

Verbundversagensmechanismen im Verankerungsbereich von textilbewehrten Feinbetonverstärkungsschichten*

Regine Ortlepp¹, Anett Brückner², Enrico Lorenz³

Zusammenfassung: Experimentelle Untersuchungen an Plattenbalken zeigen, dass Querkraftverstärkungen auch außerhalb der Biegedruckzone verankert werden können. Entscheidend dabei ist, dass alle in der Verbundfuge von Altbeton und Verstärkung auftretenden Beanspruchungen durch die Haftzug- und Scherfestigkeit des Alt- und Feinbetons übertragen werden können. Ein Verbundversagen führt durch das Ablösen der Verstärkungsschicht zu deren Ausfall. Der Beitrag befasst sich mit den Beanspruchungen und Versagensmechanismen des Verankerungsbereiches, die anhand von Versuchsergebnissen dargestellt werden. Als Versagenskriterium für die Verankerung sind zwei flächige Versagensarten – der Altbetonuntergrund und die Ebene der textilen Bewehrung – zu berücksichtigen. Als weiteres Versagenskriterium der Verankerung ist der innere Verbund zwischen den Multifilamentgarnen und der sie umgebenden Feinbetonmatrix zu betrachten. Für die Bemessung des Verankerungsbereiches einer Verstärkung wird der jeweils ungünstigste Wert dieser drei Versagensarten maßgebend.

Summary: Experimental research on T-beams show that shear strengthenings can also be anchored outside of the compression zone. Thereby it is essential that all occurring loads between the old concrete and the strengthening can be transferred by the adhesive tensile and shear strength of the concrete. A bond failure splits off the strengthening layer leading to its failure. The paper deals with failure mechanisms of the anchoring range represented by test results. Two failure possibilities, namely within the old concrete substrate and in the layer of the textile reinforcement, have to be taken into account as failure criteria for the anchorage. A further criterion is the inner bond between the filament yarns and the fine-grained concrete matrix surrounding them. When designing the anchoring range of a strengthening the respectively most unfavourable values for these three failure mechanisms get crucial.

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

Online verfügbar/Online available: [urn:nbn:de:bsz:14-ds-1244049139702-05245](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-ds-1244049139702-05245)

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

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

³ M.Sc., Institut für Massivbau, TU Dresden

1 Einleitung

Die Eignung des textilbewehrten Betons zur Verstärkung von Bauteilen ist durch zahlreiche Versuche belegt. Nach BRÜCKNER, ORTLEPP & CURBACH [1] und WEILAND, ORTLEPP & CURBACH [2] kann durch eine Biegeverstärkung die Tragfähigkeit von Platten deutlich gesteigert werden. Zusätzlich verbessert die Verstärkung die Gebrauchstauglichkeit der Platten, d. h. die Durchbiegungen werden geringer und die Rissbreiten kleiner.

TRIANTAFILLOU & PAPANICOLAOU [3] vergleichen Querkraftverstärkungen von Balken mit Carbonfasertextilien in organischer Harz- und anorganischer Mörtel-Matrix. Beide Varianten haben ihre Vor- und Nachteile. Die Gelege in organischer Matrix sind aufgrund des sehr guten Verbundes zwischen Fasern und Matrix sehr effizient. Nachteilig sind jedoch die hohen Kosten der Harze und der notwendige Brandschutz. Eine Verstärkung mit Gelegen in anorganischer Matrix hingegen hat vergleichbare Materialeigenschaften wie das Stahlbetonbauteil. Die Effektivität des Geleges ist aber geringer, da die Faserbündel von dem Mörtel nicht vollständig durchdrungen werden und somit ein schlechterer Verbund erreicht wird als bei den CFK-Verstärkungen.

Nach dem allgemein anerkannten Fachwerkmodell müssen Querkraftverstärkungen innerhalb der Biegedruckzone verankert werden. Besonders effektiv ist dabei ein vollständiges Umschließen der Biegedruckzone mit Verankerung der Verstärkung durch Übergreifungsstoß. Experimentelle Untersuchungen an Plattenbalken zeigen jedoch, dass Querkraftverstärkungen auch über den Haftverbund zwischen Altbeton und Verstärkung verankert werden können. Dabei begrenzen die Scher- und Haftzugfestigkeit des Betons die erreichbare Schubverstärkung (BRÜCKNER, ORTLEPP & CURBACH [4]).

Der Detailpunkt der Verankerung mit den Mechanismen der Kraftübertragung von der textilbewehrten Verstärkungsschicht in den Altbeton wurde auf experimentellem Weg untersucht. Dazu wurden verschiedene Haftzug-, Filamentgarnauszug- sowie Schubversuche durchgeführt.

Während der experimentellen Untersuchungen wurde festgestellt, dass beim Verbundbruch der Verankerung einer textilbewehrten Feinbetonverstärkungsschicht zum Teil Versagensarten auftreten, die von traditionellen Klebeverbundwerkstoffen wie Stahl oder CFK her nicht bekannt sind. Dies betrifft insbesondere die Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung sowie den Auszug der Filamentgarne aus der Feinbetonmatrix.

Für die Bemessung eines Verankerungsbereiches ist die untere Grenze der Beanspruchbarkeit des Verbundes wesentlich. Eine solche Grenze existiert theoretisch für jede Versagensart in Abhängigkeit von den Eigenschaften der verwendeten Baustoffe. Der Versagensfall, welcher zur niedrigsten Beanspruchbarkeit führt, wird letztendlich bemessungsmaßgebend. Aus diesem Grund sind alle möglichen Versagensarten bei der Entwicklung eines Berechnungsmodells zu berücksichtigen, um den Versagensbereich vom Überlebensbereich abzugrenzen. Für die Verbundverankerung der Verstärkungsschicht sind dabei zwei flächige Versagensarten zu berücksichtigen, die eine getrennte Betrachtung erfordern: der Altbetonuntergrund und die

Ebene der textilen Bewehrung. Ein Versagen der Verbundfuge zwischen Alt- und Neubeton kann bei einer ausreichenden Oberflächenvorbehandlung ausgeschlossen werden (ORTLEPP [5]). Bezüglich der Versagensart innerer Verbund wird an dieser Stelle auf LORENZ & ORTLEPP [15] verwiesen.

2 Verbundbeanspruchung bei Querkraftverstärkung

Plattenbalken, deren Querkrafttragfähigkeit durch eine nachträglich aufgebraute Verstärkungsschicht erhöht wurde, wirken als Verbundquerschnitt mit starrem Verbund. Die beiden Teilquerschnitte, der Plattenbalken und die U-förmige Querkraftverstärkung, sind in ihrer Berührungsfuge durch den Haft- bzw. Scherverbund miteinander gekoppelt. Maßgebend wird jeweils die Berührungsfuge innerhalb des Verbundquerschnitts mit der geringsten Haftzug- bzw. Scherfestigkeit. Bei Verstärkungen mit textilbewehrtem Beton sind das entweder der Altbetonuntergrund, die Grenzschicht zwischen Alt- und Feinbeton oder die Grenzschicht der ersten, dem Bauteil zugewandten Textillage (siehe Abschnitt 3.2.2).

Versagt die Kopplung und damit der Verbund der Teilquerschnitte ist die Verstärkungsschicht nicht mehr tragfähig, da der Stahlbetonbalken ausschließlich im Bereich der lichten Stützweite verstärkt wird. Die Querkraftverstärkung selbst hat kein eigenes Auflager sondern ist nur über den Verbund zum Stahlbetonbalken gehalten. Eine Bemessung der Querkraftverstärkung ohne Kenntnis der Beanspruchungen innerhalb der Verbundfuge ist deswegen nicht möglich.

2.1 Scherbeanspruchung durch Relativverschiebung

Der Verbund in der Berührungsfuge der Teilquerschnitte wird durch eine Kombination von Scher- und Haftzugspannungen beansprucht. Die Scherzugspannungen resultieren aus der Behinderung der Relativverschiebungen zwischen den Teilquerschnitten. Ursache ist der Schwerpunktastand e , der bei unverbundenen Teilquerschnitten unter Biegebeanspruchung zu parallelen aber um $\Delta\varepsilon$ versetzten Dehnungsverläufen führt (Bild 1). Werden durch den Verbund in beiden Teilquerschnitten gleiche Dehnungen erzwungen, sind Normalkräfte die Folge.

Rechnerisch setzen sich der Dehnungsunterschied bzw. die Normalkräfte aus einem Anteil infolge der Verdrehung der Querschnitte und einem Anteil infolge der Momentenbeanspruchung zusammen. Näheres dazu ist in MÖHLER [6] und ORTLEPP ET AL. [7] ausführlich beschrieben.

Die Relativverschiebung als Folge des Dehnungsunterschiedes ist über die Trägerlänge veränderlich. Für eine Bemessung des Verbundes ist vor allem der Bereich der maximalen Relativverschiebungen von Interesse.

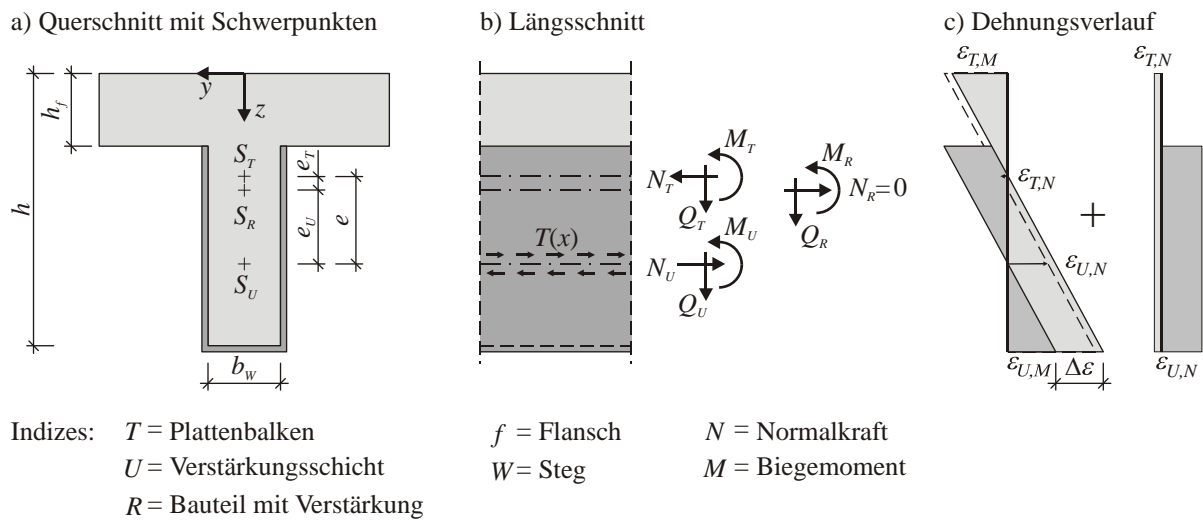


Bild 1: Schnittkraftzerlegung und Dehnungsverlauf am Verbundquerschnitt

Fig. 1: Resolution of forces at the composite cross section

Der Verlauf der Relativverschiebungen entlang der Bauteilachse kann abhängig von der Dehn- und Biegesteifigkeit der Teilquerschnitte, dem Schwerpunktabstand und der Verbundsteifigkeit aus einem gekoppelten System zweier Differentialgleichungen abgeleitet werden (ORTLEPP ET AL. [7]). Das nichtlineare Materialverhalten des Betons macht jedoch eine geschlossene Lösung des Gleichungssystems nahezu unmöglich. Aus diesem Grund wurde der prinzipielle Verlauf der Relativverschiebungen für einen Einfeldträger mit Einzellast anhand der beiden Grenzfälle des Betons (Träger vollständig im Zustand I und Träger vollständig im Zustand II) hergeleitet (Bild 2).

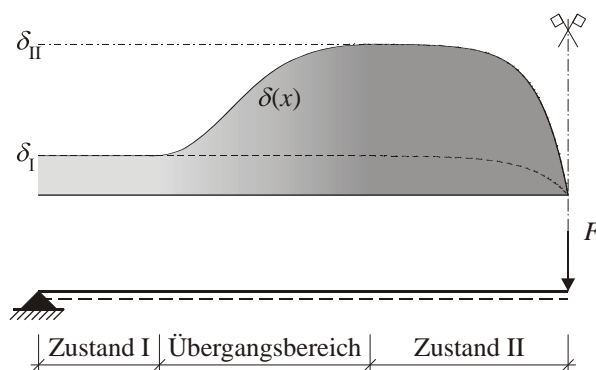


Bild 2: Theoretischer Verlauf der Relativverschiebung $\delta(x)$ am Einfeldträger

Fig. 2: Theoretical distribution of the relative displacement $\delta(x)$ at the single-span girder

Der tatsächliche Verlauf von $\delta(x)$ bewegt sich zwischen diesen beiden Grenzlinien. In Stützweitenmitte befindet sich der Träger überwiegend im Zustand II, so dass eine Relativverschiebung nahe der Grenzlinie δ_{II} zu erwarten ist. Im Bereich des Auflagers ist der Stahl-

betonbalken aufgrund der geringen Biegemomente zunehmend ungerissen. Es kommt zur Annäherung an die Grenzlinie vom Zustand I (δ_1).

Generell ist festzustellen, dass die Relativverschiebung mit sinkender Biegesteifigkeit der Teilquerschnitte wächst. Auch ein zunehmender Schwerpunktabstand e vergrößert die Relativverschiebungen und damit die Beanspruchungen des Verbundes in der Berührungsfuge.

2.2 Haftzugbeanspruchung durch Verankerung der textilen Bewehrung

Neben den Schubspannungen infolge der Relativverschiebung werden durch die Verankerung der textilen Bewehrung zusätzliche Zugspannungen senkrecht zur Berührungsfuge verursacht. Analog zum herkömmlichen Stahlbeton müssen auch beim textilbewehrten Feinbeton die Zugkräfte der textilen Bewehrung innerhalb der Verankerungslänge auf den umgebenden Feinbeton übertragen werden. Das geschieht jeweils vor und nach einem Biege- bzw. Schubriss oder am Ende der textilen Bewehrung. Die resultierenden Querszugspannungen müssen über den Haftverbund auf den Steg des Plattenbalkens übertragen werden (Bild 3). Die gleichzeitig in der Ebene der Berührungsfuge wirkenden Schubspannungen überlagern sich mit dieser Beanspruchung und vermindern damit zusätzlich die übertragbaren Querszugspannungen.

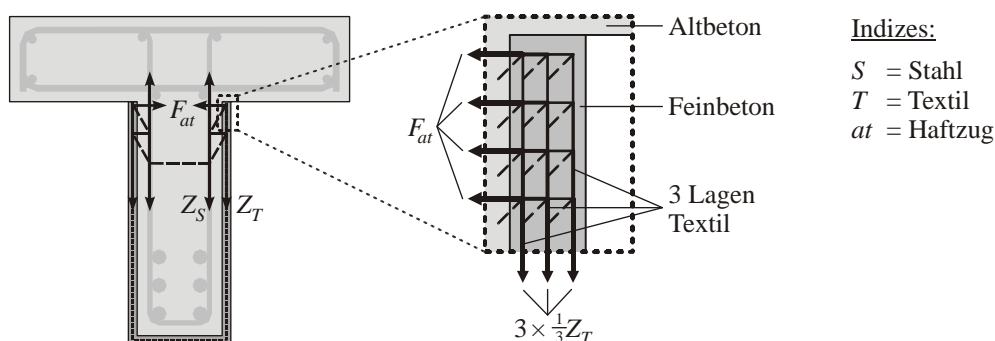


Bild 3: Stabwerkmodell zu Verankerung der Zugkräfte aus der textilen Bewehrung

Fig. 3: Strut-and-tie-model for anchoring the tensile forces from the textile reinforcement

Eine unzureichende Verankerung führt zum Ablösen der Verstärkungsschicht, was durch die Querszugbeanspruchung F_{at} infolge der Krafteinleitung verursacht wird (Bild 3). Das Ablösen tritt ein, sobald die Betonzugfestigkeit des Altbetonuntergrundes oder des Feinbetons in einem durch das Bewehrungstextil gestörten Bereich überschritten wird. Ein Versagen in der Textilebene wird auch als Delamination bezeichnet (ORTLEPP [5]). Dabei löst sich die Verstärkungsschicht entlang der inneren, dem Altbetonuntergrund zugewandten Textilebene vom Balkensteg ab. Die gesamte Zugkraft Z_T der Verstärkungsschicht verteilt sich auf die einzelnen Textillagen (Bild 3). Die aus der Verankerung der Zugkraft der einzelnen Textillagen zu übertragenden Haftzugkräfte summieren sich über die Textilebenen von außen nach innen

auf. Deshalb ist die innere Bewehrungsebene am stärksten durch Querzug belastet (Bild 3). Somit wird ein Delaminationsversagen entlang dieser Ebene eintreten, wenn nicht der Altbetonuntergrund maßgebend wird. Um die Tragfähigkeit der Verankerung zu beschreiben, wurden separate Verbunduntersuchungen durchgeführt, die im Abschnitt 3.2 näher beschrieben werden.

3 Experimentelle Untersuchungen

3.1 Relativverschiebung bei verstärkten Plattenbalken

Die theoretischen Überlegungen zum Verbund der Querkraftverstärkung (siehe Abschnitt 2) werden durch die experimentellen Untersuchungen an Plattenbalken bestätigt. Geprüft wurden Plattenbalken mit einer Stützweite von 5 m bei außermittiger Laststellung im 3-Punkt-Biegeversuch. Die Geometrie der Probekörper sowie die eingelegte Bewehrung sind in Bild 4 dargestellt und in SCHLADITZ ET AL. [8] näher beschrieben. Die Bügelbewehrung der Plattenbalken wurde mit einem Abstand von 30 cm als Mindestbewehrung konzipiert, um ein Querkraftversagen zu provozieren. Mit dem gleichen Ziel wurde für die Prüfung der Probekörper entsprechend dem Schubtal nach KANI [9] eine Schubschlankheit (a/d) von 3,8 gewählt (Bild 4).

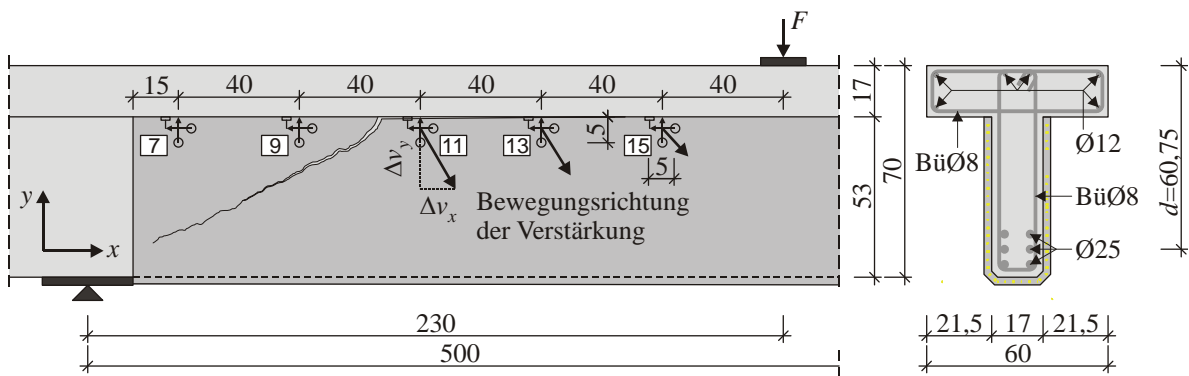
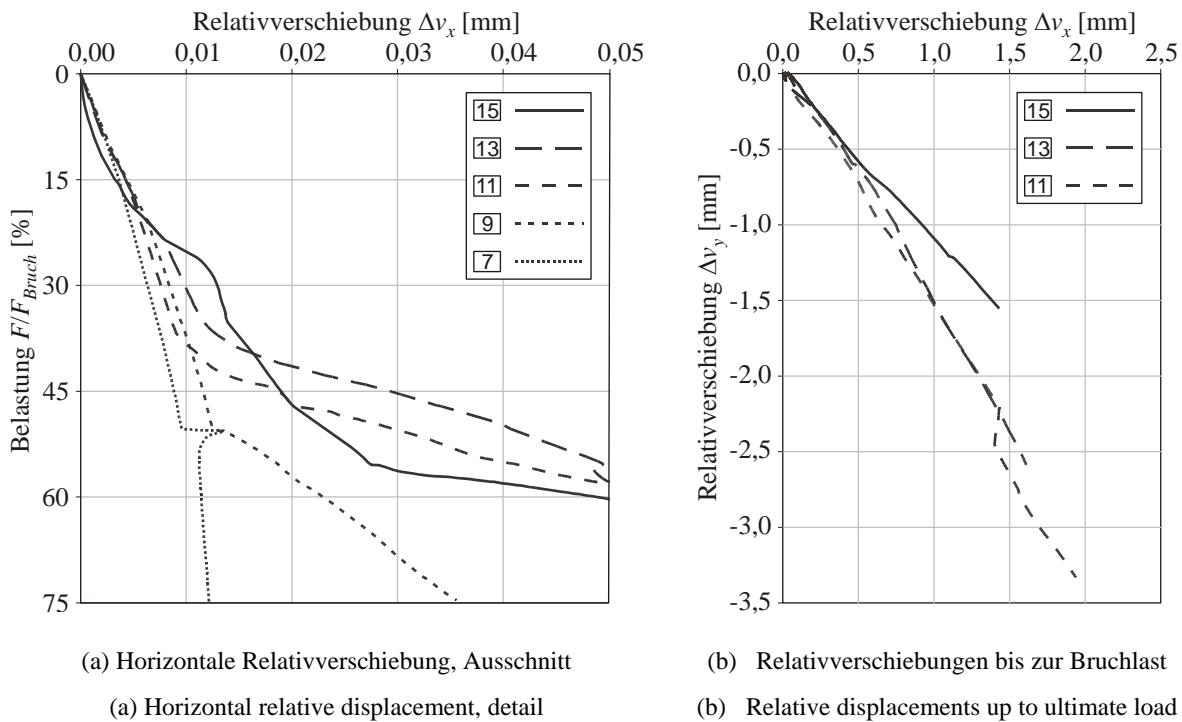


Bild 4: Versuchsaufbau und Messstellenplan (Maße in cm)

Fig. 4: Test set-up and location of gauges (dimensions in cm)

Der verwendete Altbeton mit einer mittleren Würfeldruckfestigkeit von 32 N/mm^2 entspricht einem C25/30. Als Bewehrung wurde handelsüblicher Betonstahl (BSt 500 S) eingelegt.

Der Feinbeton der Verstärkungsschicht mit einem Größtkorn von 1 mm und einer Prismendruckfestigkeit von 75 N/mm^2 war mit einem multiaxialen AR-Glasgelege bewehrt. Angepasst an die Querkraftbeanspruchung waren die Faserbündel des Geleges in 45° -Richtung geneigt. Bei einem Faserabstand von 10,8 mm und einer Feinheit von 1200 tex (1200 g/km) wurde pro Lage ein Bewehrungsgehalt von $43,05 \text{ mm}^2/\text{m}$ erreicht.



(a) Horizontale Relativverschiebung, Ausschnitt

(a) Horizontal relative displacement, detail

(b) Relativverschiebungen bis zur Bruchlast

(b) Relative displacements up to ultimate load

Bild 5: Relativverschiebung der Verstärkungsschicht gegenüber dem Altbeton bei einem verstärkten Plattenbalken mit 3 Textillagen

Fig. 5: Relative displacement of the strengthening in relation to the old concrete at a strengthened T-beam with 3 textile layers

In Bild 5 sind die mit induktiven Wegaufnehmern in horizontaler bzw. vertikaler Richtung gemessenen Relativverschiebungen zwischen Stahlbetonbauteil und Verstärkung dargestellt. Während die Messstellen 7 und 9 (Bild 4) bis zur Bruchlast des Balkens nahezu keine Verschiebungen zeigen, sind die Verschiebungen an den Messstellen 11 bis 15 deutlich ausgeprägt. Bereits bei geringen Belastungen von 30 bis 40 % der Bruchlast nehmen die horizontalen Verschiebungen (Bild 5a) überproportional zu und kündigen das Ablösen der Verstärkungsschicht an. Die Gegenüberstellung von vertikaler und horizontaler Verschiebung (Bild 5b) verdeutlicht die Bewegung der Verstärkung in Richtung Trägermitte (Bild 4).

Die Endwerte der Relativverschiebungen in Bild 5b sind nicht direkt vergleichbar, da die Wegaufnehmer der Messstellen 11 bis 13 aufgrund der großen Verschiebungen kurz vor dem Erreichen der Bruchlast ausgefallen sind. Trotzdem ist erkennbar, dass die größten Relativverschiebungen an den Messstellen 11 und 13 auftreten. Zur Trägermitte hin (Messstelle 15) sind die Relativverschiebungen geringer und die kleinsten Relativverschiebungen (Messstellen 7 und 9) wurden unweit des Auflagers gemessen. Damit korrelieren die Messungen mit dem theoretisch hergeleiteten Verlauf der Relativverschiebungen in Bild 2.

3.2 Untersuchungen zur Tragfähigkeit des Verbundes

3.2.1 Allgemeines

Ein wichtiger Aspekt für die Charakterisierung der Verbundeigenschaften zwischen einem Altbetonbauteil und einer nachträglich aufgetragenen Verstärkungsschicht ist die Beurteilung der Eigenschaften des Haftverbundes unter einer Oberflächenzugbeanspruchung (vgl. Abschnitt 2.2, F_{at}). Bei der Instandsetzung von Hochbau- und Ingenieurbauwerken wird diese Prüfung als allgemein übliches Verfahren für die Güteprüfung der Tragfähigkeit des Untergrundes oder auch der neu aufgetragenen Schichten angewendet (SCHULZ [10]). Nach deutschen Richtlinien (z. B. RL SIB [11], ZTV-ING 03, Teil 1 [12]) muss für die Durchführbarkeit einer Verstärkungsmaßnahme eine Mindesthaftzugfestigkeit des Altbetonuntergrundes von i. M. $1,5 \text{ N/mm}^2$ erreicht werden, wobei der kleinste Einzelwert aus drei Messungen $1,0 \text{ N/mm}^2$ nicht unterschreiten darf.

Die Ausbildung einer genügend rauen Oberfläche des zu beschichtenden Betonbauteils ist neben der Festigkeit des Betons Voraussetzung für einen guten Haftverbund. Um die Rauigkeit einer Betonoberfläche in der praktischen Anwendung beschreiben zu können, wird ein Parameter benötigt, welcher zahlenmäßig erfassbar ist. Deutsche Vorschriften empfehlen in diesem Zusammenhang die Rautiefe als Maß für die Oberflächenbeschaffenheit zu verwenden. Diese wird im Regelfall nach dem von KAUFMANN [13] entwickelten Sandflächenverfahren ermittelt. In deutschen Regelwerken sind keine Mindestwerte für die Rautiefe des zu beschichtenden Altbetonuntergrundes vorgegeben.

3.2.2 Versagensarten

Ein Versagen des Verbundes der textilbewehrten Feinbetonverstärkung kann grundsätzlich in drei verschiedenen Ebenen eintreten. Bezogen auf das Verstärkungssystem von innen nach außen betrachtet sind das:

1. Versagen des Altbetonuntergrundes (Bild 6b),
2. Versagen in der Verbundfuge (Bild 6c) und
3. Delamination in der Textilebene (Bild 6d).

Als vierte Versagensart einer Verankerung kann auch der Verbund der Bewehrungsfasern innerhalb der Feinbetonschicht maßgebend werden. Hierbei wird das Faserende der Textilien im Verankerungsbereich bei der Laststeigerung aus der Feinbetonmatrix herausgezogen (Bild 6e). Diese Versagensart sollte in der Praxis durch Wahl von geeignetem Fasermaterial vermieden werden (siehe Abschnitt 3.2.5).

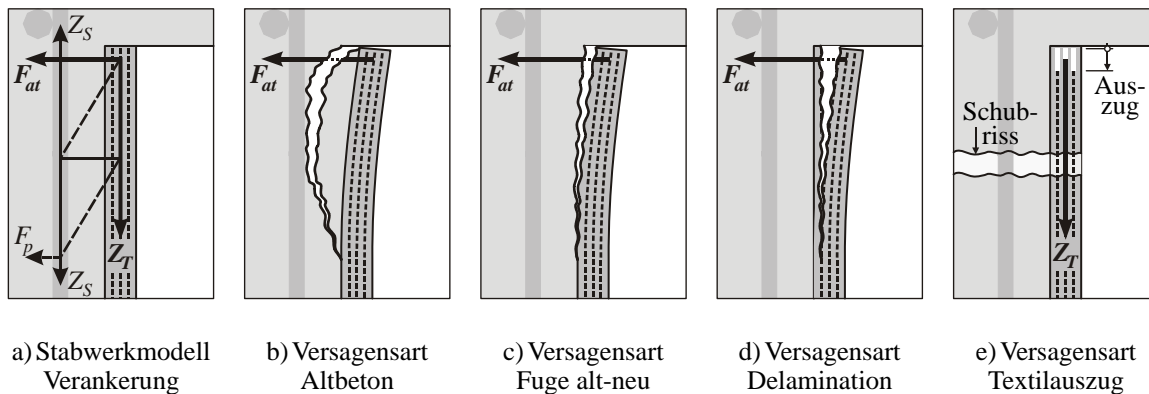


Bild 6: Verbundversagensarten der Textilbetonverstärkungsschicht

Fig. 6: Bond failure modes of the textile reinforced concrete strengthening

3.2.3 Verbundversuche unter Haftzugbeanspruchung

Zur Untersuchung der flächigen Versagensarten (Bild 6b-d) wurden Haftzugversuche nach DIN 1048, Teil 2 [14] sowie Schubversuche durchgeführt. Bezüglich der Schubversuche wird an dieser Stelle auf ORTLEPP [5] verwiesen. Die Tragfähigkeit des inneren Verbundes (Bild 6e) wurde an speziellen Auszugskörpern untersucht. Diese Untersuchungen sind in LORENZ & ORTLEPP [15] umfassend beschrieben. Im Folgenden werden die Untersuchungen zum Tragverhalten unter Haftzugbeanspruchung (F_{at} , siehe Bild 3) näher beschrieben.

Zur Herstellung der unbewehrten Altbetongrundkörper wurde ein Beton verwendet, welcher der Betonfestigkeit eines typischen zu verstärkendem Bauteiles entspricht. Als Feinbeton für die Verstärkungsschicht kam, wie auch bei den Plattenbalken, die im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 528 in Dresden entwickelte Rezeptur zum Einsatz.

Vor dem Aufbringen der textilbewehrten Betonschicht wurden die Oberflächen der Altbetonkörper mit Sand gestrahlt und die Rautiefe nach KAUFMANN [13] bestimmt. Die verstärkten Proben wurden 7 Tage lang durch Abdecken mit feuchten Tüchern nachbehandelt und bis zum 28. Tag innerhalb der Versuchshalle gelagert. Je Serie wurden 16 Einzelprüfungen durchgeführt. Dazu wurden je Platte 16 Probekörper mit einem Durchmesser von 50 mm mit Hilfe eines Ringbohrers freigebohrt. Zwei bis drei Tage vor der Prüfung werden Stahlstempel für den Anschluss der Zugvorrichtung des Prüfgerätes auf die freigebohrten Zylinder aufgeklebt. Hierzu wird ein Zweikomponenten-Epoxydharzkleber verwendet. Die Messung der Haftzugfestigkeiten wurde mit dem transportablen Prüfgerät DYNA Z 15 mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 100 N/s durchgeführt. Die Prüfung erfolgte einheitlich 28 Tage nach dem Aufbringen der Verstärkungsschicht. Als Regelprüfungen wurden zusätzlich die Druckfestigkeit des Altbetons sowie die Biegezug- und Druckfestigkeit des Feinbetons im Alter von 28 Tagen geprüft.

3.2.4 Versuchsergebnisse

An der TU Dresden wurden über 160 Serien mit je 16 Einzelversuchen zur Haftzugfestigkeit unterschiedlich textilbewehrter Verstärkungsschichten untersucht. Die Notwendigkeit der großen Versuchsanzahl ist dabei u. a. in der starken Streuung der Betonfestigkeit unter Zugbelastung begründet. Aus den Untersuchungen lassen sich grundlegende Erkenntnisse zur maßgebenden Versagensart von textilbewehrten Betonverstärkungssystemen unter einer Haftzugbeanspruchung ableiten. Bei der Auswertung der Ergebnisse aus den Parameterstudien ist zwischen den verschiedenen Versagensarten (siehe Abschnitt 3.2.2) zu differenzieren. Diese lassen sich anhand der Lage der Versagensebene im Versuch unterscheiden und entsprechend getrennt auswerten.

Versagensart „Altbeton“

Der im Rahmen des Versuchsprogramms eingesetzte Altbeton wies im Mittel eine Haftzugfestigkeit von $2,4 \text{ N/mm}^2$ auf und lag damit weit über dem geforderten Mindestwert (vgl. Abschnitt 3.2.1). Die Haftzugfestigkeit des Altbetons ist im Diagramm (Bild 8) als durchgezogene Grenzlinie dargestellt. Eine höhere Altbetonfestigkeit wurde nur punktuell untersucht. Für einen Beton mit der mittleren Würfeldruckfestigkeit von 64 N/mm^2 wurde eine mittlere Haftzugfestigkeit von $3,1 \text{ N/mm}^2$ gemessen. Diese ist im Diagramm (Bild 8) als gestrichelte Grenzlinie dargestellt. Es ist festzuhalten, dass eine Verdoppelung der Würfeldruckfestigkeit von 32 N/mm^2 auf 64 N/mm^2 zwar zu einer Erhöhung, jedoch nicht gleichzeitig zu einer Verdoppelung der Haftzugfestigkeit führt.

Versagensart „Verbundfuge zwischen Alt- und Neubeton“

Die Versuche haben gezeigt, dass bereits eine geringe Rautiefe der Altbetonoberfläche von 1 mm zur Sicherstellung des Verbundes in der Kontaktebene zwischen Alt- und Neubeton ausreichend ist (ORTLEPP [5]), so dass diese Ebene für ein flächiges Verbundversagen nicht maßgebend wird.

Versagensart „Delamination in der Textilebene“

Im Zusammenhang mit der Haftzugtragfähigkeit der textilen Bewehrungsebene hat der zwischen den Fäden der textilen Struktur verbleibende wirksame Flächenanteil $k_{A,eff}$ der Feinbetonmatrix (Bild 7) ausschlaggebende Bedeutung. Dieser Wert kann als eine Art Materialkennwert der textilen Bewehrungsstruktur angesehen werden (ORTLEPP [16]).

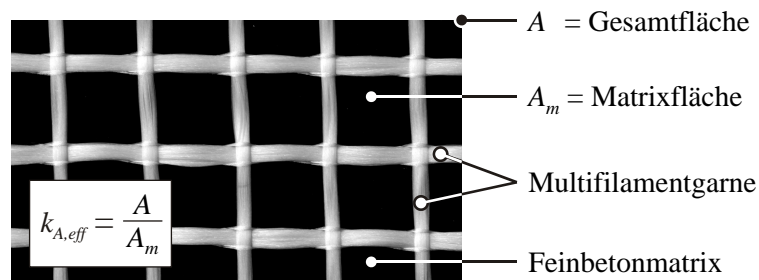


Bild 7: Flächenverhältnisse in der Textilebene

Fig. 7: Area ratios in the textile layer

Die Untersuchungen haben einen annähernd linearen Zusammenhang zwischen dem wirksamen Flächenanteil und den gemessenen Haftzugfestigkeiten in der Textilebene gezeigt (Bild 8). Die dargestellte Grenzlinie für Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung wurde durch lineare Regression aller Einzelmesswerte nach der Methode der kleinsten Abstandsquadrate bestimmt. Dieser Regressionsgeraden liegen über 1.000 Einzelversuche mit einem Versagen in der Ebene der textilen Bewehrung zugrunde.

Die wirksame Haftzugfestigkeit in der Ebene der textilen Bewehrung kann entweder größer oder kleiner als die Haftzugfestigkeit des Altbetonuntergrundes werden. Dies ist außer von den Festigkeiten des Altbetons und des reinen Feinbetons direkt abhängig von der Größe des wirksamen Flächenanteiles der verwendeten textilen Bewehrungsstruktur. Genauer gesagt bestimmt der wirksame Flächenanteil, welche Ebene für ein flächiges Verbundversagen maßgebend wird. Der Wechsel der Versagensarten lässt sich im Diagramm (Bild 8) durch den Schnittpunkt der beiden Grenzlinien ablesen, die den Versagens- vom Überlebensbereich trennen.

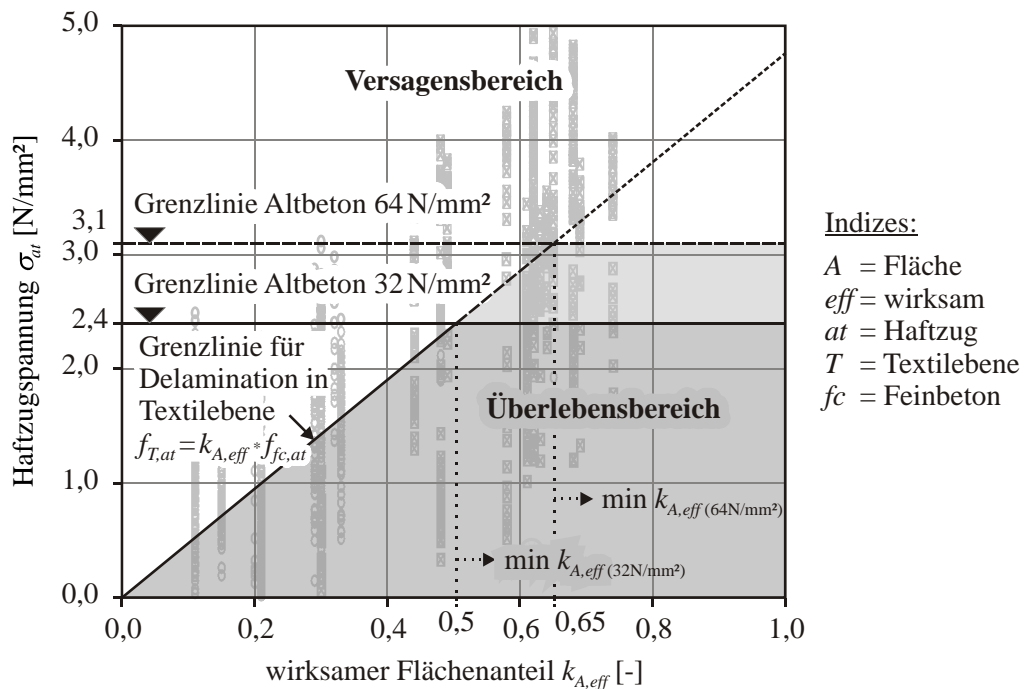


Bild 8: Grenzlinsen der Versagensarten

Fig. 8: Limit lines of the failure modes

3.2.5 Möglichkeiten zur Beeinflussung der Verbundtragfähigkeit

Aus wirtschaftlichen Gründen sollte dafür gesorgt werden, dass nicht die neu aufgebrachte Verstärkungsschicht sondern der Altbetonuntergrund des zu verstärkenden Bauteiles für ein eventuelles Verbundversagen maßgebend wird, um die Tragfähigkeit der Verstärkungsschicht möglichst voll auszunutzen. Im Folgenden werden die im Abschnitt 3.2.2 benannten Versagensarten bezüglich der Möglichkeiten zur positiven Beeinflussung der Verbundtragfähigkeit einzeln betrachtet:

1. Das *Versagen des Altbetons* kann nicht beeinflusst werden, da es von den Eigenschaften der Altkonstruktion, die verstärkt werden soll, abhängt. Besitzt das zu verstärkende Bauteil eine vergleichsweise hohe Zugfestigkeit, so vermindert sich auch die Gefahr eines Verbundversagens im Altbeton.
2. Ein Versagen in der *Verbundfuge* tritt nur ein, wenn die minderfeste oberflächige Zementleimschicht des zu verstärkenden Altbetonbauteiles versagt oder sonstige Verschmutzungen den Verbund zur Verstärkungsschicht beeinträchtigen. Ein Versagen in dieser Grenzfläche kann durch eine ausreichende Oberflächenbehandlung, wie z. B. Einhaltung eines Mindestwertes der Rautiefe, vermieden werden.

3. Das Versagen durch *Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung* ist von den Eigenschaften der Bewehrungsstrukturen abhängig. Durch Wahl geeigneter Textilien, die bestimmte Mindestanforderungen erfüllen, kann diese Versagensgrenze positiv beeinflusst werden. In Abhängigkeit von der Qualität des zu verstärkenden Untergrundes erfüllen nur Textilien mit einem entsprechenden Mindestwert des wirksamen Flächenanteiles diese Bedingung. Dieser kann aus dem Schnittpunkt der Grenzlinie für Delamination mit der Grenzlinie des entsprechenden Altbetons ermittelt werden. So sollte z. B. für einen zu verstärkenden Altbeton mit einer Haftzugfestigkeit von 2,4 N/mm² der wirksame Flächenanteil mindestens 0,5 betragen (vgl. Bild 8).
4. Ein Versagen durch *Textilaustrag* tritt nur bei Garnmaterial mit schlechten Verbundeigenschaften ein. Diese Versagensart kann durch geeignete Wahl der Bewehrungsstruktur ausgeschlossen werden. Möglichkeiten dazu werden ausführlich in LORENZ & ORTLEPP [15] diskutiert.

Wenn die Haftzugtragfähigkeit in den drei positiv beeinflussbaren Versagensarten (2.-4.) soweit erhöht wird, dass diese Ebenen nicht mehr versagensmaßgebend sind, ist die Tragfähigkeit des Gesamtsystems nur noch von den Eigenschaften des Altbetonuntergrundes (1.) abhängig. Ist diese Verbundtragfähigkeit für den benötigten Verstärkungsgrad nicht ausreichend, so kann eine nachträgliche Verstärkung nur mit zusätzlichen mechanischen Verankerungselementen durchgeführt werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Querkraftverstärkungen bis zu einem bestimmten Grad über den Haft- und Scherverbund zwischen Altbeton und Verstärkung verankert werden können. Ein Überschreiten der Haftzug- und Scherfestigkeit des Alt- oder Feinbetons führt zunehmend zum Ablösen der Verstärkungsschicht. Um höhere Verstärkungsgrade erreichen zu können, sind zusätzliche mechanische Verankerungselemente erforderlich. Spezielle Untersuchungen hierzu sind Gegenstand der laufenden Forschung.

5 Literaturverzeichnis

- [1] BRÜCKNER, A.; ORTLEPP, R.; CURBACH, M.: Textile Reinforced Concrete – Applications and Bond Specifics. In: CEB-FIP (Edt.): *Proceedings of the fib-Symposium "Concrete Structures – the Challenge of Creativity"*, April 26-28, 2004, Avignon, France. pp. 161-162
- [2] WEILAND, S.; ORTLEPP, R.; CURBACH, M.: Strengthening of predeformed slabs with textile reinforced concrete. In: CEB-FIP (Edt.): *Proceedings of the 2nd fib-Congress, June 5-8, 2006, Neapel, Italy*. Bd. 2, pp. 428–430

- [3] TRIANTAFILLOU, T. C.; PAPANICOLAOU, C. G.: Shear strengthening of reinforced concrete members with textile reinforced mortar (TRM) jackets. *Materials and Structures* 39 (2006), pp. 93-103
- [4] BRÜCKNER, A.; ORTLEPP, R.; CURBACH, M.: Textile Reinforced Concrete for Strengthening in Bending and Shear. *Materials and Structures* 39 (2006), pp. 741–748
- [5] ORTLEPP, R.: *Untersuchungen zur Verbundverankerung textilbewehrter Feinbetonverstärkungsschichten für Betonbauteile*. Dresden, Technische Universität, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Massivbau, Diss., 2007.
- [6] MÖHLER, K.: *Über das Tragverhalten von Biegeträgern und Druckstäben mit zusammengesetzten Querschnitten und nachgiebigen Verbindungsmitteln*. Karlsruhe, Technische Hochschule Fridericiana, Habil., 1962
- [7] ORTLEPP, R.; BRÜCKNER, A.; CURBACH, M.: Limits of shear strengthening with textile reinforced concrete because of the anchorage. *Journal of Materials and Civil Engineering* – Artikel zur Veröffentlichung eingereicht.
- [8] SCHLADITZ, F.; BRÜCKNER, A.; ORTLEPP, R.; CURBACH, M.: Shear force strengthening of large concrete components using textile-reinforced concrete (TRC). In: *Proceedings of the 18th Congress of the International Glassfibre Reinforced Concrete Association, Prag, 20.–23.04.2008*
- [9] KANI, G.: Was wissen wir heute über die Schubbruchsicherheit? In: *Bauingenieur* 43 (1968), Nr. 5, S. 167-174
- [10] SCHULZ, R.-R.: *Beton als Beschichtungsuntergrund – Über die Prüfung des Festigkeitsverhaltens von Betonoberflächen mit dem Abreißversuch*. Aachen, RWTH, Diss., 1984
- [11] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (Hrsg.): *Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen, Teil I bis IV*. DAFStb. Berlin : Beuth, 1991/1992
- [12] BUNDESANSTALT FÜR STRAßENWESEN (Hrsg.): *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING)*. Dortmund : Verkehrsblatt-Verlag, 2003
- [13] KAUFMANN, N.: Das Sandflächenverfahren. *Strassenbau-Technik* 24 (1971), Nr. 3, S. 131–135
- [14] DIN 1048: *Prüfverfahren für Beton. Festbeton in Bauwerken und Bauteilen*. Berlin : Beuth, 1991
- [15] LORENZ, E.; ORTLEPP, R.: Algorithmus zur Bestimmung der Verankerungslänge der textilen Bewehrung in der Feinbetonmatrix. In: *Proceedings of the 4th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS4), Dresden, June 2009*, pp. 491-502
- [16] ORTLEPP, R.: The effective area of an adhesive bond of textile reinforced concrete. In: *Proceedings of the fib-conference Concrete: 21st Century Superhero – Building a sustainable future, London, 22.–24.6.2009*