

Qualitative Bewertung des Versuchsstandes zur Untersuchung des zweiaxialen Tragverhaltens von textilbewehrtem Beton*

Dirk Jesse¹, Frank Jesse²

Zusammenfassung: Infolge des Herstellungsprozesses textiler Bewehrungen ergeben sich unterschiedliche Materialeigenschaften in den beiden Hauptrichtungen (Schuss und Kette). Diese Unterschiede entstehen durch verschiedene Einflussfaktoren, z. B. aus dem Verbundverhalten oder der Querschnittsform der Rovings. Um das Tragverhalten des anisotropen Verbundwerkstoffes Textilbeton experimentell untersuchen zu können, müssen mögliche Einflüsse aus dem Versuchsaufbau möglichst gering gehalten werden, bzw. – falls unvermeidbar – in ihrer Wirkung qualitativ und quantitativ bestimmt und bei der Auswertung der Versuchsergebnisse berücksichtigt werden. Auf der Grundlage der durchgeführten umfangreichen experimentellen Untersuchungen wird eine qualitative Bewertung des Versuchsstandes sowie der verwendeten berührungslosen Messtechnik, der Nahbereichsphotogrammetrie, vorgenommen.

Abstract: Due to the manufacturing process textile reinforcements have different material properties in the two main directions (weft and warp). These differences are caused by various factors, e.g. bond behaviour and cross-sectional geometry of the reinforcing rovings. To study the anisotropic structural behaviour of textile reinforced concrete experimentally, possible influences from test set-up must be minimized, or – if inevitable – these effects have to be determined qualitatively and quantitatively to be considered during evaluating the experimental results. On basis of conducted extensive experimental studies, a qualitative assessment of the test set-up as well as the employed digital close-range photogrammetry has been performed.

* Dies ist eine begutachtete Veröffentlichung./This is a peer-reviewed paper.

Online verfügbar/Online available: [urn:nbn:de:bsz:14-ds-1244044382818-76589](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-ds-1244044382818-76589)

¹ Dipl.-Ing., Institut für Massivbau, TU Dresden

² Dr.-Ing., Institut für Massivbau, TU Dresden

1 Einleitung

Bauteile aus Textilbeton haben aufgrund der typischen flächenartigen Bewehrungsstrukturen zwei orthogonale Bewehrungsnetze und zeigen bei Belastung in einer der Hauptrichtungen aufgrund der Rissbildung ein stark nicht-lineares Verhalten. Unter mehraxialer Beanspruchung kommt es zu einer Interaktion des Tragverhaltens in den beiden Hauptrichtungen. Deren Vernachlässigung kann zu einer Fehleinschätzung des Tragverhaltens führen. Bei der Anwendung von textilibewehrtem Beton für die Verstärkung bestehender Stahlbetonbauteile hinsichtlich Biegung, Querkraft und Torsion ist vor allem das Materialverhalten unter Querkzug bzw. mehraxialer Zugbeanspruchung von Interesse. Oft erfolgen entsprechende Untersuchungen mit experimentellen Methoden.

Während Druckkräfte in (Beton-)Proben in der Regel über ebene Kontaktflächen eingeleitet werden, sind zur Einleitung von Zugkräften spezielle Lasteinleitungsstrukturen nötig. Ein Einfluss der Lasteinleitungsstrukturen auf das Tragverhalten des Probekörpers kann nicht vollständig ausgeschlossen werden. Zur Vermeidung von Fehlinterpretationen ist es wichtig, störende Einflüsse des Versuchsaufbaus zu kennen und ihre Auswirkungen auf das Tragverhalten einschätzen zu können. Das Ziel der Untersuchungen besteht darin, die in [1] gefundenen Gesetzmäßigkeiten für das Tragverhalten von Textilbeton auf zweiaxiale Spannungszustände zu bestimmen und das hierarchische Multi-Skalen-Modell [2] zur Prognose des Tragverhaltens von Textilbeton dahingehend zu erweitern.

Bruckermann [3] und *Voss* [4] entwickelten einen Versuchsaufbau für Zug-Zug- und Zug-Druck-Beanspruchung von Textilbeton. *Voss* kommt anhand von Versuchen mit unbewehrten Probekörpern zu dem Schluss, dass die störenden Einflüsse aus dem Versuchsaufbau vernachlässigbar sind [4]. *Michler* hat ebenfalls einen speziellen Versuchsstand für biaxiale Zugversuche entwickelt [5]-[7]. Hier wird dessen Eignung anhand einer umfangreichen Versuchsreihe diskutiert. Der Schwerpunkt der Betrachtungen liegt auf den Einflüssen aus der Geometrie der Proben und der versteifenden Wirkung der Lasteinleitungsstruktur.

2 Einflussparameter

2.1 Probekörper

2.1.1 Geometrieabweichungen

Die Probekörper sind planmäßig 8 mm dick. Fertigungstoleranzen aus dem händischen Laminieren der 120 cm × 70 cm großen Rohlinge, aus denen später die Probekörper und Referenzproben herausgeschnitten werden, führen jedoch zwangsläufig zu Abweichungen der Plattendicke wegen ungleicher Schichtdicken des Feinbetons. Grundsätzlich werden diese in der Fertigung begründeten Geometrieabweichungen durch die Verwendung einer Stahlscha-

lung mit allseitig höhenjustierbarer Randschalung minimiert, können jedoch nicht ausgeschlossen werden. Für die Ermittlung der mittleren Betonspannung im Probekörper wird die Plattendicke an den vier Eckpunkten des quadratischen Grundkörpers gemessen und dessen Mittelwert verwendet. Geometrieabweichungen in der Mitte der Probe werden nicht erfasst.

Die Textilien sind nicht perfekt eben, sondern zeigen eine gewisse Welligkeit. Aufgrund vorliegender Erfahrungen mit einaxialen Dehnkörpern wird angenommen, dass daraus resultierende Einflüsse vernachlässigbar sind.

2.1.2 Randstörungen

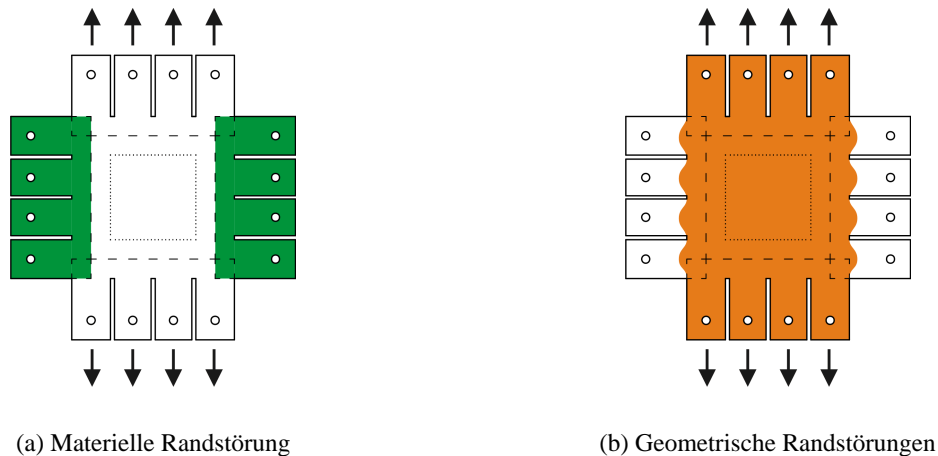
Die Probengeometrie wurde hinsichtlich der Anforderungen aus der zweiaxialen Lasteintragung optimiert. Die Lasteinleitungsbereiche in den beiden Hauptrichtungen beeinflussen sich dennoch zwangsläufig gegenseitig. Mit der gewählten Form können die daraus resultierenden Effekte jedoch klein gehalten, aber nicht verhindert werden:

- **Materialbedingte Randstörungen**

Die Lasteinleitungsbereiche der Probe sind zur Vermeidung eines vorzeitigen Versagens mit zusätzlichen Bewehrungslagen verstärkt, siehe Bild 1a. Die Zusatzbewehrung reicht 50 mm in den quadratischen Grundkörper bzw. endet 50 mm vor dem Messbereich. Die versteifende Wirkung der zusätzlichen Bewehrungslagen ist nachteilig, weil sie direkt die Dehnungsverteilung in der Probe und damit indirekt auch die Spannungsverteilung beeinflusst. Die Zulagebewehrung in Verlängerung der Entlastungsfugen zwischen den Lasteinleitungszähnen ist eingeschnitten. Dies mindert den versteifenden Effekt ab, hebt ihn aber nicht auf.

- **Geometrisch bedingte Randstörungen**

Die jeweils senkrecht zur Belastungsrichtung befindlichen Lasteinleitungszähne beteiligen sich an der Lastabtragung in Belastungsrichtung. Es handelt sich quasi um eine Vergrößerung des vorhandenen Betonquerschnitts im Randbereich der Probe, siehe Bild 1b. Die Folgen sind eine erhöhte Biegesteifigkeit des Randbereiches, eine Lastausbreitung in die Lasteinleitungszähne der Querrichtung, eine geringere Beanspruchung des Betonquerschnitts im Randbereich bzw. eine geringere Dehnung eben dort. Ebenfalls muss der Fall betrachtet werden, dass der Randbereich durch seine höhere Steifigkeit Kräfte anzieht und so zu einer ungleichförmigen Spannungsverteilung in Querrichtung führt bzw. dass infolge der höheren Dehnsteifigkeit eine Spannungs-konzentration im Randbereich stattfindet.



(a) Materielle Randstörung

(b) Geometrische Randstörungen

Bild 1: Randstörungen des zweiachsialen Probekörpers**Figure 1:** Marginal distortions of biaxial specimens

Bei der Planung des Versuchsstandes und Optimierung des Probekörpers für die zweiachsialen Versuche lag einer der Schwerpunkte darauf, den Einfluss der Lasteinleitungsbereiche auf den Messbereich auf ein Minimum zu reduzieren [5].

2.1.3 Versuchsprogramm

In der hier vorgestellten Studie werden die Auswirkungen der materiellen und geometrischen Randstörung untersucht. Sie soll erstmals eine qualitative und quantitative Bewertung der genannten Einflüsse auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Verbundwerkstoffes im Messbereich des Probekörpers ermöglichen. Zur Abbildung der beiden Arten Randstörungen wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt, siehe Tabelle 1.

Die Prüfkörper der Reihe A sind zwei Untertypen zuzuordnen. Typ 1 entspricht in Geometrie und Bewehrung den Prüfkörpern für die planmäßigen zweiachsialen Versuche mit geometrischen und materiellen Randstörungen. Typ 2 ist ein 40 cm breiter Referenzkörper ohne Randstörungen aus der gleichen Betoniercharge. Es werden jeweils drei Einzelversuche durchgeführt.

In der Reihe B wird gezielt der Einfluss der materiellen Randstörungen untersucht. Die Prüfkörper erhielten daher keine Lasteinleitungszähne, sondern nur die Zulagebewehrung im Randbereich der Probekörper aus Reihe A. Auf eine isolierte Betrachtung der geometrischen Einflüsse wurde verzichtet. Der Vergleich der Referenzen mit den Prüfkörpern mit materiellen Randstörungen sowie dem kombinierten Einfluss aus materiellen und geometrischen Randstörungen erlaubt eine Zuordnung der Störeinflüsse.

Die Belastungsgeschwindigkeit des kraftgesteuerten Versuches betrug 200 N/sec. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 3 vorgestellt und diskutiert.

Tabelle 1: Ergebnisse zum Einfluss der Probekörpergeometrie auf das Tragverhalten**Table 1:** Results for influence of specimen geometry on stress-strain relationship

Proben-Nr.	Beanspruchungs- richtung	Traglast (Typ 1) [kN]	Traglast Referenz (Typ 2) [kN]
Reihe A: geometrische & materielle Randstörungen			
B1-535		42,266	46,850
B1-536	Kette	41,080	41,628
B1-537		38,319	38,753
B1-538		42,837	45,400
B1-539	Schuss	41,010	51,265
B1-540		43,084	50,309
Reihe B: materielle Randstörungen			
B1-541		38,329	35,521
B1-542	Kette	37,872	36,444
B1-543		35,415	40,097
B1-544		43,177	46,276
B1-545	Schuss	40,403	48,398
B1-546		43,592	48,969

2.2 Messtechnik

Die Messung der Verformungen des Probekörpers erfolgte berührungslos mittels Nahbereichsphotogrammetrie. 81 diskrete Messpunkte wurden in einem regelmäßigen Raster (Achsabstand 5 cm) auf dem Probekörper angeordnet. Die Kraftmessung erfolgte mit separaten Kraftmessdosen an den Hydraulikzylindern. Die Zylinderwege wurden mit induktiven Wegaufnehmern gemessen. Die Erfassung der eingetragenen Kräfte und Zylinderwege erfolgte mit einer Messrate von 5 Hz. Parallel dazu erfolgte die Bildaufnahme mit einer Frequenz von 0,5 Hz. Die Synchronisation der analogen Messdaten mit den Bilddaten der Photogrammetrie erfolgt nachträglich über die Auswertung eines Triggersignals, welches bei jeder Bildaufnahme aufgezeichnet wurde.

Die Bildgröße der verwendeten Kameras vom Typ AVT Pike F-421 B/C beträgt 2048×2048 Pixel. Bei optimaler Wahl des Bildausschnitts zur Erfassung des 40×40 cm großen Probekörpers entspricht ein Pixel im Bild einem Quadrat mit einer Kantenlänge von $195 \mu\text{m}$. Durch geeignete mathematische Verfahren kann die Auflösung der Messtechnik in den Subpixelbereich erweitert werden, wobei die praktischen Grenzen des verwendeten Systems bei

max. 1/100 Pixel liegen, wodurch theoretisch Verformungen in der Größe von ca. 2 μm erfassbar sind. Aufgrund des unvermeidlich vorhandenen Messrauschens steigt dieser Wert praktisch jedoch wieder um eine Größenordnung auf ca. 20 μm an.

Die Betonzugbruchdehnung des verwendeten Feinbetons liegt im Bereich von 0,10 bis 0,13 ‰. Bezogen auf die 40 cm Kantenlänge des Probekörpers entspricht diese Zugbruchdehnung des Betons einer Längenänderung des Probekörpers von 40 μm . Es ist daher davon auszugehen, dass die zu erwartenden Verformungen im ungerissenen Zustand an der Untergrenze des Auflösungsvermögens der verwendeten Messtechnik liegen. Gleichwohl soll im Rahmen der zweiaxialen Versuche das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Textilbetons untersucht werden. Die Bruchdehnung von Textilbeton mit Carbonbewehrung beträgt bei einaxialen Zugbeanspruchungen 10 bis 12 ‰ (mit AR-Glasbewehrung bis 20 ‰) und damit zwei Größenordnungen über der Betonzugbruchdehnung (Erstrissdehnung). Der Bereich, in dem sich der Probekörper im Zustand I befindet, umfasst also nur ca. 1 % des Messbereiches. Zur Kontrolle der Messgenauigkeit des Systems wird bei den zweiaxialen Versuchen ein 15 \times 3 cm großer Referenzstreifen aus Aluminium zwängungsfrei auf dem Probekörper angebracht, sodass ein Lasteintrag in den Referenzstreifen sicher ausgeschlossen werden kann.

2.3 Spannungs- und Dehnungsermittlung

Die Ermittlung der mittleren Dehnungen erfolgt in fünf Achsen im Abstand von 5 cm innerhalb des Messbereiches. Bei dem eingelegten Bewehrungsgrad ist nach den Erfahrungen bei einaxialen Versuchen [1] zu erwarten, dass die Rissabstände mit den Rovingabständen des Bewehrungsmaterials korrelieren. Bei abgeschlossener Rissbildung ist mit 7 bis 9 Rissen auf 5 cm zu rechnen. Da die Dehnungen im Bruchzustand zu etwa 99 % auf die akkumulierten Rissbreiten zurückgehen, lässt dies bei 5 cm Basislänge Schwankungen/Streuungen der Dehnungen von ± 15 % zwischen verschiedenen benachbarten Messintervallen erwarten, je nachdem wo Risse nahe der Intervallgrenze entstehen. Bei Vergrößerung der Bezugslänge klingt dieser Einfluss ab. Eine Bezugslänge von 20 cm (hier der gesamte Messbereich) dürfte zu einer Schwankungsbreite von $\pm 3,5$ % und damit zu einer akzeptablen Genauigkeit bei der Dehnungsmessung führen. Die Lage der Risse hat dann einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Ergebnis.

Bei der gewählten Versuchsanordnung werden die Verformungen nur an einer Oberfläche der Probe erfasst. Bei der Dehnungsermittlung über die Randpunkte des Messbereichs kann diese Vorgehensweise zu Messfehlern führen, da Verformungen der Probe senkrecht zur Belastungsebene (Verkrümmungen) nicht erfasst werden können. Das Geradeziehen einer ggf. durch Schwindeinflüsse vorgekrümmten Probe würde in diesem Fall als zusätzliche Dehnung interpretiert. Für die Bestimmung der mittleren Dehnungen in den einzelnen Achsen werden daher Verformungen entlang der Polygonzüge zwischen den Messpunkten auf den Achsen aufsummiert. Globale Verformungen wie Beulen oder Schüsseln der Probe werden bei der Längenermittlung am Polygonzug näherungsweise erfasst.

Für eine möglichst realitätsnahe Ermittlung des Spannungszustandes im Messbereich wird auf das Multi-Skalen-Modell [2] von *Lepenies* zurückgegriffen. Aus dem mittleren Dehnungszustand soll auf den mittleren Spannungszustand im Messbereich geschlossen werden. Unter der Annahme, dass Schuss- und Kettrichtung unabhängig voneinander betrachtet werden können, müsste sich für eine einaxiale Belastung das Tragverhalten prognostizieren lassen. Abweichungen der Prognose bei nicht Spannungsverhältnissen σ_1/σ_2 , deren Resultierende nicht parallel zu den Hauptrichtungen verläuft, würden auf eine Interaktion der beiden Richtungen hindeuten, die sich auf diesem Wege qualitativ und quantitativ erfassen lässt. Um dieses Ziel zu erreichen ist es zunächst erforderlich, die Steifigkeitsverhältnisse und den daraus resultierenden internen Spannungszustand des Probekörpers für einaxiale Zugbeanspruchung vollständig zu erfassen. Hierzu werden die gemessenen diskreten Verformungen mit Hilfe einer Spline-Interpolation idealisiert, wobei die 81 Messpunkte als Stützstellen vorgegeben werden. Die so entstehende stetige Verformungsfigur ist nach den Hauptrichtungen differenzierbar, wodurch sich das Dehnungsfeld ermitteln lässt.

Bild 2a zeigt anhand des Versuches B1-441 (Spannungsverhältnis $\sigma_1/\sigma_2 = 0,0/1,0$, Belastung in Kettrichtung) das gemittelte Dehnungsprofil (Bezugslänge 20 cm) über den Querschnitt des Probekörpers. Bild 2b zeigt das daraus errechnete Spannungsprofil nach Abschluss der Rissbildung. In beiden Teilbildern wurde zusätzlich jeweils der Mittelwert der Dehnungen und Spannungen über den Querschnitt als gestrichelte Linie eingetragen. Während die Dehnungen alternativ auch über die direkte Auswertung der Messpunkte ermittelt werden können, zeigt das Spannungsprofil, dass unter dem vereinfachten Ansatz einer mittleren Spannung $\sigma = F/A$ das Beanspruchungsniveau im Messbereich überschätzt werden würde.

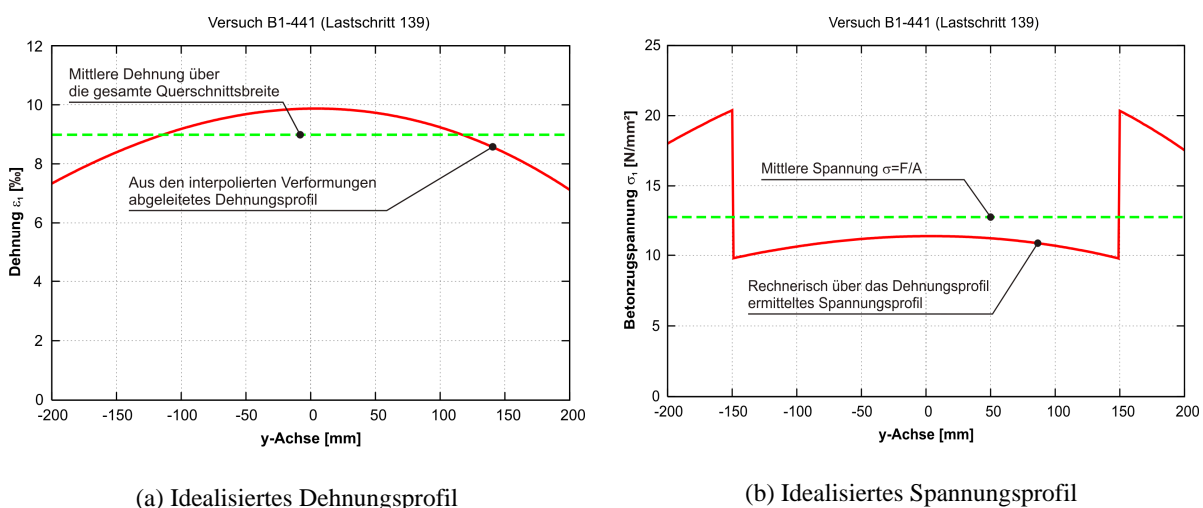


Bild 2: Versuch B1-441, Idealisiertes Spannungs- und Dehnungsprofil

Figure 2: Test B1-441; Idealized stress and strain profile

Infolge der durch die Randstörungen hervorgerufenen Steifigkeitszunahme am Probenrand erfolgt eine Spannungskonzentration in diesem Bereich. Die Sprünge im Spannungsprofil ergeben sich durch die Abstufung der Bewehrungslagen. Der Abfall der Spannungen zu den Außenrändern des Störbereiches ist der Lastausbreitung in die Lasteinleitungszähne zuzuschreiben.

3 Diskussion der Einflussparameter

3.1 Probekörper

3.1.1 Geometrieabweichungen

Die Auswertung der Dickenmessung an über 50 zwei axialen Probekörpern zeigt, dass trotz Einsatz höhenjustierbarer Stahlschalungen und großer Sorgfalt bei der Herstellung durch das Laminierverfahren bedingte Dickenabweichungen unvermeidbar sind. Die Standardabweichung der Probendicke beträgt 0,31 mm, was etwa 4 % Abweichung vom Soll-Maß (8 mm) entspricht. Die Extremwerte variieren jedoch zwischen 7,81 mm (97,5 %) und 9,13 mm (114 %), was auf einen systematischen Fehler in der Herstellung hindeutet, der in der Auswertung der Versuche berücksichtigt werden sollte. Die Verwendung einer mittleren Plattendicke, ermittelt aus den vier Messwerten an den Eckpunkten, hat sich als sinnvolle und hinreichend genaue Methode für die Beschreibung des Materialverhaltens erwiesen.

3.1.2 Materielle Randstörungen

In Bild 3 sind Mittelwerte und Streubänder der Spannungs-Dehnungs-Linien der jeweils drei Probekörper mit materieller Randstörung und der Referenzkörper ohne Randstörung für Schuss- (Bild 3a) und Kettrichtung (Bild 3b) dargestellt. Die Ergebnisse unterscheiden sich in Schuss- und Kettrichtung nicht grundsätzlich voneinander, weshalb die Beschreibung und Diskussion im Folgenden für beide Richtungen zusammengefasst sind.

Bild 3a zeigt, dass die Erstrissspannung der Referenzproben ohne Randstörung niedriger liegt als die der Proben mit Zulagebewehrung. Das gleiche grundsätzliche Verhalten lässt sich in geringerer Ausprägung auch in Bild 3b für die Schussrichtung feststellen.

Der Übergang vom Zustand IIa (Rissbildung) zum Zustand IIb (abgeschlossenes Rissbild) findet infolge der materiellen Randstörung in beiden Richtungen deutlich früher statt. Der Übergang ist für die Referenzproben in Bild 3a und Bild 3b als Punkt B angetragen. Wiederum sind die Auswirkungen in Kettrichtung größer als in Schussrichtung. Im Vergleich zu den Referenzproben findet der Übergang zur abgeschlossenen Rissbildung in Kettrichtung bei etwa 1,0 ‰ geringerer Dehnung statt. In Schussrichtung beträgt die Differenz zu den Referenzwerten im Mittel nur 0,5 ‰.

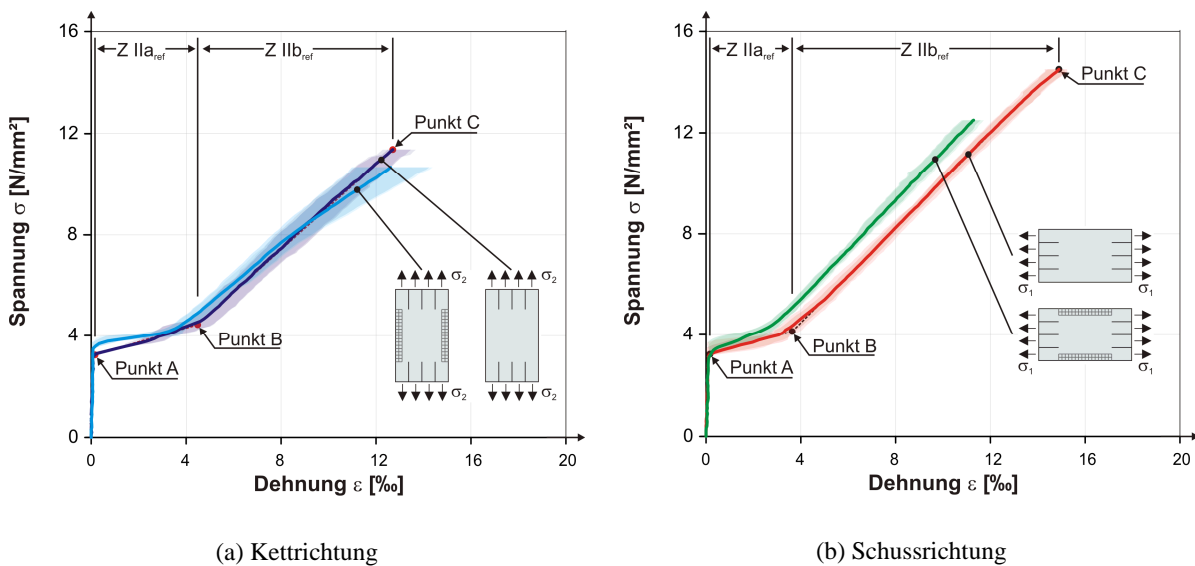


Bild 3: Einfluss der materiellen Randstörungen

Figure 3: Influence of material induced border distortions

Im Zustand IIb verlaufen Kurven der Proben mit materieller Randstörung und der Referenzen in der Schussrichtung parallel. Ein signifikanter Einfluss auf den Anstieg der Kurve im Zustand IIb lässt sich nicht feststellen, dafür aber eine Zunahme der Zugversteifung (engl. tension stiffening). Die seitlichen Bewehrungszulagen sind somit maßgeblich am Lastabtrag beteiligt. Das Einschneiden der Zulagen in Verlängerung der Entlastungsschnitte minimiert den ungewollten Steifigkeitszuwachs quer zur Lasteinleitung.

In Kettrichtung ergeben die Ergebnisse ein weniger klares Bild. Im Dehnungsbereich zwischen 4 und 8 ‰ gleicht das Verhalten den in Schussrichtung beobachteten Effekten. Oberhalb fällt die Steifigkeit der Probekörper jedoch signifikant ab, auch das Streuband wird deutlich breiter. Generell erscheint die Steifigkeit der Prüfkörper als auch der Referenzproben für die Kettrichtung der Reihe A zu gering. Die Aussagekraft der Ergebnisse ist daher geringer zu bewerten. Grundsätzlich wird der Einfluss der materiellen Randstörungen in Schuss- und Kettrichtung die gleichen Effekte in vergleichbarer Größenordnung hervorrufen, weshalb die Ergebnisse der Schussrichtung auf die Kettrichtung übertragen werden können, auch wenn durch Streuungen der Materialeigenschaften in den Betonierchargen die Versuche der Kettrichtung im oberen Dehnungsbereich des Zustandes IIb ein leicht abweichendes Materialverhalten aufzeigen.

Hinsichtlich der Tragfähigkeit zeigt sich in Kettrichtung und Schussrichtung eine geringere Tragfähigkeit der Proben mit Randstörung im Vergleich zu Referenzproben. Die messbaren Unterschiede in den erreichten Traglasten liegen im üblichen Toleranzbereich für Textilbeton, ein Einfluss der Zulagebewehrung ist daher nicht erkennbar. Im Gegensatz dazu liegen in Schussrichtung die durchschnittlichen Traglasten der Probekörper mit 42,4 kN im Schnitt

5,5 kN (oder 12 %) niedriger als die Traglasten der Referenzprüfkörper, deren Mittelwert 47,88 kN beträgt.

3.1.3 Geometrische Randstörungen

In Bild 4a und Bild 4b sind der kombinierte Einfluss aus geometrischen und materiellen Randstörungen gegenüber den Referenzproben dargestellt. Um Änderungen im Tragverhalten gegenüber der reinen materiellen Randstörungen besser zu erkennen, wurden die entsprechenden Kurven aus den Bild 3a und b zum Vergleich eingefügt.

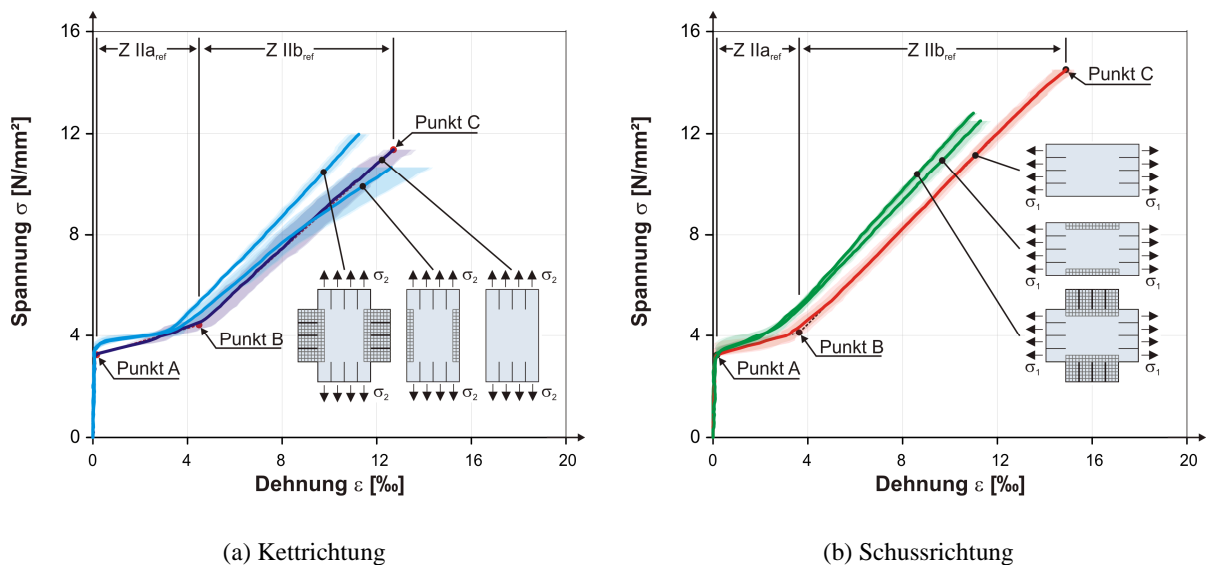


Bild 4: Einfluss der geometrischen und materiellen Randstörungen

Figure 4: Influence of geometrical and material induced marginal distortions

Im Zustand I lassen sich zwischen dem Fall der materiellen Randstörung und der kombinierten Wirkung beider Randstörungen für Schuss- und Kettrichtung keine Unterschiede im Tragverhalten ausmachen. Der Einfluss der geometrischen Randstörungen kann bis zum Abschluss der Rissbildung vernachlässigt werden.

Im Verlauf der Rissbildung zeigen die Prüfkörper mit seitlichen Lasteinleitungszähnen in beiden Richtungen einen signifikant steileren Anstieg der Spannungs-Dehnungs-Linie. Der Übergang vom Zustand IIa in den Zustand IIb findet bei den Prüfkörpern mit seitlichen Lasteinleitungszähnen im Vergleich zur Reihe A (ohne seitliche Zähne) auf nochmals leicht verringertem Dehnungsniveau statt. Das Spannungsniveau bleibt hingegen unverändert. Im Zustand IIb zeigen die Prüfkörper mit seitlichen Lasteinleitungszähnen in beiden Richtungen einen deutlich steileren Anstieg der Spannungs-Dehnungs-Linie. Der Probekörper verhält

sich insgesamt steifer. Dieser Effekt ist vollständig der geometrischen Randstörung zuzuweisen, denn die Kurven der materiellen Randstörungen zeigen diesen Effekt nicht.

Mit der gewählten Methodik bleibt bei der Spannungsermittlung – Bezug der Kraft auf die Probendicke und 40 cm Breite – die Lastausbreitung im Bereich der Lasteinleitungszähne unberücksichtigt. Die Probe erscheint dadurch steifer bzw. die den jeweiligen Dehnungen zugeordnete Spannung wird überschätzt.

3.1.4 Messtechnik

In Bild 5 sind die aus jeweils zwei 15 cm voneinander entfernten Punkten ermittelte Dehnung auf dem zweiaxialen Probekörper in Schuss- und Kettrichtung sowie die Dehnung des unbelasteten Referenzstreifens über die Zeit aufgetragen. Grundlage der Auswertung ist der Versuch B1-445 mit einem Spannungsverhältnis $\sigma_1/\sigma_2 = 1,0/0,32$ ($\alpha = 18^\circ$). Gut erkennbar ist, wie mit fortlaufender Versuchsdauer die Rissbildung aufgrund des gewählten Spannungsverhältnisses zunächst in Schussrichtung einsetzt, gefolgt von der Rissbildung in Kettrichtung. Die gemessene Dehnung des Referenzstreifens pendelt während des gesamten Versuches zwischen $\pm 0,05$ % und zeigt den der Messmethode eigenen zufälligen Fehler (Messrauschen).

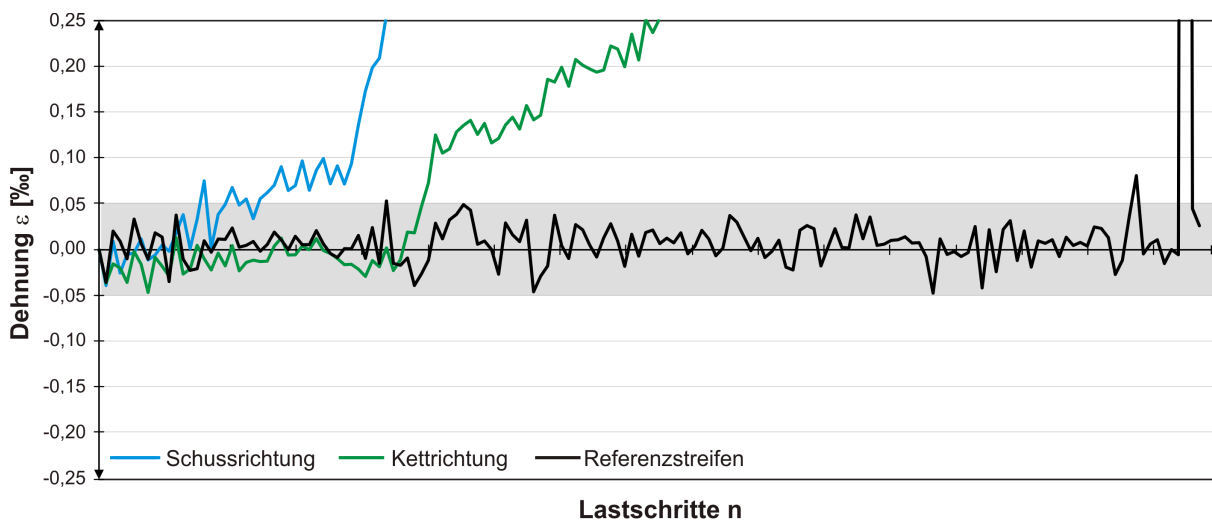


Bild 5: Ungenauigkeiten der Dehnungsmessung, Versuch B1-445

Figure 5: Inaccuracies in strain measurement, test B1-445

Die Genauigkeit des eingesetzten Messsystems liegt damit im erwarteten Rahmen. Die sichtbaren Dehnungsschwankungen bewegen sich in der Größenordnung von 0,1 % damit unterhalb des Dehnungsniveaus der Rissbildung. Die Bruchdehnung von Textilbeton liegt im Bereich zwischen 10-12 % und somit zwei Größenordnungen darüber. Für die Untersuchung

des Tragverhaltens von Textilbeton unter Zugbeanspruchungen, welches in erster Linie durch das Materialverhalten in den Zuständen IIa und IIb charakterisiert wird, ist die Messauflösung der eingesetzten Nahbereichsphotogrammetrie ausreichend.

3.2 Bewertung der Spannungsermittlung

Zur Bewertung der Spannungsermittlung auf Basis des Multi-Skalen-Modells wurden die in Bild 2b ermittelten Spannungen über den Querschnitt integriert und die so berechnete Kraft (innere Kraft) der real eingetragenen Kraft (äußere Kraft) gegenübergestellt. Die Ergebnisse dieses Vergleiches sind in Bild 6 dargestellt.

Bild 6 zeigt die Ergebnisse dieses Vergleiches als Kraft-Dehnungs-Verlauf aus Simulation und Experiment sowie zusätzlich den prozentualen Fehler der Simulation gegenüber dem Experiment. Aufgrund der Rissbildung unterhalb des bei einaxialen Versuchen üblichen Spannungsniveaus ist der Fehler zu Beginn der Rissbildung relativ hoch, fällt jedoch mit fortschreitender Rissbildung auf einen Wert von ca. 10 %. Mit dem Übergang der Probe in den Zustand IIb sinkt der Fehler auf etwa 7,5 % ab. Mit zunehmender Beanspruchung im Zustand IIb nähern sich beide Kurven weiter an und schneiden sich bei $\varepsilon_1 \approx 10\%$. Die Ursache hierfür liegt darin, dass zahlreiche Effekte (z. B. das sukzessive Versagen der Filamente und die damit verbundene Steifigkeitsabnahme) in der Simulation noch nicht berücksichtigt sind.

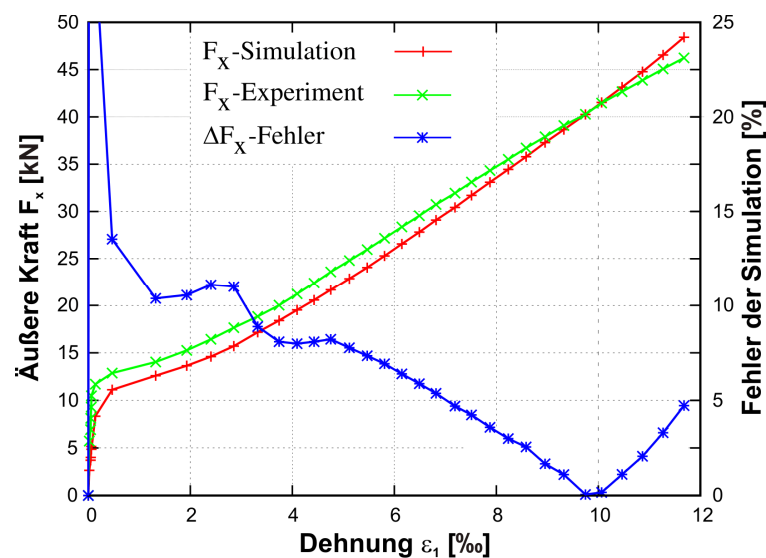


Bild 6: Analytische Ermittlung der Kraft im Probekörper

Figure 6: Analytical determination of force in the specimen

4 Zusammenfassung

Der von *Michler* [6] entwickelte Versuchsstand ist für die Untersuchung des Materialverhaltens von Textilbeton unter zwei axialen Zugbeanspruchungen geeignet. Einschränkungen ergeben sich im Zustand I (ungerissener Beton) hinsichtlich des E-Moduls. Einerseits kommen hier die physikalischen Grenzen des Messsystems zum Tragen, andererseits ist der Versuch maßgeblich auf die Untersuchung der Effekte nach der Rissbildung ausgelegt. Der E-Modul im Zustand I ist daher sinnvollerweise mit herkömmlichen Prüfmethoden zu bestimmen. Die Ergebnisse von *Bruckermann* [3] und *Voss* [4] können in diesem Zusammenhang bestätigt werden.

Der Messbereich des Probekörpers unterliegt störenden Einflüssen aus den Lasteinleitungsstrukturen. Experimentelle Untersuchungen zeigen, dass der Einfluss dieser materiellen und geometrischen Randstörungen auf das Tragverhalten im Zustand IIa und IIb signifikant und nicht vernachlässigbar ist. Die Zulagebewehrung und die Lasteinleitungszähne bewirken eine Versteifung der Randbereiche des Probekörpers. Nichtbeachtung dieses Effekts führt zu Fehleinschätzungen des Materialverhaltens. Es wurde gezeigt, dass die genannten Einflüsse erfasst und die Messdaten korrigiert werden können, um den Einfluss der Randstörungen auszugleichen.

5 Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Unterstützung im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 528 mit dem Titel „Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung“.

6 Literatur

- [1] JESSE, F.: *Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix*. Dissertation, Fakultät Bauingenieurwesen, Technische Universität Dresden, Dresden, 2004 – urn:nbn:de:swb:14-1122970324369-39398.
- [2] LEPENIES, I.: *Zur hierarchischen und simultanen Multi-Skalen-Analyse von Textilbeton*. Dissertation, Fakultät Bauingenieurwesen, Technische Universität Dresden, Dresden, 2007
- [3] BRUCKERMANN, O.: *Zur Modellierung des Zugtragverhaltens von textildbewehrtem Beton*. Dissertation, Fakultät Bauingenieurwesen, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen, 2007

- [4] VOSS, S.: *Ingenieurmodelle zum Tragverhalten von Textilbeton*. Dissertation, Fakultät Bauingenieurwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2008
- [5] JESSE, D.; MICHLER, Y. L.; JESSE, F.: Stress-strain behavior of textile reinforced concrete subjected to biaxial loading. In: Brameshuber, W.; Hegger, J.; Will, N. (Edt.): *1st International Conference on Textile Reinforced Concrete (ICTRC), Institute of Structural Concrete, RWTH Aachen University, Aachen, 2006*. RILEM, 2006, S. 141-150
- [6] MICHLER, L. Y.: Zweiaxiales Spannungsverhalten von textildbewehrtem Beton: Entwicklung des Versuchsaufbaus. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 100 (2005) 2, S. 239-242
- [7] MICHLER, L. Y.: *Entwicklung eines Versuchsstandes zur mehraxialen Beanspruchung von textildbewehrtem Beton*. Dissertation, Fakultät Bauingenieurwesen, Technische Universität Dresden – im Druck