

**Die Erstveröffentlichung dieses Beitrages erfolgte in der Zeitschrift:  
Beton- und Stahlbetonbau 99 (2004) 6, S. 466–471, Verlag Ernst & Sohn, Berlin**

**Verstärken mit textilbewehrtem Beton –  
Experimente und numerische Simulation**

Strengthening with Textile Reinforced Concrete –  
Experimental Investigations and Numerical Simulation

Prof. Dr.-Ing. Manfred Curbach, Dresden

Prof. Dr.-Ing. Bernd Möller, Dresden

Dipl.-Ing. Anett Brückner, Dresden

Dipl.-Ing. Frank Steinigen, Dresden

**Zusammenfassung**

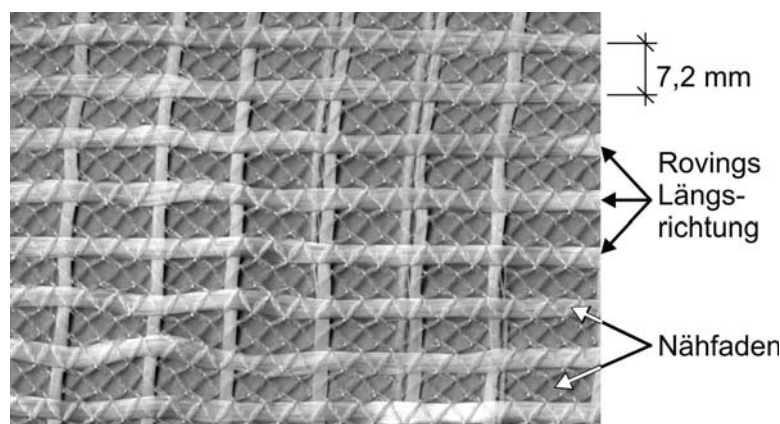
Zur Verbesserung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit können Stahlbetontragwerke mit textilbewehrten Feinbetonschichten nachträglich verstärkt werden. Im Beitrag wird der Nachweis anhand experimenteller und numerischer Untersuchungen erbracht.

**Abstract**

The strengthening by textile reinforced concrete noticeably increases both the ultimate load bearing behaviour as well as the serviceability. This will be shown in the paper using experimental results and numerical simulations of strengthened concrete members.

## 1 Einleitung

Textilbewehrter Beton steht für eine neue Verstärkungstechnologie, mit der die Tragfähigkeit eines bestehenden Bauwerkes verbessert und dessen Sicherheitsniveau erhöht werden kann. Bei dieser Verstärkungstechnologie wird auf die Oberfläche des Altbetons eine textilbewehrte Feinbetonschicht aufgetragen. Die textile Bewehrung besteht aus Filamentgarnen (Rovings), die durch einen Nähfaden miteinander verbunden und im Feinbeton eingebettet sind (Bild 1). Textile Bewehrungsstrukturen können aus verschiedenen Fasermaterialien wie alkaliresistentem Glas (sog. AR-Glas), Polyethylen oder Karbon bestehen. Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen kamen Fasern aus AR-Glas zur Anwendung.



**Bild 1:** Textiles Gelege als Bewehrungsmaterial der Feinbetonverstärkung

**Fig. 1:** Textile fabric as reinforcement of the fine grained concrete strengthening

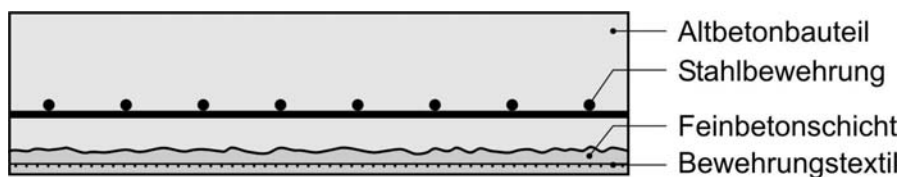
Mögliche Anwendungen sind die Verstärkung von Platten bei vorwiegender Biegebeanspruchung oder die Verstärkung von Balken bei vorherrschender Schubbeanspruchung. Mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen konnte die Wirksamkeit von Verstärkungen aus textilbewehrtem Feinbeton nachgewiesen werden. Zur Prognose der Tragfähigkeit textilverstärkter Bauwerke wird das Tragverhalten numerisch simuliert. Dafür wurden geeignete numerische Modelle entwickelt, die mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen verifiziert werden.

Anhand einaxialer Zugversuche an Dehnkörpern wurden die Materialmodelle für textilbewehrten Feinbeton verifiziert. Besonderheiten dieses Verbundwerkstoffes, wie die von Materialpunkt zu Materialpunkt streuender Zugfestigkeiten des Feinbetons oder die kaum zu vernachlässigende Unschärfe der Zugfestigkeit der AR-Glas-Rovings, werden mit adäquaten unscharfen Datenmodellen berücksichtigt.

Experimentelle Untersuchungen an großformatigen textilverstärkten Bauteilen gewähren Einblick in grundlegende Verstärkungsphänomene. Exemplarisch wird das Tragverhalten biegeverstärkter Einfeldplatten und querkraftverstärkter Balken dargestellt.

## 2 Zum Tragverhalten von textilverstärkten Stahlbeton-Konstruktionen

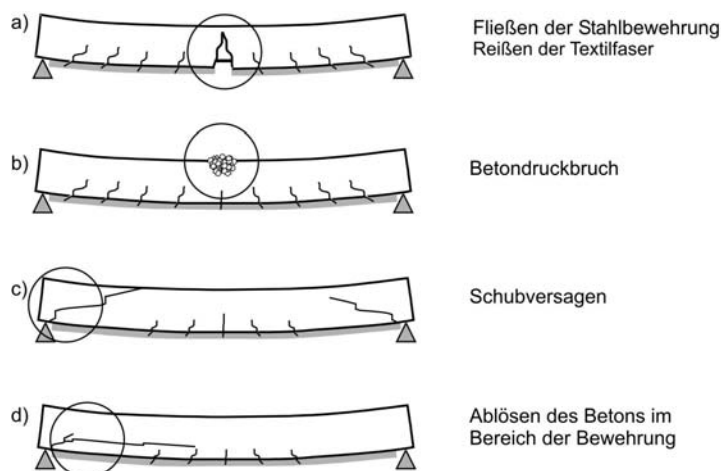
Durch Verstärken von Stahlbeton (Altbeton) mit textilbewehrtem Feinbeton entsteht ein äußerst komplexer Verbundwerkstoff (Bild 2). Die textilbewehrte Feinbetonverstärkung wird dabei lagenweise auf die zuvor durch Sandstrahlen aufgeraute Oberfläche des alten Stahlbetonbauteils aufgebracht. Durch Auflaminieren oder im Sprühverfahren werden abwechselnd Feinbeton und Textil in mehreren Lagen aufgetragen. Das Tragverhalten von Konstruktionen aus diesem Verbundwerkstoff wird von den Eigenschaften des stahlbewehrten Betons, des textilbewehrten Feinbetons und des Verbundes zwischen beiden bestimmt. Ein gestörter Verbund zwischen altem Bauteil und Verstärkung führt zum Ablösen einzelner Schichten und kann Ausgangspunkt des Versagens der Konstruktion werden. Die Ablösung der Verstärkung wird durch abhebende Kräfte senkrecht zur Verstärkungsschicht verursacht und kann in verschiedenen Ebenen eintreten [1]. Im numerischen Modell wird die Ablösung der Verstärkungsschicht allgemein als Delamination zwischen zwei Schichten bezeichnet.



**Bild 2:** Verbundwerkstoff aus stahlbewehrtem Beton und textilbewehrtem Feinbeton

**Fig. 2:** Composite material composed of steel reinforced concrete and textile reinforced fine grained concrete

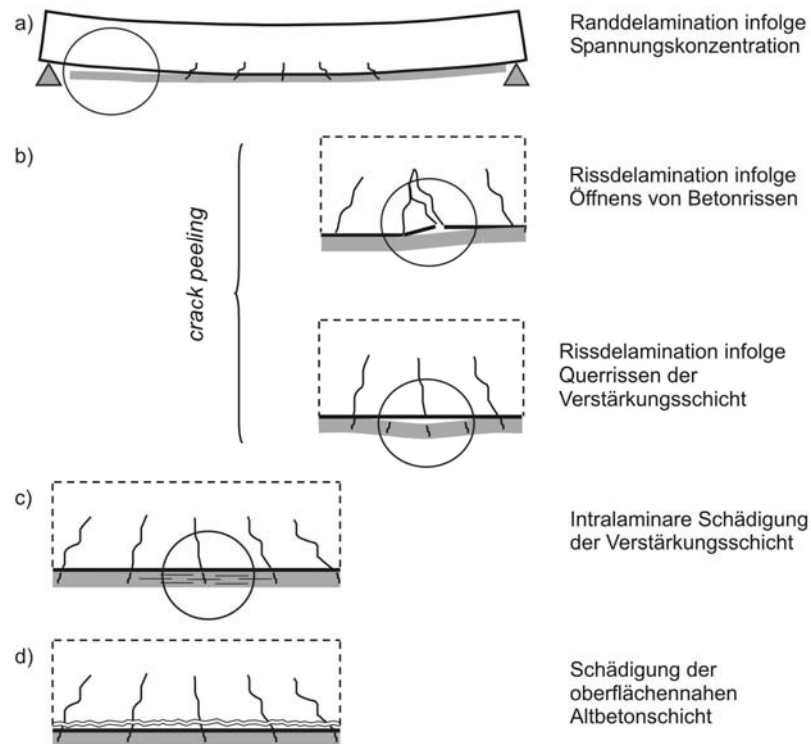
Das Tragverhalten des stahlbewehrten Betons ist hinreichend bekannt. Es wird von der Rissbildung, dem Verbund zwischen Stahlbewehrung und Beton, dem nichtlinearen Materialverhalten von Beton und Bewehrungsstahl sowie dem Langzeitverhalten des Betons beeinflusst. Tritt an textilverstärkten Bauteilen bei Laststeigerung keine Delamination auf, d. h. kein Versagen im Bereich der Kraftübertragung vom Altbeton zum Feinbeton, werden die in Bild 3 dargestellten Versagenszustände beobachtet. Beim Fließen der Stahlbewehrung und folgendem oder gleichzeitigem Reißen der textilen Bewehrung ist die Tragfähigkeit vollständig ausgeschöpft. Durch geeignete konstruktive Maßnahmen können die drei anderen Versagenszustände (Bild 3 b-d) vermieden werden.



**Bild 3:** Versagenszustände ohne Delamination

**Fig. 3:** Failure modes without delamination

Tritt jedoch Delamination auf, sind bei Laststeigerung weitere Versagenszustände zu beachten (Bild 4). Randedelamination tritt als Folge von Spannungskonzentration auf, die sich an freien Rändern, Öffnungen und anderen strukturellen Diskontinuitäten ausbildet. Die dort lokal auftretenden transversalen Spannungskomponenten führen zum Verlust des Verbundes. Rissdelamination entsteht als Folge von Rissen im Altbeton oder im Feinbeton, die lastabhängige strukturelle Diskontinuitäten darstellen.

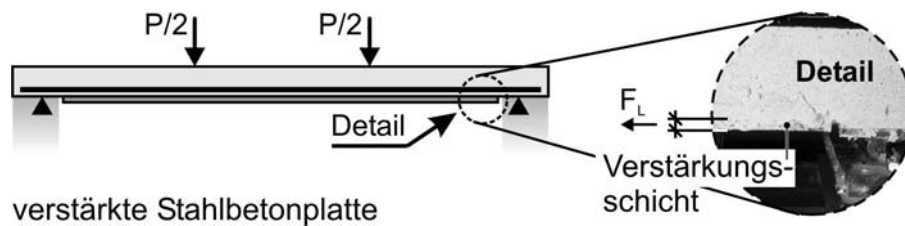


**Bild 4:** Schädigungszustände mit Delamination  
**Fig. 4:** State of damage with delamination

Schließlich kann Delamination in Form intralaminarer Schädigung der Verstärkungsschicht auftreten. Diese spezifische Form der Delamination ist insbesondere bei zementgebundener Feinbetonschicht zu beobachten, weil bei dieser die Haftung zwischen Fasern und Feinbeton wesentlich geringer ist als bei einer Polymermatrix. Auch der Fertigungsprozeß beeinflusst die Neigung zu intralaminarer Schädigung. Bei intralaminarer Delamination ist flächiges Ablösen des Feinbetons von der häufig mehrlagigen textilen Bewehrung zu beobachten. Geringe Maschenweite der textilen Bewehrung und damit geringer Feinbetonanteil zwischen den Rovings fördern diese Versagensform [1]. Die Trennung findet progressiv auf Mikroniveau durch Versagen des Feinbetons zwischen den Rovings statt. Der intralaminare Verbundverlust führt zu schneller Degradation bis hin zum vollständigen Versagen.

Ein Verbundversagen im Altbeton des zu verstärkenden Bauteils tritt ein, wenn die Oberflächenhaftzugfestigkeit des zu verstärkenden Bauteils so gering ist, dass die Zugkraft aus der Verstärkungsschicht nicht mehr in das Altbetonbauteil eingeleitet werden kann. Der Versagensmechanismus beim Verbundbruch im Altbeton wird in [2] beschrieben.

Von besonderer Bedeutung ist die Verankerung der Verstärkung, z.B. der Biegeverstärkung in Bild 5.



**Bild 5:** Verankerung der Biegeverstärkung  
**Fig. 5:** Anchoring of flexural strengthening

Die Zugkraft aus der Verstärkungsschicht muss am Ende wieder in den Altbeton des zu verstärkenden Bauteils eingeleitet werden. Um diese Zugkraft über die Verbundfuge in den Altbeton einzuleiten, ist eine bestimmte Verbundlänge erforderlich, die u. a. von den Eigenschaften der textilen Bewehrung abhängt. Ab einer bestimmten erforderlichen Verbundlänge kann die Zugtragfähigkeit der Verstärkungsschicht erreicht werden bevor ein Verbundversagen eintreten kann. Steht nur eine kürzere Verbundlänge zur Verfügung, so kann nur ein Teil der Zugtragfähigkeit der Verstärkungsschicht im Altbeton verankert werden. Genauere Untersuchungen zu diesen Mechanismen der Kraftübertragung von der textilbewehrten Verstärkungsschicht in den Altbeton finden sich in [3] und [1].

Für das Verbundverhalten nachträglich aufgeklebter Stahllaschen oder CFK-Lamellen zur Verstärkung von alten Stahlbetonbauteilen sind bereits entsprechende Verbundmodelle in der Literatur zu finden [4], [5]. Im Gegensatz zu Stahllaschen und CFK-Lamellen zeigen Verstärkungen aus textilbewehrtem Beton – durch die eintretende Rissbildung – ein ausgeprägtes nichtlineares Materialverhalten [3]. Des weiteren ist durch die sandgestrahlte Oberfläche des Altbetons und das direkte Auflaminieren bzw. Aufsprühen eine starke Verzahnung zwischen Untergrund und Verstärkung gegeben. Dies führt zu einem grundsätzlich anderem Verformungsverhalten und Versagensmechanismus als dies vom Verbundverhalten von Kleblamellen her bekannt ist [1].

In den bisherigen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die Verankerung der textilbewehrten Verstärkungsschicht bereits bei relativ geringen Verbundlängen sichergestellt werden kann. Aufgrund dieser relativ kurzen erforderlichen Verbundlängen tritt auch bei geringen Rissabständen im Altbeton der nachfolgend beschriebenen verstärkten Bauteile keine Verbundentkopplung ein.

Ein Versagen zwischen Altbeton und Feinbeton kann bei ausreichender Untergrundvorbehandlung, z. B. Sandstrahlen, ausgeschlossen werden.

Der Verbund zwischen dem Feinbeton und den eingebetteten Rovings ist – wie experimentell bestätigt (SFB 528, TP A2) – diskontinuierlich und von der Eindringtiefe der Hydratationsprodukte abhängig. Er unterscheidet sich somit grundsätzlich vom Verbund zwischen Bewehrungsstahl und Beton. Der diskontinuierliche Verbund durch Hydratationsprodukte und Reibung zwischen dem Feinbeton und den äußeren Filamenten sowie zwischen den äußeren und den inneren Filamenten kann mit Hilfe einer abnehmenden Steifigkeit der Rovings vom Rand zum Kern modelliert werden.

Für die numerische Simulation des Verbundverhaltens spielt die zutreffende Erfassung der Datenunschärfe, d. h. die Schwankungen der Materialparameter, eine größere Rolle als beim klassischen Stahlbeton [6]. Die Unschärfe wird u. a. durch die Inhomogenität der textilen Bewehrung und des Feinbetons verursacht. Die Zugfestigkeit der Filamente, aus denen die Ro-

vings bestehen, schwankt insbesondere infolge Struktur- und Oberflächendefekten der Filamente sowie infolge der herstellungsbedingten Unterschiede der Filament-Querschnittsfläche. Wegen der längs der Filamente willkürlich verteilten Defekte ist die Zugfestigkeit eine Funktion der zugbeanspruchten Länge. Die Zugfestigkeit ist deshalb eine unscharfe Größe und kann nicht als deterministischer Wert angegeben werden.

Eine weitere, ebenfalls signifikant unscharfe Größe ist die Zugfestigkeit des Feinbetons. Der Einfluss der unscharfen Zugfestigkeit kann an mit Rovings bewehrten Feinbeton-Dehnkörpern studiert werden. Beim einaxialen Zugversuch beginnt die Rissbildung nicht – wie theoretisch bei homogenem Material zu erwarten – gleichzeitig sondern schreitet sukzessive fort. Als unscharfes Datenmodell für die genannten Materialparameter eignet sich ganz besonders das Unschärfemodell *Fuzzy-Zufälligkeit* [7]. Objektive (aleatorische) Informationen in Form von Stichproben und subjektive (epistemische) Bewertungen können in diesem Datenmodell adäquat berücksichtigt werden. Die Unschärfemodelle Zufälligkeit und Fuzziness sind als Sonderfälle enthalten. Durch die Berücksichtigung fuzzy-zufälliger Parameter bei der numerischen Simulation erhält man - analog zu den Experimenten - unscharfe Ergebnisse. Beispielsweise ist das Ergebnis der Simulation der Dehnkörperversuche eine fuzzy-zufällige Spannungs-Dehnungs-Abhängigkeit [8].

Die numerische Simulation des Tragverhaltens und die Bestimmung des Sicherheitsniveaus basiert auf dem in diesem Heft im Beitrag „Numerische Modellierung von textilbewehrtem Beton“ vorgestellten Multi-Referenzebenen-Modell (MRM). Die Modellierung des textilbewehrten Feinbetons kann beim MRM in zwei Varianten erfolgen. Bei Variante I werden Feinbeton und textile Bewehrung getrennt (aber nicht homogenisiert) modelliert, bei Variante II werden beide Materialkomponenten zu einem homogenisierten Kontinuum verschmiert. Bei der Betrachtung als homogenes Material werden für unterschiedliche Garnfeinheiten und Fasergehalte spezielle Spannungs-Dehnungs-Abhängigkeiten verwendet, die aus einaxialen Zugversuchen (s. Beitrag „Tragverhalten von textilbewehrtem Beton“) abgeleitet werden. Dieses Vorgehen ist nur bei einsinniger Belastung möglich, bei zyklischer Belastung wird nach Variante I modelliert [9]. Dabei wird die Verstärkungsschicht in mehrere Subschichten unterteilt. Der Feinbeton wird mit dem endochronen Betonstoffgesetz nach Bažant [10] beschrieben. Parallel zueinander liegende Rovingscharen werden als einaxial wirkende verschmierte Bewehrungsschichten modelliert. Für die Glasfilamente wird dabei ein nichtlinear elastisch-sprödes Materialgesetz eingesetzt. Die Schädigung der Randfilamente und die damit einhergehende Reduzierung des tragenden Rovingquerschnittes wird mit einer dehnungsabhängigen Schädigungsfunktion modelliert.

In den beiden folgenden Abschnitten werden Versuchsergebnisse mit Ergebnissen der numerischen Simulation einer Platte und eines Balken verglichen.

### 3 Biegeverstärkung von Platten

Um die Biegetragfähigkeit textilverstärkter Stahlbeton-Konstruktion beurteilen zu können, werden Experimente an Versuchsplatten mit einer Breite von 0,60 m und einer Stützweite von 1,60 m durchgeführt. Die Verstärkungsschicht wird in einzelnen Lagen auf die Unterseite der Platten aufgebracht. Zuvor ist die Oberfläche der Platten durch Sandstrahlen von den Feinkornanteilen zu befreien, um einen ausreichenden Verbund zwischen Altbeton und Verstärkungsschicht zu gewährleisten. Anschließend werden im Wechsel je eine Feinbetonschicht und eine textile Bewehrungslage aufgebracht. Pro Lage werden Schichtdicken von ca. 2 mm erreicht.

Als textile Bewehrung wurde für die Biegeverstärkung ein biaxiales Gelege mit einem Flächengewicht von etwa 210 g/m<sup>2</sup> verwendet. In der Haupttragrichtung enthält dieses Gelege AR-Glasfasern der Feinheit 1100 tex im Abstand von 7,2 mm. Pro Faser entspricht das einer Querschnittsfläche von ca. 0,39 mm<sup>2</sup>. In der Querrichtung beträgt der Bewehrungsgrad etwa 25 % der Längsbewehrung. Der Stahlbewehrungsgrad der Platten lag bei 0,2 bzw. 0,5 %.

Maßgebende Kriterien für die Dimensionierung der textilbewehrten Verstärkungsschichten sind:

- die geforderte Tragfähigkeit des verstärkten Bauteils,
- das Kriterium der Mindestbewehrung sowie
- die ausreichende Verankerung der textilbewehrten Verstärkungsschicht.

Nur wenn eine ausreichende Verankerung gewährleistet ist, können die Zugkräfte der textilbewehrten Verstärkungsschicht sicher in die Altstruktur abgetragen werden. Die dafür erforderliche Verbundwirkung wird – wie in [3] und [1] beschrieben – anhand experimenteller Untersuchungen an Verbundprobekörpern untersucht.

Der Nachweis der prinzipiellen Wirkung der Verstärkung erfolgte zunächst an Platten, deren Verstärkungsschicht über die Auflagerlinie hinausreichte. Da jedoch in bestehenden Bauwerken der Auflagerbereich unzugänglich ist, wurden zusätzlich Platten geprüft, deren Verstärkungsschicht vor dem Auflager endete. Mit beiden Verankerungen wurden im Versuch vergleichbare Bruchlasten erzielt, so dass eine ausreichende Verankerung vor dem Auflager gegeben ist.

Die Prüfung der Tragfähigkeit erfolgte im Vierpunkt-Biegeversuch, um Querkrafteinflüsse im Bereich des maximalen Biegemomentes zu vermeiden. Zum Vergleich dienten die Versuchsergebnisse der unverstärkten Referenzplatten. Innerhalb des Versuchsprogramms wurden die Anzahl der Textillagen sowie der Stahlbewehrungsgrad variiert.

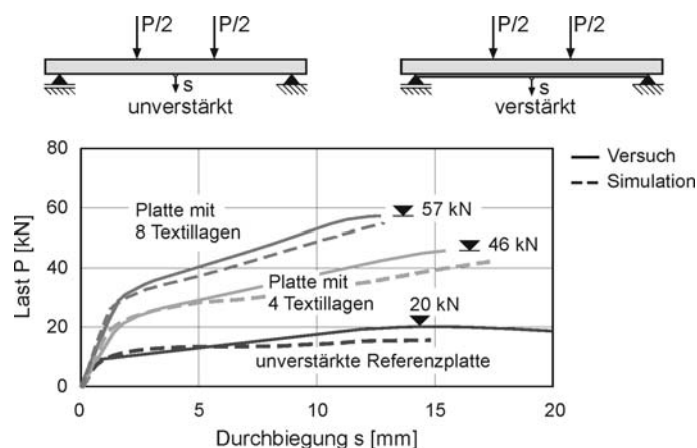


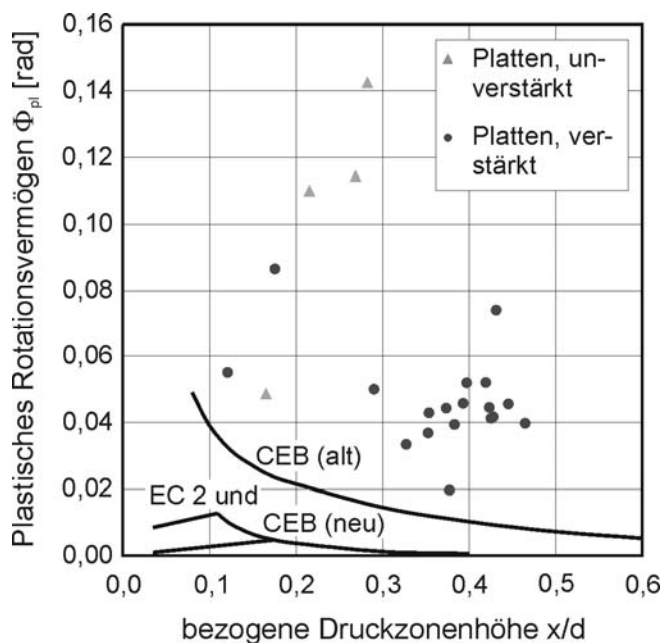
Bild 6: Kraft-Verformungs-Diagramm

Fig. 6: Load-displacement-diagram

Im Kraft-Verformungs-Diagramm (Bild 6) zeigen alle Platten das für Stahlbeton typische Verhalten mit den Zuständen I (ungerissen), II (Rissbildung) und III (Fließen des Bewehrungsstahls). Erwartungsgemäß ist die Steifigkeit der verstärkten Platten größer als die der unverstärkten Platten, weil durch die zusätzlich aufgebrachte Verstärkungsschicht das Trägheitsmoment im ungerissenen Zustand größer wird. Nach Abschluss der Rissbildung (Zustand III) ergibt sich durch die Tragwirkung der textilen Bewehrung eine höhere Steifigkeit.

Neben der Steigerung der Tragfähigkeit werden insbesondere die Eigenschaften im Gebrauchszustand durch die textile Bewehrung positiv beeinflusst. Bezogen auf das Gebrauchslastniveau treten deutlich geringere Verformungen auf, die mit dem fein verteilten Rissbild des Feinbetons zu begründen sind.

Für die Entwicklung eines semiprobabilistischen Sicherheitskonzeptes ist das Verformungsvermögen, d. h. die Duktilität der verstärkten Platten im Bruchzustand, von Bedeutung. Abhängig vom Verformungsvermögen wird für die Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte zwischen spröden, sehr plötzlichen und angekündigten Versagensformen unterschieden. Das Maß für die Duktilität ist das plastische Rotationsvermögen.



**Bild 7:** Rotationsvermögen  $\Phi_{pl}$  über  $x/d$

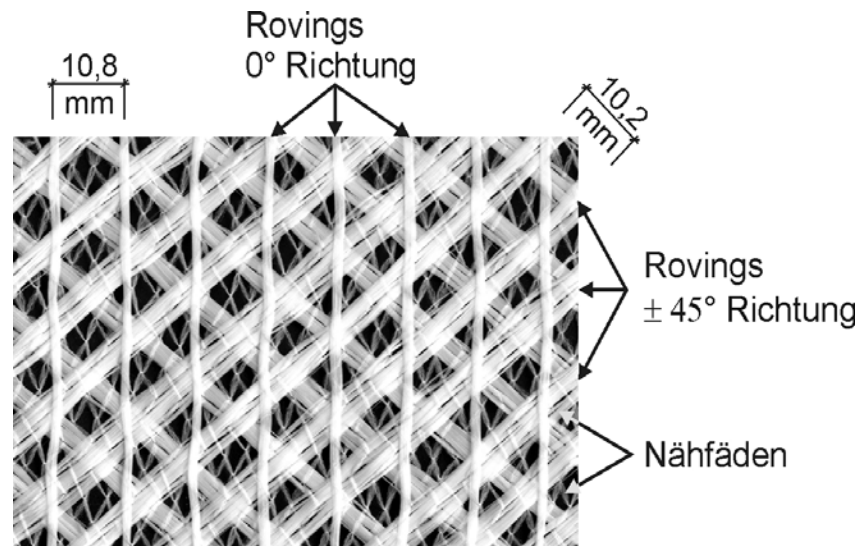
**Fig. 7:** Rotation capacity  $\Phi_{pl}$  versus  $x/d$

In Bild 7 werden die gemessenen Rotationswinkel der Plattenversuche mit den Empfehlungen des CEB [11] und dem Eurocode 2 verglichen. Für alle geprüften Platten liegt die Gesamtro-tation oberhalb der angegebenen Grenzlinien, d. h. die textilverstärkten Platten besitzen ein ausreichendes Rotationsvermögen.

Die Ergebnisse der Experimente werden zur Verifikation von Modellen zur numerischen Simulation genutzt. In Bild 6 sind die Ergebnisse der numerischen Simulation den Versuchergebnissen gegenübergestellt. Die numerische Simulation erfolgte mit gemittelten Materialparametern, die an Prüfkörpern ermittelt wurden. In Ergänzung zu den numerischen Modellen wird ein querschnittsbezogenes Bemessungskonzept entwickelt [12].

#### 4 Balken mit Querkraftverstärkung

Als Grundlage für die Entwicklung eines Bemessungsmodells für die Querkraftverstärkung dienen die erreichbaren Traglasten sowie möglichen Versagensmechanismen textilverstärkter Balken und Plattenbalken im Versuch [13].



**Bild 8:** Textiles Gelege für Querkraftverstärkung

**Fig. 8:** Textile fabric for shear strengthening

Für die textile Verstärkung wird ein Gelege verwendet (Bild 8), dessen Rovings mit einem Neigungswinkel von  $\pm 45^\circ$  an den Verlauf des gedachten Fachwerkmodells angepasst sind. Hergestellt ist das Gelege aus zwei gefachten AR-Glasfäden mit je einer Feinheit von 1100 tex für die geneigten Rovings und Kettfäden in  $0^\circ$ -Richtung aus AR-Glasfäden mit einer Feinheit von 310 tex. In Richtung der Rovings entspricht das einem Bewehrungsquerschnitt von ca.  $38,8 \text{ mm}^2/\text{m}$ .

Die Balkenprüfkörper sind vor Aufbringen der Verstärkungsschicht nicht schubbewehrt. Bei einer Stützweite im Vierpunkt-Biegeversuch von 4,5 m, einer Höhe von 30 cm und einer Breite von 15 cm sind die Balken lediglich mit einer Längsbewehrung von 2  $\text{Ø}28 \text{ mm}$  in Längsrichtung bewehrt. Die Lasteinleitung erfolgt in einem Abstand von 1 m von der Auflagerlinie entfernt, was einer Schubslankheit  $a/d$  von ca. 4 entspricht.

Variiert wurden im Versuchsprogramm die Anzahl der Textillagen sowie deren Verankerung, indem die Verstärkungsschicht bei einigen Versuchskörpern vollständig um den Querschnitt gewickelt und auf der Oberseite überlappt wurde und bei anderen die Schubverstärkung mit der Balkenoberseite endete, so dass lediglich die Druckzonenhöhe zur Verankerung der Verstärkungsschicht verblieb. Darüber hinaus wurden zwei Balken geprüft, bei denen als Querkraftverstärkung nur eine Feinbetonschicht ohne textile Bewehrung aufgebracht wurde, um den Einfluss der gegenüber dem Altbeton höheren Zugfestigkeit der Feinbetons auf die Querkrafttragfähigkeit zu untersuchen. Zum Vergleich dienen die Versuchsergebnisse einer Serie von unverstärkten Referenzbalken.

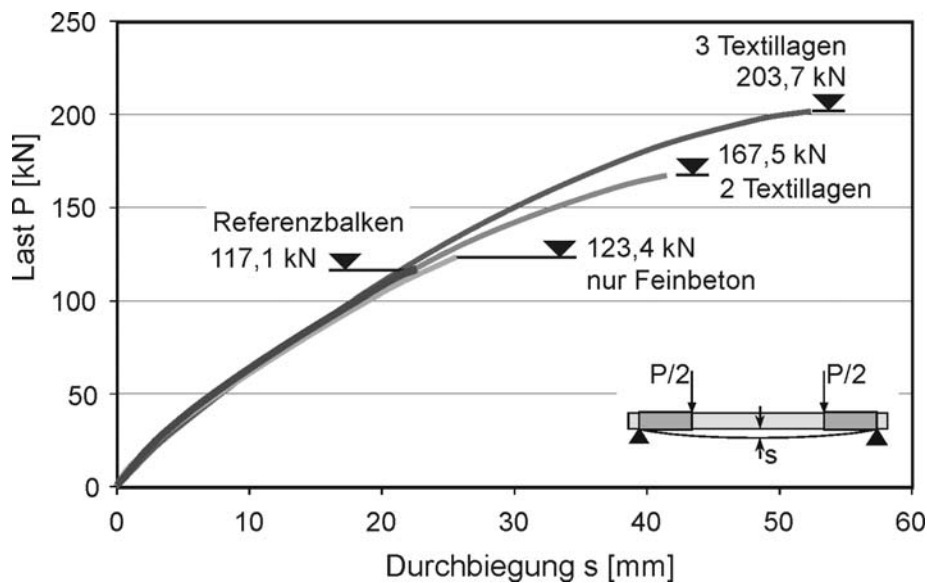


Bild 9: Kraft-Verformungs-Diagramm

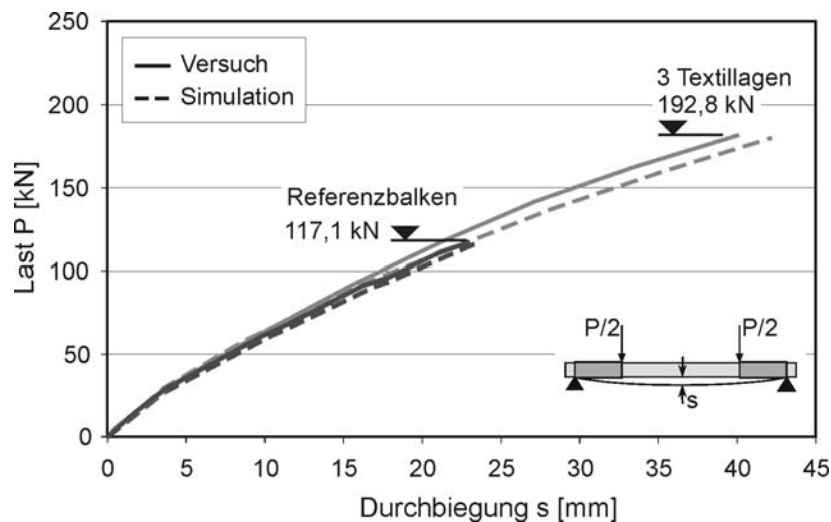
Fig. 9: Load-displacement-diagram

Anhand der geprüften Bruchlasten (Bild 9) ist deutlich die Verstärkungswirkung der textilen Bewehrung zu erkennen. Während bei dem unverstärkten Referenzbalken das Versagen bei einer Belastung von 117,1 kN infolge Schrägzugbruch auftrat, erreichten die verstärkten Balken mit zwei Textillagen eine um ca. 45 % gesteigerte Traglast. Sowohl bei den unverstärkten als auch bei den verstärkten Balken entwickelte sich der finale Schubriss aus einem Biegeriss, der sich durch den Verbund der Längsbewehrung zunehmend in Richtung der Lasteinleitung krümmt. Eine weitere Laststeigerung führt zur Ausbildung eines Sekundärrisses entlang der Längsbewehrung. In diesem Riss kommt bei den unverstärkten, nicht schubbewehrten Balken zum Versagen der Dübelwirkung und damit zum Schubversagen des Balkens. Bei den verstärkten Balken verhindert das Gelege zunächst das Versagen der Dübelwirkung. Erst wenn die Zugfestigkeit des Textilgeleges im Verbund überschritten ist, führt die Öffnung des Sekundärrisses zum Verlust der Dübelwirkung der Längsbewehrung sowie der Aufhängung der Betondruckstrebe. Zeitgleich versagt die Betondruckzone im Bereich der Lasteinleitung. Es bildet sich ein sogenannter Schrägzugbruch aus.

Bei einer dreilagig aufgetragenen Verstärkung lag die Querkrafttragfähigkeit der Balken bereits über der Biegetragfähigkeit. Im Bereich zwischen Lasteinleitung und Auflager entwickelten sich lediglich erste geneigte Biegerisse, als der Biegedruckbruch des Balkens eintrat.

Bei allen geprüften Balken führte die unterschiedliche Verankerung der Verstärkung unabhängig von der Anzahl der Textillagen zu keinerlei Abweichung im Trag- und Bruchverhalten der Balken. Daraus lässt sich schließen, dass die verbleibende Druckzonenhöhe zur Verankerung der Verstärkungsschicht ausreicht. Bis zur geprüften Traglast konnte weder ein Faserzug noch ein Ablösen der Verstärkungsschicht beobachtet werden.

Die Tragfähigkeit der mit unbewehrtem Feinbeton verstärkten Balken lag mit ca. 2 % nur unwesentlich über der Tragfähigkeit der Referenzbalken, so dass die höheren Traglasten der textilverstärkten Balken maßgeblich auf die textile Bewehrung und nur zu einem geringen Teil auf die zusätzlich aufgetragene Feinbetonschicht zurückzuführen sind.



**Bild 10:** Vergleich von Versuch und numerischer Simulation

**Fig. 10:** Comparison of test and simulation

Der Vergleich der Ergebnisse von numerischer Simulation und Experiment (Bild 8) zeigt sowohl für den unverstärkten Referenzbalken als auch für einen Balken mit dreilagiger Verstärkung eine gute Übereinstimmung.

Gegenstand der laufenden Forschung ist die Untersuchung des kombinierten Querkraftabtrages an Plattenbalken über eine vorhandene Bügelbewehrung und eine nachträglich ergänzte textile Bewehrung. Wesentliches Detail dieser Versuche ist die Verankerung der Querkraftverstärkung, die bei den Balken durch das Umfassen der Druckzone ausreichend gewährleistet ist. Bei den Plattenbalken hingegen ist die Druckzone aufgrund der anschließenden Platte für die Verankerung unzugänglich. In diesem Fall ist zu prüfen, welcher Teil der Belastung von der textilen Bewehrung abgetragen werden kann, wenn die Verstärkungsschicht ohne gesonderte Maßnahmen der Verankerung unterhalb der Platte endet, bzw. welche Art der Verankerung zu einer effizienten Steigerung der Ausnutzung der textilen Bewehrung führt.

## 5 Zusammenfassung

Anhand von Versuchsergebnissen wurde gezeigt, dass Stahlbetonbauteile mit textilbewehrtem Beton verstärkt werden können. Sowohl die Tragfähigkeit als auch die Gebrauchstauglichkeit werden durch die textile Bewehrung deutlich verbessert. Separate Verbunduntersuchungen belegen, dass bereits bei relativ kurzen Verbundlängen eine ausreichende Verankerung der Verstärkungsschicht gegeben ist. Bei den biegeverstärkten Platten konnte keine Verbundentkopplung beobachtet werden. Zur Verdeutlichung der Qualität der numerischen Simulation werden exemplarisch nur Ergebnisse von Simulationen mit deterministischen Eingangsgrößen dargestellt. Mit den numerischen Modellen ist es möglich, auch das Tragverhalten geometrisch komplizierter Tragwerke zu prognostizieren und die Sicherheitsbeurteilung mit adäquaten Konzepten durchzuführen.

## 6 Literatur

- [1] Curbach, M.; Ortlepp, R.: Besonderheiten des Verbundverhaltens von Verstärkungsschichten aus textilbewehrtem Beton, In: Curbach, M. (Hrsg.): *Textile Reinforced Structures, Proceedings of the 2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2), Dresden, 29.9.–1.10.2003*, Technische Universität Dresden, Eigenverlag, 2003, S. 361–374
- [2] Ortlepp, R.; Curbach, M.: Bond Failure Mechanisms of Strengthening Layers made of Textile Reinforced Concrete. In: Concrete Society (Hrsg); GRCA (Hrsg): *Proceedings of the 13th Congress of the International Glassfibre Reinforced Concrete Association (GRC 2003), Barcelona, 6.–8.10.2003*. – Book of Abstracts and CD-ROM, paper 23
- [3] Ortlepp, R.; Curbach, M.: Bonding Behaviour of Textile Reinforced Concrete Strengthening. In: Naaman, A. E. (Hrsg.); Reinhardt, H. W. (Hrsg.): *Proceedings of the RILEM-International Workshop „High Performance Fiber Reinforced Cement Composites – HPRCC 4“, Ann Arbor, 15.–18.6.2003*. Bagnoux : RILEM, 2003, S. 517–527
- [4] Holzenkämpfer, P.: *Ingenieurmodelle des Verbunds geklebter Bewehrung für Betonbauteile*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft. 473, 1997, S. 109–209
- [5] Neubauer, U.: *Verbundtragverhalten geklebter Lamellen aus Kohlenstoffaser-Verbundwerkstoff zur Verstärkung von Betonbauteilen*. Braunschweig, Technische Universität, Fakultät Bauingenieurwesen, iBMB, Diss., 2000
- [6] Möller, B.; Sickert, J.-U.; Graf, W.; Beer, M.: Berücksichtigung räumlich verteilter Unschärfe bei der numerischen Simulation von Textilbeton. In: Curbach, M. (Hrsg.): *Textile Reinforced Structures, Proceedings of the 2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2), Dresden, 29.9.–1.10.2003*, Technische Universität Dresden, Eigenverlag, 2003, S. 435–446
- [7] Möller, B.; Graf, W.; Beer, M.: Safety assessment of structures in view of fuzzy randomness. *Computers & Structures* 81 (2003), pp. 1567–1582
- [8] Sickert, J.-U.; Beer, M.; Graf, W.; Möller, B.: Fuzzy probabilistic structural analysis considering fuzzy random functions, In: *Proceedings of the 9th International Conference on Applications of Statistics and Probabilistics in Civil Engineering*. San Francisco, Rotterdam: Milpress, 2003, pp. 379–386
- [9] Möller, B.; Steinigen, F.; Graf, W.; Hoffmann, A.: Berücksichtigung von zyklischer Belastung und Schädigung bei der numerischen Simulation von Textilbeton. In: Curbach, M. (Ed.): *Textile Reinforced Structures. Proceedings of the 2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2), Dresden, Germany, 29.9.2003-1.10.2003*. Dresden: Sonderforschungsbereich 528, Technische Universität Dresden, 2003, pp. 423–434
- [10] Kluger, J.: *Numerische Modelle zur physikalisch nichtlinearen Analyse von Stahlbeton-Faltwerken*. Diss., TU Dresden, Veröffentlichungen des Lehrstuhls für Statik, 1999, Heft 1
- [11] CEB (Hrsg.): *CEB-FIB Model Code 1990*, Bulletin D’Information, No. 213/214, Lausanne, 1993
- [12] Stritzke, J.; Curbach, M.; Wagner, A.; Bösche, A.: Verstärkung von Balken und Plattenbalken mit textilbewehrtem Beton. In: *Sonderforschungsbereich 528 – Arbeits- und Ergebnisbericht für die Periode II/1999-I/2002*. Technische Universität Dresden, Eigenverlag, 2001, S. 359–404

- [13] Curbach, M.; Brückner, A.: „Textile Strukturen zur Querkraftverstärkung von Stahlbetonbauteilen“, In: Curbach, M. (Hrsg.): *Textile Reinforced Structures, Proceedings of the 2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2), Dresden, 29.9.–1.10.2003*, Technische Universität Dresden, Eigenverlag, 2003, S. 347-360