

Untersuchungen zur Bestimmung der Übergreifungslängen textiler Bewehrungen aus Carbon in Textilbeton (TRC)

Enrico Lorenz¹, Regine Ortlepp²

Zusammenfassung: Für das Funktionieren von Verstärkungsschichten aus Textilbeton ist eine sichere Kraftübertragung zwischen den einzelnen Verbundbaustoffen sicherzustellen. Aufgrund der sehr hohen Garnzugfestigkeiten sind besonders bei Verwendung textiler Bewehrungen aus Carbon sehr effektive Verstärkungen herstellbar. In Textilbetonbauteilen sind hierbei im Regelfall Übergreifungsstöße der textilen Bewehrungslagen nicht zu vermeiden. Der vorliegende Beitrag befasst sich daher mit der experimentellen und analytischen Bestimmung der Übergreifungslängen textiler Bewehrungsstrukturen innerhalb von Textilbetonverstärkungsschichten.

Summary: A safe introduction and transmission of the acting forces is crucial for the functioning of composite materials. Because of the very high yarn tensile strengths of textile reinforcements made of carbon, the manufacturing of very effective TRC strengthening layers is possible. In TRC members, overlap joints within the textile layers usually cannot be avoided. This contribution deals with the experimental and analytical determination of the lap lengths of textile fabrics within a textile reinforced concrete strengthening layer.

1 Einleitung

Bei Verstärkungsmaßnahmen mit Textilbeton sind im Regelfall Übergreifungsstöße innerhalb der textilen Bewehrungslagen nicht zu vermeiden. Die Übergreifungsstöße in Textilbetonverstärkungen werden aufgrund des flächigen Aufbaus der textilen Gelege sowie der lagenweisen Herstellung des Verbundwerkstoffs im Regelfall als zweilagige Stöße ausgeführt. Für das Funktionieren von Textilbetonverstärkungen ist hierbei eine sichere Kraftübertragung zwischen den einzelnen Verbundbaustoffen sicherzustellen.

¹ M.Sc., Institut für Massivbau, TU Dresden

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

Grundsätzlich können in Textilbetonschichten hinsichtlich eines Verbundversagens unterschiedliche Versagensarten auftreten (LORENZ ET AL. [1]). Im Bereich der Übergreifungsstöße werden zwei verschiedene Mechanismen des Verbundversagens maßgebend. Zum einen kann es zu einem Versagen durch Auszug der Garne aus der Feinbetonmatrix, zum anderen zu einer Spaltrissbildung/Delamination in Textilebene innerhalb des Übergreifungsstoßes kommen. In Bild 1 und Bild 2 sind die Versagensmechanismen exemplarisch dargestellt.



Bild 1: Auszugsversagen

Fig. 1: Pull-out failure

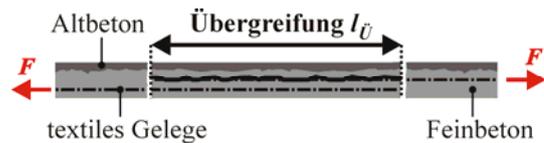


Bild 2: Spaltrissbildung/Delamination

Fig. 2: Delamination failure

Im Grenzzustand des Garnauszuges werden die Übergreifungslängen direkt durch die Größe der Verbundkräfte beeinflusst. Vergrößerungen der übertragbaren Verbundkräfte zwischen Garn und Matrix, z. B. durch eine Erhöhung des Beschichtungsgrades der textilen Bewehrung, führen zu Verkürzungen der erforderlichen Übergreifungslängen. Die Neigung zu einem Versagen im Grenzzustand der Spaltrissbildung/Delamination wird von den Querkraften bestimmt, welche durch die Krafteinleitung und Übertragung innerhalb des Übergreifungsstoßes entstehen. Diese resultieren primär aus dem Versatzmoment in Folge des Abstandes der Bewehrungslagen, den vorhandenen Verbundkräften zwischen Garn und Matrix sowie den wirkenden Umlenkkraften auf den Beton in Folge eines nicht gestreckten Einbaus der Filamentgarne in die Matrix (LORENZ ET AL. [1]). Wird die Querkraftfestigkeit des Betons in der Ebene der textilen Bewehrung überschritten, entstehen am Beginn des Übergreifungsstoßes zunächst kleine Spaltrisse, welche mit zunehmender Last immer weiter in den Übergreifungsbereich hineinwandern und anschließend zum Versagen führen. Weiterhin können in Folge zu geringer Betondeckungen, insbesondere bei vorhandenen herstellungsbedingten Garnwelligkeiten, lokale Abplatzungen und Schädigungen der Betondeckung mit daraus folgenden Verringerungen der wirkenden Verbundkräfte im Bereich der äußeren Bewehrungslagen ein Auszugsversagen im Stoßbereich bewirken.

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der experimentellen und analytischen Bestimmung der Übergreifungslängen textiler Bewehrungsstrukturen innerhalb von Verstärkungsschichten aus Textilbeton. Ziel der Untersuchungen ist die zielgerichtete Überprüfung der Übergreifungslängen im Grenzzustand des Garnauszuges unter Vermeidung von Delamination und Spaltrissbildung im Stoßbereich. Das hier exemplarisch untersuchte carbonbewehrte textile Gelege wurde hierzu im Hinblick auf die Verbesserung der Verbundeigenschaften und die Verminderung der Garnwelligkeit mithilfe des erweiterten Nähwirkverfahrens (HAUSDING/CHERIF [2]) konfiguriert.

2 Materialien

Für die Matrix wurde die in CURBACH/JESSE [3] beschriebene Rezeptur mit einem Größtkorn von 1 mm verwendet.

Bei der gebrauchten textilen Bewehrung handelt es sich um ein nähgewirktes biaxiales Gelege der Bindung Trikot, Basisversatz (HAUSDING/CHERIF [2]) in Zusammenhang mit einem dreilagigen, symmetrischen Aufbau der Form $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$.

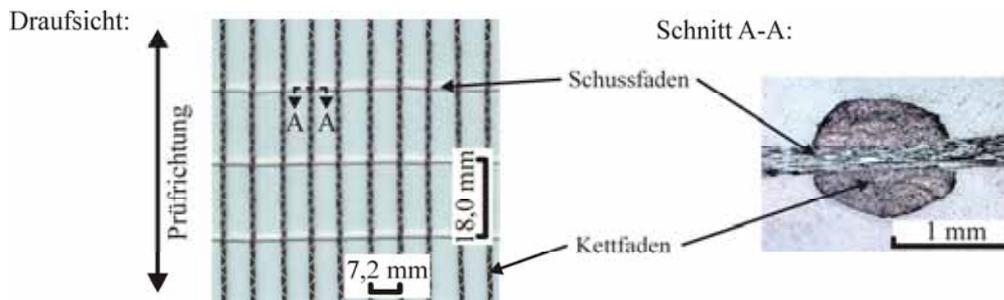


Bild 3: Verwendetes textiles Gelege

Fig. 3: Used textile reinforcement

Das Textil besteht in Kettichtung (= Prüfrichtung) aus jeweils zwei Carbonfilamentgarnen Tenax HTA 400 tex. Der Achsabstand beträgt einheitlich 7,2 mm. In Schussrichtung wurden alkaliresistente Glasfasern (Cem-FIL Direct Roving) mit einer Feinheit von 640 tex in einem Abstand von 18,0 mm verarbeitet. Der Schussfaden wurde direkt in den aus 2×400 tex Einzelgarnen hergestellten Kettfaden eingearbeitet (Bild 3).

Die an unbeschichteten Garnen bestimmten mechanischen Eigenschaften der in Prüfrichtung liegenden Carbon-Einzelgarne sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Mechanische Kennwerte des Carbongarns

Table 1: Mechanical properties of the carbon yarn

| Kennwert | Einheit | Wert |
|----------------------|-------------------|---------|
| Feinheit | tex | 405 |
| Anzahl der Filamente | K | 6 000 |
| maximale Festigkeit | N/mm ² | 1 345 |
| zugehörige Dehnung | % | 0,73 |
| E-Modul | N/mm ² | 202 340 |

Die Textilien wurden mit einer nachträglichen Beschichtung auf Polymerbasis modifiziert. Der Beschichtungsgehalt beträgt 15,0 Masse-%.

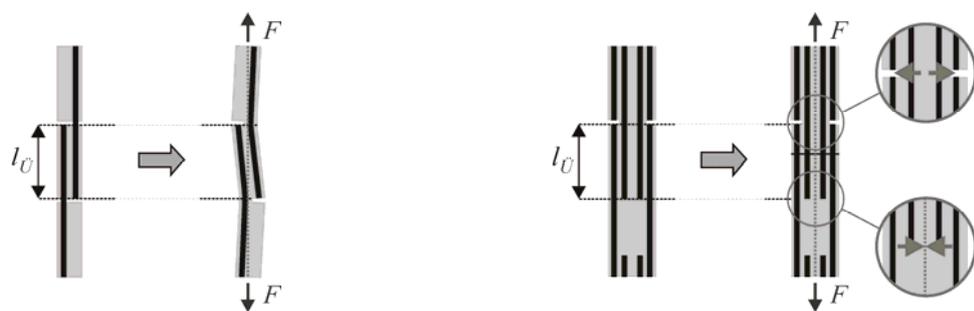
3 Experimentelle Versuche zur Bestimmung der Übergreifungslänge

3.1 Allgemeines

Ziel der durchgeführten experimentellen Untersuchungen war die Bestimmung der erforderlichen Übergreifungslängen textiler Bewehrungen innerhalb von Bauteilen aus textilbewehrtem Beton. Zur Prüfung des Verhaltens der Textilbetonbauteile im Übergreifungsbereich wurden in Anlehnung an einaxiale Zugversuche (Dehnkörperversuche) nach JESSE [4] einaxiale Zugversuche mit einem Überreifungsstoß in Probenmitte durchgeführt.

3.2 Eignung des gewählten Versuchsaufbaus

Den Untersuchungen vorangestellt wurden Probekörper mit symmetrischen und unsymmetrischen Bewehrungsanordnungen im Hinblick auf ihre Eignung zur bauteilgerechten Bestimmung der Übergreifungslängen überprüft (Bild 4). In Zugversuchen mit einlagig textilbewehrten Versuchskörpern konnten hierbei die in Bild 4a gezeigten Verformungen beobachtet werden. Diese resultieren aus dem entstehenden Versatzmoment in Folge des Abstandes der übergriffenen Textillagen. Bei Übergreifungen am Verstärkungsbauteil wird diese Verdrehung jedoch durch den Verbund der Textilbetonschicht zum Altbetonbauteil behindert und es werden delaminationsfördernde Querkzugspannungen im Stoßbereich erzeugt. Durch die symmetrische Anordnung der Übergreifungsstöße im Probekörper können diese aus dem Versatz der Bewehrungslagen entstehenden Kräfte auf den Stoß berücksichtigt werden. Daher wurde für die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen zur Bestimmung der Tragfähigkeit zugbeanspruchter Übergreifungsstöße in Textilbetonbauteilen eine symmetrische Anordnung der textilen Bewehrungen und Übergreifungsstöße im Probekörper gewählt (Bild 4b).



(a) unsymmetrische Textilanordnung

(b) symmetrische Textilanordnung

(a) asymmetrical arrangement of textile reinforcement

(b) symmetrical arrangement of textile reinforcement

Bild 4: Untersuchte symmetrische und unsymmetrische Probekörper

Fig. 4: Investigated symmetrical and asymmetrical specimens

3.3 Probekörper

Die verwendeten Probekörper mit Abmessungen von 600 mm × 50 mm × 12 mm sind mit zwei, sich in Probenmitte übergreifenden Lagen des in Kapitel 2 gezeigten textilen Geleges bewehrt. Die äußere Betondeckung sowie der Abstand der sich übergreifenden Textilien werden einheitlich mit jeweils 2 mm gewählt. Die beiden inneren Textilagen verlaufen bis zum unteren Rand des Untersuchungsbereichs.

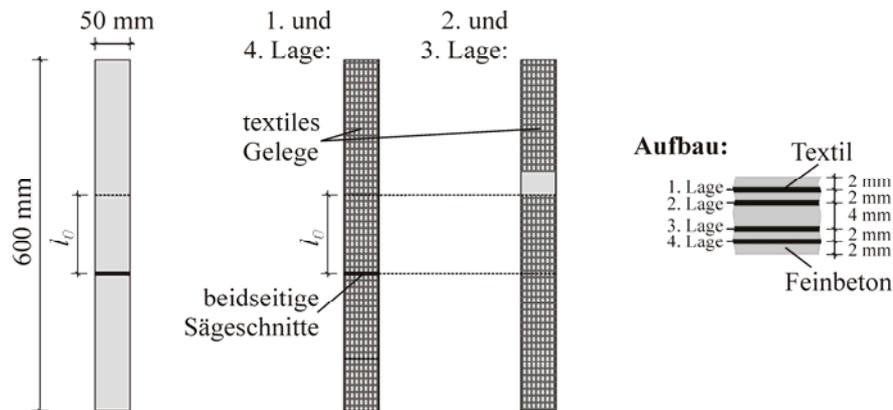


Bild 5: Probekörper mit symmetrischer Anordnung der textilen Bewehrung

Fig. 5: Used specimen with symmetrical arrangement of textile reinforcement

Die Anordnung der beiden äußeren Lagen erfolgt durchgehend. Dadurch kann die Länge des Übergreifungsstoßes zwischen den jeweiligen inneren und äußeren Bewehrungslagen direkt vor Beginn des Versuches durch zwei gegenüberliegende Sägeschnitte mit einer Durchtrennung der beiden äußeren Bewehrungslagen festgelegt werden. Dies ermöglicht eine iterative Variation der untersuchten Übergreifungslängen innerhalb der Versuchsserie. Die geprüften Übergreifungslängen variieren bei dem hier untersuchten Textil zwischen 30 und 150 mm.

Die Herstellung der Textilbetonprobekörper erfolgt im Handlaminierverfahren auf einer glatten, nicht saugenden Stahlschalung mit den Abmessungen 1 200 mm × 700 mm. Die einzelnen Probekörper mit den Abmessungen 600 mm × 50 mm × 12 mm werden nach ca. 21 Tagen aus diesen Textilbetonplatten zugeschnitten. Die Proben stammen somit alle aus ein und derselben Betoniercharge. Dadurch kann die Vergleichbarkeit der einzelnen Teilversuche unter Verminderung von Streuungen der Beton- und Verbundeigenschaften sichergestellt werden. Die Lagerung der Proben erfolgt in Anlehnung an die DIN 18555-3 [5]. Direkt nach der Herstellung werden die Textilbetonplatten für drei Tage, bei Temperaturen von ca. 20 °C gegen Austrocknen geschützt, in der Schalung gelagert. Nach dem Ausschalen folgt eine Aufbewahrung bis zum 7. Tag im Wasser. Anschließend werden die Proben bis zum Prüfetermin in der Klimakammer bei ca. 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte aufbewahrt. Zum Zeitpunkt der Prüfung sind die Proben 28 Tage alt.

3.4 Versuchsaufbau

Für den einaxialen Zugversuch werden die Proben außerhalb des Übergreifungsbereiches am oberen und unteren Lasteinleitungsbereich zwischen Stahlplatten auf einer Länge von jeweils 180 mm gleichmäßig geklemmt (Bild 6). Zwischen den stählernen Klemmbacken und der Probenoberfläche wird eine Ausgleichsschicht aus 0,5 mm dickem Gummi angeordnet. Der Anpressdruck wird so festgelegt, dass sowohl ein Rutschen der Probe in der Lasteinleitung als auch ein Überschreiten der Druckfestigkeit der Probe zwischen den Lasteinleitungsplatten vermieden wird.

3.5 Versuchsdurchführung und Messgrößen

Nach dem Anbau der oberen und unteren Lasteinleitungsstruktur erfolgt der Einbau der Proben in eine servohydraulische Zugprüfmaschine. Zur Ausrichtung der Probe wird eine Vorlast von 0,20 kN aufgebracht. Die weitere Belastung erfolgt verformungsgesteuert mit einer Belastungsgeschwindigkeit von ca. 1 mm/min. Während des Zugversuches werden die Maschinenkraft F und der Maschinenweg u gemessen. Die Bestimmung der zugehörigen Verformungen im Bereich des Übergreifungsstoßes erfolgt mittels eines photogrammetrischen Messsystems (Bild 6).

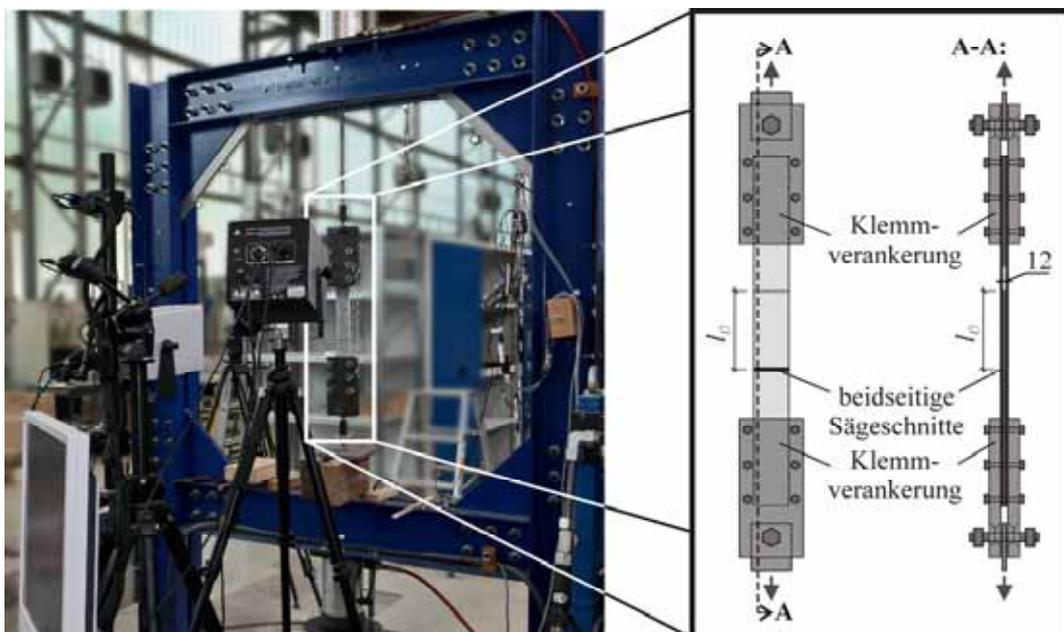


Bild 6: Versuchsaufbau mit photogrammetrischem Messsystem

Fig. 6: Test setup with photogrammetric measurement

3.6 Diskussion und Gegenüberstellung der Ergebnisse

In Bild 7 sind die Ergebnisse der durchgeführten Versuche zur Bestimmung der Übergreifungslängen dargestellt.

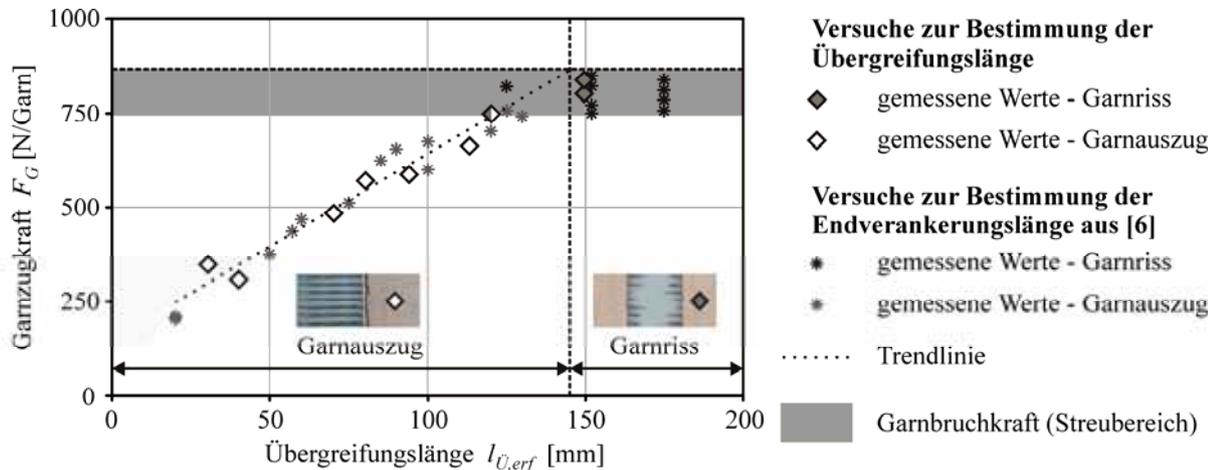


Bild 7: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Versuchsergebnisse

Fig. 7: Comparison of the experimentally determined test results

An der y-Achse sind die gemessenen Versagenslasten aufgetragen. Die x-Achse zeigt die zugehörigen Übergreifungslängen. Es konnten zwei unterschiedliche Versagensmechanismen beobachtet werden. Während bei Übergreifungslängen von ≤ 125 mm und gemessenen Garnzugkräften kleiner als die Garnbruchkraft ein Garnauszug zu beobachten ist, konnte bei Übergreifungslängen von 150 mm bei allen untersuchten Proben ein Versagen durch Garnriss festgestellt werden. Die maximal übertragbaren Kräfte variieren dann in Abhängigkeit der Streuung der maximalen Garnbruchkräfte. Zur Vermeidung eines Versagens durch Garnauszug ergibt sich folglich für das untersuchte Gelege bei voller Ausnutzung der Zugtragfähigkeit eine erforderliche Übergreifungslänge $l_{Ü,erf}$ von 145 mm. Vergleichend werden die Ergebnisse der in LORENZ/ORTLEPP [6] beschriebenen experimentellen Untersuchungen zur Ermittlung der Endverankerungslängen gegenübergestellt. Die Versuche erfolgten in einer Serie mit dem identischen Textil-Matrix-System. Die Ergebnisse der Versuche zur Bestimmung der Endverankerungslängen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Untersuchungen zur experimentellen Bestimmung der Übergreifungslängen. Dies lässt den Schluss zu, dass im Grenzzustand des Garnauszuges die Verteilung der Verbundspannungen über die beidseitigen Verankerungsbereiche des Übergreifungsstoßes in Folge der Rissbildung innerhalb der Übergreifungsstöße (Bild 8) im Vergleich zur Verbundspannungsverteilung im Endverankerungsbereich (Bild 17) nur unwesentlich beeinflusst wird. Dies bedeutet, dass die Übergreifungslänge dem 1,0-fachen Wert der Endverankerungslänge entspricht.

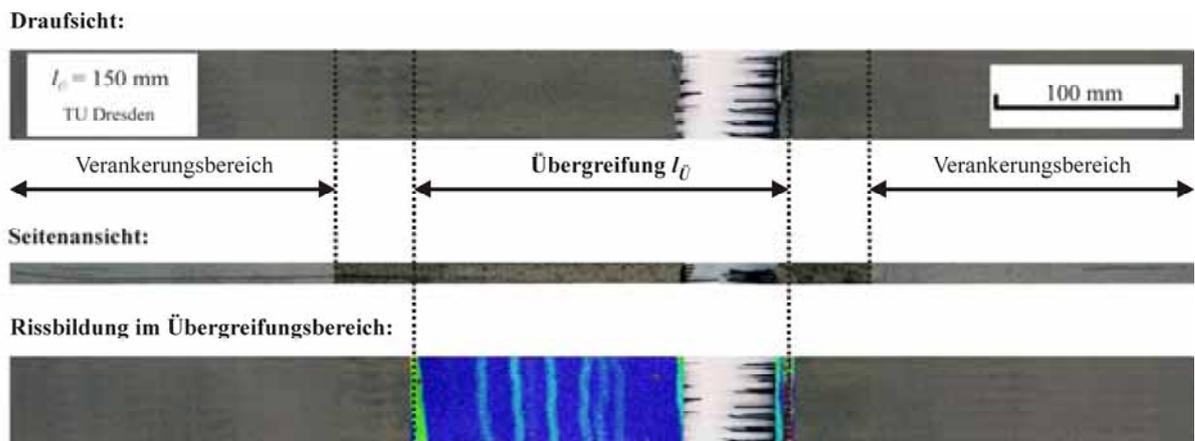


Bild 8: Geprüfte Probe mit einem Versagen durch Garnriss

Fig. 8: Tested specimen which failed because of yarn rupture

Dies ist im Grenzzustand der Delamination nicht der Fall. Die im Versagensfall in den Stoß hineinwandernde, verbundschädigende Spaltrissbildung kann die erforderlichen Übergreifungslängen deutlich erhöhen bzw. führt zu Verringerungen der nutzbaren Garnzugfestigkeit. Ein plötzliches Delaminationsversagen der Übergreifungsstöße sollte daher grundsätzlich durch die zielgerichtete Abstimmung des verwendeten Faser-Matrix-Systems vermieden werden (LORENZ ET AL. [1]). In den durchgeführten Versuchen konnte, wie exemplarisch in Bild 8 gezeigt, keine Neigung zu einem Versagen durch Spaltrissbildung/Delamination innerhalb der Übergreifungsstöße beobachtet werden. Durch die Verwendung des in Kapitel 2 gezeigten textilen Geleges ohne nennenswerte herstellungsbedingte Garnwelligkeit wird in Verbindung mit den vorliegenden Verbundkräften, dem gewählten Abstand der Bewehrungslagen im Stoßbereich und einer Betondeckung von 2 mm eine sichere Übertragung der Zugkräfte im Übergreifungsbereich ohne Verbundschädigungen sichergestellt.

4 Rechnerische Bestimmung der Endverankerungs- und Übergreifungslängen im Grenzzustand des Garnauszuges

4.1 Allgemeines

Unter der Annahme einer im Grenzzustand des Garnauszuges nahezu identischen Verteilung der Verbundspannungen in den Übergreifungs- und Endverankerungsbereichen zugbeanspruchter Textilbetonbauteile wird nachfolgend ein Modell zur analytischen Berechnung der Endverankerungs- bzw. Übergreifungslängen gezeigt. Die zur Übertragung einer Kraft F_G erforderliche Verankerungs- bzw. Übergreifungslänge wird hierzu vereinfachend mit l_E bezeichnet. Die Berechnung erfolgt unter Verwendung der Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung (VSB) des untersuchten Textil-Matrix-Systems, welche nach dem in LORENZ/ORTLEPP

[7] beschriebenen Berechnungsalgorithmus aus Textilauszugsversuchen ermittelt wurde. Die nachfolgende rechnerische Betrachtung des Verankerungsproblems in Übergreifungs- und Endverankerungsbereichen geschieht aufbauend auf die in RICHTER [8] beschriebenen, abschnittsweise geschlossenen Beziehungen zwischen Auszugskraft und Auszugslänge. Für eine genauere Darstellung der Herleitungen und die Erläuterung der Zusammenhänge wird auf RICHTER [8] und ZASTRAU/RICHTER/LEPENIES [9] verwiesen.

4.2 Annahmen für die textile Bewehrung und den Matrix-Garn Verbund

Für die analytischen Untersuchungen des Verankerungsproblems werden die nachfolgend aufgeführten Grundlagen und vereinfachten Annahmen verwendet. In Bild 9 ist für die untersuchte Kettrichtung des in Kapitel 2 beschriebenen textilen Geleges die aus Textilauszugsversuchen nach LORENZ/ORTLEPP [7] ermittelte linearisierte Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung (VSB) dargestellt. Die Bestimmung der Verbundspannungen erfolgte unter Ansatz eines über die Einbindelänge gemittelten einheitlichen Garnumfangs von $u_G = 3,3$ mm. Dieser wurde für das textile Gelege anhand optischer Messungen bestimmt (Bild 10). Der gemittelte Umfang geht nachfolgend im weiteren Berechnungsverlauf zur Ermittlung der erforderlichen Verankerungslängen rückwärts wieder in die Berechnung ein. Somit variiert lediglich die bezogene Verbundspannung als Zwischenwert. Auf das Endergebnis hat der Faserumfang keinen Einfluss.

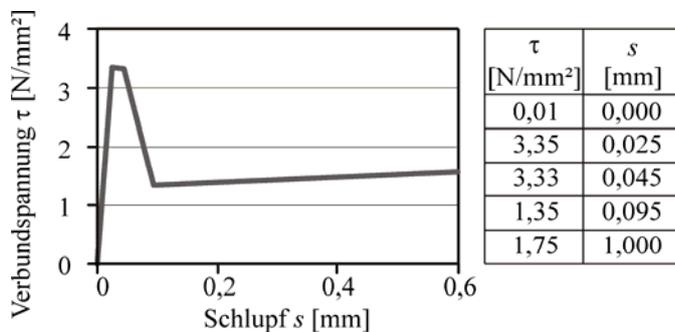


Bild 9: Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung (VSB)

Fig. 9: Bond stress versus slip relation (BSR)

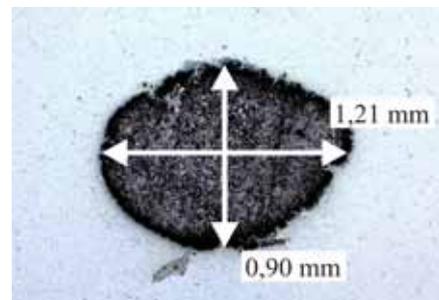


Bild 10: Garnquerschnitt

Fig. 10: Yarn cross section

Die Ermittlung der statisch wirksamen Bewehrungsfläche A_G des Carbongarns erfolgt anhand der Dichte des Garnwerkstoffes sowie der Garnfeinheit nach Gleichung (1).

$$A_G = \frac{\text{Feinheit}}{\rho} \quad (1)$$

mit A_G statisch wirksame Bewehrungsfläche des Carbongarns ($A_G = 0,45$ mm²)
 ρ Dichte des Garnwerkstoffes ($\rho_{\text{Carbon}} = 1,80$ g/cm³)
 Feinheit Gewicht des Filamentgarnes in tex [g/km], (Feinheit= 2×405 tex)

Aufgrund des annähernd geradlinigen Verlaufes der in Garnzugversuchen bestimmten Spannungs-Dehnungs-Linien beschichteter Filamentgarne wird von einem linear-elastischen Materialverhalten der Garne mit einem E-Modul von 202 400 N/mm² (Tabelle 1) ausgegangen.

4.3 Bezeichnungen und rechnerische Grundlagen

Die Berechnung der erforderlichen Verankerungslänge l_E für beliebige Garnzugkräfte F_G erfolgt in Abhängigkeit des Schlupfes am gezogenen Garnende s_{ge} (Bild 11).

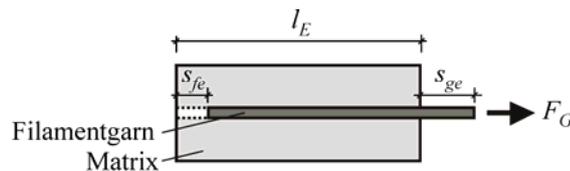


Bild 11: Relativverschiebung des freien s_{fe} und des gezogenen Garnendes s_{ge}

Fig. 11: Relative displacement of the free yarn end s_{fe} and the pulled yarn end s_{ge}

Anhand der nachfolgend beschriebenen Zusammenhänge können für beliebige multilineare Formen der VSB die Faserauszugskraft $F_G(s_{ge})$ und die zugehörige erforderliche Übergreifungslänge $l_E(s_{ge})$ in Abhängigkeit vom Schlupf des gezogenen Garnendes s_{ge} bestimmt werden. Dadurch ist die Berechnung der zur Verankerung einer beliebigen Garnzugkraft F_G erforderlichen Verankerungslänge $l_E(F_G)$ möglich.

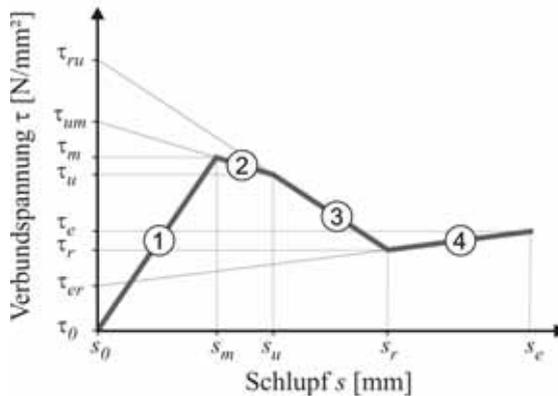


Bild 12: Erläuterung der Bezeichnungen der 4-fach linearen VSB

Fig. 12: Explanation of terms of the 4-fold linear BSR

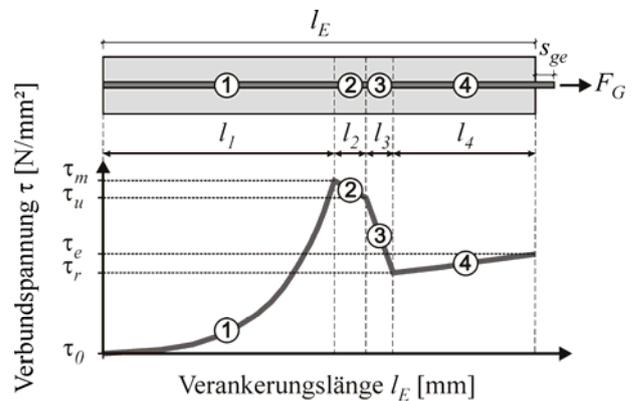


Bild 13: Exemplarische Verteilung der Verbundspannung entlang der Verankerungslänge

Fig. 13: Exemplarily distribution of the bond stresses along the development length

Die in den nachfolgend genannten Gleichungen zur Berechnung der Verankerungslänge verwendeten Bezeichnungen der einzelnen Abschnitte für die in Bild 9 dargestellte, aus vier linearen Abschnitten bestehende Form der VSB sind in Bild 12 erläutert.

In Bild 13 ist exemplarisch die zugehörige Verteilung der Verbundspannungen τ für eine zu verankernde Kraft F_G über die zugehörige Endverankerungs- bzw. Übergreifungslänge l_E dargestellt. Weiterhin ist erläuternd die zugehörige Verteilung der vier Abschnitte der VSB gezeigt.

In Folge der allgemein bei Textilbetonbauteilen im Verhältnis zum Garn (E_G, A_G) deutlich dehnsteiferen Feinbetonmatrix (E_M, A_M) wird bei Annahme eines linear-elastischen Materialverhaltens die konstante Ersatzdehnsteifigkeit $(E \times A)^*$ unter Vernachlässigung der Matrixdehnung vereinfachend zu:

$$(E \times A)^* = E_G \times A_G \quad \text{angenommen.} \quad (2)$$

mit A_G Querschnittsfläche des Filamentgarnes
 E_G E-Modul des Filamentgarnes
 A_M Querschnittsfläche der Matrix
 E_M E-Modul der Matrix

Der Anstieg der VSB im jeweiligen untersuchten Abschnitt (hier 1 bis 4) wird mit Z_x bezeichnet. Es ist für die hier vorliegende Form der VSB zwischen ansteigenden und abfallenden Bereichen zu unterscheiden. Für die Ermittlung der Konstante k_x im jeweiligen linearen Bereich gilt anschließend:

$$k_x = \sqrt{\frac{u_G}{(E \times A)^*}} \times |Z_x|. \quad (3)$$

mit u_G Umfang des Filamentgarnes
 Z_x Anstieg der VSB im jeweiligen Bereich ($x = 1$ bis 4)
 $(E \times A)^*$ Ersatzdehnsteifigkeit

4.4 Anfangswerte $N_{G,1}$, $N_{G,2}$, $N_{G,3}$ und $N_{G,4}$

Die zur abschnittsweise geschlossenen Lösung des Verbundproblems erforderlichen Anfangswerte sind die jeweiligen Endwerte der Normalkraft im Garn des vorhergehenden Abschnittes.

Abschnitt 1 – Startwert

Die Garnnormalkraft $N_{G,1}$ am freien Faserende ergibt sich bei dem hier vorliegenden Verankerungsproblem zu null:

$$N_{G,1} = F_G(s_{ge} = s_0) = 0 \quad (4)$$

Abschnitt 2 – Startwert

$$N_{G,2} = F_G(s_{ge} = s_m)$$

$$N_{G,2} = \sqrt{Z_1 \times E_G \times A_G \times u_G \times \left(\left(s_m + \frac{\tau_0}{Z_1} \right)^2 - \left(\frac{\tau_0}{Z_1} \right)^2 \right) + N_{G,1}^2} \quad (5)$$

Abschnitt 3 – Startwert

$$N_{G,3} = F_G(s_{ge} = s_u)$$

$$N_{G,3} = \sqrt{Z_2 \times E_G \times A_G \times u_G \times \left(\left(s_u + \frac{\tau_{um}}{Z_2} \right)^2 - \left(\frac{\tau_m}{Z_2} \right)^2 \right) + N_{G,2}^2} \quad (6)$$

Abschnitt 4 – Startwert

$$N_{G,4} = F_G(s_{ge} = s_r)$$

$$N_{G,4} = \sqrt{Z_3 \times E_G \times A_G \times u_G \times \left(\left(s_r + \frac{\tau_{ru}}{Z_3} \right)^2 - \left(\frac{\tau_u}{Z_3} \right)^2 \right) + N_{G,3}^2} \quad (7)$$

4.5 Abschnittsweise Berechnung der Auszugskraft

Die Berechnung der Auszugskraft F_G erfolgt abschnittsweise in Abhängigkeit vom Schlupf am gezogenen Faserende s_{ge} . Die zugehörigen Berechnungsformeln sind nachfolgend für die vier Abschnitte der VSB dargestellt.

Abschnitt 1 – Lösung für linear ansteigende Schubspannungen

Für $s_{ge} < s_m$ ergibt sich für den ansteigenden Bereich der VSB die Garnauszugskraft F_G gemäß Gleichung (8).

$$F_G(s_{ge}) = \sqrt{Z_1 \times E_G \times A_G \times u_G \times \left(\left(s_{ge} + \frac{\tau_0}{Z_1} \right)^2 - \left(\frac{\tau_0}{Z_1} \right)^2 \right) + N_{G,1}^2} \quad (8)$$

Abschnitt 2 – Lösung für linear abfallende Schubspannungen

Für $s_m < s_{ge} < s_u$ kann für abfallende Bereiche der VSB die Garnauszugskraft $F_G(s_{ge})$ nach Gleichung (9) bestimmt werden.

$$F_G(s_{ge}) = \sqrt{Z_2 \times E_G \times A_G \times u_G \times \left(\left(s_{ge} + \frac{\tau_{um}}{Z_2} \right)^2 - \left(\frac{\tau_m}{Z_2} \right)^2 \right) + N_{G,2}^2} \quad (9)$$

Abschnitt 3 – Lösung für linear abfallende Schubspannungen

Für $s_u < s_{ge} < s_r$ ist für abfallende Bereiche der VSB die Garnauszugskraft $F_G(s_{ge})$ nach Gleichung (10) berechenbar.

$$F_G(s_{ge}) = \sqrt{Z_3 \times E_G \times A_G \times u_G \times \left(\left(s_{ge} + \frac{\tau_{ru}}{Z_3} \right)^2 - \left(\frac{\tau_u}{Z_3} \right)^2 \right) + N_{G,3}^2} \quad (10)$$

Abschnitt 4 – Lösung für linear ansteigende Schubspannungen

Für $s_{ge} \geq s_r$ ergibt sich für den wieder leichten Anstieg im Reibebereich der VSB die Garnauszugskraft $F_G(s_{ge})$ nach Gleichung (11).

$$F_G(s_{ge}) = \sqrt{Z_4 \times E_G \times A_G \times u_G \times \left(\left(s_{ge} + \frac{\tau_{er}}{Z_4} \right)^2 - \left(\frac{\tau_r}{Z_4} \right)^2 \right) + N_{G,4}^2} \quad (11)$$

4.6 Abschnittsweise Berechnung der Verankerungslängen

Die Berechnung der zugehörigen Verankerungslängen l_E für die anhand von Gleichung (8) bis Gleichung (11) berechneten Garnzugkräfte erfolgt ebenfalls abschnittsweise in Abhängigkeit vom Schlupf am gezogenen Faserende s_{ge} . Die zugehörigen Bezeichnungen sind in Bild 14 dargestellt.

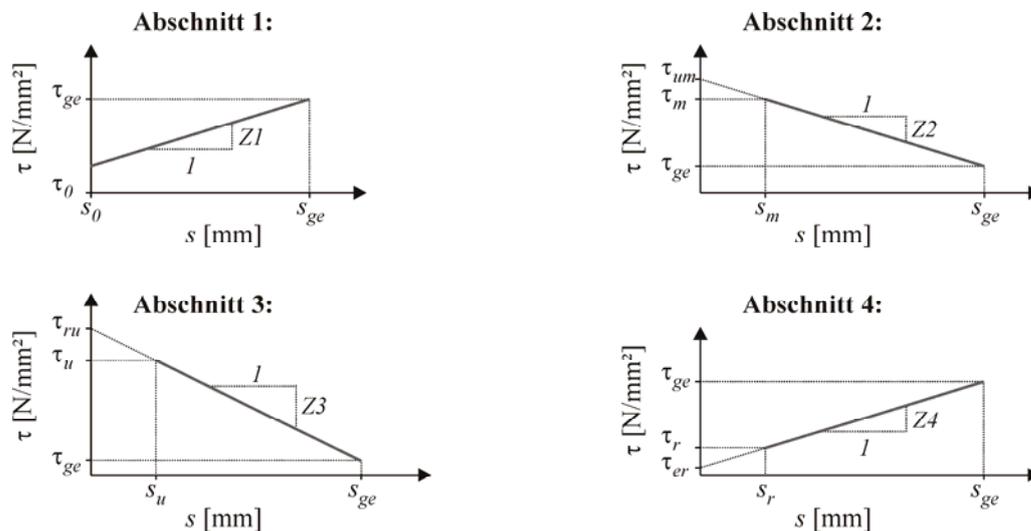


Bild 14: Bezeichnungen der multilinenen VSB zur Berechnung der Endverankerungslänge

Fig. 14: Terms used in the multilinear BSR for the calculation of the development length

Abschnitt 1 – Lösung für linear ansteigende Schubspannungen

Für $s_{ge} < s_m$ ergibt sich für den ansteigenden ersten Bereich der VSB eine erforderliche Verankerungslänge $l_E = l_1$ gemäß Gleichung (12) und Gleichung (13) zu:

$$l_1(s_{ge}) = \frac{l}{k_1} \times \ln \left(\frac{l}{\tau_0 \times u_G + N_{G,1} \times k_1} \times \left((\tau_0 + s_{ge} \times Z_1) \times u_G + \sqrt{\left((\tau_0 + s_{ge} \times Z_1)^2 - \tau_0^2 \right) \times u_G^2 + N_{G,1}^2 \times k_1^2} \right) \right) \quad (12)$$

$$l_E(s_{ge}) = l_1(s_{ge}) \quad (13)$$

Bei einer Anordnung des Anstieges in Abschnitt 1 der VSB ist, wie in Kapitel 2 beschrieben, der Wert $N_{G,1}$ der Normalkraft am freien Faserende mit null anzunehmen. Bei Verwendung in einem anderen Bereich ist der jeweilige Endwert $N_{G,x}$ der Normalkraft im Garn des vorhergehenden Bereiches einzusetzen.

Abschnitt 2 – Lösung für linear abfallende Schubspannungen

Für $s_m < s_{ge} < s_u$ kann die Verankerungslänge l_2 für den abfallenden Bereich der VSB gemäß Gleichung (14) ermittelt werden. Die Gesamtlänge des erforderlichen Verankerungsbereiches l_E ergibt sich anschließend durch das Aufsummieren der Verankerungslänge der jeweiligen bereits aktivierten Bereiche (Gleichung (15)).

$$l_2(s_{ge}) = \frac{l}{k_2} \times \arcsin \left(u_G \times \frac{\tau_m \times \sqrt{\left(\tau_m^2 - (\tau_{um} + s_{ge} \times Z_2)^2 \right) \times u_G^2 + N_{G,2}^2 \times k_2^2} - N_{G,2} \times k_2 \times (\tau_{um} + s_{ge} \times Z_2)}{\tau_m^2 \times u_G^2 + N_{G,2}^2 \times k_2^2} \right) \quad (14)$$

$$l_E(s_{ge}) = l_1 + l_2(s_{ge}) \quad (15)$$

Abschnitt 3 – Lösung für linear abfallende Schubspannungen

Für $s_u < s_{ge} < s_r$ berechnen sich die Längen l_3 und l_E für den abfallenden Bereich der VSB gemäß Gleichung (16) und Gleichung (17) zu:

$$l_3(s_{ge}) = \frac{l}{k_3} \times \arcsin \left(u_G \times \frac{\tau_u \times \sqrt{\left(\tau_u^2 - (\tau_{ru} + s_{ge} \times Z_3)^2 \right) \times u_G^2 + N_{G,3}^2 \times k_3^2} - N_{G,3} \times k_3 \times (\tau_{ru} + s_{ge} \times Z_3)}{\tau_u^2 \times u_G^2 + N_{G,3}^2 \times k_3^2} \right) \quad (16)$$

$$l_E(s_{ge}) = l_1 + l_2 + l_3(s_{ge}) \quad (17)$$

Abschnitt 4 – Lösung für linear ansteigende Schubspannungen

Für $s_{ge} \geq s_r$ kann für den wieder leichten Anstieg im Reibebereich der VSB die Verankerungslänge l_4 und l_E gemäß Gleichung (18) und Gleichung (19) bestimmt werden.

$$l_4(s_{ge}) = \frac{l}{k_4} \times \ln \left(\frac{l}{\tau_r \times u_G + N_{G,4} \times k_4} \times \left((\tau_r + s_{ge} \times Z_4) \times u_G + \sqrt{\left((\tau_r + s_{ge} \times Z_4)^2 - \tau_r^2 \right) \times u_G^2 + N_{G,4}^2 \times k_4^2} \right) \right) \quad (18)$$

$$l_E(s_{ge}) = l_1 + l_2 + l_3 + l_4(s_{ge}) \quad (19)$$

4.7 Korrektur des Startwertes τ_0

Für die Berechnung der maximalen Auszugswiderstände von Endverankerungs- und Übergreifungsbereichen zugbeanspruchter textiler Bewehrungen in Textilbeton ist bei den für textile Bewehrungen typischen Verläufen der VSB im Regelfall ein Hineinschlupfen des freien Garnendes s_{fe} erforderlich (Bild 11).

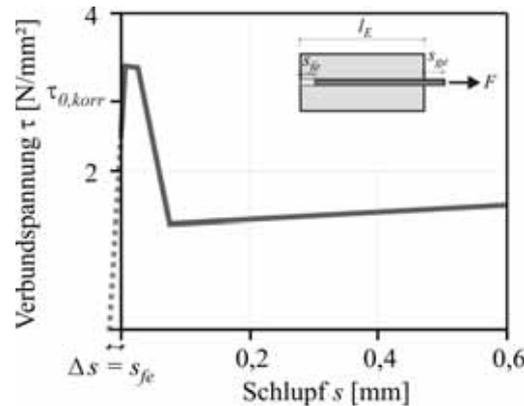


Bild 15: Modifizierte VSB mit Berücksichtigung des Schlupfes des freien Garnendes s_{fe}

Fig. 15: Modified BSR taking account of a relative displacement of the free yarn end s_{fe}

Dies kann rechnerisch für das hier gezeigte Modell durch eine Korrektur der verwendeten VSB mit einer Vergrößerung des Startwertes der Verbundspannung τ_0 berücksichtigt werden (Bild 15). Die restlichen Bereiche der VSB sind dazu gleichzeitig in Richtung der y-Achse zu verschieben. Das Maß der Verschiebung $\Delta s = s_{fe}$ nach Gleichung (20) entspricht dabei der zur Verbundspannung τ_0 zugehörigen Relativverschiebung des freien Garnendes s_{fe} im Abschnitt 1 der VSB.

$$\Delta s(\tau_{0,korr}) = \frac{\tau_{0,korr} \times s_m}{\tau_m} \quad (20)$$

Die maximale Garnauszugslast für die jeweilige Verankerungslänge ergibt sich im Anschluss genau dann, wenn durch Variation des Startwertes der Verbundspannung $\tau_{0,korr}$ das Integral der Verbundspannung über die jeweilige Einbindelänge maximal wird.

4.8 Berechnung der erforderlichen Endverankerungs- und Übergreifungslänge in Abhängigkeit der Garnzugkraft

Anhand der beschriebenen analytischen Zusammenhänge kann nun die Berechnung der jeweils erforderlichen minimalen Endverankerungs- und Übergreifungslängen l_E zw. $l_{\dot{U}}$ für

verschiedene Garnzugkräfte F_G erfolgen. Die Materialkennwerte der textilen Bewehrung werden, wie in Tabelle 1 und Abschnitt 4.2 beschrieben, angenommen.

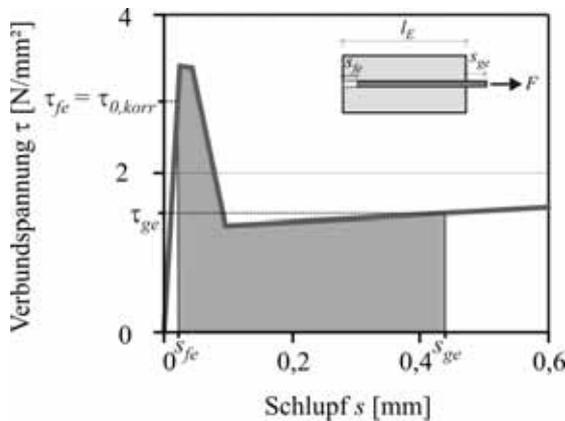


Bild 16: Aktivierte Bereiche der VSB

Fig. 16: Activated sections of the BSR

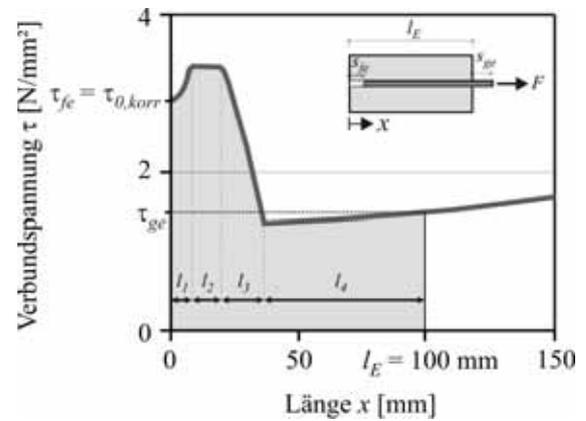


Bild 17: Verteilung der Verbundspannungen über die Verankerungslänge

Fig. 17: Distribution of the bond stresses along the development length

In Bild 16 sind hierzu für eine Garnauszugskraft F_G von 633 N ($l_{E,erf} = l_{Ü,erf} = 100$ mm) beispielhaft die aktivierten Bereiche der VSB unter Annahme eines Startwertes der Verbundspannungen von $\tau_{0,korr} = 2,95$ N/mm² dargestellt. Weiterhin ist in Bild 17 die zugehörige Verteilung der Verbundspannungen über die minimal erforderlichen Endverankerungs- bzw. Übergreifungsbereiche gezeigt.

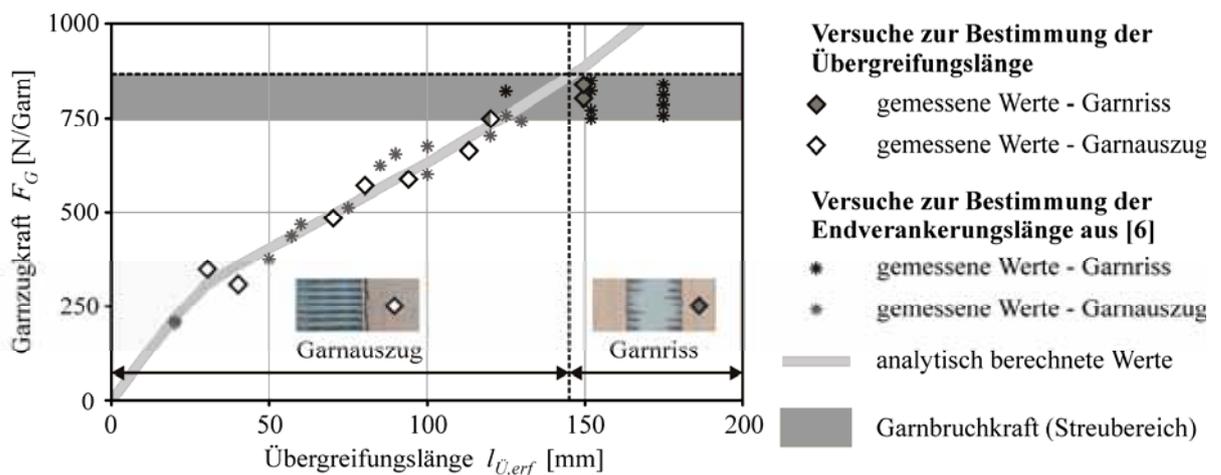


Bild 18: Gegenüberstellung der berechneten und der experimentell bestimmten Ergebnisse

Fig. 18: Comparison of the analytically calculated and experimentally determined results

Die analytisch bestimmten Verankerungs- und Übergreifungslängen im Grenzzustand des Garnauszuges sind für Garnzugkräfte von 0 bis 1 000 N/Garn in Bild 18 dargestellt. Vergleichend zu den berechneten Werten sind die experimentell ermittelten Übergreifungslängen sowie die zugehörigen Endverankerungslängen aus LORENZ/ORTLEPP [6] gegenübergestellt.

4.9 Diskussion und Gegenüberstellung der Ergebnisse

Bei einer Gegenüberstellung der experimentell bestimmten Versagenslasten mit den jeweils zugehörigen analytisch berechneten Werten ist eine gute Übereinstimmung erkennbar. Anhand der beschriebenen Zusammenhänge können folglich im Grenzzustand des Garnauszuges für beliebige multilineare Formen der VSB die erforderlichen Endverankerungs- und Übergreifungslängen l_E bzw. $l_{\bar{U}}$ in Abhängigkeit der Faserauszugskraft F_G bestimmt werden. Mit Hilfe des vorgestellten Berechnungsalgorithmus ist zukünftig eine versuchstechnisch einfachere Prognose der erforderlichen Übergreifungs- und Endverankerungslängen unter Nutzung der in LORENZ/ORTLEPP [7] vorgestellten Textilauszugsversuche möglich. Die in Kapitel 3 beschriebenen, sehr aufwendigen experimentellen Versuche zur Bestimmung der Übergreifungslängen sind daher bei kommenden Untersuchungen nur noch zur stichprobenartigen Überprüfung der analytisch berechneten Werte erforderlich. Die in ASSAM/RICHTER [10] beschriebenen unabhängigen numerischen Untersuchungen bestätigen die hier dargestellten Ergebnisse.

5 Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der analytischen und experimentellen Bestimmung der erforderlichen Übergreifungslängen textiler Bewehrungen innerhalb von Bauteilen aus textilbewehrtem Beton. Die Ergebnisse der experimentellen Übergreifungsversuche zeigen gute Übereinstimmungen mit den in LORENZ/ORTLEPP [6] experimentell bestimmten Endverankerungslängen. Dies zeigt, dass die Übergreifungslängen im Grenzzustand des Garnauszuges durch die Rissbildung innerhalb der Übergreifungsstöße nur unwesentlich beeinflusst werden. Im Grenzzustand des Garnauszuges entspricht demzufolge die Übergreifungslänge dem 1,0-fachen Wert der Endverankerungslänge. Bei einer Gegenüberstellung der experimentell bestimmten Versagenslasten mit den jeweils zugehörigen analytisch berechneten Endverankerungs- und Übergreifungslängen konnte eine gute Übereinstimmung festgestellt werden. Damit ist eine umfassende rechnerische Bestimmung der Endverankerungs- und Übergreifungslängen textilbewehrter Verstärkungsschichten aus Feinbeton unter Beachtung der jeweiligen Garnzugkraft der textilen Bewehrung geschaffen. Die dargestellten Zusammenhänge bilden damit eine wesentliche Grundlage für die Endverankerung und Übergreifung textiler Bewehrungen in Verstärkungsschichten aus textilbewehrtem Beton.

6 Literatur

- [1] LORENZ, E.; ORTLEPP, R.; HAUSDING, J.; CHERIF, C.: *Effizienzsteigerung von Textilbeton durch Einsatz textiler Bewehrungen nach dem erweiterten Nähwirkverfahren*. Beton- und Stahlbetonbau 106 (2011) 1, S. 21-30 - DOI: 10.1002/best.201000072.
- [2] HAUSDING, J.; CHERIF, C.: *Improvements in the warp knitting process and new patterning techniques for stitch-bonded textiles*. In: The Journal of the Textile Institute. 101 (2010), 3, pp. 187-196 (doi:10.1080/00405000802370354).
- [3] CURBACH, M.; JESSE, F.: Beton im Textilbeton – Entwicklung, In: Lohaus, L. (Hrsg.): *Ingenieurbaustoffe – konstruktive Wege in die Zukunft. Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Harald Schorn*, Universität Bochum, Eigenverlag, 2001, S. 29-44.
- [4] JESSE, F.: *Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix*. Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Massivbau, Diss., 2004 - urn:nbn:de:swb:14-1122970324369-39398.
- [5] DIN EN 18555-3 (1982-09): *Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; - Teil 3: Festmörtel; Bestimmung der Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und Rohdichte*.
- [6] LORENZ, E.; ORTLEPP, R.: *Anchoring Failure Mechanisms of Textile Reinforced Concrete Strengthening of RC Structures*. In: Proceedings of the ACI 2010 Fall Convention, Pittsburgh, 24.-28.10.2010., 2010.
- [7] LORENZ, E.; ORTLEPP, R.: *Bond Behavior of Textile Reinforcements - Development of a Pull-Out Test and Modeling of the Respective Bond versus Slip Relation*. In: Naaman, A. E.; Reinhardt, H. W. (Hrsg.): Proceedings of the RILEM-International Workshop "High Performance Fiber Reinforced Cement Composites - HPRCC 6", Ann Arbor, 19. - 24.06.2011.
- [8] RICHTER, M.: *Entwicklung mechanischer Modelle zur analytischen Beschreibung der Materialeigenschaften von textilbewehrtem Feinbeton*. Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Mechanik und Flächentragwerke, Diss., 2004
- [9] ZASTRAU, B.; RICHTER, M.; LEPENIES, I.: *On the Analytical Solution of Pullout Phenomena in Textile Reinforced Concrete*. In: Journal of Engineering Materials and Technology 125 (2003), pp. 38-43 (revised paper).
- [10] ASSAM, A.; RICHTER, M.: *Investigation of Stress Transfer Behavior in Textile Reinforced Concrete with Application to Reinforcement Overlapping and Development Lengths*. In: CURBACH, M. (Hrsg.); ORTLEPP, R. (Hrsg.): *Textilbeton in Theorie und Praxis: Tagungsband zum 6. Kolloquium zu Textilbewehrten Tragwerken (CTRS6)*, Berlin, 19.-20.9.2011. SFB 528, TU Dresden, Eigenverlag, 2011, S. 103-116.