Variante mit einer Lage Textil und Kurzfasern (Serie 2) wurden die gleichen Oberlasten wie bei der Referenz übernommen, da die Wirkung von Kurzfasern und Textil direkt mit einander verglichen werden sollte. Bei der Variante mit zusätzlicher Kurzfaserbewehrung (Serie 3) wurden die relativen Belastungsgrade der Referenz, bezogen auf die Maximallast, übernommen, um den höheren Bewehrungsgrad zu kompensieren. Die Ergebnisse der zyklischen Versuche sind in Bild 7 gegenüber gestellt.

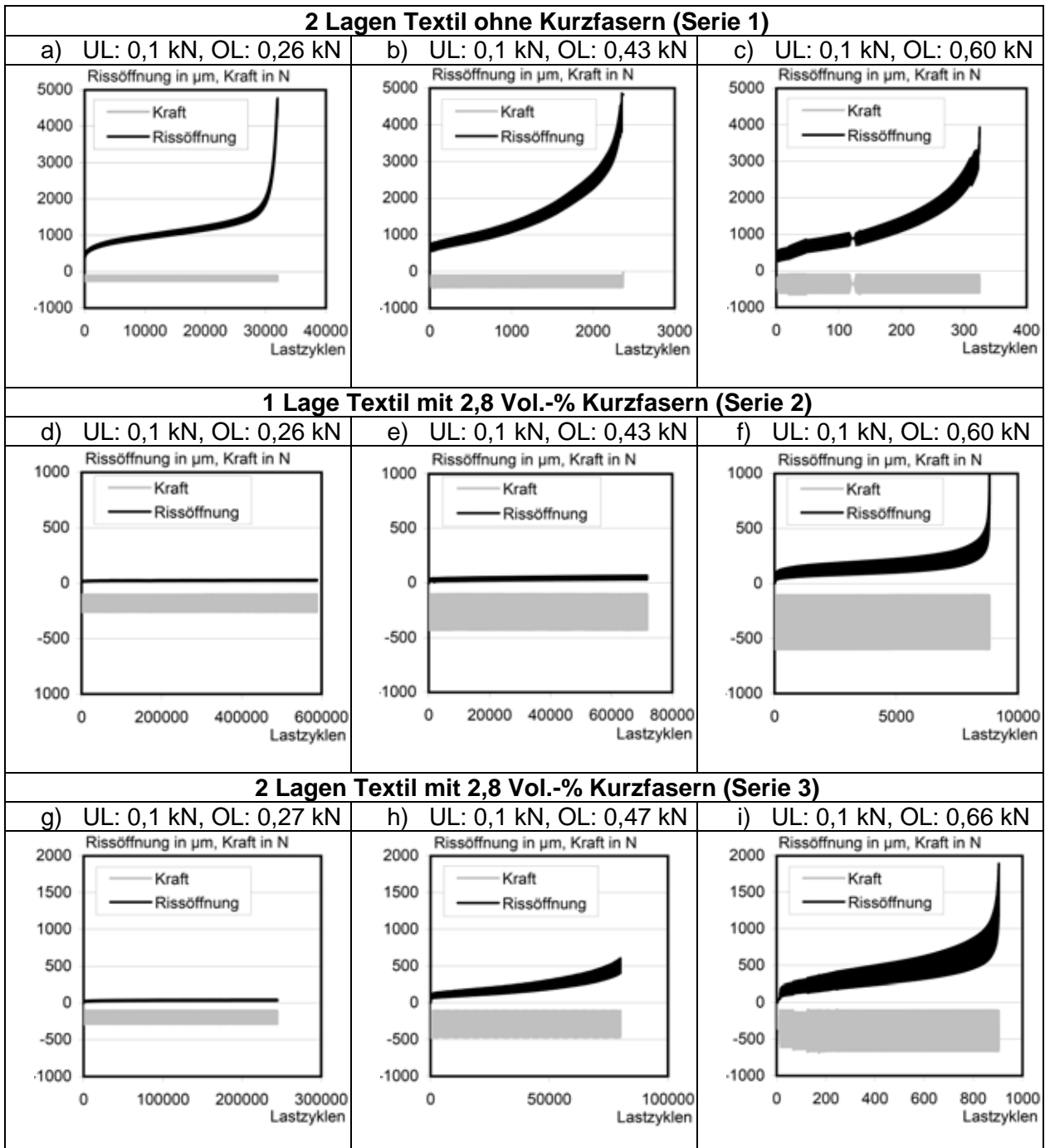


Bild 7: Unter- und Oberlast sowie zugehörige Rissöffnung in Abhängigkeit der Lastzyklen

Fig. 7: Minimum and maximum load as well as referring crack opening displacement over the number of load cycles

Es ist jeweils die Rissöffnung bei Unterlast und bei Oberlast sowie die aufgebrachte Last über die Lastzyklen aufgetragen. Die sinusförmigen Verläufe sind stark gestaucht, so dass nur die Entwicklung über die Lastzyklen erkennbar ist. Drei Versuche (d, e, g) wurden aufgrund der langen Prüfdauer nach frühestens 24h abgebrochen, da keine kritische Rissaufweitung erkennbar war. Unabhängig davon bestätigen die Ergebnisse die Vermutung, dass Textilbeton eine begrenzte Anzahl an Lastzyklen im Zustand II erträgt. Alle Platten sind bei einer Oberlast von 0,6 kN, was einem Belastungsgrad von ca. 60 % bis 75 % entspricht innerhalb weniger Minuten gebrochen. Bei den kleineren Laststufen zeigt sich ein sehr unterschiedliches Verhalten. Betrachtet man zunächst die Serien 1 und 2, zeigt sich, dass die kurzfaserbewehrten Platten tendenziell eher der Ermüdungsbelastung stand halten, obwohl eine Lage weniger Textil eingebaut war. Die Referenzplatte ohne Kurzfasern hat bereits bei der kleinsten Laststufe (a), im Bereich der Rissfestigkeit, nach ca. 30000 Lastzyklen versagt. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch beim Vergleich der Serien 1 und 3. Bei zusätzlicher Kurzfaserbewehrung schneiden die faserbewehrten Platten auch bei entsprechend höherer Belastung tendenziell besser ab als die Platten ohne Kurzfasern. Bei den höher belasteten Platten (h und i) kam es jedoch auch zu Brüchen, wenn auch nach deutlich mehr Lastzyklen. Nur bei den jeweils kleinen Laststufen der faserbewehrten Platten (d und g) schienen die Rissöffnungen während der Versuche asymptotisch gegen einen Höchstwert zuzulaufen. Ein Versagen nach weiteren Lastzyklen ist jedoch nicht auszuschließen. Abschließend kann der positive Einfluss der Kurzfasern auf das Ermüdungsverhalten herausgestellt werden. Es zeigte sich aber auch, dass bei zyklischer Beanspruchung von gerissenen Textilbetonbauteilen entsprechende Sicherheiten bei der Anzahl der zu erwartenden Lastzyklen berücksichtigt werden müssen.

Danksagung

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des Teilprojektes C1 im Sonderforschungsbereich 532 „Textilbewehrter Beton – Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie“ erbracht und von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziell gefördert. Hierfür bedanken sich die Autoren ganz herzlich.

7 Literatur

- [1] BARHUM, R. ; MECHTCHERINE, V.: *Influence of Short Fibres on Fracture Behaviour in Textile Reinforced Concrete*. In: *Fracture and Damage of Advanced Fibre-reinforced Cement-based Materials* (2010), S. 77-89
- [2] KORB, S.: *Untersuchungen zum Zugtragverhalten hochduktiler Faserbetone mit zusätzlicher Textilbewehrung*. Kaiserslautern, Technische Universität, Fachbereich Architektur/Raum- und Umweltplanung/Bauingenieurwesen, Dissertation, 2010

- [3] HINZEN, M. ; BRAMESHUBER, W.: *Improvement of Serviceability and Strength of Textile Reinforced Concrete by Using Short Fibres*. Dresden: 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. 261-272
- [4] HINZEN, M. ; BRAMESHUBER, W.: *Improvement of Serviceability and Strength of Textile-Reinforced Concrete Elements with Short Fiber Mixes*. Farmington Hill : American Concrete Institute, ACI SP-251, 2008. - In: *Design and Applications of Textile Reinforced Concrete*, ACI Fall Convention 2007, Fajardo, Puerto Rico, 14.-18.10.2007, (Aldea, C.-M. (Ed.)), 12 Seiten
- [5] HINZEN, M.; BRAMESHUBER, W.: *Influence of Short Fibers on Strength, Ductility and Crack Development of Textile Reinforced Concrete*, RILEM Proceedings PRO 53. - In: *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC5)*, Proceedings of the Fifth International RILEM Workshop, Mainz, July 10-13, 2007, (Reinhardt, H.W.; Naaman, A.E. (Eds.)), S. 105-112, ISBN 978-2-35158-046-2
- [6] BROCKMANN, J. ; RAUPACH, M.: *Durability Investigations on Textile Reinforced Concrete*. Durability of Materials and Components, 9th International Conference (CSIRO 2002), Brisbane, Australia, 17-20 March 2002. Paper No. 111
- [7] HINZEN, M.; BRAMESHUBER, W.: *Influence of Matrix Composition and Short Fibres on the Workability of Fine Grained Fibre Concrete*. Bagnaux: 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. 131-140 ISBN 978-2-35158-106-3
- [8] SHAH, S.P.: *Do Fibers Increase the Tensile Strength of Cement-Based Matrix?*. Berlin: Ernst & Sohn, 1990. - In: *Baustofftechnische Einflüsse auf Konstruktionen*. Zum 60. Geburtstag von Hubert K. Hilsdorf, (Kropp, J. (Ed.)), S. 465-481
- [9] JESSE, F.: *Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix*. Dresden, Technische Universität, Fakultät Bauingenieurwesen, Dissertation, 2004
- [10] VOSS, S.: *Ingenieurmodelle zum Tragverhalten von textilbewehrtem Beton*. Aachen, Technische Hochschule, Fachbereich 3, 2008, - Dissertation

