

VII Verstärken mit Textilbeton

Frank Jesse, Dresden

Manfred Curbach, Dresden

Beton-Kalender 2010: Brücken – Betonbau im Wasser

Herausgegeben von Konrad Bergmeister, Frank Fingerloos und Johann-Dietrich Wörner

Copyright © 2010 Ernst & Sohn, Berlin

ISBN: 978-3-433-02931-2

1 Einleitung

1.1 Motivation für diesen Beitrag

Textilbeton ist ein neuartiger Baustoff mit einem erstaunlichen Leistungspotenzial. Üblicherweise wird im Beton-Kalender der aktuelle Stand der Technik für Bauverfahren, Materialien und Bemessungsmethoden beschrieben, die sich in der Praxis bereits etabliert haben. Diese Themenauswahl ist in einem Jahrbuch für praktisch tätige Ingenieure üblich und sinnvoll. Warum steht an dieser Stelle jetzt ein Beitrag zur Anwendung eines neuartigen Materials, das gerade das Forschungslabor verlässt und für das es bisher gerade eine Handvoll Anwendungen in der Praxis des Ingenieurbaus gibt?

Die Zahl der Anfragen aus der Praxis hat uns gezeigt, dass es zum textilbewehrten Beton einen enormen Informationsbedarf gibt. Es existiert zwar eine ganze Reihe hervorragender Publikationen über dieses neue Material, aber keine aktuelle geschlossene Darstellung in deutscher Sprache. Bisher ist der Anwender darauf angewiesen, sich die benötigten Informationen mühsam zusammenzusuchen. Diesem umfassenden Informationsbedürfnis möchten die Autoren mit diesem Beitrag Rechnung tragen.

Vor mehr als 15 Jahren hatte eine Gruppe von Wissenschaftlern an den Technischen Universitäten Dresden und Aachen eine Vision: die Verwendung von technischen Textilien aus Hochleistungsfasern als Betonbewehrung für extrem schlanke und leistungsfähige Bauteile. Woher kommt diese Vision? Technische Textilien aus Hochleistungsfasern haben beispielsweise dem Flugzeugbau zur heutigen Leistungsfähigkeit verholfen und moderne Windkraftanlagen erst möglich gemacht. Gleichzeitig sind es solche realen Anwendungen in industriellem Maßstab, die die Entwicklung von Materialien, Technologien, Berechnungsmethoden und deren Anwendung massiv fördern. Auch im Fall des Textilbetons wird nur durch eine breite Anwendung in der Praxis der Bedarf nach derartigen Entwicklungen befriedigt werden können und helfen, die notwendigen Ressourcen dafür aufzubringen. Die Anwendung in der Praxis und die Rückkopplung zur Forschung sind Voraussetzung, um heute noch bestehende, offene Fragen zu klären und entsprechende Lösungen für die praktische Anwendung von Textilbeton zu entwickeln.

Textilbeton ist ein Verbundmaterial mit besonderen Eigenschaften. Es ist weniger ein Ersatz für

vorhandene Materialien – z. B. Stahlbeton, Spannbeton, (Kurz-)Faserbeton – als vielmehr ein Material, das den Einsatzbereich von bewehrten Betonen erheblich erweitern kann. Textilbeton dringt in neue Märkte vor bzw. schafft diese erst. Natürlich ist es nicht leicht, eine aus gutem Grund an Bewährtem festhaltende Bauindustrie von neuen Materialien und passend dazu neu zu entwickelnden Technologien zu überzeugen und für neuartige Anwendungen (Märkte) zu begeistern. Voraussetzung ist in jedem Fall die Bereitstellung detaillierter Informationen zum Materialverhalten, insbesondere zu den Langzeiteigenschaften.

Über Grundlagen zum Tragverhalten, Berechnung und Simulation von Textilbeton sowie verschiedene Fallbeispiele für den Praxiseinsatz existiert bereits umfangreiches Schrifttum, z. B. der Sachstandbericht des DAfStb [28], der Sachstandbericht des gleichnamigen Technischen Komitees des RILEM [14] oder die Tagungsbände der von den Sonderforschungsbereichen 528 und 532 bisher durchgeführten Kolloquien aus den Jahren 2001 [53], 2003 [29], 2006 [54] und 2009 [33]. Allerdings hat sich gezeigt, dass diese meist wissenschaftlichen Publikationen aus der laufenden Grundlagenforschung dem Praktiker selten direkt die gewünschte einfache Antwort geben können. Ziel dieses Beitrags ist deshalb eine aktuelle Zusammenstellung des Wissensstandes rund um den Einsatz von Textilbeton mit dem Schwerpunkt des Einsatzes zur Verstärkung von Stahlbetontragwerken.

Besonders für Leser, die sich erstmals mit der Thematik beschäftigen oder detailliertere Informationen suchen, wurden der Erläuterung der Eigenschaften der Ausgangsmaterialien, des Verbundwerkstoffs Textilbeton selbst, seiner Herstellung und seiner herausragenden Eigenschaften jeweils eigene Abschnitte gewidmet. Textilbeton eignet sich sowohl für die Herstellung neuer Bauteile als auch zur Verstärkung vorhandener Bauteile und Bauwerke. Der Schwerpunkt der praktischen Anwendung soll in diesem Beitrag ausdrücklich auf der Anwendung des Textilbetons als Verstärkungsmaterial für Stahl- und Spannbetonbauwerke liegen.

1.2 Was ist Textilbeton?

Die Idee zum Textilbeton wurde aus dem Stahlbeton abgeleitet oder vielmehr aus einem seiner wenigen Nachteile. An dieser Stelle zu erläutern, warum Stahlbeton der mengenmäßig erfolg-

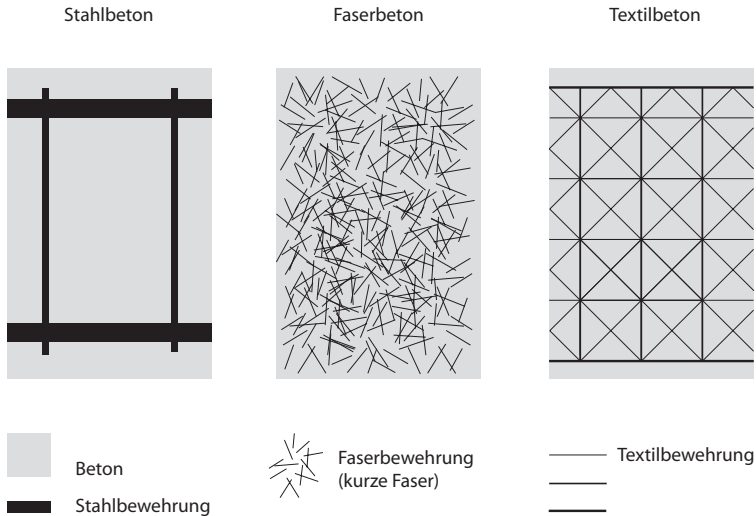


Bild 1. Vergleich verschiedener Bewehrungssysteme

reichste und bedeutendste Baustoff des vergangenen Jahrhunderts gewesen ist und aller Voraussicht nach auch in diesem Jahrhundert sein wird, ist sicher nicht notwendig. Der Erfolg des Stahlbetons ist in der fast perfekten Kombination zweier Baustoffe begründet, wobei jeder für die ihm übertragene Aufgabe die wirtschaftlichste Wahl darstellt – der Beton zur Abtragung von Druckkräften und der Bewehrungsstahl zur Aufnahme der Zugkräfte. Ideal ist die Kombination auch deshalb, weil der Beton infolge seines Portlandklinkeranteils im Zement einen pH-Wert im stark basischen Bereich besitzt, der den Stahl bei fachgerechter Planung und Ausführung dauerhaft vor Korrosion schützt. Um diese Schutzfunktion über die Lebensdauer eines Bauwerks zuverlässig aufrechtzuerhalten, ist eine Mindestbetonüberdeckung zwischen 15 und 50 mm erforderlich [119], woraus sich Mindestabmessungen für Stahlbetonbauteile von 50 bis 100 mm ergeben. Immer dann, wenn so viel Beton zur Aufnahme der Druckkräfte nicht erforderlich oder aus Gewichtsgründen störend ist, stellt sich die Frage nach alternativen, leichteren und eleganteren Lösungen.

Was wäre, wenn die Bewehrung nicht durch eine dicke Betonschicht vor Korrosion geschützt werden müsste? Und angenommen, die Bewehrung wäre extrem filigran und das Kriterium der Mindestbetondeckung zur Sicherstellung des Verbundes nach DIN 1045-1, 6.3 (4) träfe auch bei Bewehrungsdurchmessern im Millimeterbereich zu. Wenn es eine solche Bewehrung gäbe, wären Bauteile aus bewehrtem Beton um ein Vielfaches

schlanker, leichter und materialsparender und könnten als Nebeneffekt den Anwendungsbereich dieses Verbundbaustoffs spürbar erweitern. Durch die schlankere Bauweise kann auch ein erheblicher Beitrag zur Nachhaltigkeit geleistet werden. Der Feinbeton enthält zwar anteilig höhere Zementmengen als Normalbeton, insgesamt aber wird erheblich weniger Zement je Bauteil eingesetzt.

Die Verwendung von textilen Bewehrungen aus Hochleistungsfasern ist eine mögliche Antwort auf diese Frage. Weil die Abmessungen der hochfesten Fasern im Millimeterbereich liegen und damit mindestens eine Größenordnung unter der normalen Betonbewehrung und weil die Fasermate-



Bild 2. Typisches Erscheinungsbild von Textilbeton

rialien nicht vor Korrosion geschützt werden müssen, lassen sich Bauteile und Bauwerke aus Beton mit bisher unerreichter Leistungsfähigkeit und Schlankheit realisieren.

Der Beitrag beschreibt Eigenschaften von Textilbeton und sich daraus ableitende Regeln für das Konstruieren mit Textilbeton allgemein und speziell seine Verwendung zur Verstärkung von Stahlbetonbauteilen. Der an vielen Stellen strapazierte Vergleich mit der traditionellen Stahlbetonbauweise erscheint den Autoren geeignet. Praktisch kern das Material und seine Anwendungsmöglichkeiten nahezubringen.

1.3 Textilbeton ist kein Faserbeton

Faserbeton – oder korrekt Kurzfaserbeton – enthält kurze Fasern aus unterschiedlichsten Materialien. Am weitesten verbreitet sind der Glasfaserbeton mit 5 bis 25 mm langen Fasern aus speziellem alkaliresistentem Glas (AR-Glas) sowie der Stahlfaserbeton mit Fasern aus meist hochfestem Stahldraht mit Längen von 15 bis 60 mm. Die Kurzfasern werden dem Beton bei der Herstellung beigegeben und sind im fertigen Bauteil – im Gegensatz zum Stahlbeton und Textilbeton – quasi zufällig verteilt. Durch spezielle Herstellungsverfahren lässt sich die Ausrichtung der Fasern teilweise steuern. Aber abgesehen von den Schwierigkeiten bei der Reproduzierbarkeit bleibt das wesentliche Charakteristikum von Faserbeton die zufällige Anordnung der Fasern im fertigen Bauteil.

Menge und Verteilung der Fasern legen das wesentliche Potenzial wie auch die technischen Grenzen des Faserbetons gleichermaßen fest. Bei Faserbetonen erreicht die Bewehrung praktisch ohne Aufwand jeden Winkel eines Bauteils. Das ist optimal für Einwirkungen, deren Richtung unbestimmt ist. Bei gerichteten Einwirkungen, wie sie in lastabtragenden Strukturen typischerweise anzutreffen sind, ist eine zufällige Anordnung der Bewehrung sehr ineffizient. Bemerkenswert ist, dass es aufgrund des besonders einfachen Herstellungsverfahrens (Beton-mischen-und-in-die-Schalung-gießen) trotzdem wirtschaftlich interessant sein kann, Stahlfaserbeton für lastabtragende Strukturen des Hochbaus einzusetzen [37, 50]. Die zentrale Rolle der Wirtschaftlichkeit eines Herstellungsverfahrens sei bereits an dieser Stelle betont.

Die zweite charakteristische Eigenschaft, die Faserbeton grundsätzlich von Stahlbeton und textilbewehrtem Beton unterscheidet, ist der Versagensmechanismus. Beim Faserbeton kommt es im Bruchzustand zum Auszug der Fasern. Aus der dabei verrichteten Arbeit gewinnen Faserbetone ihr anerkannt hohes Arbeitsvermögen (Duktilität). Allerdings muss auf Dauer sichergestellt

sein, dass beim Faserauszug die Beanspruchung unterhalb der Faserfestigkeit verbleibt, sonst kommt es zur Versprödung. Damit der Faserauszug als charakteristischer Versagensmechanismus dauerhaft, d. h. bei fortschreitender Hydratation des Zementes und mit dem Betonalter steigender Verbundfestigkeit sicher gewährleistet werden kann, ist die volle Ausnutzung der Faserfestigkeit bei Faserbeton prinzipbedingt nicht möglich.

Textilbeton wie auch Stahlbeton versagen hingegen durch Erreichen der Materialfestigkeit der Bewehrung. Das Verformungsvermögen¹⁾ des Verbundwerkstoffs rührt allein aus dem Verformungsvermögen der Bewehrung. Die Festigkeit der Bewehrung kann bei beiden Verbundwerkstoffen im Bruchzustand voll ausgenutzt werden. Das trägt erheblich zum wirtschaftlichen Einsatz bei.

1.4 Textilbeton ist miniaturisierter Stahlbeton

Textilbeton und Stahlbeton teilen wesentliche Konstruktionsmerkmale. In beiden Verbundwerkstoffen dient der Beton dem Abtrag von Druckkräften und die Bewehrung der Aufnahme der Zugkräfte, wenn beim Erreichen der Betonzugfestigkeit Risse entstehen. Zur Sicherstellung ausreichender Duktilität muss die Bewehrung in der Lage sein, die bei der Rissbildung frei werdende Betonzugkraft aufzunehmen. Die Bewehrung wird im Allgemeinen oberflächennah und -parallel in der erforderlichen Lagenzahl eingebaut und entsprechend dem Kraftfluss im Bauteil orientiert.

Die wesentlichen Unterschiede zwischen Textilbeton und Stahlbeton liegen zum einen im Maßstab und zum anderen in der Detailausbildung. Beim Textilbeton sind alle Dimensionen des Stahlbetons – vereinfacht ausgedrückt – um eine Größenordnung kleiner. Das Größtkorn liegt nicht im Bereich von 8 bis 32 mm, sondern zwischen 1 und 4 mm (je nach Anwendung auch darunter). Statt 6 bis 32 mm (0,28 bis 8,04 cm²) Durchmesser bei Stab- und Mattenstahl beträgt er bei textiler Bewehrung nur 0,6 bis 2,5 mm (0,0025 bis 0,02 cm²), siehe Bild 3. Die Stababstände liegen beim Textilbeton im Bereich von 5 bis 25 mm statt der im Stahlbeton üblichen 5 bis 25 cm. Schließlich folgen auch die Dimensionen der Bauteile, vor allem die Bauteildicke, dieser Skalierung. Typische Bauteildicken für Textilbeton liegen im Bereich von 10 bis 30, maximal 50 mm (Bild 4).

¹⁾ An dieser Stelle wird bewusst von Verformungsvermögen gesprochen. Duktil im klassischen Sinn ist Textilbeton nicht, denn die verwendeten Materialien besitzen keine Plastizität und versagen spröde.



Bild 3. Größenvergleich für Bewehrungen; von oben nach unten: Glasfaser, Carbonfaser, Bewehrungsstahl 14 mm, Spannlitze 150 mm²

Die Dimensionen von Tragwerken aus Textilbeton sind dieser Skalierung nicht zwingend unterworfen. Offensichtlich ist jedoch, dass die Gebrauchstauglichkeit und speziell die Verformungsbegrenzung auch bei Textilbeton zu den schon vom Stahlbeton bekannten Schlankheiten führt. Die Vollplatte ist ein gutes Beispiel dafür, wie zulässige Verformungen maßgebend für die Bauteilabmessungen werden. In vielen Fällen wird der Nachweis der Verformungsbegrenzung nach DIN 1045-1:2008-08, 11.3.2 indirekt über die Biegeschlankheit geführt. 10 bis 30 mm Bauteildicke führen damit zu Spannweiten von 35 bis 100 cm. Kann man damit sinnvoll Tragwerke konstruieren? Das mehrfach ausgezeichnete Beispiel



Bild 5. Ansicht der ersten Textilbetonbrücke; Konstruktionsformen für Textilbeton müssen sich noch weiterentwickeln

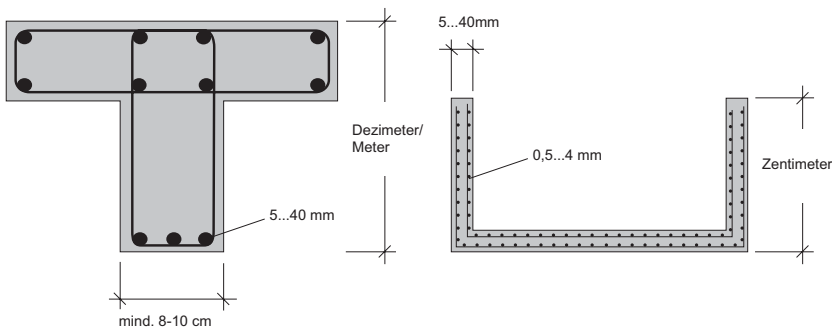
der Fußgängerbrücke in Oschatz [4] zeigt, dass es möglich ist, aber auch, dass die Konstruktionen des Stahlbetons nicht direkt auf textilbewehrten Beton übertragbar sind (Bild 5).

In Anlehnung an [73] kann Textilbeton wie folgt definiert werden:

Textilbeton ist ein extrem dünnwandiger bewehrter Beton, üblicherweise hergestellt aus einem hydraulisch erhärtenden Feinbeton und endloser, gitterartiger, mehrlagiger textiler Bewehrung. Die textilen Bewehrungen können aus AR-Glas, Carbon oder anderen geeigneten endlosen Hochleistungsfasern bestehen.

1.5 Potenzial als Verstärkungsmaterial

Durch die Verwendung von Hochleistungsfasern aus AR-Glas oder Carbon können Textilbetonschichten sehr hohe Zugkräfte aufnehmen. Die Festigkeiten dieser Fasern liegen ein Vielfaches über der des Bewehrungsstahls und können auch die des Spannstahls übertreffen. Carbonfasern



a) Stahlbeton

b) Textilbeton

Bild 4. Gegenüberstellung typischer Dimensionen und Bauteilabmessungen von Stahlbeton und Textilbeton

werden bereits seit Ende der 1980er-Jahre als Faserverbundkunststoffe (FVK) in Form von Lamellen und Sheets zur Bauwerksverstärkung erfolgreich eingesetzt. Die Verwendung von FVK hat viele Vorteile. Sie sind sehr leicht, besitzen hohe Steifigkeit, Festigkeit und Dauerhaftigkeit.

Textilbeton basiert auf den gleichen Hochleistungsfasern, bettet diese aber in eine zementgebundene Matrix (Beton) ein statt in eine Polymermatrix (Epoxidharz). Durch die Verwendung eines Betons als Matrix verbessern sich die Kompatibilität zum Stahlbeton und die bauphysikalischen Eigenschaften. Die Begrenzung des Bewehrungsgehaltes bei Verwendung einer Betonmatrix führt als Nebeneffekt zu einer sanfteren Krafteinleitung in das zu verstärkende Bauwerk, da die Bewehrung ein flächenförmiges Erscheinungsbild statt der starken eindimensionalen Ausrichtung der FVK besitzt. Tragfähigkeiten und Verformungsvermögen von FVK und Textilbeton sind wegen des gleichen Bewehrungsmaterials weitgehend vergleichbar.

Klare Vorteile des Textilbetons sind z. B. der Erhalt des Ankündigungsverhaltens beim Versagen durch eine weiterhin sichtbare Rissbildung und ein wesentlich größerer Temperaturbereich für den Einsatz, bis hin zur Brandbeständigkeit.

Abschnitt 9 zeigt eine Gegenüberstellung der Verstärkung mit Textilbeton mit den FVK und anderen bereits etablierten Verstärkungsmethoden, z. B. Spritzbeton und Aufbeton, einschließlich spezifischer Eigenschaften, Vor- und Nachteile und typische Anwendungsbereiche. Gegenüber einer Spritzbetonverstärkung haben Textilbetonverstärkungen den Vorteil wesentlich kleinerer Veränderungen der Bauteilabmessungen und des Eigengewichts.

Bauwerke sind Teil unserer (Bau-)Kultur und ihr Erhalt für nachfolgende Generationen ist ein wichtiger Aspekt unseres Handelns, wie wir mit unserer Kultur, ihrer Entwicklung und unseren heutigen (gewachsenen) Ansprüchen umgehen. Der Erhalt vorhandener Bausubstanz ist aber auch gleichzeitig ein wesentlicher Beitrag zu Nachhaltigkeit und nachhaltigem Umgang mit unseren Ressourcen (Material- und Energieeinsatz). Denn eine Sanierung und Instandsetzung vorhandener Bausubstanz benötigt meist wesentlich weniger endliche und viel mehr erneuerbare Ressourcen (Arbeitskraft) als Abriss und Errichtung von Ersatzbauten.

2 Fasermaterialien für textile Bewehrungen

2.1 Begriffe

Für Bauingenieure und Architekten ist der Kontakt mit Textilbeton zunächst mit einer Vielzahl neuer, leider nicht immer konsistent verwendeter

Begriffe aus dem Bereich der Textiltechnik verbunden, die verschiedene Bestandteile und Erscheinungsformen von Fasern und Textilien kontextabhängig beschreiben. Es werden die wichtigsten Begriffe im Zusammenhang mit Textilbeton erklärt, wie sie auch im weiteren Verlauf dieses Beitrags verwendet werden, siehe Kasten S. 464. Die englische Übersetzung ist jeweils in Klammern angegeben. Für detaillierte Informationen zu Fasermaterialien und Fasern sei bspw. auf [8] und [14] verwiesen. Anschließend werden die Anforderungskriterien für die Auswahl geeigneter Fasern entwickelt.

Neben den speziellen textiltechnischen Fachtermini für die unterschiedlichsten Textilien und textilen Herstellungsverfahren ist die *Feinheit* einer der wichtigsten Begriffe im Zusammenhang mit textilen Bewehrungen. Im Gegensatz zu Stahlstahlbewehrung ist bei den textilen Bewehrungen die Angabe eines Durchmessers in den wenigsten Fällen sinnvoll, da i. d. R. Multifilamentgarne, also Bündel aus vielen einzelnen Filamenten, eingesetzt werden. Die Angabe eines Durchmessers ist dort nur für die Elementarfaser möglich. Garne werden in der Textiltechnik durch die Feinheit f mit der Maßeinheit tex charakterisiert (vgl. Tabelle 1).

$$1 \text{ tex} = \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ m}}$$

Die im Bauwesen für Bewehrung übliche Querschnittsfläche ergibt sich, indem die Feinheit in tex durch die Dichte ρ des Materials (z. B. in g/cm^3) dividiert wird.

$$A = \frac{f}{\rho}$$

So hat ein Carbonfilamentgarn mit der Feinheit $f = 800 \text{ tex}$ und der Dichte $\rho = 1,80 \text{ g/cm}^3$ eine Querschnittsfläche von $A_{f1} = 800 \text{ tex} / 1,80 \text{ g/cm}^3 \times 10^3 = 0,44 \text{ mm}^2$.

In den folgenden Abschnitten wird darauf eingegangen, welche Materialien bzw. textilen Herstellungsmethoden sich für den Einsatz bzw. die Herstellung von textiler Betonbewehrung besonders

Tabelle 1. Bezeichnung der Filamentgarnfeinheit (lineare Dichte) mit der Einheit tex

1 ctex (centi tex)	=	0,01 g/1000 m (1 km)
1 dtex (deci tex)	=	0,1 g/1000 m (1 km)
1 tex	=	1 g/1000 m (1 km)
1 htex (hecto tex)	=	100 g/1000 m (1 km)
1 ktex (kilo tex)	=	1000 g/1000 m (1 km)

Begriffserklärungen, Teil 1

Faden (thread) – Oberbegriff von Garn und Zwirn.

Faser (fibre) – bezeichnet die Elemente eines natürlichen oder künstlich hergestellten Materials, aus dem die textilen Strukturen wie Garne, Zwirne, Gewebe, Gelege, Gestricke o. a. bestehen. Eine Faser ist dadurch charakterisiert, dass ihre Länge mehr als das 100-Fache ihres Durchmessers beträgt. Fasern sind also Elemente, die mit verschiedenen textilen Verarbeitungstechniken zu textilen Strukturen verarbeitet werden können. Wesentliche Voraussetzung für die Verarbeitung sind neben einer Mindestlänge von ca. 5 mm eine bestimmte Flexibilität und Festigkeit. Weitere Eigenschaften zur Charakterisierung einer Faser sind bspw. Feinheit, Elastizitätsmodul, Gleichmäßigkeit und Dauerhaftigkeit. Außerdem wird Faser als ein übergeordneter allgemeiner Begriff verwendet. Je nach Kontext kann damit ein Filament, ein Garn, ein Filamentgarn, ein Multifilamentgarn oder auch eine Kurzfaser gemeint sein. *Anm.*: Oft wird der Begriff auch innerhalb einer Publikation nicht konsistent verwendet.

Feinheit bzw. Titter (fineness) – ist ein Maß zur Beschreibung der linearen Dichte eines eindimensionalen Materials wie Filament, Garn, Zwirn oder textile Struktur. In Europa wird die Feinheit in tex gemessen²⁾.

Filament (filament) – ist eine Elementarfaser undefinierter oder großer Länge, bspw. die der Naturfaser Seide oder künstlich gesponnener Fasern.

Filamentgarn, Multifilamentgarn (filament yarn, multifilament yarn) – besteht aus zahlreichen parallelen Filamenten ohne Drehung.

Garn (yarn) – ist ein allgemeiner Begriff für endlose Stränge aus textilen Fasern und/oder Filamenten in einer Form, die sich zur Herstellung textiler Strukturen eignet. Garne gibt es in verschiedenen Formen:

- als Anzahl zusammengedrehter Garne, wobei die Drehung den Zusammenhalt der Garne bewirkt (*Zwirn*),
- als Anzahl paralleler Filamente ohne Drehung (*Rovings, Multifilamentgarne*),
- als Anzahl paralleler Filamente mit einer gewissen Drehung (*gedrehte Garne*),

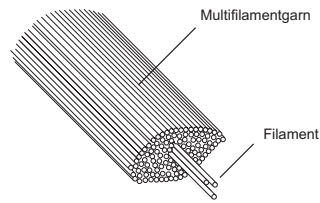


Bild 6. Multifilamentgarne bzw. Rovings bestehen aus hunderten oder tausenden Filamenten (Elementarfasern)

- als Einzelfilamente mit oder ohne Drehung (*Monofilamente*³⁾),
- als schmale Streifen aus Materialien wie Papier, Kunststofffilme oder Metallfolien mit und ohne Drehung zur Verwendung in textilen Strukturen.

Roving (roving) – (deutsch Faserbündel) ist ein Bündel endloser, gestreckter, unverdrehter Fasern bzw. Filamente (Bild 6). Der englische Begriff ist auch im deutschen Sprachraum üblich.

Drehung (twist) – bezeichnet die Anzahl der Drehungen des Garns um seine Längsachse, bezogen auf eine bestimmte Länge, z. B. Drehungen pro Meter oder Drehungen pro Zoll.

Schlichte (sizing) – ist eine während der Garnherstellung aufgetragene Beschichtung aus einer wässrigen Dispersion mit überwiegend organischem Anteil aktiver Substanzen. Die Schlichte hat mehrere Funktionen. Sie beeinflusst die Reibung der Filamente untereinander und – bei Kontakt mit den Maschinenteilen der Textilmaschine – elektrostatische Aufladungen und damit über einen verbesserten Zusammenhalt der Filamente und verringerten Abrieb die Verarbeitungseigenschaften der Garne. Oft werden auch Substanzen zugegeben, die mikroskopische Defekte in der Faseroberfläche bedecken und so die Festigkeit der Garne und andere anwendungsrelevante Eigenschaften positiv beeinflussen.

Strang (strand) – ist im Zusammenhang mit textilen Fasern eine Anzahl von Filamenten, die einen gewissen Zusammenhalt zeigen. Garne bzw. Rovings können aus mehreren Strängen bestehen.

tex – ist die Maßeinheit der linearen Dichte. 1 tex entspricht dem Gewicht eines Filaments, Garns, Zwirns oder anderen eindimensionalen textilen Produkts in Gramm pro 1000 Meter.

²⁾ In den USA wird die Feinheit in Denier gemessen. Offiziell ist dies die Anzahl von 0,05 g Einheiten pro 450 m Länge, was rechnerisch dem Gewicht in 9000 m Material in Gramm entspricht. Dieses System wird außerhalb der USA nur noch in wenigen Ländern verwendet.

³⁾ Nach dieser Definition ist der Einzelstab einer handelsüblichen Betonstahlmatte ein Monofilament, denn das Schweißen als Fügeverfahren ist aus textilttechnischer Sicht eines der möglichen Verfahren zur Bildung eines flächigen Textils.

eignen. Damit eine Faser als Bewehrung für Beton geeignet ist, muss sie ein bestimmtes Anforderungsprofil erfüllen. Offensichtliche Merkmale sind z. B. ausreichende Dauerhaftigkeit, Festigkeit und Dehnsteifigkeit. Wie sich gezeigt hat, stellt der Einsatz als Betonbewehrung konkrete – und teilweise recht hohe – Anforderungen, die nur wenige der zahlreichen verfügbaren Faserarten und -materialien erfüllen.

2.2 Anforderungen und Auswahlkriterien

Für die Definition eines Anforderungsprofils ist zunächst die genaue Funktion der Bewehrung zu klären. Bewehrungen haben in Betonbauteilen unterschiedliche Aufgaben. Sie übernehmen natürlich die Zugkräfte, wenn der Beton gerissen ist. Bewehrungen müssen aber auch einige darüber hinausgehende Funktionen und Eigenschaften in Abhängigkeit von Einsatzort, -zweck und -dauer aufweisen. In den meisten Fällen bestehen aus Gründen der Dauerhaftigkeit (besonders bei Stahlbeton) und der Funktion (Dichtheit, Ästhetik) Anforderungen an die Verbundeigenschaften und das Verformungsverhalten, damit die zulässigen Rissbreiten eingehalten werden können. Der Anwendungszweck, der in diesem Beitrag betrachtet wird, ist die Verwendung der Fasern zur Herstellung textiler Bewehrung für Textilbeton zur Verstärkung von existierenden Stahlbetonkonstruktionen.

Anforderungen an die textile Bewehrung können aus der Analyse eines möglichen Verstärkungsszenarios abgeleitet werden. Dazu wählen wir zunächst die einfachste mögliche Verstärkungsaufgabe als fiktives Szenario. Gegeben sei eine Stahlbetonplatte mit vorhandener, aber unzureichender Stabstahl- oder Mattenbewehrung in der Zugzone. Die Verstärkungsaufgabe bestehe in der Erhöhung der Tragfähigkeit, z. B. durch Applikation einer zusätzlichen Zugbewehrung an der Bauteiloberfläche in der Zugzone.

Die geforderte Tragfähigkeit kann durch die vorhandene Bewehrung nur zum Teil abgedeckt werden, die Textilbetonverstärkung muss also eine bestimmte Kraft in der Zugzone übernehmen. Die Textilbetonverstärkung besteht aus einer Betonschicht, in die in der erforderlichen Menge und Orientierung textile Bewehrungen eingebettet werden. Je nach Leistungsfähigkeit der textilen Bewehrung ist eine entsprechende Menge (Gesamtmenge Fasern und Anzahl Lagen textiler Bewehrungen) erforderlich. Solange die Verstärkungsschicht insgesamt klein gegenüber den vorhandenen Bauteilabmessungen bleibt, hat die Schichtdicke einen vernachlässigbaren Einfluss auf die erforderliche aufzunehmende Zugkraft. Die Anforderungen an die textile Bewehrung ergeben sich nun aus verschiedenen Gesichtspunkten:

1. Als wesentliche Voraussetzung für die Realisierung von dünnen Verstärkungsschichten aus Textilbeton müssen die verwendeten Fasern sowohl im alkalischen Milieu des jungen Betons als auch im karbonatisierten Beton dauerhaft sein und dürfen nicht korrodieren.
2. Aus technologisch-wirtschaftlichen Aspekten scheint es sinnvoll, möglichst wenige Bewehrungslagen zu applizieren, da jede einzelne Bewehrungslage in einem separaten Arbeitsschritt in eine eigene Betonlage eingebaut werden muss. Daraus ergibt sich der Wunsch nach einer hohen Tragfähigkeit pro Bewehrungslage. Die pro Bewehrungslage aufnehmbare Zugkraft ist das Produkt aus Festigkeit und Querschnittsfläche. Folglich ist eine möglichst hohe Zugfestigkeit des Fasermaterials wünschenswert.
3. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Einleitung der Kräfte von der Betonmatrix in die textile Bewehrung. Vorteilhaft sind möglichst kurze Lasteinleitungslängen, sodass die Verankerungslängen der Verstärkungsschicht kurz bleiben.
4. Als limitierender Faktor bei der Verankerung der Verstärkungsschicht steht den angestrebten kurzen Verankerungslängen die Tragfähigkeit des Betons der vorhandenen Konstruktion und die der Feinbetonmatrix der Textilbetonschicht entgegen, denn die über den Verbund in die textile Bewehrung eingetragenen Kräfte führen zu entsprechenden Beanspruchungen des umgebenden Betons. Kritisch sind hier insbesondere:
 - a) die Zugbeanspruchungen im Beton senkrecht zur Bauteiloberfläche, die zu einem Delaminationsversagen führen können und
 - b) die Zugspannungen senkrecht zur Bewehrungsrichtung in der Ebene senkrecht zur Bauteiloberfläche, die zu Spaltrissen führen können.

Beide Versagensarten sind zu vermeiden und begrenzen die übertragbaren Verbundkräfte.
5. Stahlbeton ist bekannt für sein duktilen Verhalten im Grenzzustand der Tragfähigkeit. Wünschenswert ist, dass diese positive Eigenschaft auch für das verstärkte Bauteil erhalten bleibt. Zumindest sollte eine ausreichende Verformbarkeit des verstärkten Bauteils gewährleistet sein, damit auch weiterhin die für statisch unbestimmte Stahlbetontragwerke typischen Umlagerungen infolge rissbildungsbedingter Steifigkeitsänderungen möglich sind. Daraus ergibt sich der Wunsch nach einer Bruchdehnung des Faserwerkstoffs, der mit der des Bewehrungsstahls identisch ist, also größer als 25 bzw. 50 ‰. Da es bereits als kritischer

Zustand bewertet wird, wenn die (stählerne) Bewehrung ins Fließen kommt, sollte die Bruchdehnung zumindest oberhalb der Fließgrenze des Bewehrungsstahls liegen, also größer sein als 2,5 %.

6. Im Gebrauchszustand dürfen die Bauteilverformungen bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten. Da die Gebrauchslast mit der Erhöhung der Tragfähigkeit ebenfalls ansteigt, die zulässigen Verformungen im Allgemeinen jedoch nicht, muss das verstärkte Bauteil entsprechend steifer sein als im unverstärkten Zustand. Das führt zu der Forderung nach einer möglichst hohen Dehnsteifigkeit der Fasern für die Textilbetonverstärkung.
7. Je nach Dauer und Häufigkeit der einwirkenden Kräfte kommen Anforderungen an die Langzeiteigenschaften der textilen Bewehrung hinzu. Bei vorwiegend nicht ruhender Beanspruchung muss eine entsprechende Ermüdungsfestigkeit vorhanden sein. Aus der Häufigkeit und Dauer der Einwirkung ergeben sich Anforderungen an die Dauerstandfestigkeit.
8. Die rheologischen Eigenschaften des Betons der Textilbetonverstärkung und das darin enthaltene Zuschlagkorn begrenzen den praktisch erreichbaren Bewehrungsgrad und bestimmen damit die Schichtdicke einer Textilbetonverstärkung mit. Vom Stahlbeton ist dieser Zusammenhang hinreichend bekannt. Qualitativ hochwertiger und ausreichend verdichteter Beton ohne Fehlstellen ist nur möglich, wenn die Ausbildung der Bewehrung, die Zusammensetzung und Konsistenz des Betons sowie die Verarbeitungstechnologie aufeinander abgestimmt sind. Die normativ zulässige Grenze [119] liegt bei einem Bewehrungsgrad von 9 %. Praktisch wird die Betonage bereits ab 5 % schwierig. Üblich sind bei Stahlbetonbauteilen Bewehrungsgrade im Bereich zwischen 1 und 2 %. Für die weiteren Betrachtungen soll angenommen werden, dass für den Textilbeton ähnliche Bewehrungsgrade realistisch sind. Eine möglichst hohe Festigkeit der Fasern ist demnach auch aus technologischen Gründen wünschenswert.

Die Anforderungen sollen noch einmal kurz zusammengefasst werden. Damit eine Faser als Bewehrung im Beton und insbesondere für die Anwendung als Verstärkung von bestehenden Betonbauteilen geeignet ist, muss sie folgendes Anforderungsprofil erfüllen:

- **Dauerhaftigkeit:** Die Materialien müssen sowohl im alkalischen Milieu des Betons im jungen Alter als auch nach der Passivierung infolge Karbonatisierung resistent gegen Korrosion sein.

- **Elastizitätsmodul:** Für eine gute Kompatibilität von herkömmlicher und textiler Bewehrung und zur Minimierung der Verformungen im Gebrauchszustand sollten die Fasern einen Elastizitätsmodul aufweisen, der in der Größe des Elastizitätsmoduls von Stahl liegt ($E_s = 200.000 \text{ N/mm}^2$).
- **Zugfestigkeit:** Vorteilhaft ist eine möglichst hohe Zugfestigkeit. Die Zugfestigkeit des Bewehrungsstahls ($f_{sy} = 500 \text{ N/mm}^2$) kann als Orientierung dienen. Materialien mit niedrigeren Zugfestigkeiten scheinen ungeeignet.
- **Zugbruchdehnung:** Eine dem Bewehrungsstahl vergleichbare Zugbruchdehnung ($\epsilon_{su} = 25 \dots 50 \text{ ‰}$) scheint ideal. Mindestens sollte jedoch die Fließdehnung des Stahls ($\epsilon_{sy} = 2,5 \text{ ‰}$) erreicht werden, damit das gutmütige Ankündigungsverhalten von Stahlbeton erhalten bleibt und sowohl die vorhandene Stahlbewehrung als auch die zusätzliche textile Bewehrung im Bruchzustand ausgenutzt werden können.
- **Langzeiteigenschaften:** Die Dauerstandfestigkeit und Ermüdungsfestigkeit gewinnen als Anforderung an Bedeutung, je höher der Anteil ständig wirkender Lasten in der Verstärkung ist, insbesondere bei vorwiegend nicht ruhender Beanspruchung. Geringes Kriechen bzw. Relaxation sind ebenfalls wichtige Auswahlkriterien.
- **Verarbeitbarkeit:** Zur Herstellung von textilen Strukturen muss auch die technologische Verarbeitbarkeit der Fasern gegeben sein.

Für eine wirtschaftliche Anwendung spielen zusätzlich die Kosten eine wichtige Rolle. Gewichtsbezogene Kosten in €/kg, wie sie für Stahl und Beton als Maßstab bekannt sind, sind keine geeignete Vergleichsbasis, denn es müssen die zum Teil erheblich abweichende Dichte der Materialien und ihre Langzeiteigenschaften berücksichtigt werden. Bei einzelnen Materialien gibt es einen deutlich ausgeprägten Unterschied zwischen der Kurzzeitfestigkeit und der Dauerstandfestigkeit. Die dafür verantwortlichen Effekte werden in einem späteren Abschnitt erläutert. Im folgenden Abschnitt werden verschiedene Fasermaterialien vorgestellt und es wird diskutiert, wie sie das oben entwickelte Anforderungspotenzial mit zum Teil gegensätzlichen Anforderungen erfüllen.

2.3 Überblick Fasermaterialien

Im vorhergehenden Abschnitt wurden die wesentlichen Anforderungen an die Fasern herausgearbeitet, wenn es um die Anwendung von Textilbeton zur Verstärkung vorhandener Stahlbetonbauteile geht. Bild 7 zeigt eine mögliche Einteilung der Faserarten. Bei der Auswahl geeigneter Faserarten für die Bewehrung von Beton ist es hilfreich

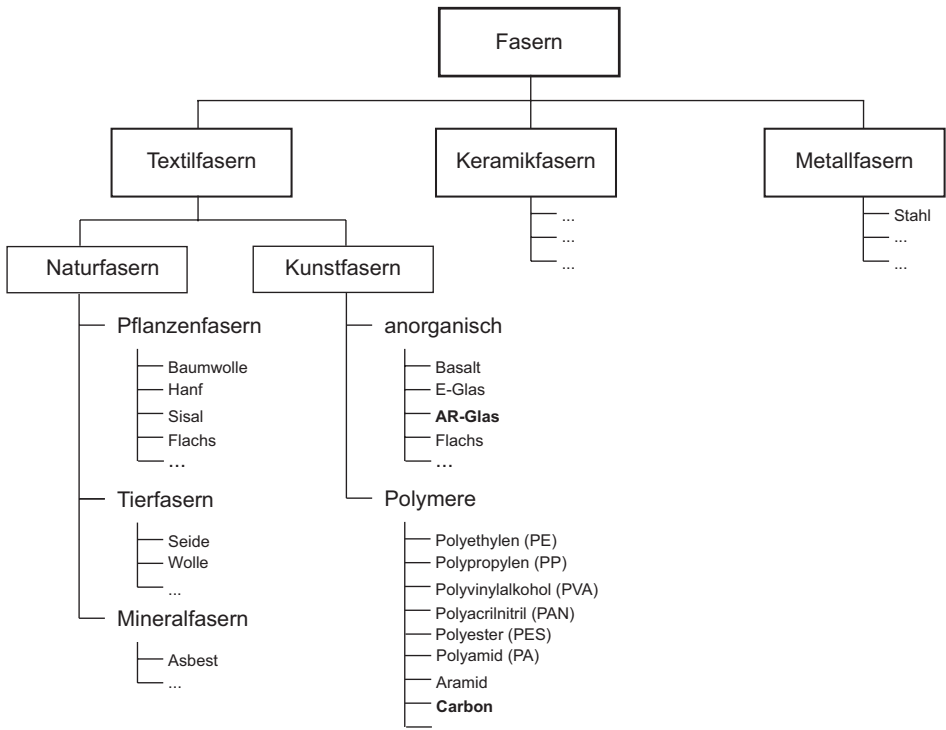


Bild 7. Einteilung der Faserarten in Anlehnung an [14]

und sinnvoll zu analysieren, welche Faserarten sich für faserverstärkte Kunststoffe (FVK) hauptsächlich bewährt haben. Auch dort übernehmen die Fasern die Verstärkungsfunktion und haben hinsichtlich Festigkeit, Steifigkeit und Bruchdehnung ein ähnliches Anforderungsprofil. Abweichungen von den Forderungen ergeben sich vor allem aus den speziellen Umgebungsbedingungen beim Einsatz in einer zementgebundenen Matrix. Bei FVK haben sich vor allem Fasern aus E-Glas (E = Electric, Standard-Glasfaser), Carbon und Aramid durchgesetzt. Sie zeichnen sich durchweg durch eine sehr hohe Festigkeit und einen hohen bis sehr hohen Elastizitätsmodul aus.

Textilfasern werden in Pflanzenfasern, Tierfasern und Chemiefasern eingeteilt [127]. *Tier- und Pflanzenfasern* sind für die Bewehrung von Beton nur von geringem Interesse. Das liegt zum einen an der Verfügbarkeit in ausreichend großen Mengen bei gleichbleibender Qualität, zum anderen an der teilweise sehr begrenzten Dauerhaftigkeit (sie verrotten leicht, besonders bei höherem Feuchteangebot) und den zum Teil problematischen Eigenschaftsänderungen bei Änderung der Umge-

bungsfeuchte. Ein weiterer Nachteil ist die im Vergleich zu Stahl geringere Festigkeit. Der Einsatz von Naturfasern als Betonbewehrung ist nur für einfachste Anwendungen sinnvoll und wird aus Gründen der Nachhaltigkeit vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländern vorangetrieben [102]. Für den Einsatz zur Verstärkung von Stahlbetontragwerken sind Pflanzenfasern aber keine Alternative.

Keramikfasern sind für die Herstellung textiler Betonbauteile ohne Bedeutung. Sie besitzen zwar ähnliche oder bessere mechanische Eigenschaften als z.B. Glasfasern und darüber hinaus eine sehr gute Temperaturbeständigkeit. Sie können aber im Regelfall nicht zu offenen gitterartigen Bewehrungsstrukturen verarbeitet werden. Ihr Einsatzgebiet liegt im Bereich der Kurzfaserbewehrung verschiedener Matrices und bei Feuerfestprodukten (Dämmplatten, feuerfeste Bekleidungen).

Stahlfasern erfüllen bis auf eine Ausnahme alle im vorhergehenden Abschnitt genannten Anforderungen. Besonders interessant sind Litzen aus hochfestem und höchstfestem Stahl mit einem

Tabelle 2. Eigenschaften von Aramidfasern (nach [28])

Eigenschaft	Maßeinheit	HM-Fasern	HT-Fasern
Dichte	g/cm ³	1,44	–
Elastizitätsmodul	10 ³ N/mm ²	120 ... 146	235
Zugfestigkeit	10 ³ N/mm ²	2,14 ... 2,76	7,75
Bruchdehnung	‰	1,5 ... 2,4	3,3
Wärmeausdehnungskoeffizient	10 ⁻⁵ /K	– 3,5	–

Durchmesser von etwa einem Millimeter. Die Verbundeigenschaften zum Beton sind positiv zu bewerten und entsprechen denen des Bewehrungsstahls im Stahlbetonbau. Die Festigkeiten erreichen oder übertreffen die des Spannstahls ($f_{pu} = 1860 \text{ N/mm}^2$). Zu beachten ist die höhere Kerbempfindlichkeit im Vergleich zu normalem Bewehrungsstahl. Mit diesen Litzen lassen sich für Textilbeton geeignete textile Bewehrungen und damit dann hochtragfähige, sehr dünne Textilbetonelemente bzw. -schichten realisieren. Zur Dauerhaftigkeit ist anzumerken, dass nach den Herstellerangaben zur Vermeidung der Korrosion spezielle Oberflächenbeschichtungen (Verzinkung, Galvanisierung) eingesetzt werden. Genauere Angaben oder belastbare Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von hochfesten Stahllitzen in dünnen (karbonatisierten) Betonschichten sind zurzeit noch nicht verfügbar. Aus diesem Grund wird auf diese grundsätzlich interessante Alternative als Bewehrungsmaterial für Textilbeton hier nicht näher eingegangen.

Aramidfasern sind künstlich durch Polykondensation hergestellte goldgelbe Polymerfasern. Im Handel sind sie z. B. unter den Namen Kevlar, Spectra, Technora oder Twaron erhältlich. Nach den Kriterien Festigkeit, Steifigkeit, Schlagzähigkeit und Bruchdehnung sind Aramidfasern den Glasfasern überlegen (s. Tabelle 2). Hochmodulige und hochfeste Typen (HM high modulus, HT high tenacity) erreichen einen E-Modul in der Größe von Stahl bzw. von Carbonfasern, sind dann allerdings aber teurer als Letztere [65]. Aramidfasern werden als Filamentgarne mit einigen Tausend Filamenten geliefert. Der Filamentdurchmesser liegt meist in der Größe von etwa 10 µm. Die Fasern sind beständig gegen Hitze (beginnen aber ab etwa 400 °C zu verkohlen) und besitzen eine gute Beständigkeit gegenüber Säuren und Laugen.

Aramide haben für den Einsatz als Verstärkungsfaser im Beton einige nachteilige Eigenschaften. Sie besitzen einen negativen Wärmeausdehnungskoeffizienten⁴⁾ und reagieren auf Feuchtigkeit mit einem Rückgang der Festigkeit. Eine weitere un-

erwünschte Eigenschaft ist die Empfindlichkeit gegenüber UV-Strahlung. Bei direkter Sonneneinstrahlung kann ein deutlicher Zugfestigkeitsverlust eintreten [28]. Belastbare Aussagen zum Langzeitverhalten von Aramid sind den Autoren nicht bekannt, sodass ein Einsatz im Bereich der Tragwerksverstärkung in einer zementösen Matrix derzeit nicht möglich ist.

Basaltfasern sind als Multifilamentgarne lieferbar, besitzen Filamentdurchmesser von 10 bis 20 µm und zeigen eine Färbung von dunkel-oliv bis golden. Der Schmelzpunkt liegt bei ca. 1.450 °C, der Erweichungspunkt bei etwa 1050 °C. Sie sind in ihren mechanischen Eigenschaften den Glasfasern recht ähnlich (Tabelle 3). Sie werden in dem gleichen Prozess wie Glasfasern hergestellt, allerdings wird das Ausgangsmaterial aus natürlichen Basaltvorkommen gewonnen. Basaltfasern nehmen praktisch kein Wasser auf, sind nicht toxisch, chemisch inert und als Temperatureinsatzgrenze werden i. d. R. 700 °C angegeben. Die Marktpreise liegen unter denen von AR-Glasfasern. Die Dauerhaftigkeit bisher lieferbarer Basaltfasern im alkalischen Milieu des Betons ist allerdings nach unveröffentlichten Untersuchungen im Sonderforschungsbereich 528 schlechter als die der speziell für den Einsatz im Beton entwickelten AR-Glasfasern. Aus diesem Grund sind Basaltfasern derzeit keine Alternative für den Einsatz zur Verstärkung von Betonbauteilen.

Die meisten der verfügbaren *Polymerfasern*, wie z. B. Polyethylen, Polypropylen und Polyester, sind aufgrund ihres niedrigen Elastizitätsmoduls, der großen Bruchverformungen und des oft unzureichenden Bindungsvermögens zum Beton nicht

⁴⁾ Grundsätzlich wird es als günstig empfunden, wenn Matrix und Bewehrung etwa gleiche Ausdehnungskoeffizienten haben. Insbesondere bei wechselnder Temperatur können große Unterschiede der Temperaturdehnungskoeffizienten maßgebend für die Bemessung werden, denn schon der Tagesgang der Temperatur wird dann u. U. zu einem Ermüdungslastfall. Das schränkt den Einsatzbereich ein.

Tabelle 3. Eigenschaften von Basaltfasern nach Herstellerangaben

Eigenschaft	Maßeinheit	Wertebereich
Dichte	g/cm^3	2,75 ... 2,80
Filamentdurchmesser	μm	10 ... 19
Elastizitätsmodul	10^3 N/mm^2	89
Zugfestigkeit (Filament)	10^3 N/mm^2	4840
Bruchdehnung (Filament)	%	5,4
Zugfestigkeit (Roving)	N/mm^3	2800
Bruchdehnung (Roving)	%	3,15
Wärmeausdehnungskoeffizient	$10^{-5}/\text{K}$	5,5

für die Tragwerksverstärkung geeignet. Deshalb werden sie hier nicht weiter betrachtet. Sie werden in den textilen Bewehrungen als Bindefäden eingesetzt.

Für den Einsatz als Bewehrung im Textilbeton zur Anwendung als Verstärkungsmaterial für Stahlbetonbauteile haben *Fasern aus alkaliresistentem Glas* (AR-Glas) und vor allem *aus Carbon* das beste Eigenschaftsprofil. Auf beide Fasern wird in den folgenden beiden Abschnitten detaillierter eingegangen.

2.4 AR-Glas

2.4.1 Herstellung

Der Glaszustand entsteht durch eine rasche Abkühlung einer Schmelze, sodass die Kristallisation (Bild 8a) unterdrückt wird. Es entsteht eine durch Netzbildner geformte amorphe Struktur (Bild 8b). Die Einlagerung von Fremdatomen (Netzwerkmodifizierer, s. Bild 8c) soll eine Stabilisierung des Netzwerks bewirken. Glas wird auch als unterkühlte oder erstarrte Flüssigkeit betrachtet. Aufgrund dieser Struktur haben Gläser keinen Schmelzpunkt, sondern der Phasenübergang findet in einem Transformationsbereich statt.

Normale E-Glasfasern sind im hochalkalischen Milieu des Betons nicht beständig. Sie werden innerhalb kurzer Zeit aufgelöst und verlieren vollständig ihre Festigkeit.

Alkaliresistente Glasfasern wurden speziell für den Einsatz im alkalischen Milieu des Betons entwickelt. Die erhöhte Alkalibeständigkeit beruht auf der Zugabe von Zirkoniumdioxid ZrO_2 . Es hilft, das Glasnetzwerk widerstandsfähiger gegen den alkalischen Angriff zu machen und damit die Beständigkeit von Glasfasern sehr deutlich zu erhöhen, sodass der Einsatz als Bewehrung im Beton möglich ist. Da die Fa. Pilkington (Marken-

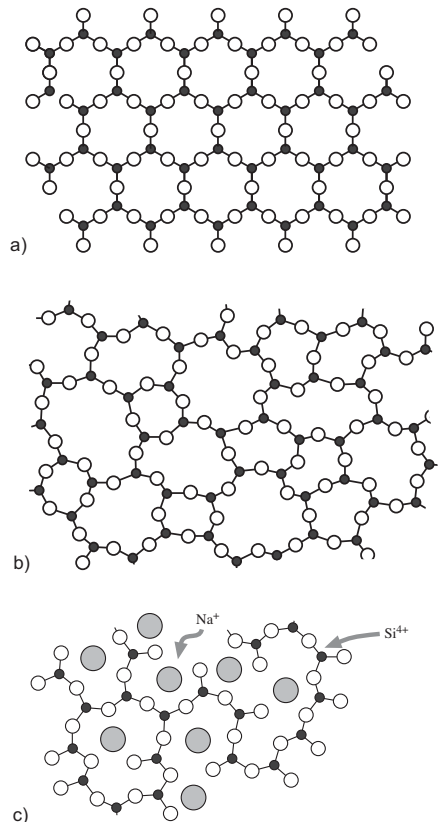


Bild 8. Schematischer Vergleich verschiedener atomarer Strukturen von Glas (nach [28]): a) kristallines Siliziumdioxid, b) Netzwerkstruktur von Glas mit dem Netzbildner Siliziumdioxid, c) Einbau von Netzwerkwandlern in die Glasstruktur

name der Faser: Cem-FIL, das spanische Werk war lange Zeit im Besitz der Saint Gobain VETROTEX und gehört seit kurzem zu OCV Reinforcement) diese Zusammensetzung mit Zirkoniumdioxidgehalten zwischen 16 und 18 % patentiert hat, müssen Wettbewerber – derzeit Nippon Electric Glas (NEG) aus Japan und Xiang-Fan Huierjie Glassfibre Co., Ltd. aus China – mit höheren – wie NEG – oder niedrigeren Zirkoniumdioxidgehalten arbeiten. Durch den höheren ZrO_2 -Gehalt haben die Fasern von NEG einen etwas höheren Elastizitätsmodul im Vergleich zu den Cem-FIL-Fasern.

Die Herstellung von AR-Glasfasern erfolgt ausschließlich im Düsenziehverfahren (Bild 9). Die Bestandteile werden aufgeschmolzen und nach ausreichender Homogenisierung über beheizte Kanäle den Spinddüsen zugeführt. Die Düsen befinden sich an der Unterseite einer Wanne aus einer speziellen Platin-Rhodium-Legierung. Die Anzahl der Öffnungen mit einem Durchmesser von etwa 2 mm im Wannenboden entspricht der Anzahl der Filamente des zu ziehenden Garns. Die Schmelze tritt durch ihr Eigengewicht durch die Düsen hindurch und wird von unten mit Geschwindigkeiten zwischen 30 und 50 m/s abgezogen. Über die Düsendurchmesser, -temperatur und

Abzugsgeschwindigkeit wird der Durchmesser der Filamente gesteuert. Im weiteren Verlauf werden die Filamente mit einer Schlichte beschichtet und aufgespult. Es folgt die Trocknung bzw. Aushärtung der Schlichte in speziellen Öfen.

Die Schlichte ist eine wässrige Suspension aus Polymeren und zahlreichen anderen aktiven Substanzen. Die genaue Zusammensetzung der Schlichten ist ein gut geschütztes Betriebsgeheimnis der Firmen, denn die Schlichte beeinflusst entscheidend die Eigenschaften der Fasern. Sie überdeckt herstellungsbedingt Oberflächendefekte im Glaskörper, hat eine antistatische Wirkung, beeinflusst den Zusammenhalt der Garne, die Reibung zwischen den Filamenten und zwischen den Filamenten und den Maschinenteilen und hat so großen Einfluss auf die textile Verarbeitbarkeit der Garne, den Abrieb während der Herstellung der textilen Strukturen und auf die Festigkeit und Bruchempfindlichkeit der Filamente. Außerdem beeinflusst die Schlichte den Verbund zwischen den Filamenten untereinander und zwischen den Filamenten und der Betonmatrix und hat so einen entscheidenden Anteil an der Leistungsfähigkeit des Verbundwerkstoffs Textilbeton und insbesondere auf seine Festigkeit.

Je nach Herstellungsprozess wird zwischen assemblierten Rovings und Direktrovings unterschieden (Bild 10). Assemblierte Rovings werden nach dem Erspinnen in einem separaten Prozessschritt aus mehreren kleineren Rovings zusammengesetzt. Das kann sich problematisch auf die Festigkeit auswirken, wenn die einzelnen Stränge beim Zusammenführen keine gleichmäßige Fadenspannung aufweisen. Die einzelnen Stränge eines assemblierten Rovings weisen herstellungsbedingt quasi unvermeidliche Längendifferenzen auf. Das führt im Verbundwerkstoff bei Belastung zu einer verzögerten Aktivierung der Stränge mit größerer Länge und zu signifikanten Festigkeitsverlusten. Für die Anwendung als Bewehrung sind folglich die Direktrovings eindeutig zu bevorzugen, da hier Probleme mit ungleichmäßig gestreckten Filamenten so nicht auftreten können.

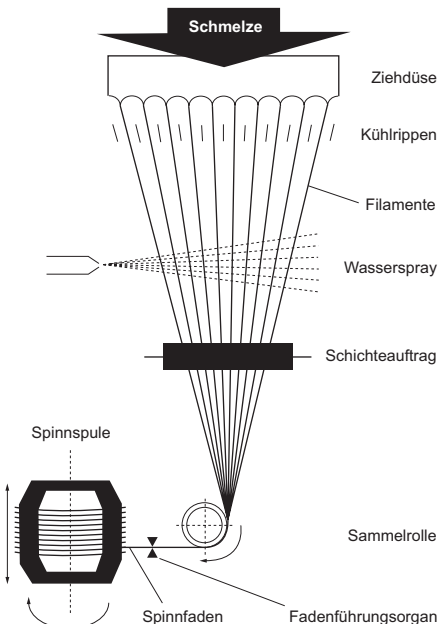


Bild 9. Schematische Darstellung des Düsenziehverfahrens [28]

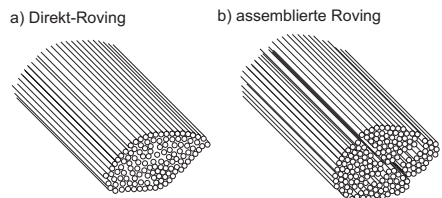


Bild 10. Direktrovings und assemblierte Rovings

2.4.2 Eigenschaften

AR-Glasfasern werden als Multifilamentgarne mit 400 bis 2000 Filamenten je Garn und Filamentdurchmessern zwischen 12 und 30 μm geliefert (Tabelle 4). Glasfasern sind nicht brennbar und farblos, erscheinen aber wegen der Streuung des Lichtes weiß. Je nach Schlichte oder Beschichtung kann das farbliche Erscheinungsbild des Endprodukts von dieser natürlichen Farbe abweichen. Für Anwendungen im Textilbeton sind Feinheiten ab etwa 310 tex von Interesse. Beim Einsatz kleinerer Feinheiten lässt sich aufgrund der rheologischen Eigenschaften des Betons der erforderliche Mindestfasergehalt⁵⁾ kaum erreichen.

Die mechanischen Eigenschaften der AR-Glasfasern sind in Tabelle 5 zusammengestellt. AR-Glasfasern haben sehr hohe Festigkeiten von weit über 2000 N/mm². Das ist durchaus erstaunlich, vergleicht man diese Werte mit der Festigkeit von Fensterscheiben⁶⁾ (bis 100 N/mm²) oder Glasfla-

schen (ca. 10 N/mm²). Letzteres sind zwei Beispiele aus dem täglichen Leben, die typisch für das sprichwörtlich spröde Verhalten von Glas sind. Um diesen Festigkeitsunterschied zu den dünnen Fasern zu verstehen, sind Kenntnisse zum Versagensmechanismus von Glas(fasern) hilfreich. Die theoretische Festigkeit von Glas liegt noch weit über den angegebenen Filamentfestigkeiten. Begrenzt wird die Festigkeit durch Defekte in der Glasstruktur und an der Glasoberfläche wie Einschlüsse, Fehlstellen oder vorhandene Mikrorisse. Die Sorgfalt im Herstellungsprozess und insbesondere das Düsenziehverfahren führen zu einer fast perfekten Oberfläche und verleihen den Fasern die enorm hohen Festigkeiten. Im Gegensatz dazu erhält z. B. Flachglas seine Form durch Gießen auf ein Zinnbad, wodurch das fertige Produkt eine deutlich höhere Anzahl Strukturdefekte und damit eine verminderte Festigkeit aufweist als Monofilamente [103] (Bild 11).

Die Abhängigkeit der Festigkeit vom Auftreten der Oberflächendefekte [99] führt direkt zur Abhängigkeit der Festigkeit von der Länge der getesteten Probe. Die Defekte sind auf der Oberfläche statistisch bzw. zufällig verteilt. Mit steigender Probenlänge wächst die Wahrscheinlichkeit, dass ein größerer Defekt vorhanden ist und zu einer geringeren Festigkeit im Versuch führt. Die Festigkeit von Glas hängt also von der Größe der Oberfläche der belasteten Probe ab [1].

Die Festigkeit eines Garns, also eines Faserbündels, fällt mehr oder weniger deutlich geringer aus als bei einem Einzelfilament. Das liegt einer-

- ⁵⁾ Der Mindestfasergehalt oder kritische Fasergehalt V_{crit} entspricht der Fasermenge, die in einem Bauteil – oder genauer in dessen Zugzone – vorhanden sein muss, damit die Fasern beim Eintreten der Rissbildung die frei werdenden Zugkräfte aufnehmen können und es zu keinem spröden Versagen des Bauteils kommt. Damit ist der kritische Fasergehalt also analog zur Mindestbewehrung bei Stahlbeton auch direkt von der Betonzugfestigkeit abhängig.
- ⁶⁾ Die Festigkeit von „normalem“ Fensterglas liegt je nach Alterungszustand im Bereich von etwa 30 bis 80 N/mm².

Tabelle 4. Auswahl kommerzieller AR-Glasrovings für Textilbeton (nach [65])

Bezeichnung	Nennfeinheit [tex]	Anzahl Filamente [Stück]	Filamentdurchmesser [μm]	Querschnittsfläche [mm^2]
Nippon Electric Glass (NEG), Japan				
AR310S-800/DB	310	800	13,5	0,11
AR630S-800/TM	620	1600	13,5	0,22
AR1100S-800/TM	1100	2000	16	0,39
AR2500S-800/DB	2500	2000	24	0,89
OCV Reinforcement, Spanien (früher Vetrotex)				
LTR ARC 320 5325	320	800	14	0,12
LTR ARC 640 5325	640	1600	14	0,23
LTR ARC 1200 5325	1200	1600	19	0,44
LTR ARC 2400 5325	2400	1600	27	0,88

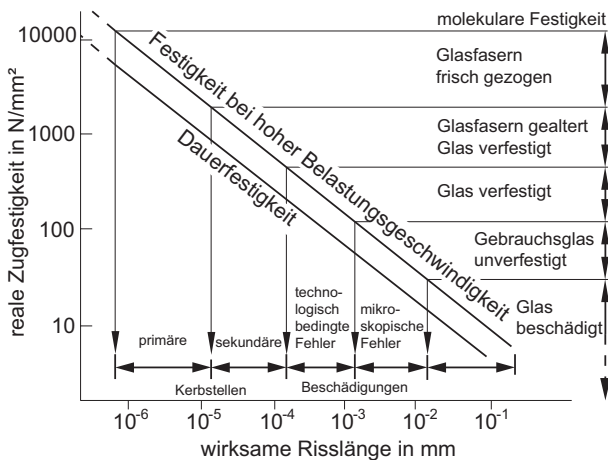


Bild 11. Einfluss der Oberflächenschäden auf die Zugfestigkeit von Glas (nach [103])

seits an der wesentlich größeren Prüflänge (100 mm bei Filamenten, 500 mm bei Garnen), unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten und Einspannbedingungen, aber andererseits hauptsächlich am Versagensmechanismus der Faserbündel, der sich von dem eines Filaments grundsätzlich unterscheidet. Mehr zu den Hintergründen⁷⁾ ist in Abschnitt 6 zu finden.

Für die Anwendung zur Bauwerksverstärkung nicht sehr vorteilhaft, aber für zahlreiche Anwendungen noch akzeptabel ist der relativ geringe Elastizitätsmodul. Er erreicht mit etwa 74.000 bis 80.000 N/mm² nur etwa 35 bis 40 % des Vergleichswertes von Stahl.

Der Temperatúrausdehnungskoeffizient von AR-Glas liegt sehr nahe an den Werten von Beton und Stahl, sodass im Zusammenspiel dieser Materialien keine Probleme zu erwarten sind.

Bei vielen Materialien unterscheiden sich die im Labor in Kurzzeitversuchen messbaren Eigenschaften zum Teil erheblich von den Materialeigenschaften am Ende der geplanten Lebens-

dauer. Ursachen können z.B. Materialalterung, Versprödung, chemischer Angriff aus der Umgebung bzw. Korrosion und Gefügeveränderungen in Abhängigkeit von der Art der Belastung und den Umgebungsbedingungen sein. Für den Einsatz von AR-Glasfasern bei der Bauwerksverstärkung mit Textilbeton spielen alle diese Mechanismen eine Rolle.

Bei der *Versprödung* sinken Verformungsvermögen und Festigkeit mit zunehmendem Alter des Textilbetons aufgrund von Veränderungen der Verbundeigenschaften zwischen den Glasfasern und der Feinbetonmatrix. Ursächlich sind das Fortschreiten der Hydratation und damit einhergehende Gefügebzw. -neubildungen in der Feinbetonmatrix. Die Mechanismen werden im Abschnitt 6.4 detailliert erläutert.

Das zweite wichtige Thema im Zusammenhang mit dem Langzeitverhalten ist die *Korrosion*. Wie bereits erläutert, wurden AR-Glasfasern speziell für den Einsatz in der alkalischen Umgebung des Betons entwickelt. Aber der Begriff „alkaliresistent“ (AR) darf nicht zu der Annahme verleiten, diese Fasern seien absolut korrosionsresistent und dauerhaft im Beton, denn das ist definitiv nicht der Fall. Den Zusatz „alkaliresistent“ tragen die Fasern dennoch zu Recht, denn er beschreibt vor allem den Unterschied zu den bei faserverstärkten Kunststoffen eingesetzten E-Glasfasern. Abschnitt 6.4 wird zeigen, mit welchen Mitteln und unter welchen Randbedingungen mit AR-Glasfasern im alkalischen Milieu des Betons eine ausreichende Festigkeit und Verformungsfähigkeit für die geplante Lebensdauer von Bauwerken und Bauteilen erreicht werden kann.

⁷⁾ Dieser Effekt ist bei allen Filamentgarnen vorhanden, also auch bei Basaltfasern und Carbonfasern. Einerseits besteht grundsätzlich die Schwierigkeit, die Prüfkraft in alle Filamente eines Faserbündels (Rovings) gleichmäßig einzuleiten. Andererseits unterscheiden sich die Randbedingungen von Filament- und Garnprüfung stark. Filamente werden mit einer Einspannlänge von wenigen Millimetern getestet, bei Garnen hingegen beträgt die Einspannlänge mehrere hundert Millimeter. Beide Einflüsse führen zu niedrigeren Festigkeitswerten bei der Garnprüfung.

Tabelle 5. Eigenschaften von AR-Glasfilamenten und AR-Glasrovings (nach [65], ergänzt)

Eigenschaft	Maßeinheit	NEG	OCV
Dichte	g/cm ³	2,80	2,74
Filamentdurchmesser	µm	13,5 ... 24	14 ... 27
Elastizitätsmodul	N/mm ²	80.000	74.000
Zugfestigkeit (Filament)	N/mm ²	2000 ... 2500	2000 ... 2500
Bruchdehnung (Filament)	‰	25 ... 35	25 ... 35
Zugfestigkeit (Roving)	N/mm ²	1000 ... 1400	1200 ... 1500
Bruchdehnung (Roving)	‰	15 ... 20	20 ... 25
Wärmeausdehnungskoeffizient	10 ⁻⁵ /K	5	5

An dritter Stelle kommt die Erläuterung noch einmal auf die bereits erwähnte Abhängigkeit der Festigkeit des Glases von mikroskopisch kleinen Oberflächendefekten zurück. Die Festigkeit der Faser wird durch die Größe bzw. Tiefe des Risses und der damit einhergehenden Spannungskonzentration bestimmt. Ein weiterer interessanter Effekt, der für die Dauerstandfestigkeit von großer Bedeutung ist, ist das *unterkritische Risswachstum*. Risswachstum heißt, dass sich ein Riss unter Belastung vergrößert. Unterkritisch heißt, der Riss wächst auch, wenn die Belastung unterhalb eines kritischen Wertes ist, wobei der kritische Wert hier der (Kurzzeit-)Festigkeit entspricht. Das Versagen kann also nach einer konstanten Belastung über eine gewisse Zeitdauer eintreten, auch wenn diese Belastung deutlich unter der Kurzzeitfestigkeit liegt. Bei Glas ist die Ausprägung dieses Effekts von der Umgebungsfeuchtigkeit und der Temperatur abhängig. Mit steigender Feuchtigkeit und Temperatur wächst die Rissgeschwindigkeit [108, 114]. Deshalb werden bei Konstruktionen aus Glasfaserverbundkunststoffen (GFVK) die im Kurzzeitversuch ermittelten Festigkeiten um ca. 50 % abgemindert, um die Dauerstandfestigkeit abzuschätzen [56]. Für textilbewehrten Beton liegen noch keine endgültigen Ergebnisse vor. Erste Untersuchungen weisen aber auf eine nicht vernachlässigbare Größe dieses Effektes hin [87, 90]. Man geht aber bei Glasfasern davon aus, dass es einen unteren Grenzwert für die Belastung gibt, unterhalb dessen kein unterkritisches Risswachstum stattfindet.

Für das Verhalten unter vorwiegend nicht ruhender Beanspruchung bzw. Ermüdungsbelastung liegen für AR-Glasfasern noch keine aussagekräftigen Untersuchungen vor. Grundsätzlich ist aber davon auszugehen, dass die Zeitschwingfestigkeit in erheblichem Maße durch das unterkritische Risswachstum beeinflusst wird. Weiterhin ist davon auszugehen, dass die Dauerschwingfestigkeit

– so vorhanden – unterhalb der Dauerstandfestigkeit liegt.

Für den praktischen Einsatz ist auch das Verhalten unter erhöhter Temperatur von Interesse (Brandfall). Beschichtete und unbeschichtete AR-Glasfasern zeigen beim Überschreiten von 200 °C einen signifikanten Festigkeitsverlust, bei 400 bis 500 °C fällt die Festigkeit praktisch auf null ab. Der Elastizitätsmodul bleibt bis etwa 300 °C konstant und sinkt bei weiterer Erwärmung bei 400 °C auf etwa 75 % der Werte bei Raumtemperatur [115].

2.5 Carbon

2.5.1 Herstellung

Carbonfasern kommen in der Natur nicht vor. Die ersten Versuche von *Edison* und *Swan* gegen Ende des 19. Jahrhunderts, Carbonfasern aus Baumwolle und Bambusfasern zu gewinnen, hatten die Herstellung lange haltbarer Glühlampen zum Ziel. Diese Carbonfasern haben hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften wenig mit den heute verwendeten Verstärkungsfasern gemeinsam [101].

Über 90 % aller heute verfügbaren Carbonfasern werden durch den Abbau vorgeformter organischer Polymere aus dem Ausgangsmaterial Polyacrylnitril (PAN) hergestellt. PAN-Fasern sind ein Standardprodukt und weltweit in großen Mengen und relativ preiswert verfügbar. Zur Herstellung von Carbonfasern werden sie speziell eingestellt. Die Fasern werden beim Spinnen stärker verstreckt, um so der Molekularstruktur eine für die späteren Fasereigenschaften entscheidende Vororientierung aufzuprägen. Daneben werden Carbonfasern noch aus Pech hergestellt (pitch fibers), diese sind aber für die Bauwerksverstärkung ohne Bedeutung. Die Herstellung der Carbonfasern aus PAN geschieht in mehreren Schritten [101] (s. auch Bild 12):

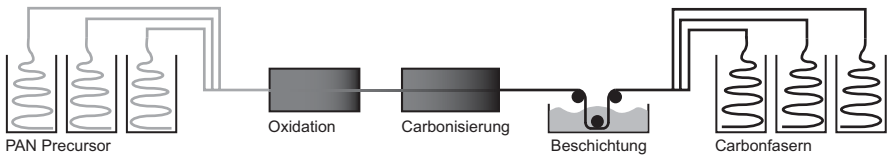


Bild 12. Schematischer Herstellungsprozess von Carbonfasern

1. **Stabilisieren:** Bei Temperaturen zwischen 180 und 350 °C wird die Faser in einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre zunächst stabilisiert, d. h. in eine unschmelzbare Struktur überführt. Damit die Fasern nicht schrumpfen oder reißen, muss dieser Schritt bei einer definierten Zugspannung erfolgen.
2. **Carbonisieren:** In einer inerten Stickstoffatmosphäre werden die jetzt spannungslosen Fasern bis ca. 1500 °C aufgeheizt. Bei diesem Prozessschritt werden Kohlenstoffringe aufgebaut, während (fast) alle Nicht-Kohlenstoffatome abgespalten werden. Der Masseverlust in dieser Stufe beträgt etwa 45 %.
3. **Graphitisieren:** Ebenfalls in Schutzatmosphäre werden jetzt bei Temperaturen bis 3000 °C und gleichzeitiger Streckung der Fasern die gewünschten Eigenschaften der Fasern eingestellt. Je höher die Temperatur und je höher die Verstreckung, desto hochmoduliger werden die entstehenden Carbonfasern, da sich die Graphitebenen zunehmend parallel zur Faserstruktur ausrichten.
4. **Oberflächenbehandlung:** Neben dem Schlichteauftrag (s. Schritt 5) können die Verbundeigenschaften der Carbonfasern auch durch die Bildung stabiler Oberflächenoxide eingestellt werden. Es sind verschiedene Verfahren möglich. Beim nasschemischen Ätzen kann außerdem die Oberfläche geglättet werden, was sich deutlich positiv auf die Festigkeit auswirken kann.
5. **Beschichtung:** Wie bei Glasfasern wird in einem letzten Schritt eine Schlichte aufgetragen. Sie basiert bei Carbonfasern meist auf Epoxidharzen und übernimmt die bereits genannten Funktionen, wie Verbesserung von Zusammenhalt und Verarbeitbarkeit der Fasern und Gewährleisten eines guten Verbundes zum Matrixsystem.

Durch die Verstreckung des Ausgangsmaterials (des Precursors) und während der Wärmebehandlung können die Eigenschaften der Carbonfasern in einem weiten Bereich eingestellt werden. Carbonfasern sind mit Elastizitätsmoduln bis über 800.000 N/mm² verfügbar. Mit wachsendem E-Modul steigen aber die notwendigen Temperaturen und technischen Anforderungen an den Pro-

duktionsprozess stark an und damit auch der Preis der Carbonfasern. Für Anwendungen zur Bauwerksverstärkung sind vor allem Typen mit hoher Festigkeit und einem Elastizitätsmodul in der Größe von Baustahl von hohem Interesse. Das sind gleichzeitig auch die preiswerten und in großen Mengen verfügbaren Typen. Der Preis von Carbonfasern zeigt darüber hinaus eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Faserfeinheit. Grundsätzlich steigt der Preis mit abnehmender Feinheit stark an – das ist bei den Glasfasern nicht so.

2.5.2 Eigenschaften

Carbonfasern werden wie Glasfasern als Multifilamentgarne geliefert. Die Filamentdurchmesser liegen zwischen 5 und 10 µm. Die Bezeichnung erfolgt wie bei anderen Filamentgarnen in tex. Tabelle 6 zeigt Beispiele kommerziell erhältlicher Garne. Eine weitere, besonders bei Carbon übliche Bezeichnung ist die Angabe der Anzahl der Filamente je Roving in Tausend Stück (k = Tausend), siehe Tabelle 7. Garne bis einschließlich 24.000 Filamenten werden als „low tow“, ab 50.000 Filament als „heavy tow“ bezeichnet (Bild 13). Verfügbar sind heavy tows mit bis zu 400.000 Filamenten. Für die Anwendung im Textilbeton sind vor allem die 12-k-, 24-k- und 50-k-Fasern interessant.



Bild 13. Größenvergleich mit einer 800-tex-Carbonfaser (low-tow, 12-k-Faser) und einer 3500-tex-Carbonfaser (heavy-tow, 50-k-Faser)

Tabelle 6. Auswahl kommerzieller Carbon-Rovings (nach [65], erweitert)

Bezeichnung	Nennfeinheit [tex]	Anzahl Filamente [Stück]	Filament- durchmesser [μm]	Querschnitts- fläche [mm ²]
Tenax Fibers GmbH, Wuppertal, Deutschland				
Tenax HTA 5131 400 tex	400	6000	7	0,22
Tenax HTS 5631 800 tex	800	12 000	7	0,44
Tenax STS 5631 1600 tex	1600	24 000	7	0,89
Toray Industries Inc., Japan				
T300J-3000	198	3000	7	0,11
T300JB-6000	396	6000	7	0,22
SGL Carbon, Meitingen, Deutschland				
SIGRAFIL C030 T050 EPY	3500	50 000	6,5	1,94

Tabelle 7. Bezeichnungen von Carbonfasern nach der Filamentanzahl

1k (k=kilo)	1.000 Filamente pro Roving	low-tow
2k	2.000 Filamente pro Roving	
4k	4.000 Filamente pro Roving	
8k	8.000 Filamente pro Roving	
12k	12.000 Filamente pro Roving	
24k	24.000 Filamente pro Roving	
50k	50.000 Filamente pro Roving	heavy-tow

Die Farbe von Carbonfasern ist tief-schwarz. Carbonfasern sind in großem Umfang beständig gegen Säuren und Alkalien, also auch im alkalischen Milieu des Betons. Für die Anwendung zur Bauwerksverstärkung weniger relevante, aber interessante Eigenschaften sind die Durchlässigkeit für Röntgenstrahlen und die gute Verträglichkeit mit menschlichem Gewebe und Knochen (Biokompatibilität). Wegen der guten Leitfähigkeit dürfen Carbonfasern oder ihre Bruchstücke nicht in elektrische Maschinen oder elektronische Geräte eindringen.

Carbonfasern haben eine niedrigere Dichte als Glasfasern im Bereich von ca. 1,7 bis 1,8 g/cm³. Höhermodulige Typen haben tendenziell eine etwas höhere Dichte, die Unterschiede sind aber gering. Die mechanischen Eigenschaften können durch die Wahl des Precursors und die Prozessparameter in einem weiten Bereich gesteuert werden. Carbonfasern sind mit einem Elastizitäts-

modul zwischen 180.000 N/mm² bis über 800.000 N/mm² erhältlich.

In den vergangenen 40 Jahren wurden verschiedene Fasertypen entwickelt:

- HT (high tenacity): hohe Zähigkeit (Standardtyp),
- HS (high strength): hohe Festigkeit,
- IM (intermediate modulus): höherer Elastizitätsmodul (als Standardtyp),
- HM (high modulus): hoher Elastizitätsmodul,
- UHM (ultra high modulus): sehr hoher Elastizitätsmodul.

Interessant für die Anwendung als Verstärkung von Stahlbetonkonstruktionen sind vor allem sog. HT-Fasern mit hoher Zähigkeit und HS-Fasern mit hoher Festigkeit sowohl von den mechanischen Eigenschaften als auch vom Preisniveau her. Höhermodulige Typen sind erheblich teurer.

Tabelle 8. Typische Eigenschaften verschiedener Carbonfasertypen (nach [3])

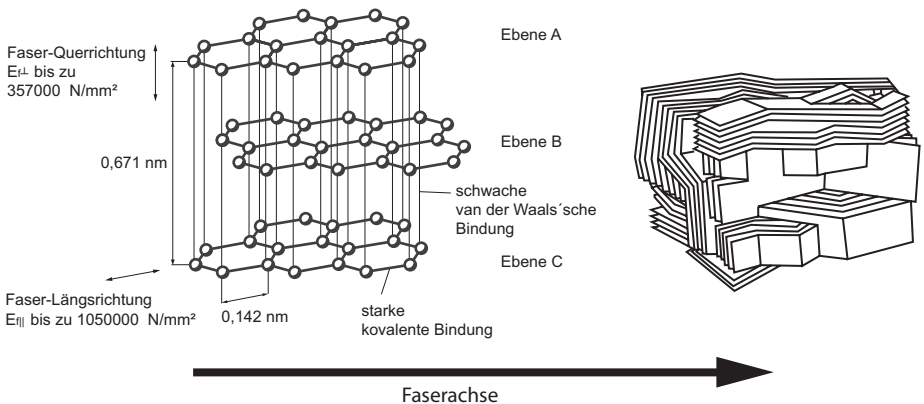
Eigenschaft	Maßeinheit	HT-Faser	IM-Faser	HM-Faser
Dichte	g/cm^3	1,70	1,80	1,81
Elastizitätsmodul	10^3 N/mm^2	238	290	435
Zugfestigkeit	10^3 N/mm^2	3,95	5,50	4,50
Bruchdehnung	%	1,6	1,9	1,0
Wärmeausdehnungskoeffizient	$10^{-5}/\text{K}$	-0,1		

Ihr Einsatz ist nur sinnvoll, wenn sich der höhere Preis durch höhere Steifigkeit und geringeres Konstruktionsgewicht oder andere technische Vorteile wirtschaftlich darstellen lässt.

Die mechanischen Eigenschaften von Carbonfasern sind grundsätzlich überragend, siehe Tabelle 8. Sie besitzen eine extrem hohe Festigkeit und einen hohen bis sehr hohen Elastizitätsmodul. Für Anwendungen in der Tragwerksverstärkung besonders vorteilhaft sind zwei Tatsachen: Erstens zeigen Carbonfasern nicht nur eine hohe Festigkeit unter statischer Beanspruchung, sondern auch unter Ermüdungsbeanspruchung. Zweitens kann der Konstrukteur je nach Aufgabenstellung und Anforderungen eine Faser in der gewünschten Steifigkeit auswählen. Bei sehr kleinen angestrebten Verformungen bzw. steifem Bauteilverhalten könnten auch hochmodulige Fasern verwendet werden, allerdings muss dann die Kompatibilität mit dem vorhandenen Bewehrungsstahl und der finanzielle Mehraufwand kritisch geprüft werden.

Bei Belastung zeigen Carbonfasern ein linear-elastisches Verhalten bis unmittelbar vor dem Eintreten des Bruches, d.h. die Spannungs-Dehnungs-Linie verläuft als Gerade und der Bruch selbst erfolgt spröde ohne Vorankündigung. Aufgrund der Ausrichtung der Graphitkristalle in Faserlängsrichtung (vgl. Bild 14) sind die Eigenschaften in Längs- und Querrichtung unterschiedlich, die Faser ist anisotrop. Bei der Anwendung als Verstärkungsmaterial ist in diesem Zusammenhang zu beachten, dass die Carbonfaser empfindlich auf Querdruck reagiert.

In inerte Atmosphäre bleiben Carbonfasern bis etwa 2000°C stabil. In normaler Luft, also bei Anwesenheit von Sauerstoff, oxidieren die Fasern ab etwa 400°C . Der auftretende Masseverlust kann durch Wiegen einfach bestimmt werden [3]. Die Festigkeit und der Elastizitätsmodul nehmen bereits ab 200°C ab und zwar stärker als bei AR-Glasfasern [115].

**Bild 14.** Schematischer Aufbau der Graphitzelle und Bandstruktur der Carbonfaser (nach [7])

2.6 Zusammenfassung

Naturfasern sind für die Anwendung in der Bauwerksverstärkung ungeeignet. Aramidfasern, Basaltfaserung und Stahlfasern besitzen hervorragende mechanische Eigenschaften. Der Anwendung in der Bauwerksverstärkung stehen aber offene Fragen bezüglich der Dauerhaftigkeit derzeit noch entgegen. Die beste Eignung wird derzeit AR-Glasfasern und Carbonfasern zugeschrieben. Die Carbonfasern sind zwar bezogen auf den Preis pro kg wesentlich teurer, allerdings ist das Eigenschaftsprofil der Carbonfasern (Festigkeit, Steifigkeit, Dauerfestigkeit, Dauerhaftigkeit) überragend, sodass die Carbonfasern, von wenigen Spezialfällen abgesehen, für den Anwendungsbereich der Verstärkung von Stahlbetonwerken mit Textilbeton die wirtschaftlichste Lösung darstellen dürften. Mittelfristig wird von

einem tendenziell sinkenden Carbonpreis ausgegangen.

3 Textile Bewehrungen

3.1 Begriffe

Mithilfe der Textiltechnik werden die Fasern zu textilen Strukturen verarbeitet. Die Erläuterung der wichtigsten Begriffe im Zusammenhang mit Textilien für Textilbeton, siehe Kasten, konzentriert sich auf die im weiteren Verlauf dieses Beitrags verwendeten Begriffe. Die englische Übersetzung ist wieder in Klammern angegeben. Für detaillierte Informationen zu Fasermaterialien und Fasern sei bspw. auf [8, 14] oder [39] verwiesen. Anschließend werden die Anforderungskriterien für die Auswahl geeigneter Herstellungsverfahren entwickelt.

Begriffserklärungen, Teil 2

Textil (textile, fabric) – ist (hier) ein flaches Gebilde, hergestellt aus Fasern und/oder Garnen, die durch unterschiedliche Verfahren zusammengefügt wurden, um dem Gebilde ausreichend Festigkeit und andere Eigenschaften zu verleihen, die für die vorgesehene Verwendung notwendig sind⁸⁾.

Textile Struktur (textile structure) – durch Anordnung der Fasern bzw. Garne festgelegte Geometrie und Beschaffenheit des Textils.

Beschichtung (coating) – ist sowohl der Prozess des Aufbringens von flüssigen oder pastösen Werkstoffen (meist Polymeren) als auch die Bezeichnung der Werkstoffe. Letzteres ist (hier) ein Bindemittel in Verbindung mit einem Lösungsmittel oder ein geschmolzener Kunststoff, um die Fasern miteinander zu vernetzen oder textile Strukturen miteinander zu verbinden. Weitere Gründe zur Applikation von Beschichtungen schließen den Schutz der Fasern, die Beeinflussung des Verbundes zwischen den Filamenten in den Garnen, zwischen den Fasern und Beton und die Stabilisierung der Textilien ein.

Imprägnierung (impregnation) – ist das Einbringen einer flüssigen Substanz in eine textile Struktur, sodass die Zwischenräume zwischen den Filamenten vollständig oder nahezu voll-

ständig ausgefüllt sind. Die Imprägnierung kann flüssig bleiben oder durch entsprechende Behandlung (Verdampfen eines Lösungsmittels, Polymerisation, Phasenübergang durch Kühlen etc.) in einen festen Zustand übergehen. Diese Definition impliziert verschiedene Grade der Imprägnierung. Vollständige Imprägnierung heißt, dass zwischen den Filamenten keine Luft verbleibt. Da für Textilbeton offene, gitterartige Strukturen verwendet werden, bedeutet Imprägnierung in diesem Fall nicht, dass die mindestens mehrere Millimeter großen Zwischenräume zwischen den Gitter bildenden Garnen/Fasern ausgefüllt werden.

Kette, Kettfaden (warp) – sind die Fadenscharen, die parallel zur Arbeitsrichtung der Textilmaschine (d. h. in Herstellungsrichtung) verlaufen und mit dem Schuss verbunden sind.

Herstellungsrichtung (machine direction) – ist die Richtung, in der das Textil auf der Maschine hergestellt wird. In Herstellungsrichtung kann die Struktur quasi beliebig lang sein. Die Länge wird nur durch technologische Randbedingungen der nachfolgenden Arbeitsschritte begrenzt, wie z. B. dem Gewicht des aufgerollten Geleges.

Schuss, Schussfaden (weft/filling) – In der Regel ist der Schuss senkrecht zur Herstellungsrichtung, so z. B. bei Geweben und biaxialen Gelegen. Bei anderen Verfahren kann der Winkel auch von 90° abweichen. Die Abmessung der Textilien in Schussrichtung wird durch die Breite der Textilmaschine definiert und liegt im Bereich von Dezimetern bis wenigen Metern.

Querrichtung (cross direction) – ist die Richtung der Breite des Textils, d. h. senkrecht zur Längs-, Kett- bzw. Herstellungsrichtung.

⁸⁾ Das ist zugegebenermaßen keine sehr konkrete Definition. Der Begriff Textil wird üblicherweise als Sammelbegriff verwendet, wenn die exakten Eigenschaften und Bestandteile im Kontext unbedeutend sind.

Gelege (laid scrim) – ist ein Textil, das durch Aufeinanderlegen paralleler Fadenscharen in verschiedenen, aber innerhalb eines Textils festen Winkeln (z. B. 0° und 90° oder 0°, +45° und –45°) und deren nachfolgender Verbindung entsteht.

Webtechnik (weaving) – ist eine Methode zur Herstellung ebener textiler Strukturen aus zwei oder mehr miteinander verwebter, traditionell gleichartiger Garne, sodass sich diese in einem festen Winkel miteinander kreuzen und ein Gewebe ergeben.

Gewebe (woven fabric) – ist der allgemein verwendete Begriff zur Bezeichnung einer textilen Struktur aus meist zwei Faserscharen, die durch Weben miteinander verbunden werden. Die Art und Weise, wie die Faserscharen miteinander verwoben/verbunden werden, bestimmt die Art des Gewebes. Durch Kombinationen der verschiedenen Gewebearten und Garne sind der Vielfalt kaum Grenzen gesetzt. Die wichtigsten Gewebearten (vgl. Bild 23) sind:

- *Leinwandgewebe (plain weave)* – Jeder Schussfaden verläuft abwechselnd über und unter den Kettfäden. Die Anordnung wechselt mit jedem Schussfaden.
- *Atlasgewebe (satin wave) und Körpergewebe (twill weave)* – sind Gewebevarianten, bei denen die Anordnung von Schuss- und Kettfäden zueinander speziellen Mustern folgt. Sie haben als Bewehrungen für Betonbauteile keine Bedeutung.
- *Drehergewebe (leno wave)* – Bei diesem Gewebe sind die Schussfäden als Paare angeordnet und werden nach jedem Schuss miteinander verdreht. Diese Gewebeart verleiht offenen Geweben Stabilität und Festigkeit und vermeidet oder verringert die Verschieblichkeit der Kett- und Schussfäden.

Maschenbildung (knitting) – nennt man die Technik zur Herstellung textiler Strukturen durch Schlingenbildung eines oder mehrerer Fadensysteme. Die wichtigsten Vertreter dieser Her-

stellungsverfahren für Betonbewehrungen sind Kettenwirken und Stricken.

- *Kettengewirk (warp knitting)* – ist eine durch Maschenbildung mit einem speziellen Nähwerkverfahren verfestigte textile Fläche, bei der die maschenbildenden Garne im Allgemeinen längs im Textil verlaufen. Das Bindfadensystem wird in Form von Kettfäden über Nadelbarren zugeführt. Jede Nähadel auf dem Barren kann einen oder mehrere Nähfäden enthalten⁹⁾. Die Menge und Anordnung der geformten Maschen bestimmen die Art und die Eigenschaften des Kettengewirks. Typische Vertreter des Kettenwirks sind *Mailandgewirk (milanes knitting)*, *Raschelgewirk (raschel knitting)* und *Tricotgewirk (tricot knitting)*.
- *Gestrick (weft knitting)* – ist ein bekannter Vertreter eines mit einem maschenbildenden Verfahren hergestellten Textils, bei dem ein einziger Faden in seinem Verlauf sämtliche Maschen innerhalb der textilen Struktur bildet. Es wird unterschieden in *Rundstricken (circular knitting)* und *Flachstricken (flat knitting)*. Gestricke haben für Betonbewehrungen keine Bedeutung, da sie keine gestreckte Fadenlage aufweisen.

Abstandstextil (spacer fabric) – ist eine spezielle Art eines dreidimensionalen Textils. Für textile Betonbewehrungen werden prinzipiell zwei ebene Kettengewirke für die obere und untere Lage hergestellt und in einem Prozess mit einem Faden in der dritten Richtung miteinander verbunden. Es entsteht ein Abstandsgewirk (*warp knitted spacer fabric*).

⁹⁾ Für den Laien ist die Vorstellung, dass hier das Grundprinzip von Omas Nähmaschine hochgradig parallel angewandt wird, vermutlich verständlicher. Aber die Art und Weise, wie mit dem Nähfaden die Maschen gebildet werden, unterscheidet sich im Detail erheblich von Omas Nähmaschine.

3.2 Anforderungen an textile Bewehrungen und deren Herstellungsverfahren

Bei der Verwendung von textilen Strukturen als Bewehrung in Betonbauteilen übernehmen die Fasern die Zugkräfte und der Beton die Druckkräfte. Die Kräfte werden über Verbundwirkung vom Beton in die textilen Bewehrungen übertragen. Wünschenswert sind aus praktischer Sicht möglichst kurze Verbundlängen, ohne dass es zu einem Verbundversagen infolge einer Überbeanspruchung des Verbundsystems kommt. Aus dem Verwendungszweck heraus ergeben sich folgende Anforderungen an die textilen Bewehrungen:

Geradlinige Faserorientierung: Zur Vermeidung zusätzlicher Beanspruchungen der Feinbetonschicht sollten die Bewehrungselemente (Garne, Rovings) in einem möglichst gestreckten Zustand vorliegen. Krümmungen der Garne bzw. ein welliger Verlauf, wie sie bei vielen textilen Verfahren entstehen, verursachen neben den für die Verbundwirkung notwendigen Beanspruchungen der Betondeckung weitere Belastungen (Bild 15) und sind vorzugsweise vollständige zu vermeiden.

Querschnittsgeometrie des Einzelements: Im Lieferzustand zeigen die Filamente der meisten Garne (auch bei AR-Glas und Carbon) einen relativ losen

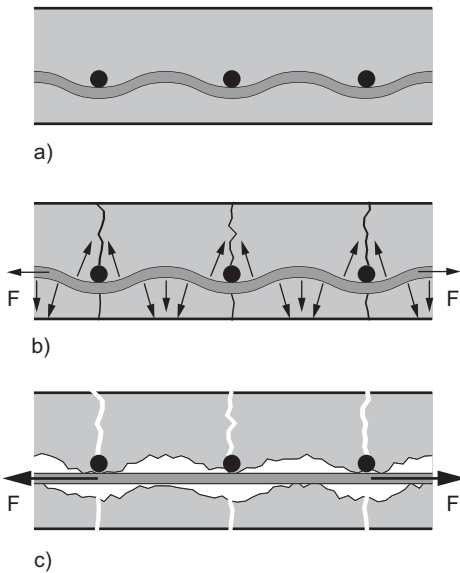


Bild 15. Gekrümmter Faserverlauf kann zum Versagen der Betondeckung führen; a) gekrümmte Faser, b) Beanspruchung der Betondeckung bei Zugkraft durch Strecken der Fasern, c) Endzustand nach dem Absplittern der Betondeckung

Zusammenhalt. Je nach auf das Garn einwirkenden Kräften kann die Querschnittsgeometrie im Endprodukt während der Textilerstellung eingestellt werden. Eine sehr kompakte, kreisförmige Geometrie mit hoher Packungsdichte verleiht dem Garn tendenziell höhere Festigkeiten und Steifigkeiten, was positiv für Verarbeitung, Tragfähigkeit und Wirtschaftlichkeit ist. Eine flache el-

liptische Form des Garnquerschnitts bzw. eine ausgeprägte flache Garngeometrie hat andererseits hinsichtlich Festigkeit und Verarbeitbarkeit Vorteile bei Applikation im Bereich von Krümmungen, weil die Eigenspannungen im Garn bei Biegung um die flache Achse geringer sind (Bild 16). Außerdem geht jede Abweichung vom kompakten Kreisquerschnitt durch eine Vergrößerung der Oberfläche des Garns mit tendenziell höheren übertragbaren Verbundkräften einher.

Gitterweite zur Einbettung des Einzelements: Der Beton muss die einzelnen Bewehrungselemente (Rovings oder Roving-Bündel) vollständig umschließen, damit die Verbundkräfte in die Fasern eingeleitet werden können. Zwischen den Garnen müssen ausreichend große Zwischenräume verbleiben, damit der Feinbeton in diese Zwischenräume eindringen kann und eine vollständige Einbettung gewährleistet ist. Bild 17 zeigt schematisch den Unterschied zwischen (ungeeigneten) geschlossenen Strukturen (a) und (ausreichend) offenen Strukturen (c, e, f–i). Für Textilbeton können nur ausreichend offene Strukturen verwendet werden (Bild 18).

Gitterweite zur Vermeidung des interlaminaren Versagens: Eine Besonderheit bei Verwendung von Filamentgarnen aus AR-Glas und Carbon besteht darin, dass die Faserbündel in Querrichtung keine Kräfte übertragen können. Die Übertragung der Kräfte von der Altkonstruktion in die Verstärkungsschicht gelingt daher nur durch die Ausnutzung der Betonzugfestigkeit. Innerhalb des Verstärkungssystems, speziell in der Ebene der textilen Bewehrung müssen die Verbundkräfte über den Feinbeton innerhalb der leichten Gitterabstände ebenfalls mithilfe der Betonzugfestigkeit übertragen werden (vgl. Bild 19). Gelingt das nicht, tritt ein interlaminares Versagen ein. Da die Zugfestigkeit des Feinbetons zwar höher ist als die von Normalbeton, aber absolut immer

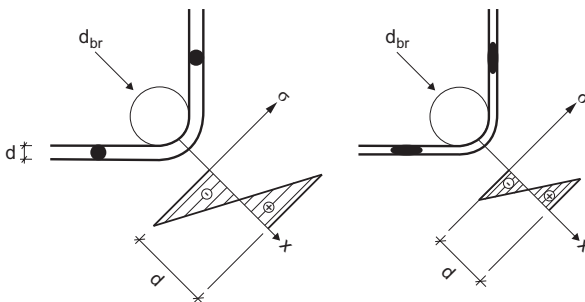


Bild 16. Eigenspannungen im Garnquerschnitt für Garne mit gleicher Querschnittsfläche, gleichem Biegeradius, aber unterschiedlicher Querschnittsgeometrie. Aus höheren Eigenspannungen folgen geringere nutzbare Festigkeiten

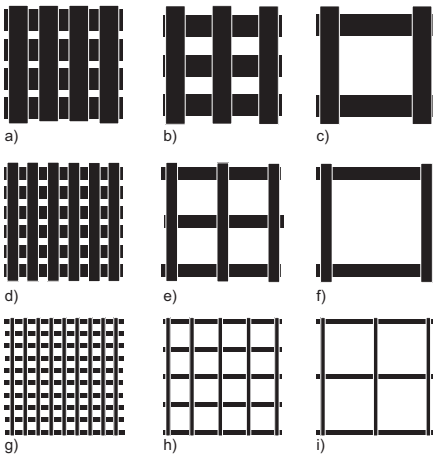


Bild 17. Abstufung der Gitterweiten; von links nach rechts jeweils Halbierung der Fasermenge durch Verdoppelung der Gitterweite; von oben nach unten jeweils Halbierung des Garndurchmessers

noch gering ist, sind ausreichend große Öffnungsweiten (lichte Gitterabstände) zwischen den Garnen der textilen Bewehrungen erforderlich. Gute Erfahrungen wurden mit Gitterabständen in Höhe des drei- bis fünffachen Durchmessers der Bewehrungselemente gemacht. Für eine detaillierte Beschreibung der Problematik siehe Abschnitt 7.1.

Oberflächenstruktur: Wie bereits erläutert, besitzen AR-Glas- und Carbonfasern eine nahezu perfekte Faseroberfläche. Bei diesen glatten, unstrukturierten Oberflächen können Verbundspannungen zum Beton nur über Adhäsion (Haftverbund) übertragen werden. Wird die Adhäsionsfestigkeit überschritten, verbleibt nur eine relative geringe Reibspannung. Hohe Faserfestigkeiten sind je nach Fasersteifigkeit mit entsprechenden Verformungen der Faser verbunden. Wird das Verformungsvermögen der Faser-Beton-Grenzfläche überschritten, wird der Haftverbund durch den Reibverbund abgelöst. In diesem Zustand können die übertragbaren Verbundkräfte durch eine oberflächliche Profilierung ähnlich wie bei geripptem Baustahl potenziell deutlich verbessert werden (Bild 20).

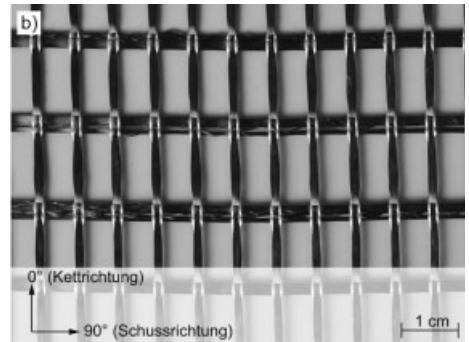
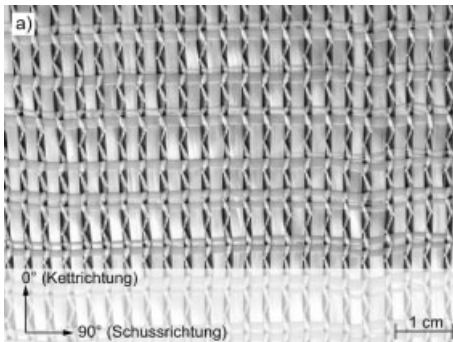


Bild 18. Beispiel mit ausreichenden und zu geringen Gitterabständen; a) zu geringer Gitterabstand, der Beton kann die einzelnen Garne nur schwer umschließen, b) ausreichender Gitterabstand, die Garne können gut in den Beton eingebunden werden

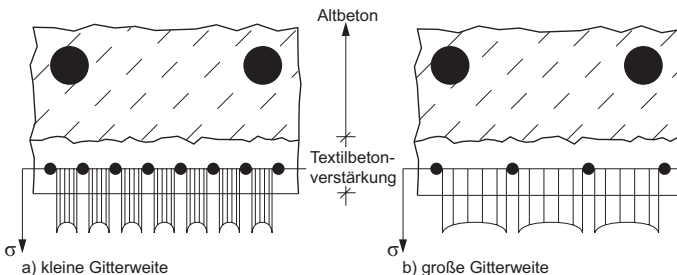


Bild 19. Schematische Verteilung der Betonzugspannungen zur Übertragung der Verbundkräfte bei unterschiedlich großen Gitterweiten

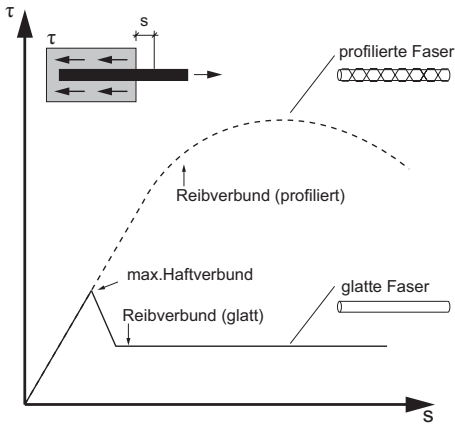


Bild 20. Qualitativer Unterschied der übertragbaren Verbundspannungen bei glatter (originaler) Faser-oberfläche und profilierter Bewehrung

Für einen effektiven Einsatz hochfester Fasern mit möglichst vielen Filamenten je Garn ist die gezielte Beeinflussung der Oberflächenstruktur eine wichtige Option.

Verschiebefestigkeit: Für die praktische Handhabung müssen die Strukturen eine ausreichende Stabilität aufweisen. Es muss sichergestellt sein, dass die planmäßige textile Struktur während der Verarbeitung (Transport, Lagerung, Konfektion, Einbettung) erhalten bleibt.

Es kommen also nur solche textilen Flächenbildungsverfahren infrage, die es erlauben, offene verschiebefeste Strukturen mit geradlinig verlaufenden Bewehrungselementen herzustellen und die gleichzeitig bei vertretbarem Aufwand die lokale Anpassung der Verbundeigenschaften der Garne durch Modifikationen der Querschnittsgeometrie und der Oberflächenstruktur gestatten. Als Querschnittsgeometrie sind – von Applikationen

im Bereich von Krümmungen an Bauteilecken und -kanten abgesehen – kompakte, näherungsweise kreisförmige Querschnitte wünschenswert. Auf weitere spezielle Aspekte wird bei den im nächsten Abschnitt besprochenen Herstellungsverfahren im Detail eingegangen.

3.3 Überblick zu Verfahren und Beispielen

Aus der Vielzahl der möglichen textilen Flächenbildungsverfahren kommen also nur wenige für die Fertigung von Betonbewehrungen in Betracht. Wichtigste Kriterien für die Auswahl sind die Umsetzbarkeit offener Strukturen (für die Einbindung in den Beton) mit ausreichender Verschiebefestigkeit (für eine gute Handhabbarkeit) und einer gestreckten Fadenlage (zur Vermeidung zusätzlicher Beanspruchungen der Betondeckung aus Umlenkräften). Einige Verfahren, wie das Kettenwirken eignen sich sehr gut, andere, wie das Flechten, wegen der notwendigerweise geschlossenen Oberfläche nicht [65].

Bild 21 zeigt schematisch typische Erscheinungsformen der gebräuchlichsten ebenen Halbzeuge: Gewebe, Gelege und Strickwaren. 3-dimensionale Textilien haben für die Tragwerksverstärkung keine Bedeutung und wurden bisher nur für Neubauteile verwendet. Für einen ausführlicheren Überblick einschließlich 3-dimensionaler Strukturen sei auf [65] verwiesen.

Gelege entstehen durch das Aufeinanderlegen mehrerer paralleler Fadensysteme unterschiedlicher Ausrichtung [126]. Für Betonbewehrungen kommen nur solche Varianten mit Fixierung an den Knotenpunkten in Betracht. Werden zwei Faserscharen verarbeitet, entsteht ein biaxiales Gelege¹⁰⁾, ab drei Faserscharen spricht man von einem multiaxialen Gelege. Gelege ermöglichen

¹⁰⁾ Bei den für die Tragwerksverstärkung verwendeten Carbonfaser Sheets handelt es sich um geschlossene (nicht-offene) einaxiale bzw. unidirektionale Gelege.

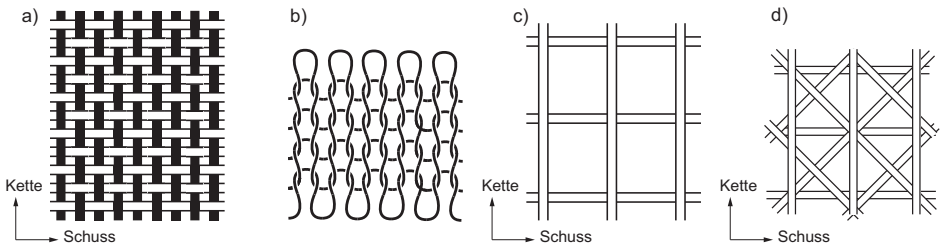


Bild 21. Schematische Darstellung der typischen Erscheinungsformen der gebräuchlichsten ebenen Halbzeuge; a) Gewebe, b) Gestrick, c) biaxiales Gelege, d) multiaxiales Gelege

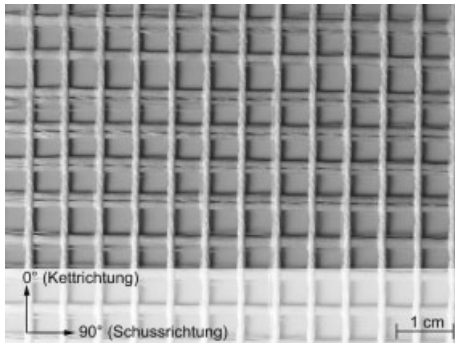


Bild 22. Beispiel für ein biaxiales Gelege

eine große Gestaltungsfreiheit und erfüllen die Anforderungen an textile Betonbewehrungen am besten. Die gestreckte Fadenlage ermöglicht hohe Steifigkeiten und Festigkeiten, die Winkel der einzelnen Lagen können beliebig eingestellt werden, die Lagenanzahl ist wählbar, genau wie das Flächengewicht¹¹⁾. Für die Verbindung der Fadenlagen miteinander können verschiedene Verfahren verwendet werden. Im Sonderforschungsbereich 528 wird das Nähwirkverfahren verwendet. Das heißt die verschiedenen Lagen werden durch eine spezielle Maschenfadenstruktur – dem Gewirke bzw. Nähgewirke – miteinander zu einem verwirkten bzw. nähgewirkten Gelege verbunden [65]. Der Charakter des Geleges kann durch die Wahl der Verstärkungsfasern, die Bindung und den Nähfaden dem Einsatzzweck angepasst werden. Nachteilig ist die prinzipiell nicht maschengerechte Arbeitsweise, d.h. das Maschenbild wird unabhängig von der Lage der Verstärkungsfäden erzeugt, die Verstärkungsfäden werden durch die Nähadeln angestochen.

Gewebe sind definiert als Flächengebilde, die mittels Fachbildung aus sich rechtwinklig verkreuzten Fäden zweier Fadensysteme, dem Kett- und Schussfaden, hergestellt werden [126]. Je nachdem, welche Bindung eingesetzt wird, d.h., wie die Fäden miteinander verkreuzt werden, entstehen verschiedene Gewebearten (vgl. Bild 23). Ge-

webe haben für den Einsatz als Betonbewehrung zwei entscheidende Nachteile: Durch die Verkreuzung von Kett- und Schussfäden ist keine gestreckte Fadenlage möglich und es können keine für den praktischen Einsatz ausreichend stabilen offenen, gitterartigen Strukturen hergestellt werden (Bild 24). Normale Gewebe sind damit als Betonbewehrung für die Tragwerksverstärkung ungeeignet (Bild 23a, b, Bild 24). Ein Vorteil der Gewebe ist die maschengerechte Arbeitsweise.

Zum Teil lassen sich diese Nachteile von Geweben durch die spezielle Variante der Dreherbindung vermeiden (Bild 23c, d). Sie erlaubt auch bei den für Beton notwendigen Gitterweiten ausreichend stabile Strukturen und die Schussrichtung erhält eine gestreckte Lage. Da die Schussrichtung auf die Fertigungsbreite beschränkt ist, ist die Eignung normaler Drehergewebe für die Bauwerksverstärkung als sehr begrenzt anzusehen. Bild 25 zeigt ein solches ausreichend offenes Drehergewebe.

Der wellige Verlauf der Bewehrungsfasern in Ketttrichtung kann deutlich verringert werden, wenn für die Kette statt zweier gleich starker Garne zwei Garne unterschiedlicher Feinheit eingesetzt werden: ein Verstärkungsfaden, der die Funktion der Bewehrung und des Bindefadens übernimmt und als zweiter Kettfaden ein Garn wesentlich geringerer Feinheit, das nur die Funktion des Bindefadens ausübt (Bild 23e). Je dünner der zweite Kettfaden ist, desto geringer fällt die Welligkeit des dickeren Verstärkungsfadens aus. Die Einflussnahme auf die Geometrie des Textils ist bei Geweben grundsätzlich eingeschränkter als bei nähgewirkten Gelegen.

Eine für Betonbewehrungen geeignete Gewebevariante sind spezielle Drehergewebe mit einem zusätzlichen, gestreckt eingearbeiteten Kettfaden (Bild 23f). Bei dieser Variante ondulieren die (dünneren) Kettfäden wie auch beim normalen Drehergewebe, übernehmen aber nur die Funktion des Bindefadens. Die Bewehrungsfunktion wird durch den gestreckt vorliegenden, zusätzlichen, dickeren Verstärkungsfaden realisiert.

Gestricke werden durch die Maschenbildung mit nur einem Faden erzeugt und sind vermutlich dem textiltchnischen Laien aus dem Haushaltsgebrauch bekannt. Zu den Vorteilen zählen die maschengerechte Arbeitsweise und die gute Drapierfähigkeit, d.h. die Fäden werden nicht angestochen und die Textilien lassen sich gut verformen und so auch komplexen Formen anpassen. Die zur Maschenbildung verwendeten Fäden können keine Bewehrungsfunktion übernehmen. Sie hätten eine viel zu hohe Strukturdehnung, bevor sie sich am Kraftabtrag beteiligen. Verstärkungsfäden können aber prinzipiell in gestreckter Form

¹¹⁾ In der Textiltechnik ist es üblich, das Flächengewicht (in g/m²) als Maß für die eingebaute Fasermenge anzugeben. Für Bauingenieure ist die Angabe einer Querschnittsfläche je Richtung sinnvoller. Diese Werte können bei bekanntem Aufbau der Struktur aus dem Flächengewicht abgeleitet werden. In diesem Beitrag sind bei konkreten Beispielen immer der geometrische Aufbau und das Flächengewicht angegeben.

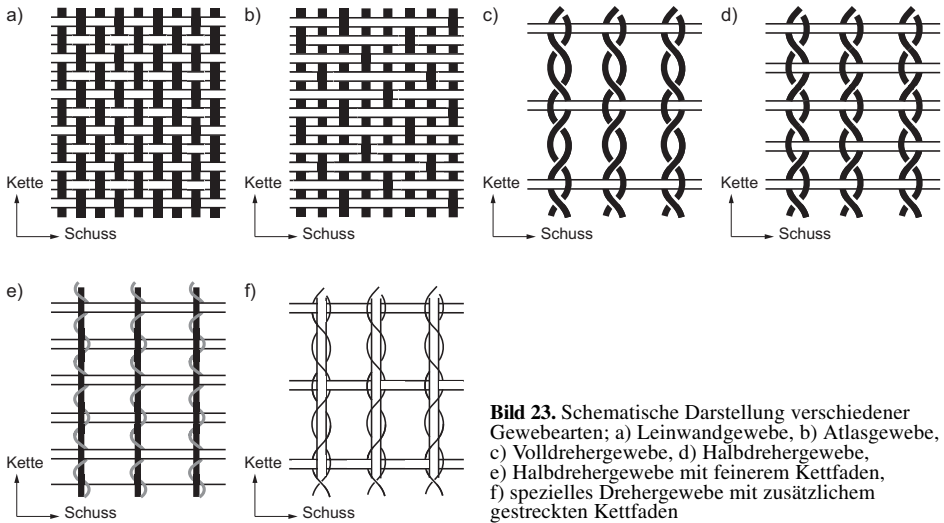


Bild 23. Schematische Darstellung verschiedener Gewebearten; a) Leinwandgewebe, b) Atlasgewebe, c) Vollandrehergewebe, d) Halbdrehergewebe, e) Halbdrehergewebe mit feinerem Kettfaden, f) spezielles Drehergewebe mit zusätzlichem gestreckten Kettfaden

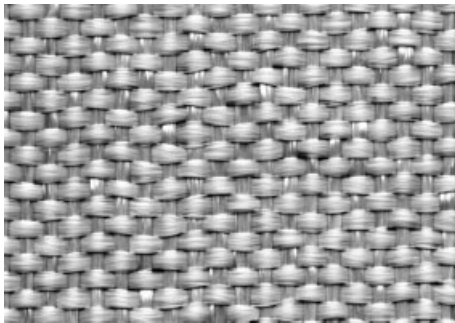


Bild 24. Dichtes (geschlossenes) und damit ungeeignetes Leinwandgewebe

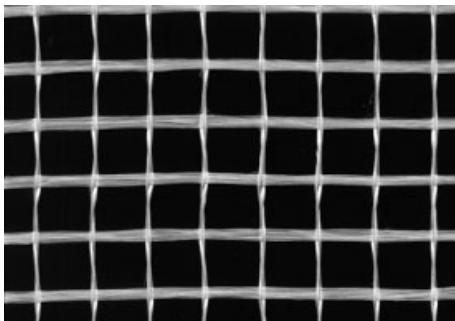


Bild 25. Offenes Drehergewebe mit nicht gestreckter Fadenlage in Ketttrichtung (senkrecht im Bild)

als zusätzliches Fadensystem eingebracht werden. Für die Anwendung als Betonbewehrung sind Gestricke nur sehr bedingt geeignet und werden daher hier nicht weiter betrachtet.

Für die Herstellung von Betonbewehrungen erfüllen Gelege das beschriebene Anforderungsprofil am umfassendsten. Sie ermöglichen eine gestreckte Fadenlage in Kett- und Schussrichtung, die Herstellung gitterartiger offener Bewehrungsstrukturen und sind in weitem Rahmen den Anforderungen anpassbar. Gelege sind in den beiden Sonderforschungsbereichen in Dresden und in Aachen das favorisierte textile Flächenbildungsverfahren. Gemeinsam mit der Textilmaschinenindustrie werden derzeit speziell für die Belange von textilen Betonbewehrungen optimierte Maschinen entwickelt.

Verfahrensbedingt werden die Kettfäden (in Herstellungsrichtung) und Schussfäden (im Winkel zur Herstellungsrichtung) während des Fertigungsprozesses unterschiedlich behandelt. Insbesondere die Packungsdichte, die Querschnittsform und die für den Verbund zum Beton zur Verfügung stehende Oberfläche des Kettfadens hängen direkt von der gewählten Bindung ab. Die Folge sind stark von der Bindung und anderen Herstellungsparametern abhängige Verbund- und Trageigenschaften, d. h. auch unterschiedliche Eigenschaften für Kett- und Schussrichtung. Auch bei gleichem eingesetzten Fasermaterial in Kett- und Schussrichtung müssen Kennwerte bemessungsrelevanter Eigenschaften (z. B. Festigkeit und Bruchdehnung) für Kett- und Schussrichtung separat ermittelt werden.

3.4 Strukturverfestigung

Die Sicherstellung der Strukturgeometrie für den gesamten Herstellungsprozess einer Verstärkung und damit die Stabilität und Verschiebefestigkeit der textilen Bewehrungen sind von entscheidender Bedeutung für die Wirksamkeit der Bewehrung und das Erreichen der während der Planung angenommenen Bemessungskennwerte (Bild 26). Die Strukturstabilität kann durch eine zusätzliche Fixierung erheblich erhöht werden. Zahlreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Verbesserung des inneren Verbundes der Filamentgarne außerdem zu einer deutlichen Erhöhung der Festigkeit des Verbundwerkstoffs führt, z. B. [41, 42, 62, 72]. Höhere Festigkeiten und bessere Verarbeitungseigenschaften können erheblich zur Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz beitragen.

Die besten Ergebnisse werden erzielt, wenn die Strukturverfestigung zu einem Zeitpunkt durchgeführt wird, wenn die Garne in der optimal ausgerichteten Lage sind [67]. Dazu muss die Verfestigung direkt auf der Textilmaschine stattfinden, wenn die Garne gestreckt und in Lage und Orientierung definiert im Transportsystem der Textilmaschine vorliegen. Die Strukturverfestigung muss dazu prozess- und steuerungstechnisch in die Maschinenteknik integriert werden. Nur dann sind ein großtechnischer Einsatz und eine effiziente Herstellung textiler Bewehrungen möglich. Eine beispielhafte Umsetzung ist in [67] detailliert dargestellt.

Begrifflich werden Beschichtungen und Imprägnierungen unterschieden. Bei einer Beschichtung wird ein formloser Stoff (das Beschichtungsmaterial) auf die Oberfläche appliziert, d. h. er erreicht nur die äußeren Filamente eines Garns (Bild 27a). Bei einer Imprägnierung füllt der zugeführte Stoff den Raum zwischen den Filamenten

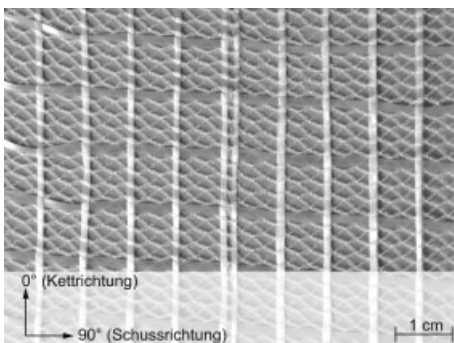


Bild 26. Beispiel für mangelnde Verschiebefestigkeit einer textilen Bewehrung ohne Strukturstabilisierung

vollständig aus (Bild 27b). Bei Garnen mit mehreren hundert bis tausend Filamenten, wie sie im Beton zur Anwendung kommen, ist dieser Idealfall der vollständigen Imprägnierung nur schwer zu erreichen, weil die Garne nach dem Nähwirkprozess durch das Bindefadensystem stark kompaktiert sind und das Imprägnierungsmaterial nur schwer eindringen kann (Bild 27c).

Die für textile Bewehrungen für Betonbauteile eingesetzte Strukturverfestigung wird aus mehreren Gründen als Sekundärbeschichtung bezeichnet:

- Die Imprägnierung ist nicht in jedem Fall vollständig und konzentriert sich tendenziell auf die äußeren Zonen des Garnbündels. Das gilt derzeit noch insbesondere für Carbongarne mit mehreren zehntausend Filamenten (heavy tows).
- Je nach eingestellten Prozessparametern verbleibt wie bei einer Beschichtung ein signifikanter Teil des Materials an der Garnoberfläche.
- Beim Herstellungsprozess der Fasern wurde auf die Filamente bereits eine erste (primäre) Beschichtung, die Schlichte, aufgebracht.

Der Begriff Sekundärbeschichtung hat sich im Zusammenhang mit Textilbeton eingebürgert und

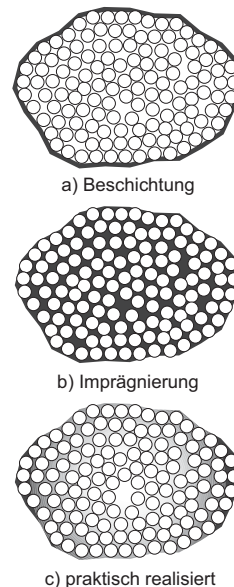


Bild 27. Schematische Darstellung der Unterschiede von a) Beschichtung, b) Imprägnierung und c) in der Praxis realisierbare Variante bei Filamentgarne

wird in diesem Beitrag verwendet, wenn auf diese zusätzliche Beschichtung Bezug genommen wird.

Neben der genannten Stabilisierung und der Beeinflussung der Verbundeigenschaften kann die Sekundärbeschichtung weitere funktionelle Eigenschaften aufweisen. Beispiele dafür sind:

- Verringerung der Wasseraufnahme der Multifilamentgarne durch kapillares Saugen (besonders während der Herstellung von Textilbeton);
- Wirkung als Barriere für korrosionsfördernde Ionen aus der hochalkalischen Porenlösung des Feinbetons und damit Verbesserung der Dauerhaftigkeit bei AR-Glas;
- Verringerung der Permeabilität und damit des Gastransports längs und quer zu den Garnen;
- durch die Zugabe von Farbstoffen können verschiedenen Sekundärbeschichtungen oder unterschiedliche textile Strukturen sicher unterschieden werden.

3.5 Bezugsmöglichkeiten

3.5.1 Lieferprogramm Textilien

Das Deutsche Zentrum Textilbeton (DZT) hat in Zusammenarbeit mit dem Institut für Massivbau, dem Institut für Baustoffe und dem Institut für Textil- und Bekleidungstechnik der TU Dresden Standardstrukturen definiert. Ziel ist es, gemeinsam mit Industriepartnern die kurzfristige und auftragsbezogene Herstellung und Lieferbarkeit solcher Standardstrukturen abzusichern. Technische Gesichtspunkte, die gegen eine preiswerte Produktion von textilen Bewehrungen mit definierten und reproduzierbaren Eigenschaften sprechen, gibt es nicht mehr.

Es sei darauf hingewiesen, dass es sich hier um eine Bestandsaufnahme zum Zeitpunkt der Manuskripterstellung handelt (Juni 2009) und nur speziell für die Bauwerkverstärkung entwickelte bzw. geeignete Strukturen erfasst sind. Interessenten sollten direkt mit den im folgenden Abschnitt genannten Anbietern Kontakt aufnehmen.

Bild 28 zeigt Standardstrukturen für die Bauwerksverstärkung, die über das Deutsche Zentrum Textilbeton in Dresden oder die SGL Carbon GmbH in Meitingen bezogen werden können. Anbieterkontaktdaten enthält Abschnitt 3.5.3. Die Lieferbreite dieser Strukturen beträgt 1250 mm. Die Lieferlänge kann in Abstimmung mit dem Abnehmer festgelegt werden, standardmäßig werden die Strukturen auf Hartpapierrohren mit Außendurchmesser 280 mm und 50 kg Gesamtgewicht ausgeliefert. Die angegebenen Flächengewichte der Strukturen enthalten neben den Verstärkungsfasern und dem Nähgarn auch anteilig ca. 10 bis 20 M.-% Beschichtungsmaterial.

3.5.2 Kosten

Die Angabe von Kosten in einem Buch ist immer ein diffiziles Thema, denn schon die Materialpreise jedes einzelnen Bestandteils von Textilbeton unterliegen sowohl marktüblichen, kurzfristigen Schwankungen als auch mittel- und langfristigen Trends. Sehr wahrscheinlich sind die folgenden Angaben bereits veraltet, wenn diese Publikation im Handel erscheint. Andererseits sind Informationen zu den Kosten für den Anwender jedoch gerade bei einem neuen Verfahren von großem Interesse, sind sie doch ein wesentlicher Faktor, der in die Entscheidung bei der Auswahl eines Bauverfahrens einfließt. Die Autoren wollen daher an dieser Stelle einen groben Überblick über die Kosten der textilen Bewehrung (Stand Juni 2009) geben und einen Ausblick auf die denkbare Entwicklung wagen. Aufgrund dieser Unwägbarkeiten sind im folgenden Abschnitt Kontaktdaten von Ansprechpartnern hinsichtlich Fasern und Textilien aufgeführt.

Die reinen Herstellungskosten für eine textile Bewehrung setzen sich aus den Kosten der eingesetzten Materialien und den Aufwendungen für die Einrichtung und den Betrieb der Textilmaschine zusammen:

- *Bewehrungsfasern:* Der Kostenanteil, der durch die Fasern entsteht, hängt direkt von der pro m² eingesetzten Materialmenge ab. Marktpreise liegen derzeit bei etwa 4 bis 5 €/kg für AR-Glas und bei etwa 20 bis 45 €/kg für Carbonfasern (der untere Wert gilt eher für heavy-tow-Standardfasern, der obere für low-tex in hochfester Qualität). Die Abhängigkeit des Preises von der Feinheit ist bei Carbonfasern ein grundsätzlicher Zusammenhang. Feinere Rovings mit geringeren tex-Werten sind im Regelfall teurer.
- *Beschichtung:* Die Kosten der Beschichtung sind im Vergleich zu den Faserkosten relativ gering. Da der Beschichtungsanteil je nach Anwendung und angestrebten Struktureigenschaften (Verbundeigenschaften, Verschiebestabilität, ...) im Bereich von 5 bis 25 M.-% variieren kann, lässt sich hier kein exakter Wert angeben. Je nach Beschichtungsmaterial liegt der Preis bei etwa 1 €/kg. An den Gesamtmaterialekosten einer textilen Bewehrung hat die Beschichtung einen Anteil von weniger als 5 %.
- *Nähfaden:* Die Menge des eingesetzten Nähfadens aus Polypropylen (PP) hängt zwar stark von der gewählten Bindung ab und kann um mehr als 100 % zwischen verschiedenen Strukturen schwanken, liefert aber aufgrund der extrem feinen Garne nur einen vernachlässigbar kleinen Masseanteil, insbesondere bei Verarbeitung von heavy-tow-Carbonfasern. Die Kosten belaufen sich auf wenige

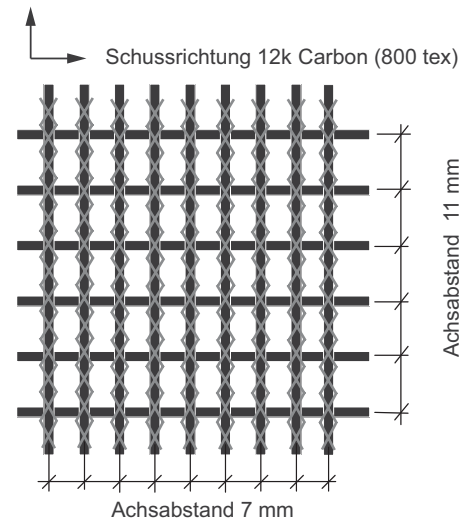
Cent je m² Textil. Der Anteil an den Gesamtmaterialekosten einer textilen Bewehrung liegt unter einem Prozent.

- **Rüstkosten:** Die Herstellung von technischen Textilien wird in der Regel auf vollautomatischen, hochproduktiven Textilmaschinen durchgeführt. Bei entsprechend großem Fertigungsvolumen sind die Rüst- und Maschinenkosten sehr niedrig im Vergleich zu den anderen Kostenbestandteilen wie Materialkosten, Lagerung, Transport und Vertrieb. Derzeit werden die in Abschnitt 3.5.1 aufgeführten Strukturen auftragsbezogen auf Maschinen hergestellt, die sonst dem Forschungsbetrieb dienen. Mit dieser auftragsbezogenen Herstellung möchte die TU Dresden die Anwendung von Textilbeton fördern. Der notwendige Rüstaufwand muss durch den Abnehmer getragen werden. Bild 29 zeigt, wie sich die pro Quadratmeter produzierter Struktur umzuliegenden Rüstkosten in Abhängigkeit von der Losgröße entwickeln. Bei Kleinstmengen von weniger als 100 m² sind die Einrichtungskosten (Rüstkosten) für die Textilmaschine dominierend, bei Losmengen über 1000 m² ist deren Anteil deutlich geringer. Die Rüstkosten fallen einmalig für das Einrichten der Maschine an und werden auf die zu produzierende Menge umgelegt. Prinzipiell sind Kleinstmengen bei auftragsbezogener Fertigung relativ preisintensiv.

Eine Produktion großer Mengen auf Vorrat und damit die Übernahme eines geschäftlichen Risikos für Absatz und Vermarktung durch die TU Dresden als Einrichtung des öffentlichen Dienstes ist derzeit nicht möglich. Sobald kommerzielle Anbieter Herstellung bzw. Handel übernehmen, wird sich die Situation deutlich verbessern. Abschließend sei außerdem darauf hingewiesen, dass es sich bei Tragwerksverstärkungen nahezu immer um sehr arbeitsintensive Arbeiten handelt und die Materialkosten für die textile Bewehrung zwar ein erheblicher, aber in den meisten Fällen nicht der dominierende Faktor sein werden. Zum Thema Gesamtkosten einer Verstärkungsmaßnahme sind im Abschnitt 9.6 einige Daten und Informationen zusammengestellt.

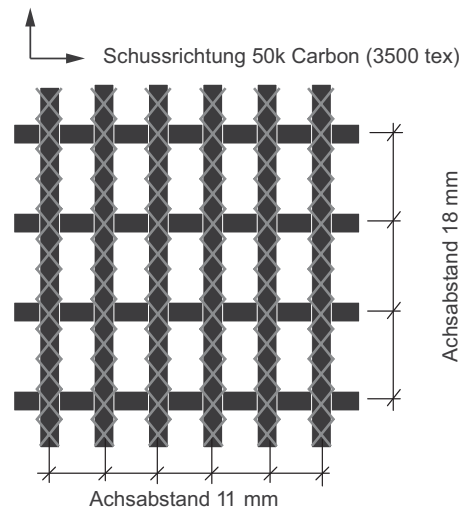
Zwei konkrete Beispiele für Preise sollen exemplarisch genannt werden. Mit Stand Juni 2009 konnte bei einer Abnahmemenge von 3000 m² die Standardstruktur 1 des DZT für einen Nettopreis von etwa 12 €/m², die Standardstruktur 2a für einen Nettopreis von etwa 15 €/m² angeboten werden. Die Preise werden grundsätzlich auf Anfrage unter Berücksichtigung der Abnahmemenge und aktueller Rohstoffpreise kalkuliert.

Ketttrichtung: 12k Carbon (800 tex)



a) Standardstruktur 1 des DZT, Flächengewicht ca. 225 g/m²

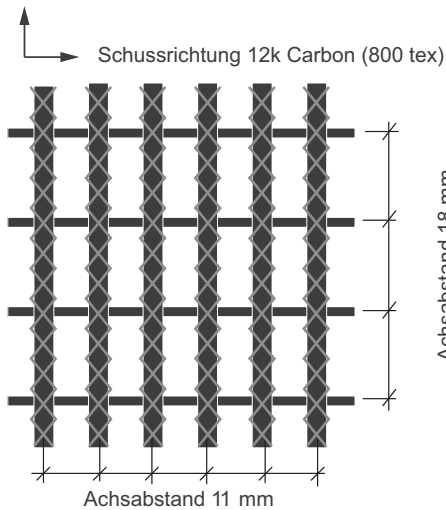
Ketttrichtung: 50k Carbon (3500 tex)



b) Standardstruktur 2a des DZT bzw. Grid 600 der SGL, Flächengewicht ca. 610 g/m²

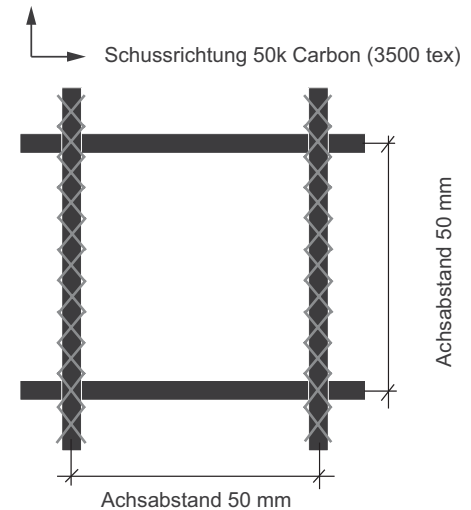
Bild 28. Standardstruktur aus dem Lieferprogramm des Deutschen Zentrum Textilbeton (DZT) und der SGL Carbon Meitingen, Deutschland (SGL)

Ketttrichtung: 50k Carbon (3500 tex)



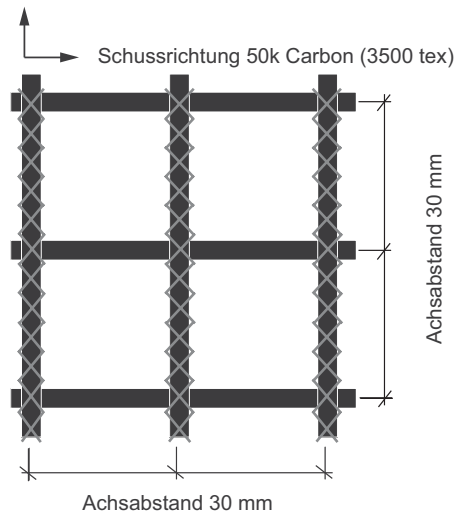
c) Standardstruktur 2b des DZT, Flächengewicht ca. 455 g/m²

Ketttrichtung: 50k Carbon (3500 tex)



e) Grid 125 der SGL Carbon, Meitingen, Flächengewicht ca. 170 g/m²

Ketttrichtung: 50k Carbon (3500 tex)



d) Grid 300 der SGL Carbon, Meitingen, Flächengewicht ca. 270 g/m²

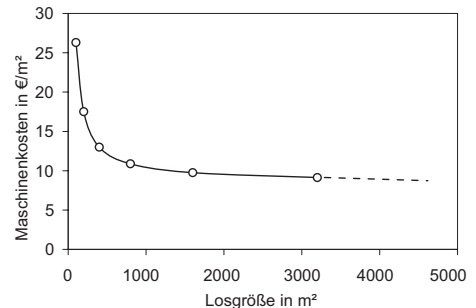


Bild 28. Standardstruktur aus dem Lieferprogramm des Deutschen Zentrum Textilbeton (DZT) und der SGL Carbon Meitingen, Deutschland (SGL)

Bild 29. Rüstkostenanteil in Abhängigkeit von der Losgröße bei auftragsbezogener Fertigung auf Textilmaschinen der TU Dresden

3.5.3 Adressen

Die folgende Übersicht enthält Kontaktdaten von Ansprechpartnern für die Bereiche Fasern und Textilien (Stand Juni 2009).

AR-Glasfasern

- European Owens Corning
Fiberglas (EOCF) srl
Chaussee de la Hulpe 166
1170 Brussels
Belgium
Internet: www.owenscorning.com,
www.cem-fil.com
Holger Zorn
Tel.: +32 26 74 83 18
Mobil: +49 (0)177 246 54 11
Fax: +32 26 62 08 15
E-Mail: Holger.Zorn@owenscorning.com
- Novacrete Faserbaustofftechnik GmbH
Balduinstr. 1A
Postfach 1270
54462 Bernkastel-Kues
Internet: www.novacret.com
Thomas Friedrich
Tel.: +49 (0)6531 96 82 41
Fax: +49 (0)6531 96 82 42
E-Mail: info@novacret.com

Carbon-Fasern

- SGL Technologies GmbH
Carbon Fibers & Composites
Werner-von-Siemens-Str. 18
86405 Meitingen
Internet: www.sglgroup.com
Bernhard Plaggenborg
Tel.: +49 (0)8271 83-1398
Fax: +49 (0)8271 83-1427
E-Mail: bernhard.plaggenborg@sglcarbon.de
- Toho Tenax Europe GmbH
Kasinostr. 19-21
42103 Wuppertal
Internet: www.tohotenax-eu.com
Christian Koppenberg
Tel.: +49 (0)202 32 32 33
Fax: +49 (0)202 32 23 60
E-Mail: christian.koppenberg@tohotenax-eu.com

Weitere, bedeutende Hersteller von Carbonfasern sind bspw. Toray Group (www.toray.com), Mitsubishi Rayon Co., Ltd. (www.mrc.co.jp), Hexcel Corp. (www.hexcel.com), Cytec Industries Inc. (www.cytec.com), Zoltek Companies, Inc.

(www.zoltek.com). Mit Fasern dieser Hersteller liegen jedoch im Bereich Textilbeton für Tragwerksverstärkung keine Erfahrungen vor.

Textile Bewehrungen für die Tragwerksverstärkung

- Deutsches Zentrum Textilbeton
Chemnitz Str. 46b
01187 Dresden
Internet: www.textilbetonzentrum.de
Silvio Weiland
Tel.: +49 (0)351 463-3 63 44
Fax: +49 (0)351 463-3 72 89
E-Mail: info@textilbetonzentrum.de
- SGL Technologies GmbH
Carbon Fibers & Composites
Werner-von-Siemens-Str. 18
86405 Meitingen
Internet: www.sglgroup.com
Bernhard Plaggenborg
Tel.: +49 (0)8271 83-1398
Fax: +49 (0)8271 83-1427
E-Mail: bernhard.plaggenborg@sglcarbon.de
- TUDATEX GmbH
Chemnitz Str. 46b
01187 Dresden
Internet: www.tudag.de
Prof. Chokri Cherif
Tel.: +49 (0)351 463-39 300
Fax: +49 (0)351 463-39 301
E-Mail: chokri.cherif@tu-dresden.de

4 Feinbeton

4.1 Definition

Nach allgemeiner Definition [123] wird Beton mit einem maximalen Größtkorn von 4 mm als Mörtel bezeichnet. Dieser Definition folgend wäre die Bezeichnung „textilbewehrter Mörtel“ oder „Textilmörtel“ für die verwendete Matrix formal korrekt, würde jedoch auf erhebliche Akzeptanzprobleme stoßen. Textilbeton basiert auf der Idee, unter Verwendung von Hochleistungsfasern und einem Hochleistungsbeton mit einem an die Anwendung angepassten Zuschlagkorn einen Hochleistungswerkstoff zu schaffen. Die Matrix wird als Konstruktionsbeton verwendet und erreicht bei den meisten Eigenschaften die Kennwerte eines Hochleistungsbetons. Aus diesem Grund wird die zementöse Matrix des Textilbetons seit Beginn der Forschung als *Feinbeton* oder *Feinkornbeton* bezeichnet. Vereinzelt findet man in der älteren Literatur auch die Bezeichnung Mörtel [104].

4.2 Anforderungen an den Feinbeton

Der Feinkornbeton muss spezielle Anforderungen hinsichtlich der chemischen Kompatibilität zu den textilen Bewehrungsfasern (besonders bei AR-Glas), der rheologischen Eigenschaften des Frischbetons und des Ansteifverhaltens in Abhängigkeit von der angewandten Verarbeitungstechnik und von den notwendigen Verarbeitungszeiten erfüllen. Ebenso muss er geeignete Verbundeigenschaften und bestimmte Mindestwerte für Zug- und Druckfestigkeiten zur Übertragung der Kräfte besitzen. Die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit des Betons gegenüber äußeren Einwirkungen in Abhängigkeit vom Anwendungsort können Frostbeständigkeit oder Frost-Taumittel-Beständigkeit erfordern.

Es ist die Möglichkeit, teilweise auch die Notwendigkeit, zu bedenken, auch die Verarbeitungstechnologie auf die Materialeigenschaften abzustimmen, denn nicht alle Anforderungen lassen sich durch die Modifizierung der Betonzusammensetzung erfüllen. Das betrifft z. B. die Problematik der Austrocknung der nur wenige Millimeter dünnen Feinbetonschichten während der Herstellung der Verstärkung.

Die Anforderungen an die Feinbetonmatrix variieren je nach Anwendung des Textilbetons sehr stark. Während für die Herstellung neuer, filigraner Bauteile die Frischbetone teilweise extrem fließfähig sein müssen, werden im Bereich der Verstärkung spritzfähige Mischungen mit starkem Zusammenhalt benötigt, um bei Applikationen über Kopf oder an senkrechten Flächen mehrlagige Verstärkungsschichten aus Textilbeton ausführen zu können. Bei der Bauwerksverstärkung wird vorzugsweise das Spritz- bzw. Sprühverfahren eingesetzt. Der Feinbeton muss also auch in handelsüblichen Geräten ausreichend homogenisierbar, pumpbar und spritzfähig sein.

Wünschenswert sind darüber hinaus geringe Schwind- und Kriechmaße. Dieser Punkt gewinnt aufgrund des hohen Bindemittelanteils und des damit einhergehenden höheren autogenen Schwindens gegenüber Normalbetonen an Bedeutung.

4.3 Zusammensetzung und Rezepturen

Die Zusammensetzung eines Betons hängt direkt von den Anforderungen ab, die aus seiner Verwendung resultieren. Nach dem eingesetzten Bindemittel können Rezepturen auf Portlandzementbasis, auf Polymerbasis bzw. mit Polymeranteil und auf Basis alternativer Bindersysteme unterschieden werden. Mit dem Einsatz von Polymeren und alternativen Bindersystemen, wie z. B. Phosphatzemente oder Kalzium-Aluminat-Zemente, wird vor allem versucht, die Frage der Dauerhaftigkeit beim Einsatz von AR-Glasfasern durch Er-

zeugen einer nichtalkalischen Matrix zu lösen. Bei kommerziell erhältlichen Systemen ist die genaue Zusammensetzung üblicherweise nicht bekannt. Die weiteren Ausführungen beschränken sich daher auf einige der in den Sonderforschungsbereichen 528 und 532 entwickelten Rezepturen auf Portlandzementbasis.

Das *Größtkorn* des Zuschlags ergibt sich aus den Dimensionen der Bewehrung und den Schicht- bzw. Bauteildicken von Textilbeton. Textilbetonbauteile sind im Vergleich zu Stahlbeton extrem dünn. Die Bewehrungen haben Gitteröffnungen im Bereich weniger Millimeter und bei der in vielen Fällen nötigen mehrlagigen Bewehrung betragen die Abstände zwischen den einzelnen Lagen auch nur wenige Millimeter. Die Kornzusammensetzung des Feinbetons muss hinsichtlich dieser Anforderungen eingestellt werden. Beim Anwendungsfall Verstärkung beträgt das Größtkorn i. d. R. 1 mm.

Aufgrund des kleinen Größtkorns werden relativ hohe Bindemittelgehalte erforderlich, hauptsächlich um die angestrebten Festigkeiten und Verarbeitungseigenschaften zu erreichen. Der Bindemittelanteil besteht bei den meisten Rezepturen aus einem Gemisch verschiedener Zementtypen, Flugasche und Mikrosilika.

Die *Zemente* werden in Abhängigkeit der Faser ausgewählt. Die hohe Alkalität des Betons geht hauptsächlich auf den Portlandklinkeranteil zurück. Im Stahlbetonbau ist ein hoher Portlandklinkeranteil von Vorteil, denn das alkalische Milieu schützt die stählerne Bewehrung bei fachgerechter Ausführung dauerhaft vor Korrosion. Bei AR-Glasfasern kommen daher ausschließlich Hochofenzement (CEM III) und Compositzemente (CEM II) zur Anwendung, da diese geringere Anteile Portlandklinker enthalten. Carbonfasern sind gegenüber alkalischem Milieu resistent, deswegen spielen derartige Überlegungen keine Rolle.

Mikrosilika und *Flugasche* werden dem Feinbeton zur Abpufferung der Alkalität zugegeben. Beide Puzzolane können das vom Portlandzement freigesetzte Portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und die Alkalien binden. Der pH-Wert bzw. die Alkalität der Porenlösung nimmt dadurch ab. Außerdem tragen Mikrosilika und Flugasche zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit und zur Vermeidung des Blutens (Wasserabsonderung der frischen Mischung) bei. Aufgrund der unterschiedlichen Korngrößen ergänzen beide Materialien das Korngefüge aus Zement und Zuschlägen im Mikrometerbereich. Die mittlere Korngröße von Mikrosilika beträgt nur etwa 1/10 der mittleren Größe der Zementkörner. Auch die eingesetzten Flugaschen füllen mikroskopische Lücken im Korngefüge.

Wasser wird für die Hydratation des Betons benötigt. Da innerhalb der Verstärkungsschichten

große Kräfte übertragen werden müssen, wird eine hohe Betonfestigkeit angestrebt. Überschüssiges Wasser, das bei der Hydratation nicht verbraucht wird, wirkt bekanntlich der Entwicklung hoher Festigkeiten entgegen, da nach dem Verdunsten ein poriges Gefüge zurückbleibt. Deshalb wird das Zugabewasser auf die zur Hydratation rechnerisch benötigte Menge begrenzt. Üblicherweise liegen die Wasser-Bindemittelwerte w/b der Feinbetone bei etwa 0,30 bis 0,40.

Betone mit derart niedrigem Wassergehalt erreichen ohne *Fließmittel* nicht die erforderliche Konsistenz. Deshalb wird die gewünschte Konsistenz mit Fließmitteln eingestellt. Aufgrund des hohen Bindemittelgehalts liegen die notwendigen Zugabemengen über den für Normalbetone tolerierten Grenzen. Gute Erfahrungen wurden mit Fließmitteln auf Naphthalinsulfonat-Basis gesammelt [31]. Andere Fließmittel können aber nach vorherigen Eignungstests ebenso verwendet werden.

Tabelle 9 zeigt Beispiele für Mischungszusammensetzungen, die für die Tragwerksverstärkung im Sonderforschungsbereich 528 entwickelt worden sind. Es handelt sich in allen Fällen um spritz- und pumpfähige Rezepturen. Mischung M1 wurde speziell für die Kombination mit textilen Bewehrungen aus AR-Glas entwickelt [31], eignet sich aber auch für den Einsatz von Carbonfasern. Bei Mischung M2 besteht ein Anteil des Bindemittels aus reinem Portlandzement (CEM I) und eignet sich daher nur für Carbonfasern. Durch den CEM I werden höhere Frühfestigkeiten erreicht und der Widerstand gegen Frostangriff ist höher als bei M1. Der geringfügig erhöhte Zuschlaganteil reduziert das Schwinden. Mischung M3 ist eine Variante der Mischung M1 mit höherem Zuschlag und geringerem Bindemittelanteil zur Reduzierung des Schwindens. Die Fließmittelmengen

sind in allen Fällen nur Orientierungswerte und beim Anwender je nach Mischtechnik und Applikationstechnologie anzupassen.

Generell sind die Eigenschaften dieser, aus der Grundlagenforschung stammenden Rezepturen gut untersucht, insbesondere hinsichtlich des Verbundverhaltens (s. Abschn. 6.2) und der Dauerhaftigkeit (s. Abschn. 6.4). Für den baupraktischen Einsatz ist bei diesen Rezepturen jedoch von Nachteil, dass Nasskomponenten (Mikrosilika und Fließmittel) eingesetzt werden, sodass sie ohne Modifikation nicht als Fertigmischungen konfektionierbar sind. Abweichungen von diesen Rezepturen sind möglich und, z. B. für die Herstellung vorkonfektionierter Mischungen oder aus anderen technologischen Gründen, notwendig. In jedem Fall müssen modifizierte Rezepturen hinsichtlich ihrer Eignung vorab untersucht werden, insbesondere die Verarbeitungseigenschaften, die Festigkeitsentwicklung und das Langzeitverhalten im Verbund mit der textilen Bewehrung.

4.4 Prüfung von Frischbeton und Festbeton

Zu den während der Verarbeitung und im Rahmen von Eigen- und Fremdüberwachung durchzuführenden Prüfungen zählen das Ausbreitmaß des Frischbetons sowie Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit und Elastizitätsmodul als wichtige Festbetonkennwerte. In den meisten Fällen kommen Geräte, Prüfkörper und Vorschriften aus der Mörtelprüfung zum Einsatz (Normen der Reihe DIN EN 1015, früher DIN 18 555), denn aufgrund des Größtkorns und der verarbeiteten Mengen ist die Verwendung von Betonprüfkörpern, -geräten, und -vorschriften (Normen der Reihe DIN 1045) unzweckmäßig und technisch nicht erforderlich.

Tabelle 9. Beispiele für spritzfähige Feinbetonrezepturen aus dem Sonderforschungsbereich 528

Bestandteil	Einheit	M1	M2	M3
Zuschlag Sand 0-1	kg/m ³	942,0	1122,4	1122,4
Zement CEM I 32,5	kg/m ³	–	564,8	–
Zement CEM III/B 32,5	kg/m ³	628,0	–	468,4
Mikrosilika (Suspension)	kg/m ³	100,5	56,6	56,6
Flugasche	kg/m ³	265,6	253,1	253,1
Wasser	l/m ³	214,6	221,5	221,5
Fließmittel FM30, BASF	l/m ³	10,5	12,0	–
Fließmittel ACE30, BASF	l/m ³	–	–	3,8
Wasser-Bindemittelwert	–	0,33	0,36	0,42

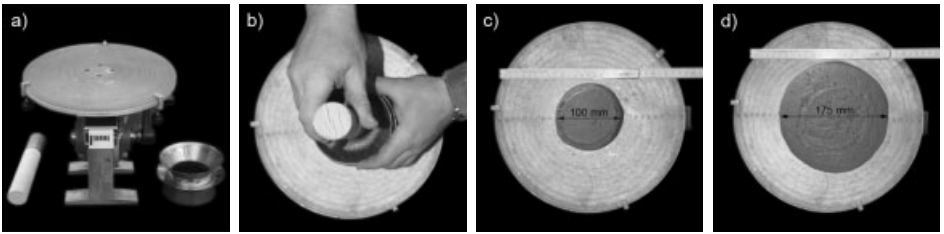


Bild 30. Hägermann-Rütteltisch nach DIN EN 1015-3; a) Hägermann-Rütteltisch mit Zubehör, b) Einfüllen und Verdichten des Feinbetons, c) Ausbreitmaß direkt nach dem Ziehen des Trichters, d) Ausbreitmaß nach 15 Schlägen

- Für das *Ausbreitmaß* bzw. die *Konsistenz* des Frischbetons hat sich die Messung mit dem Hägermann-Rütteltisch nach DIN EN 1015-3 bewährt (Bild 30). Vorversuche sind in jedem Fall zu empfehlen, insbesondere, da das Ansteifverhalten stark von den Witterungsbedingungen und der Saugfähigkeit des Untergrunds abhängig ist.
- Die *Druckfestigkeit* und *Biegezugfestigkeit* werden im Regelfall zweckmäßig an Mörtelprismen mit Abmessungen von $4\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 16\text{ cm}$ nach DIN EN 196-1 [122] oder DIN EN 1015-11 [125] (früher DIN 18 555-3) ermittelt. Im Rahmen der Überwachung von Bauwerksverstärkungen wird empfohlen, die Proben abweichend von der Norm unter den baustellenüblichen Bedingungen zu lagern, d. h. ohne Klimatisierung und im Regelfall nur in feuchte Tücher eingeschlagen.
- Für den *Elastizitätsmodul* werden die gleichen kleinformigen Betonprismen verwendet und die Prüfung in Ermangelung geeigneter Prüfvorschriften für Mörtel in Anlehnung an DIN 1048-5 [120] durchgeführt.

Auf weitere Prüfungen soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Auf einschlägige Normen sei verwiesen (Normen der Reihe DIN EN 1015, früher DIN 18 555).

4.5 Eigenschaften

Die Konsistenz des Frischbetons kann durch Variieren der Fließmittelmenge in weiten Grenzen den Erfordernissen angepasst werden. Zu beachten ist, dass der frische Beton bei Applikation an senkrechte Flächen ausreichend steif sein muss, damit er an der Wand haften bleibt. Allerdings muss der Feinbeton auch so weich und plastisch sein, dass die Bewehrungstextilien in die frische Feinbetonschicht auch noch nach einigen Minuten Verweildauer auf dem Untergrund leicht eingedrückt werden können. In diesem für die Konsistenz maßgebenden Rahmen hat sich für die Bauwerksverstärkung ein Ausbreitmaß von 170 bis 200 mm als günstig erwiesen (Bild 30d).

Die wichtigsten Festbetonkennwerte sind exemplarisch in Tabelle 10 angegeben. Nach den Druck- und Biegezugfestigkeiten kann der Feinbeton den hochfesten Betonen zugeordnet werden. Der Elastizitätsmodul ist für die Festigkeitsklasse erstaunlich niedrig. Im direkten Vergleich zu Normalbetonen und hochfesten Betonen nach DIN 1045-1 entspricht dieser Wert eher einem C20/25. Dies liegt an dem hohen Bindemittelgehalt und der völligen Abwesenheit von entsprechend steifen Grobzuschlägen.

Mit dem hohen Bindemittelgehalt gewinnen zwei weitere, meist unerwünschte Eigenschaften des Betons an Bedeutung: das Kriechen und Schwinden. Für die Anwendung zur Bauwerksverstär-

Tabelle 10. Eigenschaften der Beispielrezepturen aus Tabelle 9, Mittelwerte

Eigenschaft	Einheit	M1	M2	M3
Druckfestigkeit	N/mm ²	76	65	54
Biegezugfestigkeit	N/mm ²	7,1	8,7	9,5
E-Modul	N/mm ²	28.500	25.600	–
Dichte	kg/dm ³	2,17	–	–

kung in der Zugzone von Stahlbetonbauteilen sind die Auswirkungen allerdings vernachlässigbar, denn die textile Bewehrung übernimmt die Zugkräfte. Der Feinbeton hat „nur“ die Aufgabe, den Verbund sicherzustellen, damit die Kräfte von der Altkonstruktion in die Verstärkungsschicht eingeleitet werden können.

Bei Normalbeton ist die Druckfestigkeit von der Prüfkörpergröße abhängig. Diese Abhängigkeit wird als Maßstabeffekt bezeichnet, siehe z. B. [57]. Diese Abhängigkeit wird bei der Ermittlung der charakteristischen Druckfestigkeiten aus Prüfungen am Würfel mit 150 oder 200 mm Kantenlänge mit Korrekturfaktoren berücksichtigt. Für hochfeste Feinbetone konnte nachgewiesen werden, dass dieser Maßstabeffekt im relevanten Größenbereich (typische Abmessungen für Textilbeton liegen im Bereich von 10 bis 40 mm) vernachlässigbar ist und eine Anpassung mit speziellen Faktoren nicht notwendig ist [15].

Untersucht wurde für Feinbeton auch die Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Prüfkörpergeometrie. Auf der Grundlage von [15] wird empfohlen, die nach DIN EN 1015-11 [125] an Bruchstücken von Mörtelprismen (40 mm × 40 mm × 160 mm) ermittelte Druckfestigkeit wie folgt auf die einaxiale Druckfestigkeit $f_{c,cyl}$ umzurechnen:

$$f_{c,cyl} = 0,9f_{c,w40}$$

mit

$f_{c,w40}$ am Prismenbruchstück mit 40 mm Kantenlänge ermittelte Druckfestigkeit

Die Spannungs-Dehnungs-Linie des Feinbetons lässt sich in guter Näherung durch die Ansätze des Model-Code 90 bzw. der DIN 1045-1 beschreiben, siehe [15, 16].

4.6 Bezugsmöglichkeiten

Eine für den praktischen Einsatz mit mehreren Nachteilen behaftete, aber bisher mangels verfügbarer Fertigmischungen bereits mehrfach umgesetzte Variante ist die Herstellung des Feinbetons aus den drei Trockenkomponenten (Sand, Zement, Flugasche) und den drei Nasskomponenten (Silika-Suspension, Wasser, Fließmittel) direkt auf der Baustelle. Nachteilig sind die personellen und materiellen Aufwendungen für die Einrichtung und den Betrieb eines ausreichend vor Witterungseinflüssen geschützten Mischplatzes. Aus wirtschaftlichen, technologischen und qualitativen Aspekten ist der Einsatz einer aus Trockenkomponenten vorkonfektionierten Mischung zu favorisieren.

Auf der Basis der in Abschnitt 4.3, Tabelle 9 vorgestellten Rezeptur M2 hat die Fa. Pagel aus Essen eine solche vorkonfektionierte Fertigmischung für

den Einsatz bei der Tragwerksverstärkung mit Textilbeton entwickelt. Neben der einfacheren Herstellung des Frischbetons unter Baustellenverhältnissen kann eine stets gleichbleibende Produktzusammensetzung gewährleistet werden. Die Fertigmischung unterliegt der werkseigenen Produktionskontrolle und einer Fremdüberwachung. In diesem Rahmen werden Eingangskontrollen der Bestandteile und Prüfungen der Trockenmischung, des Frischbetons und des Festbetons durchgeführt.

Die Fertigmischung ist als Sackware (25 kg Säcke, 40 Sack bzw. 1 Tonne pro Palette), bei größeren Mengen in big bags über folgende Ansprechpartner lieferbar:

Pagel Spezial-Beton GmbH & Co. KG
Wolfsbankring 9
45355 Essen

Internet: <http://www.pagel.com>

Herr Dipl.-Ing. Bernd Gehrke
Tel.: +49 (0)201 685 04-28
Fax: +49 (0)201 685 04-31
E-Mail: gehrke@pagel.de

Die Lieferung in Silotechnik bleibt ausgeschlossen, da eine konstante Produktzusammensetzung, bedingt durch Entmischungen beim Befüllen und Entleeren eines Silos, nicht gewährleistet werden kann.

Preise werden auf Anfrage mengenabhängig und auf Basis aktueller Rohstoffpreise kalkuliert. Das Preisniveau des Feinbetons liegt über dem üblicher Normalbetone. In den Gesamtkosten einer Textilbetonverstärkung ist der Feinbeton mit unter 10 % Kostenanteil jedoch ein untergeordneter Faktor, denn die Schichtdicken des Feinbetons betragen je Verstärkungslage nur einige Millimeter. Dem stehen die Materialkosten für die textilen Bewehrungen und die Lohnkosten für die Ausführung der Verstärkungsarbeiten gegenüber, welche die Kostenstruktur dominieren.

5 Herstellen von Textilbeton

5.1 Allgemeines

Art, Menge und Anordnung der für eine Verstärkungsaufgabe notwendigen textilen Bewehrung ergibt sich aus der statischen Bemessung sowie aus konstruktiven und technologischen Randbedingungen. Im Rahmen der statischen Bemessung wird die für die Abtragung der Lasten erforderliche Bewehrungsmenge ermittelt. Je nach Anwendungsbereich kann eine Mindestbewehrung erforderlich sein, die ein ausreichendes Verformungsvermögen der Bauteile gewährleistet, also nach der Rissbildung die Aufnahme der bei der Rissbildung frei werdenden Kräfte sicherstellt.

Konstruktiv und technologisch bedingt ist z. B. die Anordnung von Übergreifungsstößen der textilen Bewehrung resultierend aus einer sinnvollen Abfolge der Arbeitsabschnitte bzw. aus den Begrenzungen der Lieferbreiten und -längen der textilen Bewehrungen.

Für den Stahlbetonbau schreibt DIN 1045-1, 13.5.2 [119] einen zulässigen Höchstbewehrungsgrad von 9 % für normalkraftbeanspruchte Bauteile vor. Erfahrungen zeigen, dass bei Textilbeton unter Laborbedingungen mit sehr fließfähigem Feinbeton geometrische Bewehrungsgrade von 6 % in einer Richtung erreichbar sind. Je nach Aufbau der textilen Bewehrung ist in Querrichtung ebenfalls ein Bewehrungsgrad von 2 bis 6 % vorhanden, da die textile Bewehrung nicht wie beim Stahlbeton aus einzelnen Stäben aufgebaut ist. Bei Verwendung von Textilbeton unter vergleichbaren praktischen Bedingungen, z. B. in einem Fertigteilwerk mit entsprechender Ausrüstung, ist diese Obergrenze von 6 % für den Längsbewehrungsgrad erreichbar. Für den praktischen Einsatz im Bereich der Bauwerksverstärkung mit den Randbedingungen einer Ortbetonbaustelle ist davon auszugehen, dass diese hohen Bewehrungsgrade nicht in jedem Fall erreicht werden. Realistisch ist ein maximaler Bewehrungsgrad von 4 % bei In-situ-Verstärkungen aus Textilbeton.

Bei der Verwendung von 800-tex-Carbonrovings im Textil wurde z. B. bei der in Abschnitt 8.8 beschriebenen Anwendung ein Längsbewehrungsgrad von etwa 2 % erreicht. Die Verstärkung besteht aus drei Lagen textiler Bewehrung und vier, insgesamt ca. 15 mm dicken Betonschichten [35]. Bei Verwendung von Heavy-Tows ist ein Längsbewehrungsgrad von 4 % als Obergrenze eine sinnvolle Orientierung. Letztlich sind die Schichtstärken aber im Vergleich zu Stahlbeton sehr gering, sodass die Veränderungen der Querschnittsgeometrie des zu verstärkenden Bauteils in den wenigsten Fällen ein begrenzender Faktor für die Anwendung sein dürfte.

Zu den vorbereitenden Arbeiten zählt auch die Konfektionierung der textilen Bewehrung, d. h.

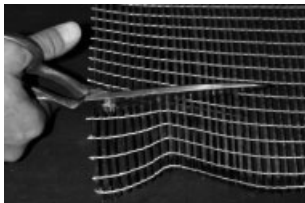


Bild 31. Konfektionieren der textilen Bewehrung mit einer handelsüblichen Schere mit Mikroverzahnung

aus dem im Lieferzustand 1,25 m breiten und quasi endlosen Textilien sind die für das Bauteil erforderlichen einzelnen Bewehrungsmatten zu schneiden. Dazu empfiehlt sich die Verwendung einer handelsüblichen Schere mit Mikroverzahnung (Bild 31).

Für die Herstellung von Textilbeton kommen mehrere Verfahren in Betracht, die jedoch für die verschiedenen Anwendungszwecke recht unterschiedlich geeignet sind. Die potenziell möglichen Applikationsverfahren für eine Tragwerksverstärkung aus Textilbeton werden im Folgenden kurz vorgestellt.

5.2 Laminieren

Das Laminieren ist das einfachste Herstellungsverfahren und stellt an die Arbeitsmittel die geringsten Ansprüche. Feinbetonmatrix und textile Bewehrung werden abwechselnd und Schicht für Schicht von Hand aufgebracht. Die Feinbetonmatrix kann im einfachsten Fall mit einer Kelle oder einem Spachtel händisch auf dem Untergrund oder der vorhergehenden Schicht verteilt werden. In die frische Feinbetonschicht wird unmittelbar danach das Bewehrungstextil leicht eingedrückt.

Da es für textile Bewehrungen (noch) keine Abstandhalter gibt, wird durch die Dicke der Betonschicht und die Tiefe, in der das Textil in die Betonschicht eingedrückt bzw. eingebaut wird, die Höhenlage der textilen Bewehrung festgelegt. Nach der letzten Bewehrungslage wird eine abschließende Feinbetonschicht aufgebracht.

Das Laminieren von Hand kann mit dem maschinellen Auftrag der Feinbetonmatrix im Spritz- bzw. Sprühverfahren kombiniert werden.

5.3 Spritzen oder Sprühen

Die Bemessung, Ausführung und Güteüberwachung von herkömmlichem, mit Stabstahl oder Mattenstahl bewehrtem Spritzbeton wird in DIN 18551:2005-01 [121] geregelt. In Abhängigkeit des Ortes der Zugabe des Wassers unterscheidet man Nass- und Trockenspritzverfahren. Beim Nassspritzverfahren wird der Beton in einem separaten oder in einem der Pumpe vorgeschalteten Zwangsmischer gemischt und homogenisiert. Die fertige Mischung wird dann durch eine Rohr- oder Schlauchleitung bis an die Spritzdüse gepumpt (Dichtstromförderung), mit Treibluft beschleunigt und an die Auftragsfläche gespritzt. Beim Trockenspritzverfahren wird das trockene Material mit Luftdruck durch die Leitung gefördert (Dünnstromförderung) und die Zugabe des Wassers erfolgt erst an der Spritzdüse. Obwohl sich das Trockenspritzverfahren in der Instandsetzung und Verstärkung von Betonbauteilen durchgesetzt hat, wird bei der Herstellung von Textilbe-

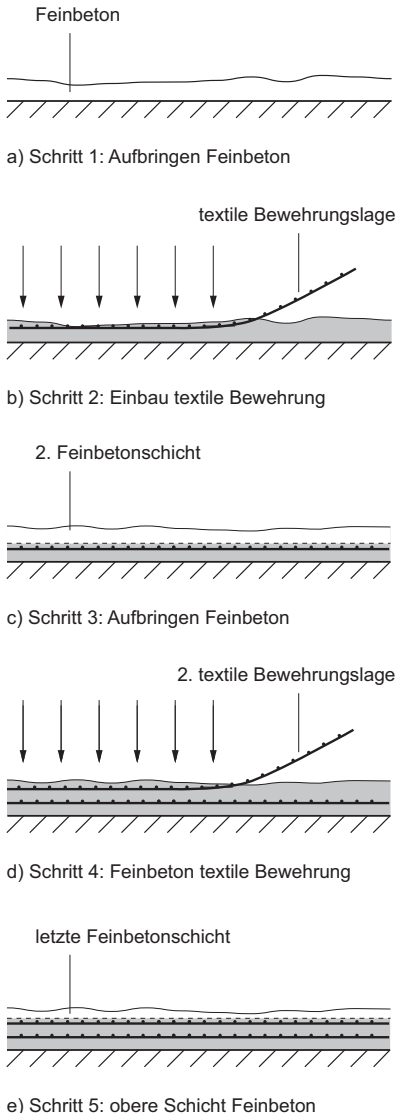


Bild 32. Schematische Darstellung der Arbeitsschritte beim händischen Laminieren von Textilbeton

ton im Spritzverfahren das Nassspritzen in der Dichtstromförderung bevorzugt.

Im Gegensatz zum üblichen Spritzbeton werden aufgrund der dünnen Betonschichten beim Textilbeton nur geringe Materialmengen verarbeitet. Bisherige Erfahrungen liegen im Bereich von 1 bis 5 Liter pro Minute. Um diese Mengen verar-

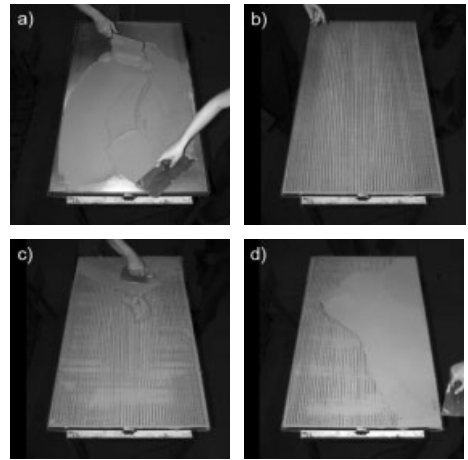


Bild 33. Händisches Laminieren von Textilbeton; a) erste Feinbetonschicht, b) erste Lage Textil wird eingelegt, c) zweite Schicht Feinbeton, d) dritte Feinbetonschicht auf zweiter Lage Textil

beiten zu können, müssen Schlauchlängen, Schlauchdurchmesser und ggf. die Spritzdüse darauf abgestimmt werden.

Bei der Herstellung von Spritzbeton sind die üblichen Spritzdrücke aufgrund der erwünschten Verdichtungswirkung so hoch, dass vorrangig größere Zuschläge des Korngemisches von der Oberfläche abprallen und nicht Bestandteil der fertigen Betonmischung am Bauwerk sind. Der entstehende Rückprall führt dazu, dass die endgültige Mischung erst am Bauteil entsteht.

Spritzbeton = Spritzgut – Rückprall

Unter Kenntnis dieses Zusammenhanges muss die Ausgangsmischung so eingestellt werden, dass in der Spritzbetonschicht die gewünschte Zusammensetzung unter Berücksichtigung des Rückpralls entsteht.

Für die Herstellung von Textilbeton sind die verwendeten Spritzdrücke nicht unproblematisch. Die für Verstärkung von Massivbauwerken besonders interessanten hochmoduligen Faserarten (AR-Glas und Carbon) besitzen einen nicht vernachlässigbaren Nachteil: Sie reagieren empfindlich auf Querdruck. Ist die Energie des aufprallenden Spritzgutes zu hoch, besteht die Möglichkeit, dass die Fasern irreparabel geschädigt werden und an Festigkeit verlieren. Dieses Risiko sollte bei der Herstellung von Textilbeton im Spritzverfahren durch eine Reduzierung der verwendeten Spritzdrücke praktisch vermieden werden. Die Reduzierung des Spritzdrucks wirft allerdings die Frage auf, ob eine ausreichende Verdichtung des

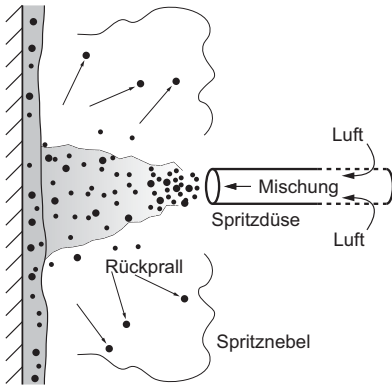


Bild 34. Beim Spritzverfahren wird mit hohen Drücken gearbeitet, zwischen 10 und 40 % der geförderten Betonmenge können als Rückprallverluste anfallen

Betongefüges und ein ausreichend guter Verbund zum Altbetonuntergrund bzw. zur eingespritzten Bewehrung erreicht werden kann.

Umfangreiche Laborversuche haben gezeigt, dass bei gewissenhafter Vorbereitung des Untergrundes auch im Handlaminierverfahren – also bei vollständigem Verzicht auf etwaige Aufprallenergie – gute Verbundqualitäten zwischen Verstärkungsschicht und Altbeton erreichbar sind. Die verwendeten Feinbetone weisen einen so guten Zusammenhalt und ein von Haus aus dichtes Gefüge auf, dass auch ohne zusätzliche Verdichtungsenergie im Regelfall Festigkeiten im Bereich der hochfesten Betone erreicht werden. Beim Verbund zum Altbetonbauteil hat sich gezeigt, dass es vor allem darauf ankommt, das tragfähige Korngerüst freizulegen und den Altbeton ausreichend vorzunässen [82]. Auf der Basis dieser Erfahrungen werden für die Verarbeitung von Verstärkungen aus textilbewehrtem Beton wesentlich geringere Spritzdrücke als bei Spritzbeton üblich empfohlen.

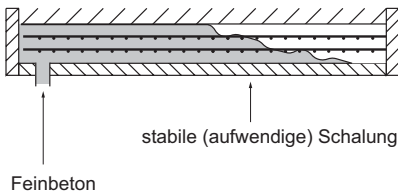


Bild 35. Prinzip des Injektionsverfahrens; die Bewehrung müsste durch geeignete Abstandhalter fixiert werden und der Feinbeton würde in die geschlossene Schalung gepumpt

Da die Menge des Rückpralls direkt vom Abstand zwischen Spritzdüse und Oberfläche und von weiteren Faktoren wie z.B. der Spritzrichtung abhängt, wäre der Wechsel hin zu rückprallfreien Spritzdrücken begrüßenswert. Zudem wäre die Betonzusammensetzung konstanter, da von den genannten Randbedingungen unabhängig. Dieser Unterschied in der Höhe des Spritzdrucks, verbunden mit der vollständigen Vermeidung von Rückprall, soll durch die Verwendung des Begriffs „*Sprühverfahren*“ betont werden.

Neben der Höhe der empfohlenen Spritzdrücke besteht ein weiterer wesentlicher Unterschied zum klassischen Spritzbeton. Während bei Verwendung von Stahlbewehrung diese mit einem Mindestabstand von 2 cm zum Altbeton zunächst fixiert und auch bei mehrlagigem Aufbau in einem zweiten Schritt vollständig eingespritzt wird, hat sich bei Verstärkungen aus Textilbeton eine andere Vorgehensweise als praktikabler erwiesen. In Schritt 1 wird zunächst eine Lage Feinbeton aufgesprüht, in die dann im nächsten Arbeitsgang das Textil eingedrückt und mit einer einfachen Glättkelle oder Kartätsche eingearbeitet wird. Diese Abfolge wird für jede notwendige Verstärkungslage wiederholt. Den Abschluss bildet in der Regel eine Feinbetonschicht ausreichender Dicke.

Bei der Herstellung von Verstärkungen aus Textilbeton im Sprühverfahren handelt es sich praktisch um das Laminierverfahren mit einem maschinellen Auftrag der Feinbetonmatrix. Wie beim Laminierverfahren kann mit der zuletzt aufgetragenen Feinbetonschicht auch die gewünschte Oberflächenstruktur hergestellt werden.

5.4 Injektion

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Bewehrung zunächst mit geeigneten Abstandhaltern¹²⁾ zu fixieren, dann die Schalung zu schließen und anschließend einen sehr fließfähigen Feinbeton mit entsprechendem Druck in die Schalung zu pumpen (Bild 35). Für Verstärkungen aus Stahlbeton wurde diese Methode bereits verschiedentlich umgesetzt. Für Textilbeton fehlen aber derzeit noch Praxistests. Die Herausforderung besteht neben der sicheren Lagefixierung der Bewehrung vor allem in der vollständigen Verfüllung des Raums zwischen Altbetonbauteil und Schalung. Die Herstellung der Schalung ist aufwendig,

¹²⁾ Geeignete Abstandhalter sind bisher in der Praxis noch nicht verfügbar. Denkbar ist die Verwendung von Abstandsgewirken, bei denen spezielle Polfäden den Abstand zwischen den Bewehrungslagen und ggf. auch zwischen der äußeren Bewehrungslage und der Schalhaut sicherstellen.

da sie dem Betonierdruck standhalten, an den Rändern über eine geeignete Abdichtung verfügen und eine hohe Steifigkeit aufweisen muss. Über den Verlauf der Betonage besteht im Regelfall keine Kontrolle. Das Ergebnis wird erst sichtbar, wenn die Schalung entfernt wird. Diese Variante scheint für die Herstellung einer Bauwerksverstärkung wenig geeignet.

6 Eigenschaften von Textilbeton

6.1 Tragverhalten Allgemein

Die mechanischen Eigenschaften von Textilbeton gleichen aufgrund ähnlicher Trag- und Versagensmechanismen weitgehend denen des Stahlbetons. Bild 36 zeigt ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm aus einem einaxialen Zugversuch. Bei diesem sog. Dehnkörperversuch wurde eine scheibenförmige Probe mit den Abmessungen von 500 mm (Länge) $\times$ 100 mm (Breite) $\times$ 8 mm (Dicke) getestet.

Das Werkstoffverhalten von Textilbeton unter Zugbeanspruchung wird in mehrere Zustände unterteilt [62]:

- **Zustand I:** Der Beton ist ungerissen und das Bauteil verhält sich näherungsweise entsprechend der Steifigkeit des Betons. Die Bewehrung trägt in diesem Zustand nur entsprechend ihrer geringen Querschnittsfläche zum Lastabtrag bei. Der Beton übernimmt den weitaus überwiegenden Teil der einwirkenden Kräfte.
- **Zustand IIa:** Mit dem Überschreiten der Betonzugfestigkeit setzt die Rissbildung im Beton ein und das Bauteil erreicht irreversibel den Zustand IIa. Die Rissbildung setzt sich fort, bis der Beton in so kurze Abschnitte unterteilt ist, dass die Verbundkräfte zwischen Bewehrung und Beton die Risslast der Matrix nicht mehr erreichen.

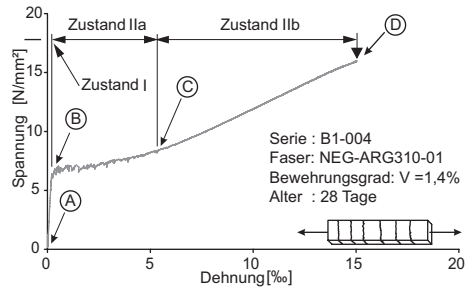


Bild 36. Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Textilbetonbauteils unter zentrischer Zugbeanspruchung (Dehnkörperversuch)

- **Zustand IIb:** Wenn keine Risse mehr entstehen können, ist der Übergang in den Zustand IIb vollzogen. Bei weiterer Belastung dehnt sich nur noch die Bewehrung, verbunden mit einer entsprechenden Vergrößerung der Rissbreiten. Theoretisch ist die Steifigkeit des Verbundwerkstoffs durch die Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen höher als die der bloßen Bewehrung. Wie noch erläutert werden wird, zeigt Textilbeton teilweise ein davon abweichendes Verhalten.
- **Bruchzustand:** Am Ende der Spannungs-Dehnungs-Linie tritt der Bruch ohne Vorankündigung ein. Textilbeton versagt spröde entsprechend den Eigenschaften der eingebauten Bewehrungsmaterialien, AR-Glas oder Carbon.

Einen Zustand III wie beim Stahlbeton gibt es bei Textilbeton mit AR-Glas und Carbon nicht, da beide Materialien kein plastisches Arbeitsvermögen besitzen.

Tabelle 11. Typische mechanische Eigenschaften des Verbundwerkstoffs Textilbeton [33]

Eigenschaft	Einheit	AR-Glas	Carbon
Bewehrungsgrad	%	1 ... 5 (10)	
Rissspannung	N/mm ²	4 ... 6	
Rissabstand	mm	2 ... 20 mm	
Druckfestigkeit	N/mm ²	50 ... 70	
Zugfestigkeit (bezogen auf Betonquerschnitt)	N/mm ²	bis 40	bis 80
Zugfestigkeit (bezogen auf Textilquerschnitt)	N/mm ²	1000 (Kurzzeit)	2500
Dauerfestigkeit	%	< 50	100
Bruchdehnung	‰	15 ... 20	10 ... 15

Textilbeton besitzt aber nicht nur ähnliche Eigenschaften wie Stahlbeton, sondern auch eine bemerkenswerte Leistungsfähigkeit (s. Tabelle 11) [55]:

- Durch die filigrane Bewehrung sind sehr dünne Bauteile herstellbar, weil für die Sicherstellung des Verbundes nur wenige Millimeter Betondeckung notwendig sind.
- Es ist keine Betondeckung für den Korrosionsschutz erforderlich.
- Die erforderlichen Verankerungslängen sind kurz, die Risse sehr fein verteilt und die Rissbreiten extrem klein, weil über die vielfach größere Oberfläche der textilen Bewehrung sehr hohe Verbundkräfte in den Beton eingeleitet werden können.
- Die hohe Zugfestigkeit des Textilbetons geht direkt auf die Fasern zurück. Im Labor übersteigt sie mit 100 N/mm^2 bereits die Betondruckfestigkeit des Feinbetons.

6.2 Verbundmechanismus

Wie bei allen Verbundwerkstoffen können die speziellen Eigenschaften von textilbewehrtem Beton auf die Verbundeigenschaften zwischen den beiden Komponenten Textil und Beton zurückgeführt werden. Bei genauer Betrachtung kann auch die sekundär beschichtete textile Bewehrung bereits als Verbund der zwei Komponenten Fasern und polymere Beschichtung angesehen werden. Eine detaillierte Darstellung der wirksamen Mechanismen findet sich bspw. in [14, 62]. Im Folgenden werden die wesentlichen und charakteristischen Merkmale beschrieben.

Bild 37 zeigt eine lichtmikroskopische Aufnahme eines Filamentgarns aus AR-Glas ohne Sekundärbeschichtung in einer Feinbetonmatrix. Die Fila-

mente liegen in einer relativ dichten Anordnung vor. Die Packungsdichte liegt in dieser Aufnahme bei ca. 60 %. Das theoretische Maximum von ca. 91 % wird bei Textilbeton nicht erreicht. Die Filamente untereinander haben nur vereinzelt und (im Querschnitt) nur punktuell Kontakt.

Bezüglich des Verbundes zur Betonmatrix können zwei Gruppen von Filamenten unterschieden werden, solche mit direktem Verbund zur Betonmatrix am Rand des Rovings (Randfasern) und solche ohne direkten Verbund zur Betonmatrix im Innern des Rovings (Kernfasern). Die Qualität der Einbindung der Randfasern ist sehr unterschiedlich. Einige Filamente sind vollständig von der Feinbetonmatrix umhüllt, einige haben dagegen nur partiellen Kontakt zur Feinbetonmatrix.

Etwas vereinfachend kann diese komplexe Verbundsituation auf folgendes Modell zurückgeführt werden: Die Filamente in einem Garnbündel werden in Rand- und Kernfasern unterschieden. Die Randfasern stehen in direktem Verbund zum Beton. Die Kernfasern stehen wiederum in direktem Verbund zu den Randfasern und haben keinen direkten Verbund zum Beton. Die übertragbaren Verbundspannungen sind an der Faser-Beton-Grenzfläche größer als an der Faser-Faser-Grenzfläche. Mit diesen wenigen Annahmen kann ein einfaches mechanisches Modell konstruiert werden, das wesentliche Merkmale des Tragverhaltens abbilden kann [78]. Auf der Basis eines solchen Modells erhält man den in Bild 38 dargestellten prinzipiellen Dehnungsverlauf für Betonmatrix, Kernfasern und Randfasern.

Aufgrund der unterschiedlichen Verbundeigenschaften werden Rand- und Kernfasern verschieden stark beansprucht. Das führt zu folgenden Effekten – wobei diese ohne Sekundärbeschichtung in erheblich geringerem Ausmaß in Erscheinung treten:

- Die Dehnungen und Spannungen in den Randfasern sind aufgrund des guten Verbundes zur Feinbetonmatrix wesentlich höher als in den schlechter angebundenen Kernfasern. Sie versagen daher eher als die Kernfasern und können das Versagen des gesamten Faserbündels einleiten. Als Folge kann die Tragfähigkeit der Filamente eines Bündels nur zu einem Teil ausgenutzt werden. Textile Bewehrungen erreichen deshalb erst mit einer Sekundärbeschichtung hohe Festigkeiten im Verbundwerkstoff und eine wirtschaftliche Ausnutzung der potenziell sehr hohen Faserfestigkeiten.
- Die schlechten Verbundeigenschaften der inneren Filamente führen zu großen Lasteinleitungslängen. Das ist nachteilig für die praktische Anwendung, denn dort werden kurze Lasteinleitungslängen bevorzugt.

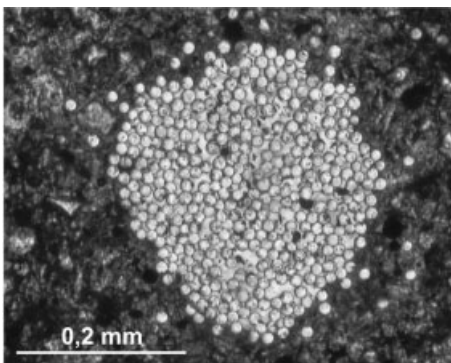


Bild 37. Mikroskopische Aufnahme eines Querschnitts durch ein AR-Glas-Filamentgarn mit 400 Filamenten in einer Feinbetonmatrix

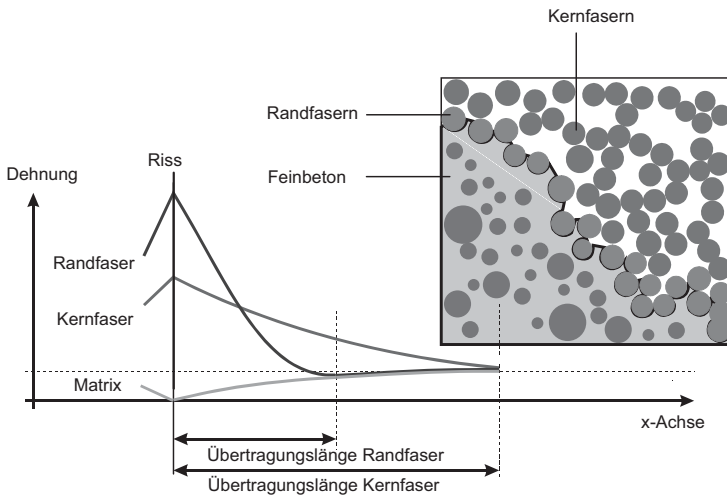


Bild 38. Prinzipieller Dehnungsverlauf in Kern- und Randfasern mit einem vereinfachten mechanischen Modell (nach [78])

- Mit zunehmender Faserfeinheit – also steigender tex-Zahl – verschlechtert sich die Festigkeit der textilen Bewehrungen im Verbundwerkstoff. Gleichzeitig wachsen die Lasteinleitungslängen an. Ursache ist der steigende Kernfaseranteil mit seinen schlechten Verbundeigenschaften, denn mit zunehmender Feinheit wächst die Querschnittsfläche des Garns quadratisch, während der Umfang nur linear zunimmt. Damit steht, bezogen auf die Querschnittsfläche, bei dickeren Fasern weniger Oberfläche für den Verbund zum Beton zur Verfügung und die Kernfasern werden immer schlechter an die Matrix angebunden.

Die für praktische Anwendungen interessanten, stärkeren Rovings (1000 tex und mehr) lassen sich dadurch wesentlich weniger effizient nutzen als dünne Rovings. Bei Letzteren ist aber der praktisch realisierbare Fasergehalt technologisch beschränkt, sodass die absolut erreichbare Tragfähigkeit mit dünneren Rovings prinzipiell niedriger ist.

Beim Einsatz einer Sekundärbeschichtung lassen sich die Verbundeigenschaften zwischen den Filamenten und zwischen den Fasern und der Betonmatrix gezielt beeinflussen und damit auch Festigkeit, Verbundverhalten und Handhabung der textilen Struktur. Die verschiedenen Eigenschaften stellen jedoch unterschiedliche und oft gegenläufige Anforderungen an eine Beschichtung.

Ein Beispiel für derartige ambivalente Zielgrößen sind Stabilität und Festigkeit auf der einen, Flexi-

bilität und Drapierfähigkeit auf der anderen Seite. Eine für die praktische Handhabung ausreichend formstabile und verschiebefeste Struktur erfordert sehr steife Verbindungen in den Kreuzungspunkten der Garne und einen steifen Verbund innerhalb der Garne. Auch hinsichtlich der Festigkeit ist eine steife Imprägnierung sinnvoll, um alle Filamente eines Garns gleichmäßig zu aktivieren. Dem steht gegenüber, dass die Strukturen auf Rollen mit handlichen Abmessungen geliefert werden sollten und dafür eine ausreichende Flexibilität benötigen. Ebenso muss das Gelege je nach Verstärkungsaufgabe auch relativ kleinen Biegegradienten folgen können, wobei es nur durch die Konsistenz des Feinbetons in seiner Lage gehalten werden kann. Da Betontragwerke selten perfekt ebene Oberflächen besitzen, ist auch eine gewisse Drapierfähigkeit wünschenswert. Diese Aspekte führen zu genau gegenläufigen Anforderungen an die Beschichtung.

Die theoretisch maximale Festigkeit kann erreicht werden, wenn es gelingt, alle Filamente gleichmäßig zu aktivieren (Bild 39). Das würde die vollständige Imprägnierung mit einem steifen Polymer erfordern, wie beispielsweise mit Epoxidharzen, die auch bei geklebten Lamellen aus Carbonfasern eingesetzt werden. Dadurch würde allerdings der für die gute Verarbeitbarkeit gewünschte und notwendige textile Charakter verloren gehen. Die Hauptaufgabe bei der Entwicklung einer Sekundärbeschichtung ist also, den für die jeweilige Anwendung besten Kompromiss zu finden.

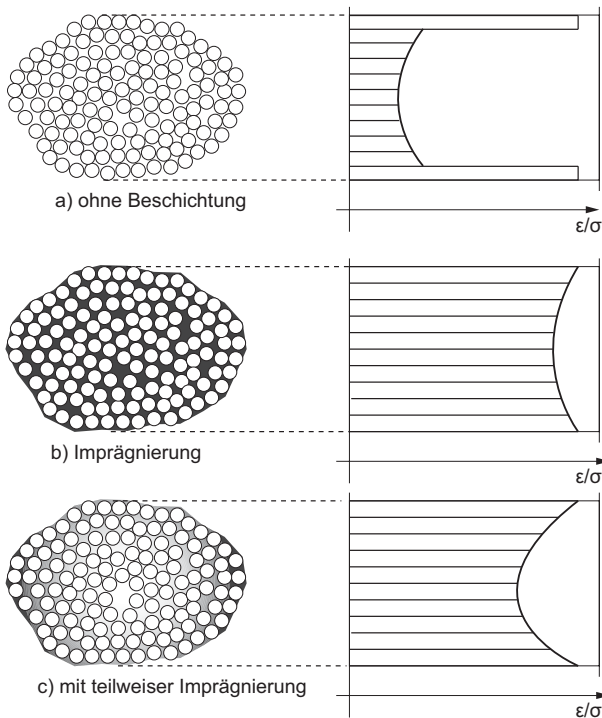


Bild 39. Dehnungsverteilung der Filamente eines Garns in Abhängigkeit der Homogenität und Steifigkeit der Sekundärbeschichtung

6.3 Festigkeit und Bruchdehnung

Für die Anwendung und Bemessung von Verstärkungen aus Textilbeton sind Festigkeit und Bruchdehnung die wichtigsten Materialkennwerte. Da die Verstärkungen aus Textilbeton zur Erhöhung der Tragfähigkeit der Zugzone eingesetzt werden, ist die Druckfestigkeit des Materials, die weitgehend der Betondruckfestigkeit entspricht, von untergeordnetem Interesse. Zugfestigkeit und Zugbruchdehnung hängen offensichtlich direkt vom eingesetzten *Fasermaterial* ab. Filamente aus AR-Glas und Carbon erreichen unterschiedliche Bruchspannungen und Bruchdehnungen. Die Festigkeiten der Carbonfasern sind deutlich höher als die der Glasfasern (s. Tabelle 5 bzw. 8). Daneben gibt es aber noch weitere Einflussfaktoren auf die Festigkeit. Die gemessene Festigkeit der Filamente aus AR-Glas und Carbon ist grundsätzlich von der Größe der beanspruchten Filamentlänge abhängig. Sie sinkt mit zunehmender Länge. Die Festigkeiten der einzelnen Filamente eines Bündels variieren und können in der Regel mit einer Weibull-Verteilung beschrieben werden [1].

Filamentgarne sind Bündel aus zahlreichen Einzelfasern und haben als solche einen sehr spezifischen Versagensmechanismus. Bei Belastung eines Bündels von Fasern identischer Länge versagt zuerst die Faser mit der niedrigsten Festigkeit. Die frei werdende Kraft muss auf die verbleibenden Fasern umgelagert werden. Bei weiter steigender Belastung versagen die nächsten Filamente, es müssen weitere Lastumlagerungen stattfinden. Wenn bei weiteren Umlagerungen eine Kettenreaktion in Gang gesetzt wird, d.h. wenn die Lastumlagerung aus Filamentversagen direkt wieder zum Versagen weiterer Filamente führt usw., wird ein lawinenartiges Filamentversagen in Gang gesetzt. Das Faserbündel versagt kollapsartig.

Besteht kein Verbund zwischen den Filamenten, findet die Umlagerung nach jedem Bruchereignis global statt. Können zwischen den Filamenten durch Verbund Kräfte übertragen werden, sind die Umlagerungen auf einen lokalen Bereich konzentriert. Zum Studium dieses Verhaltens wurden bereits frühzeitig Faserbündelmodelle entwickelt,

z. B. [38, 90], und später für Textilbeton modifiziert, z. B. [36, 108]. Trotz aller Fortschritte für das Verständnis von Versagensvorgängen ist es bisher noch nicht gelungen, ausgehend von den Eigenschaften der Filamente die Festigkeit von Textilbeton zu prognostizieren.

Bei den im Beton eingebetteten Filamentgarnen wird, wie im vorhergehenden Abschnitt stark vereinfacht dargestellt, durch die über den Beton in Längsrichtung in die Garne eingeleitete Kraft ein ungleichförmiger, über die Garnlänge veränderlicher Dehnungszustand aufgeprägt. Bild 37 zeigte bereits, dass die Beschreibung mit einem regelmäßigen System der tatsächlichen Anordnung der Filamente und ihrer Kontakte zu benachbarten Filamenten und zur umgebenden Matrix nicht gerecht werden kann. Die Festigkeitsermittlung an den filigranen Filamenten wirft eigene Probleme auf [1]. Für die messtechnische Erfassung der Faseranordnung im Querschnitt wurden Werkzeuge entwickelt [65]. Aber für die messtechnische Erfassung der Verbundparameter einzelner Filamente gibt es bisher keine geeignete Möglichkeit. Aufgrund dieser Schwierigkeiten bei der Ermittlung der Modellparameter wird es in absehbarer Zeit keine realitätsnahe Prognose des Festigkeitsverhaltens von Textilbeton auf der Basis der Festigkeiten der Filamente geben können. Die Durchführung von einfachen Standardversuchen zur Bestimmung der bemessungsrelevanten Festigkeiten bietet einen möglichen Ausweg.

Neben dem komplexen Versagensmechanismus sind weitere, unterschiedlich stark ausgeprägte Abhängigkeiten hinsichtlich der nutzbaren Festigkeit zu beachten, z. B.:

- *Garnsorte:* Unterschiedliche Garnsorten unterscheiden sich auch bei gleichem Fasermaterial in ihren Eigenschaften. Sie haben unterschiedliche Schichten, wodurch die Spannungs- und Dehnungsverteilung in den Rovings und damit die Garnfestigkeit beeinflusst werden. Bei Glasfasern werden höhere Feinheiten (größere tex-Zahlen) meist mit größeren Filamentdurchmessern produziert. Prinzipiell sinkt aber die Filamentfestigkeit mit zunehmendem Durchmesser [1].
- *Anzahl der Filamente:* Aufgrund des indirekten Lastetrags in die innen liegenden Filamente (Kernfasern) erreichen Garne mit zunehmender Filamentanzahl bei sonst unveränderten Bedingungen prinzipiell niedrigere Festigkeiten, weil die Dehnungsunterschiede zwischen Randfasern und Kernfasern zunehmen.
- *Parameter der textilen Verarbeitung:* Zahlreiche Parameter der Textilmaschine, z. B. Ausbildung der Umlenkstellen in der Fadenführung, Bindungstyp, Nähfaden oder Fadenspannung, beeinflussen die Schädigung der Filamente

während der Herstellung und die Eigenschaften der textilen Bewehrungen, insbesondere die Verbundeigenschaften der Filamente in den Garnbündeln, und damit auch deren Festigkeit.

- *Typ und Qualität der Sekundärbeschichtung:* Die mechanischen Eigenschaften der ausgehärteten Beschichtung und deren Verteilung in den Garnbündeln und an der Garnoberfläche beeinflussen direkt und in großem Maß die Verbundeigenschaften und die Festigkeit.
- *Belastungsgeschwindigkeit bzw. Art und Dauer der Belastung:* Diese Art der Belastung wird auch allgemein als Belastungs-Zeit-Funktion (BZF) beschrieben. Die Festigkeit von Carbonfasern ist weitgehend unabhängig von der BZF. Die Festigkeit der Glasfasern ist aufgrund des bereits erläuterten unterkritischen Risswachstums (s. Abschn. 2.4.2) stark von der BZF abhängig. Die für die Sekundärbeschichtungen verwendeten Polymere neigen abhängig von Höhe und Dauer der Belastung zum Kriechen. Dadurch können unter Dauerlast Lastumlagerungen in den Garnbündeln stattfinden und die Festigkeit des Verbundwerkstoffs beeinflussen¹³⁾.
- *Alter des Textilbetons:* Beton ist bekanntlich als Material zeitlichen Veränderungen seiner Eigenschaften unterworfen. Die Hydratation ist nicht nach wenigen Tagen abgeschlossen, sondern findet über einen langen Zeitraum statt. Begleitend kommt es auch zu Gefügeum- und -neubildungen im Beton. Die damit einhergehenden Änderungen der Verbundeigenschaften an der Faser-Beton-Grenzfläche können zu signifikanten Änderungen des Bruchverhaltens führen. Der folgende Abschnitt geht auf die Mechanismen im Zusammenhang mit der Dauerhaftigkeit genauer ein.
- *Umgebungsbedingungen:* Das unterkritische Risswachstum, Gefügeveränderungen im Beton oder die Eigenschaften der polymeren Beschichtungsmaterialien sind von den Umgebungsbedingungen abhängig und beeinflussen damit ebenfalls die Festigkeit.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Versagensmechanismus von Textilbeton eine gewisse Komplexität besitzt, da das Verhalten der beteiligten Komponenten (Fasern, Beton, Beschichtung, Verbund in den Grenzschichten) von

¹³⁾ Diese Umlagerungen können sowohl zu einer Entlastung hoch belasteter Filamente und Belastung von bis dahin niedriger belasteten Filamenten führen als auch zum umgekehrten Effekt, je nachdem, in welchen Grenzschichten zeitabhängige Verformungen unter Belastung stattfinden.

einer erstaunlichen Anzahl an Einflussgrößen abhängig ist, und dass eine Prognose der Festigkeit aus den Eigenschaften der einzelnen Filamente derzeit nicht gelingen kann. Letzteres gilt quasi im gleichen Maße für die Prognose der Verbundwerkstofffestigkeit aus den Garneigenschaften.

Aufgrund des erläuterten Versagensmechanismus und der maßgebenden Einflussgrößen kann geschlossen werden, dass für die Ermittlung bemessungsrelevanter Kennwerte experimentelle Untersuchungen am Verbundwerkstoff die effizienteste Lösung darstellen. In besonderen Fällen müssen bei diesen Tests auch die im Bauwerk wirkenden Umgebungsbedingungen berücksichtigt werden, z. B. stark erhöhte Temperatur, ständige Durchfeuchtung. Für die Ermittlung der bemessungsrelevanten Zugfestigkeit der textilen Bewehrung werden daher einfache Standardversuche am Verbundwerkstoff mithilfe von Dehnkörpern empfohlen [63].

6.4 Dauerhaftigkeit und Alterung

Für die Verstärkung von Stahlbetonbauwerken sind ausreichende Kenntnisse zum Langzeitverhalten der aufgetragten Textilbetonschichten erforderlich. Die Verstärkungen sollen schließlich während der verbleibenden planerischen Lebensdauer – was im Regelfall mehrere Jahrzehnte sein werden – die Tragsicherheit der verstärkten Konstruktion sicherstellen.

Ob das hohe Leistungsvermögen des textilbewehrten Betons für die gesamte Lebensdauer der Verstärkungs konstruktion zur Verfügung steht, wird wesentlich durch folgende Faktoren bestimmt:

- Die *Beständigkeit des Fasermaterials* im alkalischen Milieu. Dabei sind die Korrosionsbeständigkeit des Fasermaterials selbst sowie die Beständigkeit und Schutzwirkung von auf der Filamentoberfläche aufgetragenen Schichten und Sekundärbeschichtungen der textilen Bewehrung zu berücksichtigen.
- Die *Beständigkeit des Feinbetons* (Matrix) gegenüber Umwelteinflüssen.
- Die dauerhafte *Leistungsfähigkeit der Verbundzone* zwischen Feinbeton und Multifilamentgarn mit oder ohne Sekundärbeschichtung der Textilien.

Die korrosive Auflösung des Glaskörpers wird bei diesen AR-Gläsern nicht vollständig verhindert, sondern durch die zirkonhaltigen Diffusionsbarrieren an den Faseroberflächen nur stark verzögert. Carbonfasern hingegen sind im alkalischen Milieu beständig [77]. Die bei der Herstellung der Glasfasern aufgetragene Schlichte schützt den Glaskörper. Sie beeinflusst die Dauerhaftigkeit bei chemischen Angriffen und bestimmt die

chemische Oberflächenreaktion der Filamente. Bei Carbonfasern soll die Schlichte vor allem die Verbundcharakteristik zwischen Faser und Matrix beeinflussen.

Zur Beurteilung der Alkalibeständigkeit von AR-Glasfasern kann der Verlauf der Korrosion der Fasern in zeitraffenden Verfahren durch die Einlagerung in alkalische Lösungen nachgestellt werden. Durch die freie Umspülung der Fasern mit dem Korrosionsmedium (z. B. abfiltrierte Zementschlämme als nachgestellte Porenlösung) und die Lagerung bei erhöhten Temperaturen können schon nach kurzer Zeit korrosive Schädigungen sichtbar gemacht werden, die unter realen Bedingungen im Bauteil, bei denen die Migration der Reaktionspartner für die Korrosion stark behindert wird und die Temperaturen geringer sind, erst nach vielen Jahren oder Jahrzehnten auftreten würden [37, 47, 81].

Mit derartigen Untersuchungen kann z. B. auch die Schutzwirkung der Schlichte auf den Filamentoberflächen von AR-Glasfasern bewertet bzw. nachgewiesen werden. In Bild 40 ist die elektronenmikroskopische Aufnahme einer AR-Glasfaser zu sehen, die *ohne* eine schützende Schlichte in nachgestellter Porenlösung von pH 13 bei 80 °C gelagert wurde. Nach 28 Tagen Einlagerungsdauer sind massive Korrosionsdefekte vorzufinden, die zu einem nahezu vollständigen Verlust der Faserfestigkeit führen. In Bild 41 ist eine Faser abgebildet, die *mit* schützender Schlichte bei gleichen Bedingungen gelagert wurde. Hier sind noch keine korrosiven Oberflächenveränderungen sichtbar.

Methoden der beschleunigten Alterung werden auch eingesetzt, um in angemessenen Zeiträumen (Tage, Wochen, Monate) eine Prognose hinsichtlich der Alterung textilbewehrter Betone bei

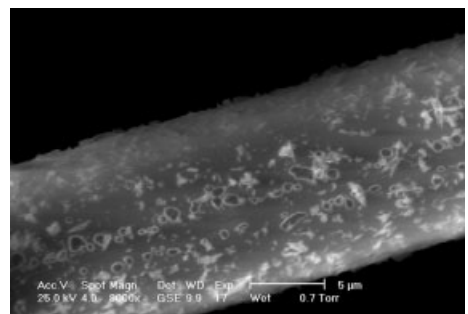


Bild 40. AR-Glasfilament ohne Schlichte nach 28-tägiger Lagerung in nachgestellter Porenlösung (pH 13) bei 80 °C, sichtbare Glaskörperkorrosion [56]

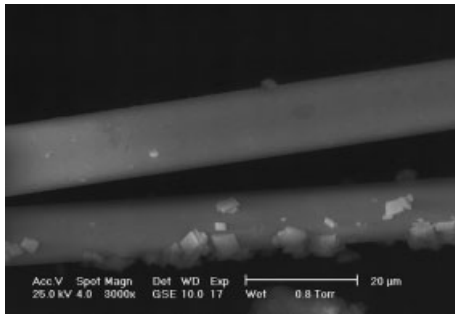


Bild 41. AR-Glasfilament mit Schlichte nach 28-tägiger Lagerung in nachgestellter Porenlösung (pH 13) bei 80 °C, ohne Schäden [56]

praxisrelevanten Expositionen und Zeiträumen (Jahre, Jahrzehnte) zu ermöglichen. Dazu muss sichergestellt werden, dass die ablaufenden Hydrationsprozesse ausreichend Bezug zu den unter natürlicher Alterung ablaufenden Prozessen aufweisen. Ist das nicht der Fall, besteht die Gefahr der Fehleinschätzung des Materialverhaltens.

Eine mögliche Art der beschleunigten Alterung ist die Lagerung der Textilbetonproben bei 40 °C und 99 % rel. Feuchte. Bei diesen Temperaturen werden die Hydrationsvorgänge beschleunigt, ohne dass sich die Gestalt und Zusammensetzung der gebildeten Phasen deutlich von der Morphologie der Hydrationsprodukte unterscheidet, die bei natürlicher Alterung des Werkstoffs entstehen. Zudem stellt diese Lagerung eine extrem ungünstige Exposition für Glasfasermaterialien dar, da sie optimale Bedingungen für die Beschleunigung der Glaskorrosion bietet. Witterungseinflüsse wie wechselnde Temperatur und Feuchtigkeit können so allerdings nicht abgebildet werden [20].

Mit einer derartigen beschleunigten Alterung wurden beispielsweise Textilbetone mit verschiedener Feinbetonzusammensetzung und unterschiedlicher textiler Bewehrung untersucht. Bei der Verwendung von Textilien aus AR-Glas wurde bei einer Bindemittelzusammensetzung aus CEM III, Flugasche und Mikrosilika (vgl. Mischung M1 in Tabelle 9) nach einjähriger Einlagerung nur eine geringe Abnahme des Leistungsvermögens festgestellt (vgl. Bild 42). Die einjährige Einlagerung kann einer realen Exposition von 35 bis 40 Jahren im mitteleuropäischen Klima gleichgesetzt werden (ohne Berücksichtigung von Befeuchtung und Trocknung!). Wird statt eines CEM III ein CEM I verwendet, sind die Einbußen im Leistungsvermögen viel deutlicher ausgeprägt. Eine sichtbare Glaskorrosion konnte in beiden Fällen nicht festgestellt werden. Im Gegensatz dazu

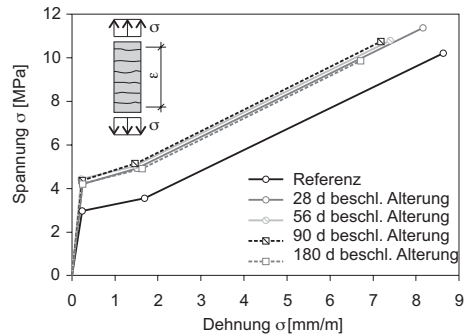


Bild 42. Spannungs-Dehnungs-Kurven für Dehnkörper aus Matrix M1; beschleunigte Alterung bei 40 °C/99 % relative Feuchte und Referenz bei 20 °C und 65 % relativer Feuchte [23]

wurde beim Einsatz von Bewehrungen aus Carbonfasern in den gleichen Feinbetonen mit zunehmendem Alter jeweils ein geringfügig steigendes Leistungsvermögen festgestellt [23].

REM-Untersuchungen haben gezeigt, dass auch die Zusammensetzung und Gestalt der Hydrationsprodukte in der Kontaktzone wesentlich das Leistungsvermögen beeinflussen. Mit fortschreitender Hydrationsdauer werden die Fasern in der Kontaktzone zunehmend von Hydrationsprodukten umhüllt. In Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung wird das Gefüge von feingliedrigen, homogenen, zu guten Verbundeigenschaften führenden Calciumsilikat-Hydraten (CSH-Phasen, Bild 43) oder wesentlich größeren, spaltbaren, die Verbundfestigkeit mindernden Calciumhydroxiden (CH-Phasen, Bild 44) dominiert.

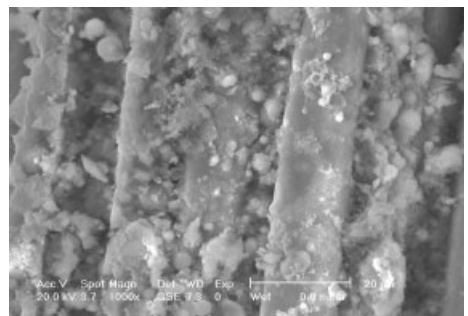


Bild 43. CSH-Phasen an AR-Glasfasern in einer mit Puzzolanen abgepufferter Matrix mit geringem Portlandzementanteil nach 360 Tagen beschleunigter Alterung bei 40 °C und 99 % rel. Feuchte [22]

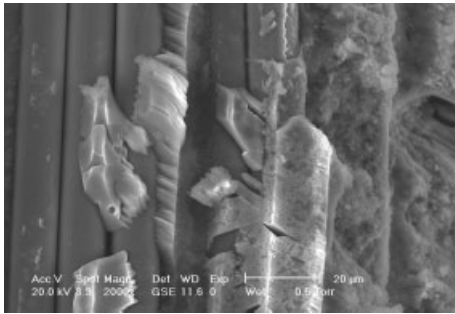


Bild 44. CH-Phasen an AR-Glasfasern in einer reinen Portlandzementmatrix nach 360 Tagen beschleunigter Alterung bei 40 °C und 99 % rel. Feuchte [22]

CSH-Phasen entstehen bei der Hydratation des Portlandzementklinkers und sind die hauptsächlich festigkeitsbildenden Hydratationsprodukte im Beton. Zugleich entsteht bei der Hydratation als weiteres Produkt Calciumhydroxid (CH-Phase), welches hauptsächlich die Alkalität der Zementsteinmatrix bewirkt. Werden dem Bindemittel Puzzolane zugegeben (z. B. Flugasche, Mikrosilika), wird ein Teil des CH abgebaut und in CSH-Phasen umgewandelt.

Mit steigendem CH-Bildungspotenzial der Feinbetone (d. h. zunehmendem Gehalt an Portlandzementklinker und abnehmendem Puzzolananteil) ist mit fortschreitendem Alter eine verstärkte Ausscheidung von CH-Phasen zwischen den Filamenten zu verzeichnen (Bild 44). Zudem werden die einzelnen Fasern zunehmend von starren, unnachgiebigen Kristallstrukturen umhüllt, die eine Relativverschiebung der Einzelfasern gegenüber dem Beton verhindern. In der Folge geht das Verformungsvermögen des gesamten Verbundwerkstoffs mit fortschreitendem Alter zurück, der Textilbeton versprödet. Dominieren dagegen über die gesamte Lebensdauer CSH-Phasen die Kontaktzonen (Bild 43), bleibt die Verschieblichkeit der Filamente erhalten und es sind kaum Veränderungen im mechanischen Verhalten des Textilbetons festzustellen [21]. Eine ausführliche Diskussion der stattfindenden Mechanismen findet sich in [20] und [79].

Die Gestalt der Hydratationsprodukte in der Kontaktzone wird allerdings nicht nur von der Zusammensetzung des Feinbetons bestimmt, sondern auch von den Oberflächeneigenschaften der Bewehrungsfasern, die i. Allg. durch die Schlichte festgelegt sind. Je nach deren Abstimmung können sich durchaus verschiedene Phasenbestände bei gleicher Betonzusammensetzung entwickeln und dementsprechend ein unterschiedliches Materialverhalten mit zunehmendem Alter einstellen.

Ein eindrucksvolles Beispiel für einen derartigen Schlichte-Einfluss zeigt Bild 45. Bei dieser Probe wurden Carbonbewehrungen in eine Matrix mit hohem CH-Aufkommen eingebettet. Das Bindemittel bestand ausschließlich aus Portlandzement (CEM I). Entgegen den Erwartungen wurden bei diesem Verbundmaterial in der Kontaktzone keine CH-Phasen ausgeschieden, sondern alle Filamentoberflächen und -zwischenräume waren nahezu frei von CH und stattdessen von CSH-Phasen besiedelt. Massive Abscheidungen von CH-Phasen waren nur im äußersten Rand der Filamentgarne und in allen Poren des Betons festzustellen. Dementsprechend zeigten die Carbonfasern über den gesamten Untersuchungszeitraum der beschleunigten Alterung, der auch hier einer realen Lebensdauer von 35 bis 40 Jahren im mitteleuropäischen Klima entsprach, ein unverändert hohes Leistungsvermögen.

Die hauptsächlich zur Strukturstabilisierung und Steuerung des Verbundes zwischen den Filamenten eingesetzten Sekundärbeschichtungen verbessern einerseits die Widerstandsfähigkeit der AR-Glasfasern gegenüber dem alkalischen Milieu der Matrix und können ebenso die Ausbildung der Verbundzone zwischen der textilen Bewehrung und der Matrix günstig beeinflussen. Allerdings unterliegen auch die Beschichtungsmaterialien spezifischen Alterungsprozessen, die in Abhängigkeit von den Expositionsbedingungen des Bauteils und der Feinbetonzusammensetzung unterschiedlich ablaufen [93].

Für eine umfassende Betrachtung der Dauerhaftigkeit textilbewehrter Betone ist neben dem Korrosionsverhalten der Bewehrung und Veränderungen im Verbund zwischen Bewehrung und Feinbeton auch die Beständigkeit des Feinbetons gegenüber den am Bauwerk vorliegenden Exposi-

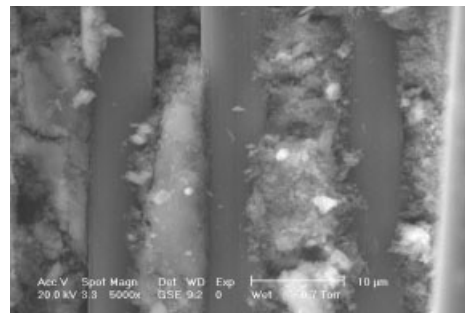


Bild 45. Carbonfaserfilamente in Portlandzementmatrix nach 360 Tagen beschleunigter Alterung bei 40 °C/99 % r. F. „weiche“ Einbettung der Filamente durch filigrane, feingliedrige Hydratationsprodukte [21]

tionen nachzuweisen. Dazu können die Feinbetone entsprechend der eingeführten Regelungen und nach dem Stand des Wissens für Betone bewertet werden.

Feinbetone, bei denen der Portlandzementklinkeranteil durch den Einsatz eines CEM III B substanziiell reduziert wurde, zeigen bspw. eine ungenügende Frost- und Frost-Tausalz-Beständigkeit. Ursache ist die Entstehung metastabiler Karbonatisierungsprodukte, die bei Frost-Tausalz-Belastung zerfallen und eine schnelle Abwitterung der karbonatisierten Randbereiche des Feinbetons ermöglichen [104]. Für eine hinreichende Frost- und Frost-Tausalz-Beständigkeit des Feinbetons ist demnach auf einen hinreichenden Portlandzementklinkergehalt im Bindemittel zu achten, der die Ausbildung stabiler Karbonatisierungsprodukte ermöglicht. Die Steigerung des Portlandzementklinkergehalts zur Sicherstellung der Frost- und Frost-Tausalz-Beständigkeit steht allerdings bei Verwendung von AR-Glasfasern im Widerspruch zu den oben genannten Anforderungen an die Matrix.

6.5 Dauerstandfestigkeit

Die Dauerstandfestigkeit beschreibt die unter einer konstanten Last über lange Zeiträume dauernd erreichte Festigkeit, i. d. R. also während der planerischen Lebensdauer der Baukonstruktion.

Bei den meisten Materialien liegt die in üblichen Laborversuchen (Kurzzeitversuchen) erreichte Festigkeit über der Dauerstandfestigkeit. Bei Bewehrung aus Baustahl ist der Unterschied so gering, dass er bei der praktischen Bemessung vernachlässigt werden kann. Bei Beton wird die Langzeitwirkung nach DIN 1045-1:2008-08, Abschnitt 9.1.6 (gemeinsam mit der Berücksichtigung der Prüfkörperform) durch den Beiwert $\alpha = 0,85$ berücksichtigt.

Bei Gläsern ist der Unterschied zwischen der Kurzzeitfestigkeit und der Dauerstandfestigkeit besonders stark ausgeprägt. Wie bereits beschrieben, wird das Versagen eines Glasbauteils durch das Wachstum mikroskopisch kleiner Risse eingeleitet. Wichtig ist vor allem das unterkritische Risswachstum (s. Abschn. 2.4.2) über einen längeren Zeitraum. Deshalb wird als Orientierungswert für Bewehrungen aus AR-Glas eine Dauerstandfestigkeit von höchstens 50 % der Kurzzeitfestigkeit angegeben [60]. Für Textilbeton mit AR-Glasfasern liegen bisher aufgrund experimenteller Schwierigkeiten bei der Nachweisführung noch keine verlässlichen Aussagen zur Dauerstandfestigkeit vor [87].

Bei Carbonfasern ist faktisch kein Unterschied zwischen Dauerstandfestigkeit und Kurzzeitfestigkeit feststellbar [3]. Der Unterschied zwischen

Kurzzeitfestigkeit und Dauerstandfestigkeit darf vereinfachend vernachlässigt werden.

6.6 Zeit- und Dauerschwingfestigkeit

Zum Verhalten von Textilbeton unter nicht ruhender Belastung liegen bisher keine aussagekräftigen Ergebnisse vor. Bei Verwendung von Carbonfasern kann erwartet werden, dass bezüglich der Festigkeit die exzellenten Ermüdungseigenschaften der Faser auch im Verbundwerkstoff weitgehend ausnutzbar sein werden. Beim Verformungsverhalten spielt das Verbundverhalten zwischen der textilen Bewehrung und dem Beton eine entscheidende Rolle. Untersuchungen hierzu sind den Autoren nicht bekannt.

Glasfasern sind hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit den Carbonfasern unterlegen. Es ist davon auszugehen, dass sich die auf dem unterkritischen Risswachstum beruhende Abhängigkeit der Festigkeit von der Belastungs-Zeit-Funktion unter nicht ruhender Belastung verstärkt. AR-Glas kann für die Anwendung bei vorwiegend nicht ruhender Beanspruchung derzeit nicht empfohlen werden.

6.7 Brandwiderstand

Bisher liegen nur sehr wenige Untersuchungen zum Brandverhalten von Textilbeton vor. Bei allseitiger Beflammung 8 mm dünner Proben nach der Einheitstemperaturkurve (ETK) beträgt die Dauer bis zum Versagen nur wenige Minuten [43]. Es tritt durch Zugversagen der textilen Bewehrung ein und wird durch massive Betonabplatzungen begleitet. Bei nur teilweiser Beflammung des Zuggurtes profilierter Träger wurden erheblich längere Zeiten bis zum Versagen gemessen. Bei textiler Bewehrung aus AR-Glas trat das Versagen nach 44 Minuten ein, bei Carbonfasern nach 75 Minuten. Die Bauteile konnten in die Brandwiderstandsklasse F 30 bzw. F 60 eingestuft werden [69]. Die verwendeten Sekundärbeschichtungen der textilen Bewehrungen verlieren ab etwa 100 °C an Wirksamkeit, beginnen deutlich unter 200 °C zu schmelzen und können dadurch auch außerhalb des direkt beflamten Bereiches ein Verbundversagen provozieren.

Der Brandwiderstand von Textilbeton hängt maßgeblich von der Temperatur im Bauteil bzw. der Temperatur der tragenden textilen Bewehrung ab. Glasfasern und Carbonfasern zeigen bereits ab 400 °C deutliche Festigkeitseinbußen [115]. Die typischen Abmessungen von Textilbetonbauteilen führen zu einer schnellen Erwärmung. Die bindemittelreichen, dichten Feinbetone neigen dadurch verstärkt zu Abplatzungen. Danach ist die Bewehrung direkt den Flammen ausgesetzt. Dünnwandige Bauteile aus Textilbeton besitzen daher nur einen begrenzten Brandwiderstand.

Im Abschnitt 7.3.6 werden Branduntersuchungen an mit Textilbeton verstärkten Bauteilen vorgestellt. Sie bestätigen diese Zusammenhänge, indem für verstärkte Querschnitte aufgrund des massebedingten langsameren Temperaturanstiegs Brandwiderstandsdauern von 90 Minuten erreicht wurden [44].

6.8 Zusammenfassung

Das Tragverhalten von Textilbeton ist im Wesentlichen mit dem von Stahlbeton vergleichbar. Die nichtlinearen Kraft-Verformungs-Eigenschaften hängen primär von der Rissbildung ab. Bei Verwendung von AR-Glas und Carbon kann kein Zustand III festgestellt werden, weil diese Bewehrungsmaterialien kein plastisches Arbeitsvermögen besitzen und spröde versagen. Die spezifischen Materialeigenschaften der einzelnen Komponenten und der Aufbau der Bewehrung aus Faserbündeln bedingen einen sehr komplexen Trag- und Versagensmechanismus. Textilbeton erreicht sehr hohe Zugfestigkeiten, zeigt im Vergleich zu Stahlbeton eine extrem feine Rissverteilung und eignet sich deshalb potenziell für die Tragwerksverstärkung.

Besondere Beachtung gilt der Zusammensetzung der Feinbetonmatrix, denn von den an den Interphasen zwischen Beton und Fasern entstehenden Hydratationsprodukten hängt die dauerhafte hohe Leistungsfähigkeit des Verbundwerkstoffs ab. Für AR-Glas eignen sich aufgrund eingeschränkter Dauerhaftigkeit im alkalischen Milieu nur portlandklinkerarme Rezepturen, bei denen die hohe Alkalität mit geeigneten Puzzolanen abgepuffert wird. Bei Carbonfasern besteht auch die Möglichkeit, Feinbetonrezepturen mit hohem Portlandklinkeranteil im Zement einzusetzen, ohne dass langfristig ein Rückgang des Leistungsvermögens auftritt.

Carbon behält auch unter Ermüdungsbelastung dauerhaft seine extrem hohe Festigkeit. Bei Glas besteht eine starke Abhängigkeit von der Belastungs-Zeit-Funktion. Unter Ermüdungsbelastung und hohem Dauerlastanteil sind AR-Glasfasern nur bedingt als Bewehrung für Textilbeton geeignet.

Immer wieder treten Nachfragen zu möglichen Gesundheitsgefährdungen bei der Herstellung auf. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) hat Grenzwerte zu einatembaren Fasern und Bruchstücken dieser Fasern festgelegt. Man geht davon aus, dass Fasern oder Bruchstücke von Fasern mit einem Durchmesser $< 3 \mu\text{m}$ mit einem Verhältnis von Länge : Durchmesser $< 3 : 1$ in Lungenbläschen eindringen können und dort möglicherweise Krebs auslösen können. Alle vorgestellten Fasern besitzen Filamentdurchmesser, die weit oberhalb dieses Wertes liegen, sodass die von der WHO definierten Grenzwerte eingehalten sind.

7 Verstärkungen aus Textilbeton

7.1 Allgemeines

Die Eignung von Textilbeton zur Verstärkung von Stahlbetonbauteilen ist durch zahlreiche Versuche für folgende Arten der Verstärkung belegt:

- *Verstärkung der Biegezugzone* bei Platten und Balken zur Erhöhung der Biegetragfähigkeit,
- *Verstärkung der Querkraftbewehrung* am Steg zur Erhöhung der Querkrafttragfähigkeit bei Balken und Plattenbalken,
- *Umschnürung* von runden und eckigen Stützen zur Erhöhung der Normalkrafttragfähigkeit und
- *Verstärkung zur Erhöhung der Torsionstragfähigkeit* von runden und eckigen Bauteilen.

In allen Fällen wurden bewehrte Stahlbetonbauteile mit einer ein- bis maximal 8-lagigen textilen Bewehrung ausgeführt. Neben der Erhöhung der Tragfähigkeit kommt es zu einer teilweise deutlichen Reduzierung der Verformungen im Gebrauchszustand und einer sehr feinen Rissbildung in den verstärkten Bereichen.

Bei den meisten Verstärkungsaufgaben tritt das Problem auf, dass die Auflagerbereiche nicht oder nur beschränkt zugänglich sind. Die Verstärkung ist auf den Bereich der lichten Stützweite begrenzt, hat also in den meisten Fällen kein eigenes Auflager und muss am Stahlbetonbauteil verankert werden. Die sichere Verankerung der Verstärkungsschicht bzw. die Krafteinleitung über die Grenzfläche zwischen Bauteil und Verstärkung ist Voraussetzung für eine wirksame Bauteilverstärkung.

Die Anwendung in der Baupraxis ist neben dem Nachweis der Wirksamkeit auch an die Verfügbarkeit von geeigneten Bemessungsmodellen gebunden, wobei sich aus praktischer Sicht die Eignung neben einer guten Übereinstimmung von rechnerischer Prognose und tatsächlich erzielbarer Wirkung vor allem durch eine einfache Handhabung bemisst. In den Sonderforschungsbereichen wurden auf verschiedenen Betrachtungsebenen (Mikro-, Meso- und Makroebene) leistungsfähige Simulationswerkzeuge entwickelt, erfüllen jedoch das Kriterium der Handhabbarkeit in der Praxis nur eingeschränkt. In diesem Beitrag wird der Fokus daher auf Ingenieurmodelle gerichtet, soweit diese für die verschiedenen Verstärkungsarten bereits verfügbar sind und ausreichend an experimentellen Daten kalibriert bzw. verifiziert werden konnten.

Ingenieurmodelle haben im Stahlbetonbau eine lange Tradition. Die Biege- und die Querkraftbemessung in der aktuellen DIN 1045-1 sind zwei gute Beispiele für die Bandbreite an möglichen Lösungen. Während bei der Biegebemessung die

formale Lösung der Bemessungsaufgabe aus einem klaren mechanischen Modell hergeleitet werden kann, ist die empirische Lösung für die Querkrafttragfähigkeit auf einer umfangreichen Datenbasis abgesichert.

Die für die Bemessung von Textilbeton bisher vorgeschlagenen Bemessungsmodelle basieren auf den Erfahrungen des Stahlbetonbaus. Teilweise wird versucht, die Filamentfestigkeit als Bezugsgröße zu definieren und die verschiedenen Einflussgrößen getrennt mit Korrekturfaktoren zu erfassen [109]. Dieser Weg ist prinzipiell interessant, weil er eine transparente Erfassung der Einflussfaktoren gestattet und universell anwendbar ist. Nachteilig ist, dass die Korrekturfaktoren je-

weils spezifisch für eine bestimmte Kombination von Feinbetonmatrix und textiler Bewehrung gelten und in aufwendigen Versuchsreihen ermittelt werden müssen.

Für die Anwendung von Verstärkungen aus Textilbeton schlagen die Autoren vor, für den Nachweis der Wirksamkeit und zur Ermittlung von Bemessungswerten direkt auf Laborversuche an verstärkten Bauteilen bzw. am Verbundwerkstoff zurückzugreifen. Die derzeit vorliegende Datenbasis reicht für die Übertragung auf hochbautypische Bauteilquerschnitte in vielen Fällen aus, nicht jedoch für allgemeingültige Modelle, in denen die oben beschriebenen Einflussfaktoren getrennt erfasst werden könnten.

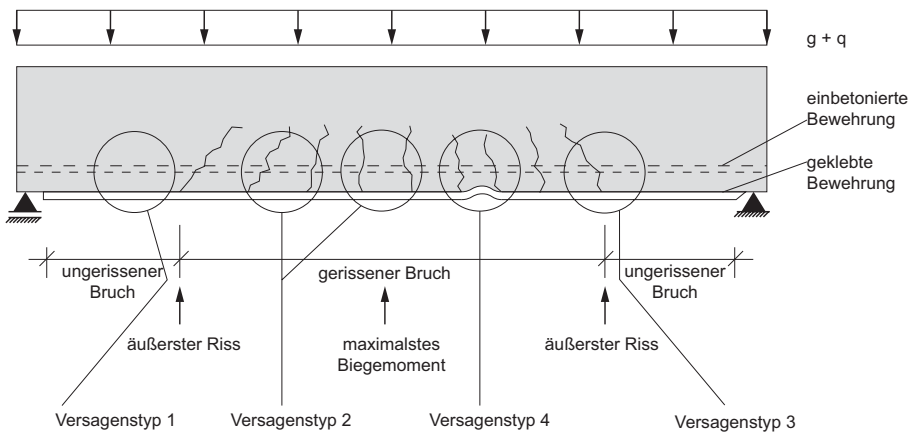
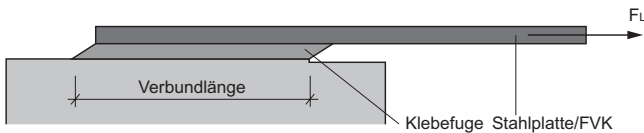
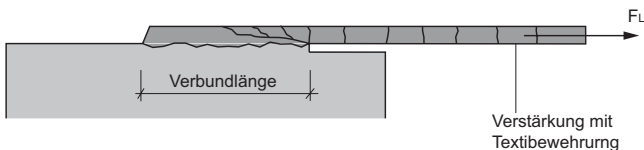


Bild 46. Schematische Darstellung der Versagensformen des Verbundes bei einem Biegebauteil mit geklebter Verstärkung (nach [59])



a) Verbund einer geklebten Verstärkung (Stahl oder FVK)



b) Verformung einer Verstärkung aus Textilbeton

Bild 47. Schematische Darstellung der Verformungen an Verstärkungssystemen aus a) Faserverbundkunststoffen und b) Textilbeton (nach [82])

7.2 Verbund zwischen Altbeton und Verstärkungsschicht

7.2.1 Versagensmechanismen

Es scheint zunächst sinnvoll, die bekannten und bereits eingehend untersuchten Versagensmechanismen für Verstärkungen aus geklebten Faserverbundkunststoffen (FVK) zu rekapitulieren, siehe bspw. [6, 59, 88, 92]. Bei der Kraftübertragung zwischen FVK-Verstärkungsschichten und einem auf Biegung zu verstärkenden Bauteil können prinzipiell folgende Versagensmechanismen auftreten (vgl. Bild 46):

- *Versagenstyp 1:* Delamination im ungerissenen Bereich der Endverankerung aufgrund eines im Beton auftretenden Schubrisses,
- *Versagenstyp 2:* Delamination an Biegerissen aufgrund eines im Beton auftretenden Schubrisses,
- *Versagenstyp 3:* Delamination an Schubrissen, wo prinzipiell horizontale und vertikale Verschiebungen auftreten können und
- *Versagenstyp 4:* Delamination aufgrund von Unebenheiten der Altbetonoberfläche.

Bei geklebten Verstärkungen können die durch Rissbildung im Beton auftretenden lokalen Verformungen nur zu einem sehr geringen Teil durch lokale Verformungen der geklebten FVK-Verstärkung aufgenommen werden. Die unterschiedlichen Verformungen zwischen FVK und dem gerissenen Untergrund müssen überwiegend durch Verzerrungen der Kleberschicht ausgeglichen werden. Dabei entstehen in dem an den Riss bzw. die Klebefuge angrenzenden Beton hohe Beanspruchungen. Wird die Betonfestigkeit überschritten, setzt die Delamination ein. Aufgrund dieser fehlenden Kompatibilität im Verformungsverhalten ist die Vermeidung der Delamination ein wesentlicher Bestandteil der Bemessung und Grund für die Einführung von zulässigen Grenzdehnungen für geklebte Verstärkungen [59].

Zwischen Verstärkungen aus geklebten FVK und Textilbeton besteht jedoch ein fundamentaler Unterschied im Verformungsverhalten in Rissnähe (vgl. Bild 47). Bei Textilbeton werden an einem Riss die gleichen Mechanismen wirksam wie bei der im Bauteil vorhandenen Stahlbewehrung. Mit zunehmender Rissöffnung wird die Bewehrung gedehnt. Ab einer bestimmten Verformung wird die Tragfähigkeit des Haftverbundes überschritten und die Bewehrung löst sich vom Beton. Trotz des damit verbundenen Schlupfes können weiterhin Kräfte übertragen werden. Die maximal mögliche Verbundkraft tritt typischerweise bei einigen Zehntelmillimetern Schlupf auf. Im Gegensatz zu geklebten Bewehrungen, bei welchen der Verlust der Kontinuität der Verformungen mit dem

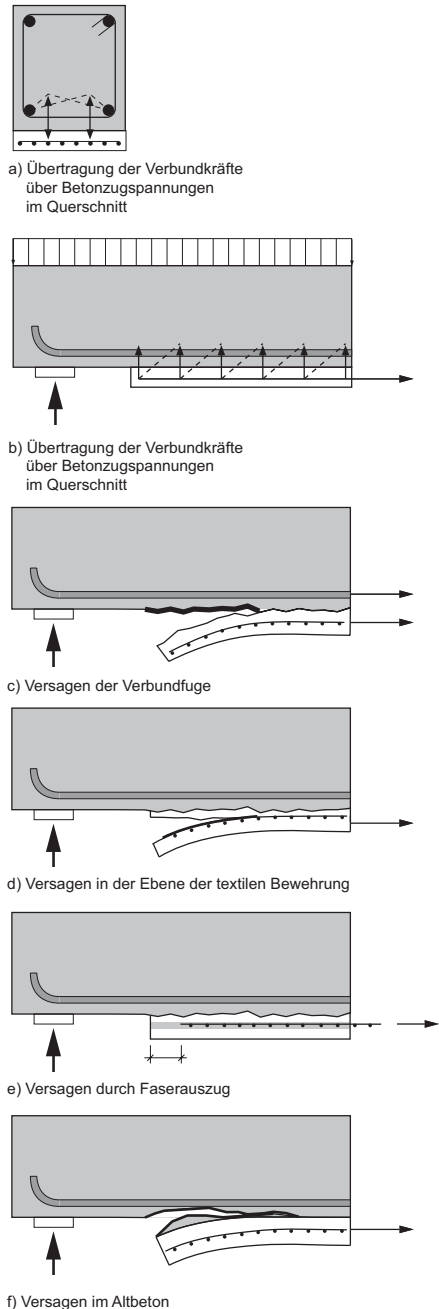


Bild 48. Arten des Verbundversagens für Verstärkungen aus Textilbeton (nach [82])

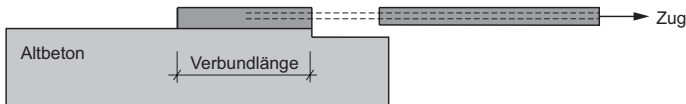


Bild 49. Verankerungsverankerung der textilen Bewehrung (nach [82])

Versagenstyp Delamination gleichgesetzt wird, tritt Schlupf zwischen Bewehrung und Beton bei Textilbeton planmäßig auf. Durch die hohen übertragbaren Verbundkräfte können im Beton weitere Risse in engem Abstand entstehen.

Für Textilbetonverstärkungen sind nach [82] die folgenden *Typen des Verbundversagens* möglich (Bild 48):

- *Typ 1 – Altbetonversagen:* Das Versagen findet im Altbeton statt. Möglich ist sowohl ein oberflächennaher Rissverlauf nahe der Verbundfuge als auch ein tiefer Ausbruchkrater im Altbeton, der dann in vielen Fällen bis an die Stahlbewehrung reicht. Die gesamte Betondeckung mit Verstärkungsschicht wird abgeschält.
- *Typ 2 – Fuge alt-neu:* Das Versagen tritt direkt in der Verbundfuge auf.
- *Typ 3 – Delamination:* Das Versagen findet in der Ebene der textilen Bewehrung statt, bei mehrlagiger Bewehrung in der ersten, dem Altbeton zugewandten Bewehrungsebene.
- *Typ 4 – Verankerungsverankerung:* Die textile Bewehrung ist nicht ausreichend verankert und die Fasern werden komplett aus dem Feinbeton herausgezogen.

Bei der Auslegung von Textilbetonverstärkungen wird angestrebt, dass das Altbetonversagen (Typ 1) maßgebend wird. Dann kann aus Sicht des Verbundversagens die maximale Leistungsfähigkeit des Verstärkungssystems erreicht werden, denn die Beanspruchbarkeit des Altbetons ist die einzige gegebene Größe, die nicht beeinflusst werden kann.

Das Versagen in der Verbundfuge sollte durch einen guten Verbund zwischen Verstärkungsschicht und Altbeton ausgeschlossen werden. Das kann in erster Linie durch eine raue Verbundfuge erreicht werden, die für eine gute Verzahnung von Altbeton und Verstärkungsschicht sorgt.

Das Verankerungsverankerung tritt auf, wenn die nach dem letzten Riss vor dem Auflager bzw. Ende der Verstärkung verbleibende ungestörte Länge nicht mehr ausreicht, um die in der Faser wirkende Zugkraft zu verankern. In den zahlreichen durchgeführten Versuchen an verstärkten Bauteilen konnte das Verankerungsverankerung in keinem Fall als Versagensursache ausgewiesen werden. In Einzelfällen wurde Verbundversagen

entsprechend den Typen 1 und 3 beobachtet [13, 14]. Nach derzeitigem Wissensstand kann also davon ausgegangen werden, dass das Verankerungsverankerung nicht maßgebend wird. Deshalb wurde für diesen Versagensfall noch kein Bemessungsmodell für Textilbeton entwickelt.

Das Delaminationsversagen oder interlaminaire Versagen (Typ 3) ist im strukturellen Aufbau des Textilbetons begründet. Bei der Einleitung der Verbundkräfte vom Altbeton in die textilen Bewehrungen der Verstärkungsschicht treten in dem die Fasern umgebenden Feinbeton Zugbeanspruchungen auf. Die verwendeten Multifilamentgarne selbst können in Querrichtung keine Kräfte übertragen. In der Ebene der textilen Bewehrung ist daher nur der zwischen den gitterartig angeordneten Fasern vorhandene Feinbeton wirksam (vgl. Bild 19). Die Höhe der übertragbaren Verbundkräfte hängt direkt von der Festigkeit und der Menge des zwischen den Fäden der textilen Bewehrung vorhandenen Feinbetons ab. Flächenmäßig entspricht der Feinbetonanteil dem zwischen den Fasern verbleibenden Flächenanteil und kann durch den Beiwert $k_{A,eff}$ durch

$$k_{A,eff} = \frac{A}{A_m}$$

mit

A Gesamtfläche

A_m Matrixfläche

ausgedrückt werden (Bild 50).

In umfangreichen Haftzugversuchen mit verschiedenen textilen Bewehrungen konnten Grenzen für die Versagenstypen 1 (Altbetonversagen) und 3 (Delamination) gefunden werden. Bild 51 zeigt den in [82] entwickelten prinzipiellen Zusammenhang. Die Grenzlinie für Typ 1 beschreibt das Ver-

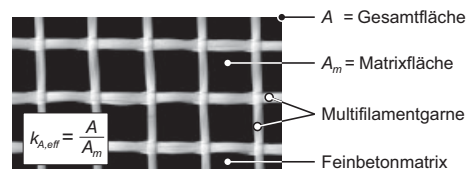


Bild 50. Definition des wirksamen Flächenanteils $k_{A,eff}$ (nach [82])

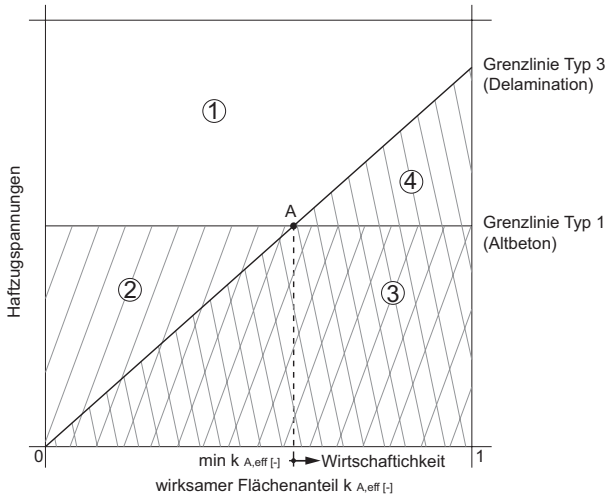


Bild 51. Prinzipielle Abhängigkeit der auftretenden Verbundversagenstypen 1 und 3 in Abhängigkeit der Altbetonfestigkeit und des wirksamen Flächenanteils (nach [82])

sagen im Altbeton. Oberhalb der Linie tritt ein Versagen im Altbeton ein, unterhalb der Linie nicht. Die Grenzlinie für Typ 3 beschreibt das Versagen durch Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung. Links bzw. oberhalb der Linie findet Delamination statt, darunter bzw. rechts nicht.

Durch Interaktion der beiden Versagensarten versagt das System in den Bereichen 1 und 3 im Altbeton, wobei im Bereich 3 bez. des Versagenstyps Delamination das System höher beanspruchbar wäre, praktisch aber durch die Tragfähigkeit des

Altbetons begrenzt wird. Im Bereich 2 versagt das System durch Delamination, ohne die Tragfähigkeit des Altbetons im Bereich 1 auszuschöpfen. Im Bereich 4 tritt kein Versagen ein. Mit zunehmendem wirksamem Flächengehalt schlägt das Verhalten am Punkt A (bzw. bei $\min k_{A,eff}$) von Delaminationsversagen in Altbetonversagen um. Dieser Bereich rechts von Punkt A ist für eine wirtschaftliche Auslegung des Verstärkungssystems von Interesse. Die in Bild 52 angegebenen Zahlenwerte gelten für die Mischung M1 aus Abschnitt 4.3 und stammen aus kleinmaßstäblichen Versuchen.

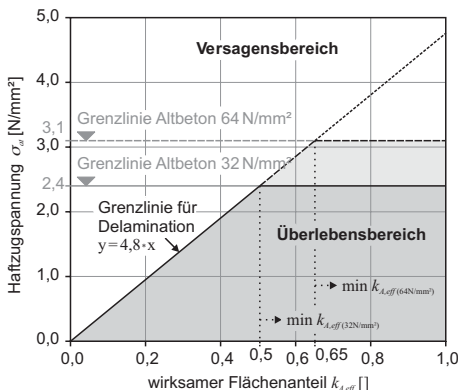


Bild 52. Grenzl意思 für die Verbundversagenstypen 1 und 3 in Abhängigkeit von der Altbetonfestigkeit und dem wirksamen Flächenanteil für Matrix M1 [82]

7.2.2 Nachweisführung

Die Verbundtragfähigkeit ergibt sich aus dem maßgebenden Versagensfall bei Betrachtung der möglichen Versagensarten [82]:

$$R_V = \min(R_{V,c}, R_{V,bj}, R_{V,tx}, R_{V,po})$$

mit

R_V Verbundtragfähigkeit

$R_{V,c}$ Verbundtragfähigkeit im Altbeton

$R_{V,bj}$ Verbundtragfähigkeit in der Verbundfuge

$R_{V,tx}$ Verbundtragfähigkeit in der Textilebene (Delamination)

$R_{V,po}$ Verbundtragfähigkeit der textilen Bewehrung (Auszugswiderstand)

Unter Ausschluss des Versagens in der Verbundfuge (durch eine ausreichende Rauigkeit) und des

Auszugsversagens der textilen Bewehrung (durch Wahl einer geeigneten textilen Struktur) ergeben sich zwei mögliche Versagensfälle, die zu betrachten sind:

1. die Tragfähigkeit des Altbetonuntergrundes und
2. die Tragfähigkeit des Feinbetons in der textilen Bewehrungsebene.

Zwischen der übertragbaren Verbundkraft und der erforderlichen Verbundlänge besteht für beide Fälle der in Bild 53 dargestellte Zusammenhang [58]. Mit steigender Verbundlänge l_v wächst die übertragbare Kraft und strebt dem Grenzwert $F_{vu, \max}$ zu, d. h. ab einer bestimmten Verbundlänge lässt sich die verankerbare Kraft nicht mehr steigern.

Ist die Tragfähigkeit der Verstärkungsschicht kleiner als die maximale Verbundbruchkraft, kann deren Tragfähigkeit ausgenutzt werden. Gegebenenfalls ist eine kürzere Verankerungslänge ausreichend (Bild 53a).

Ist die Tragfähigkeit der Verstärkungsschicht $F_{L,u}$ hingegen größer als dieser Grenzwert, kann deren Tragfähigkeit nicht ausgenutzt werden. Das System versagt vor dem Erreichen der Zugtragfähigkeit der Verstärkungsschicht durch Verbundversagen. Die maximal übertragbare Verbundkraft ist in diesem Fall maßgebend für die Bemessung (Bild 53b).

Der Versagenstyp 1 (Altbeton) kann vereinfachend mit einer zusammengesetzten Parabel-

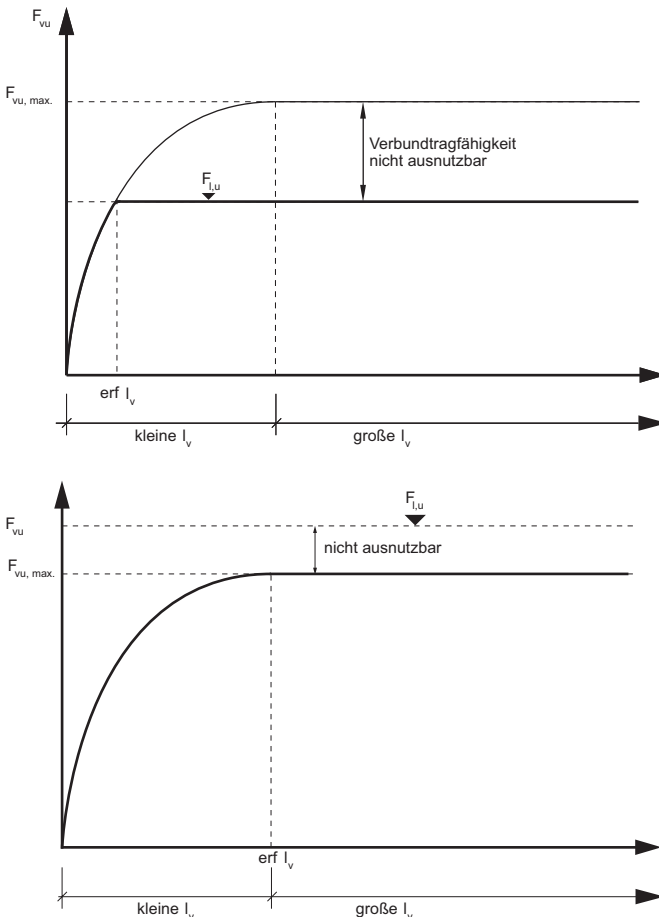


Bild 53. Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Verbundversagen und Tragfähigkeit (nach [84]); a) geringe Zugtragfähigkeit der Verstärkungsschicht, b) hohe Zugtragfähigkeit der Verstärkungsschicht

Rechteck-Funktion beschrieben werden [58]. Nach Kalibrierung an Versuchswerten zum Altbetonversagen mit einem C20/25 kann die maximal übertragbare Verbundkraft $F_{LV,c}$ bei Altbetonversagen wie folgt berechnet werden [82]:

$$F_{LV,c}^{[kN/m]} = \begin{cases} -0,9 \cdot l_v^2 [cm] + 31,17 \cdot l_v [cm] & \text{für } l_v \leq 17,32 \text{ cm} \\ 270 & \text{für } l_v > 17,32 \text{ cm} \end{cases}$$

Eine genauere Beschreibung ergibt sich bei Ansatz einer trigonometrischen Funktion, die auf bruchmechanischen Ansätzen basiert:

$$F_{LV,c}^{[kN/m]} = 270 \cdot \tanh(0,3793 \cdot l_v [cm])$$

In gleicher Form kann auch der Versagenstyp 3 (Delamination) beschrieben werden. Nach Einführung der effektiven Verbundlänge $l_{v,eff}$ zur Berücksichtigung des wirksamen Flächenteils der textilen Bewehrung und mit ebenfalls empirisch abgeleiteten Parametern kann für den Versagenstyp Delamination die übertragbare Verbundkraft $F_{LV,tex}$ nach [82] wie folgt beschrieben werden:

$$F_{LV,tex}^{[kN/m]} = \begin{cases} -7,5 \cdot l_{v,eff}^2 [cm] + 86,6 \cdot l_{v,eff} [cm] & \text{für } l_{v,eff} \leq 5,77 \text{ cm} \\ 250 & \text{für } l_{v,eff} > 5,77 \text{ cm} \end{cases}$$

mit

$$l_{v,eff} = \text{effektive Verbundlänge} \\ l_{v,eff} = k_{A,eff} \cdot l_v$$

Die Zahlenwerte gelten für die in Abschnitt 4.3 vorgestellte Feinbetonmatrix M1. Folgender alternativer Ansatz führt bis auf geringe Unterschiede zum gleichen Ergebnis:

$$F_{LV,tex}^{[kN/m]} = 249,4 \cdot \tanh\left(0,3793 \cdot l_{v,eff}^{[cm]}\right)$$

In Bild 54 ist diese Gleichung für verschiedene wirksame Flächenanteile ausgewertet.

Die maximale effektive Verbundlänge erf $l_{v,max}$ beträgt 5,77 cm. Wirksame Flächenanteile geeigneter textiler Bewehrungen liegen im Bereich $k_{A,eff} = 0,5 \dots 0,8$. Daraus ergeben sich Höchstwerte für erforderliche Verankerungslängen von etwa 7 bis 12 cm. Der Vergleich mit FVK-Lamellen zeigt, dass die Verankerung der textilen Bewehrung ohne Delaminationsversagen bei etwa 30 bis 50 % der Verankerungslänge möglich ist. Auch für das Altbetonversagen reduzieren sich die Verankerungslängen auf etwa 50 bis 60 % des Vergleichswertes bei FVK-Lamellen. Dieser Unterschied ist auf die bessere Kompatibilität des Verformungsverhaltens von Textilbeton und Stahlbeton zurückzuführen.

Für die Nachweisführung ist der maßgebende Fall der beiden Versagensarten – Altbetonversagen und Delamination – zur Ermittlung der maximal übertragbaren Verbundkraft zu ermitteln:

$$F_{LV,max} = \min(F_{LV,c}, F_{LV,tex})$$

Um wie gewünscht in den Bereich des Altbetonversagens zu gelangen und den Versagenstyp Delamination auszuschließen, ist es praktikabel, den Nachweis von vornherein indirekt zu vermeiden, indem aufgrund der ermittelten Haftzugfestigkeiten des Altbetons ein Wert $\min k_{A,eff}$ als Anforderung an das Textil definiert wird, der im Bild 51 rechts vom Punkt A liegt.

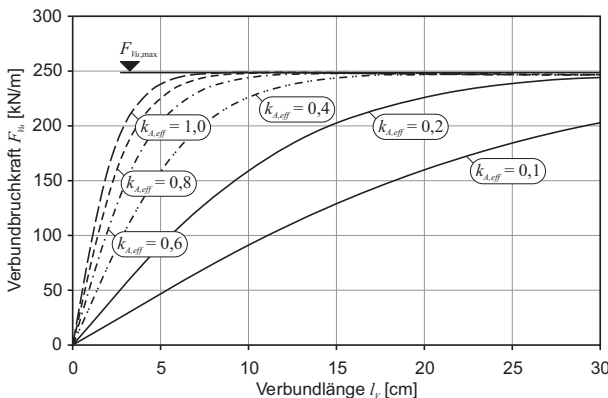


Bild 54. Abhängigkeit der übertragbaren Verbundkraft von der Verbundlänge und dem wirksamen Flächenanteil [82]

7.3 Biegeverstärkung

7.3.1 Verstärkungsaufgabe

Das Biegeversagen von Bauteilen kann zwei Mechanismen zugeordnet werden. Entweder tritt das Versagen durch Bruch der Betondruckzone ein, oder es wird durch das Fließen des Stahls in der Zugzone eingeleitet. Im zweiten Fall kann die Belastung des Bauteils in vielen Fällen noch geringfügig gesteigert werden, weil durch die wachsende Rissöffnung die Druckzone eingeschnürt wird und dadurch der innere Hebelarm wächst, solange die Druckzone die Belastung aufnehmen kann. Das endgültige Versagen tritt dann meist durch einen Druckbruch der zunehmend eingeschnürten Druckzone ein.

Wenn das Fließen des Stahls in der Zugzone die Tragfähigkeit begrenzt, kann eine zusätzliche Schicht an der Zugzone aus Textilbeton die Biegetragfähigkeit erhöhen. Die Verstärkungsschicht erhöht die aufnehmbaren Zugkräfte in der Zugzone und vergrößert den inneren Hebelarm. Beide Mechanismen können die Biegetragfähigkeit erhöhen, vorausgesetzt, die Druckzone kann die höhere Belastung aufnehmen.

Ist die Tragfähigkeit durch die Auslastung der Druckzone limitiert, kann eine zusätzliche Bewehrung in der Zugzone durch eine Verringerung der Rotation die Druckzone vergrößern und so die Tragfähigkeit erhöhen. Allerdings geht eine solche Verstärkung stark auf Kosten der Wirtschaftlichkeit, denn um dies zu erreichen, muss die Dehnung in der Zugzone reduziert werden. In diesem Fall ist eine Verstärkung der Druckzone durch Aufbeton meist die einfachere, wirtschaftlichere und damit sinnvollere Lösung.

7.3.2 Tragverhalten

Experimentelle Untersuchungen

Das Tragverhalten von Biegeverstärkungen aus Textilbeton wurde bisher am umfangreichsten in Versuch und Simulation untersucht, denn dies ist eine in der Praxis häufig anzuwendende Verstärkungsform. Die meisten Versuche zum Tragverhalten wurden an $180\text{ cm} \times 60\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ großen Stahlbetonplatten durchgeführt (Bild 55). Für den zu verstärkenden Grundkörper kam ein Normalbeton der Festigkeitsklasse C20/25 zum Einsatz und als Längsbewehrung eine Stabstahl-

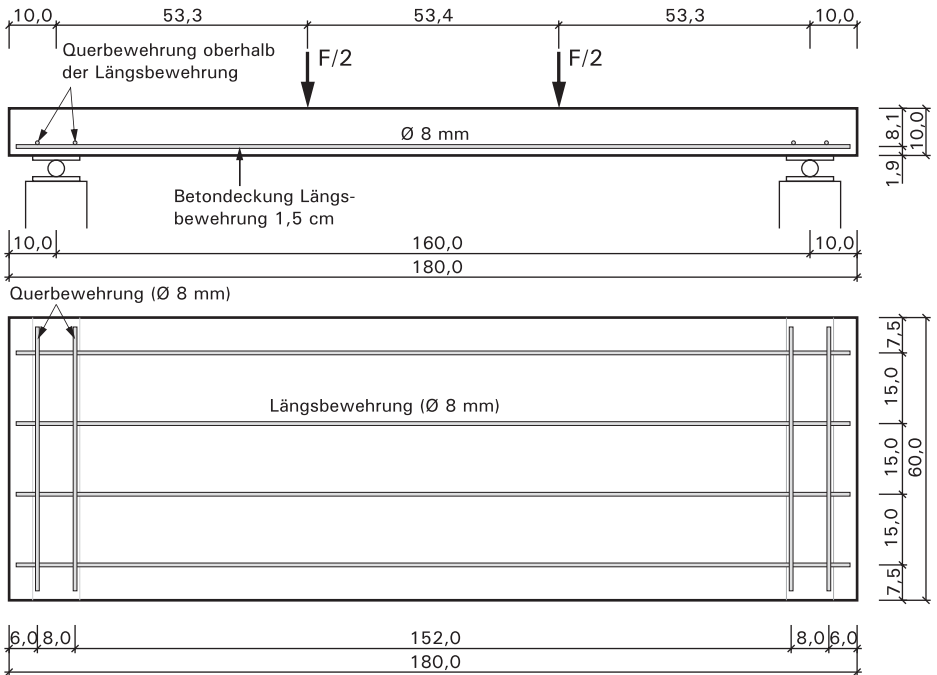


Bild 55. Geometrie der Stahlbetonplatten, an denen das Tragverhalten von Biegeverstärkungen untersucht wird
[111]

bewehrung aus 4 Ø 8 mm mit 15 mm Betondeckung. Der Versuchskörper ist einer üblichen Hochbaudecke entlehnt, im Maßstab aber an die Randbedingungen des Prüflabors angepasst. Nach dem Aufbringen der Verstärkung und einer ausreichenden Erhärtung des Betons wurden die Platten im 4-Punkt-Biegeversuch bis zum Versagen belastet.

Kraft-Verformungs-Verhalten

Typische Ergebnisse der Versuche werden im Folgenden beschrieben. Exemplarische Kraft-Verformungs-Kurven sind in den Bildern 56 und 57 dargestellt.

Die unverstärkten Referenzplatten zeigen das für Stahlbetonbauteile typische Verhalten unter Biegebeanspruchung. Der Anstieg der Kraft-Verformungs-Linie ist zu Beginn der Laststeigerung sehr steil. Der Beton ist noch ungerissen und das Bauteil befindet sich im Zustand I. Bei etwa 8 kN setzt die Rissbildung ein, das Bauteil geht in den Zustand II über. Gleichzeitig belegt der geringere Anstieg der Kraft-Verformungs-Linie die aufgrund der Rissbildung abgesunkene Steifigkeit. Bei etwa 32 kN gelangt der Bewehrungsstahl ins Fließen (Zustand III) und die Kraft-Verformungs-Linie ändert ihren Verlauf zu einem annähernd horizontalen Plateau. Bei weiterer Belastung nehmen die Verformungen stark zu, ohne dass die Kraft nennenswert gesteigert werden kann. Das endgültige Versagen tritt bei etwa 35 kN und (hier nicht dargestellten) großen Durchbiegungen von über 60 mm infolge des Ver-

sagens der zunehmend eingeschnürten Druckzone ein.

Die verstärkten Platten behalten bis zu einem wesentlich höheren Lastniveau von 15 bis 20 kN die dem Zustand I entsprechende, hohe Steifigkeit. Nach dem Einsetzen der Rissbildung (Zustand II) verläuft die Kraft-Verformungs-Linie mit etwa dem gleichen Anstieg wie die unverstärkte Referenzplatte, bis der Stahl ins Fließen kommt. Das ist bei etwa 50 kN der Fall. Ab hier ist die weitere Laststeigerung allein aufgrund der Wirksamkeit der textilen Bewehrung möglich. Der Anstieg der Kraft-Verformungs-Linie ist nun etwas geringer. Das Versagen trat durch Überschreiten der Zugfestigkeit der textilen Bewehrung ein. Im verformungsgesteuerten Versuch fällt die Kraft dann auf das Niveau der unverstärkten Platte ab. An diesem Punkt wurden die meisten Versuche abgebrochen. Die Höhe der Bruchlast und der Verformungen im Bruchzustand hängen von der Festigkeit und der Steifigkeit der textilen Bewehrung sowie den Verbundeigenschaften der Bewehrung ab.

Grenzzustand der Tragfähigkeit

Die erreichbare Verstärkungswirkung bzw. die für eine bestimmte Erhöhung der Tragfähigkeit notwendige Lagenanzahl ist von der Leistungsfähigkeit der textilen Bewehrung abhängig. Bild 56 zeigt Ergebnisse mit einer 3-lagigen ($A_f = 190 \text{ mm}^2$) und einer 6-lagigen ($A_f = 380 \text{ mm}^2$) Verstärkung mit einem Textil der 2. Generation (s. Kasten Entwicklungsphasen) aus unbeschich-

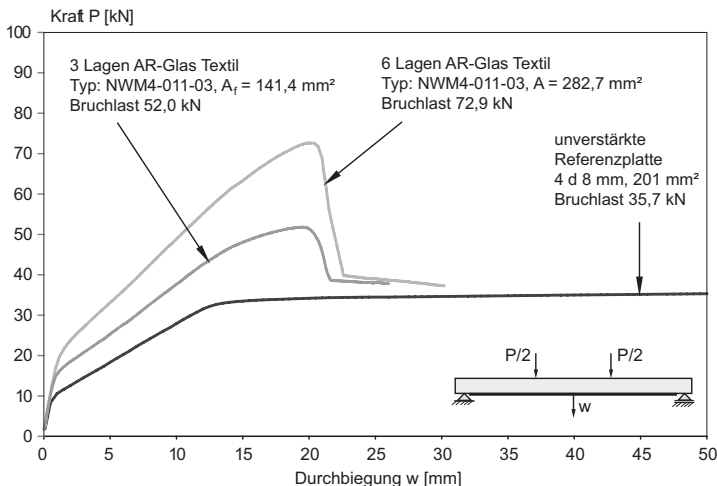


Bild 56. Versuchsergebnisse von 4-Punkt-Biegeversuchen an verstärkten Stahlbetonplatten mit textilen Bewehrungen der zweiten Generation [13]

teten AR-Glasfasern. Bei der 6-lagigen Verstärkung liegt die Versagenslast bei etwa 70 kN und damit um den Faktor zwei über der Bruchlast der unverstärkten Referenzplatten.

In Bild 57 sind Ergebnisse einer dreilagigen Verstärkung mit einem beschichteten Textil aus AR-Glas und einer zweilagigen Verstärkung mit einem beschichteten Textil aus Carbonfasern (3. Genera-

tion textiler Bewehrungen) dargestellt. Bei Carbon wird aufgrund der hohen Festigkeit der Fasern in etwa die gleiche Leistungsfähigkeit bei geringerem Materialaufwand und, aufgrund der verringerten Lagenanzahl, wesentlich geringerem Arbeitsaufwand erreicht. Im Beispiel besaß das Carbon-gelege lediglich 74 % des Bewehrungsquerschnittes des AR-Glas-Geleges, es wurde aber die gleiche Tragfähigkeit erreicht.

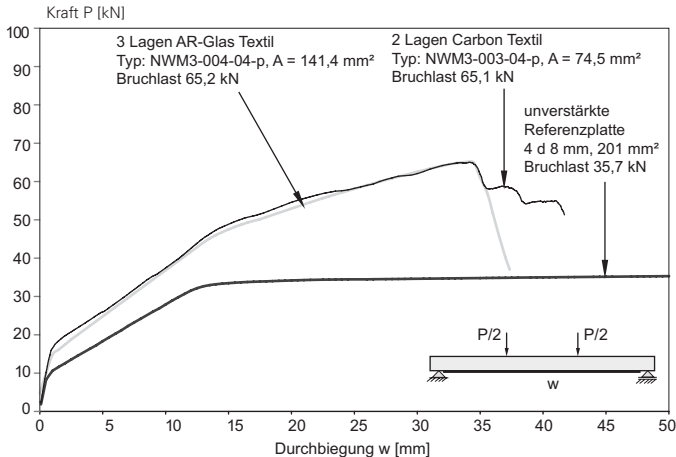


Bild 57. Versuchsergebnisse von 4-Punkt-Biegeversuchen an verstärkten Stahlbetonplatten mit textilen Bewehrungen der dritten Generation [111]

Entwicklungsphasen textiler Bewehrungen [32]

Seit Einrichtung des Sonderforschungsbereiches 528 an der TU Dresden 1999 vollzog sich die Entwicklung der textilen Bewehrungen in mehreren Meilensteinen. Die *erste Generation* textiler Bewehrungen besaß noch keine auf die spezielle Verbundsituation mit Beton abgestellte Struktur, da die wirksamen Tragmechanismen erst im Ergebnis detaillierter Untersuchungen aufgedeckt wurden. Die *zweite Generation* textiler Bewehrungen baute auf diesen Erkenntnissen auf und entstand durch gezielte Modifikationen der Textil-

struktur. Die *dritte Generation* textiler Bewehrungen ist ein weiterer erheblicher Fortschritt auf der Basis der in den Herstellungsprozess integrierten Sekundärbeschichtung. Dadurch können die Verbundeigenschaften der Filamente untereinander und zum Beton gezielt eingestellt werden. Der Einsatz von Carbonfasern wurde erst durch die Sekundärbeschichtung möglich, da ohne Beschichtung die Verbundlängen zum Beton zu groß für eine sinnvolle praktische Anwendung wären. Die Ausnutzung der Faserfestigkeit verdoppelte sich annähernd mit jeder Generation.

Entwicklungsphasen	Zugfestigkeit der Fasern im Verbundwerkstoff in N/mm ²	
	AR-Glas	Carbon
1. Generation	250 ... 500	–
2. Generation (optimierte Struktur)	400 ... 800	–
3. Generation (mit Sekundärbeschichtung)	800 ... 1200	1400 ... 1900

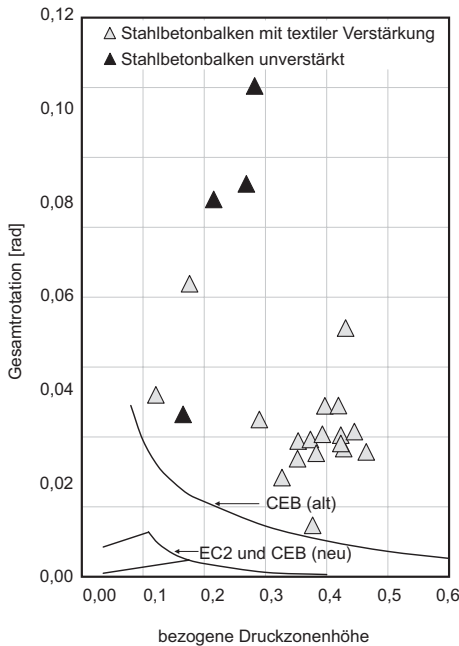


Bild 58. Gegenüberstellung gemessener Gesamtrotation und empfohlener Mindestwerte für Platten [13]

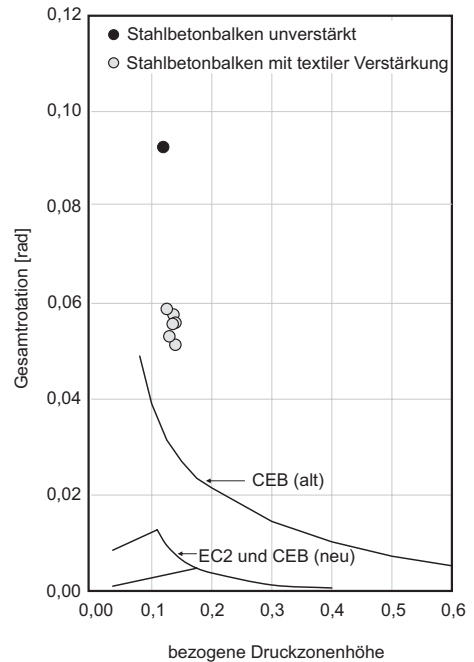


Bild 59. Gegenüberstellung gemessener Gesamtrotation und empfohlener Mindestwerte für Balken [73]

Bei Erreichen des Bruchzustandes war die Stahlbewehrung bereits deutlich in den Fließzustand gelangt. Da Fasern aus AR-Glas und Carbon ohne Vorankündigung versagen, können die verstärkten Bauteile kein duktils Verhalten zeigen. Das Versagen der Verstärkung ist deshalb spröde und nahezu ohne Vorankündigung.

Die zu verstärkenden Bauteile sind in vielen Fällen Bestandteile größerer Konstruktionen. Während der Belastung eines Stahlbetontragwerks finden aufgrund der rissbildungsbedingten Steifigkeitsänderungen mehrfach Lastumlagerungen statt. Dazu ist eine ausreichende Verformungsfähigkeit erforderlich: Der entsprechende Nachweis hat 2001 auch Eingang in die DIN 1045-1 gefunden. Es musste die Frage geklärt werden, ob mit Textilbeton verstärkte und bei vergleichsweise kleinen Verformungen versagende Bauteile eine ausreichende Verformungsfähigkeit besitzen, um die notwendigen Lastumlagerungen in Stahlbetontragwerken zu ermöglichen. Die mit Textilien der 1. und 2. Generation auf Biegung verstärkten Platten und Balken besaßen eine ausreichende Rotationsfähigkeit. Für den Nachweis wurden die gemessenen Rotationen mit den Empfehlungen des CEB Model-Code 90 [27] und des Eurocode 2

[128] gegenübergestellt. Die Ergebnisse sind in Bild 58 für Platten und in Bild 59 für Balken dargestellt. In allen Fällen wurden die empfohlenen Mindestwerte deutlich übertroffen. Wie gezeigt, nimmt die Verformungsfähigkeit bei Verwendung von Textilien der 3. Generation nochmals zu. Mit Textilbeton verstärkte Platten und Balken besitzen also ein ausreichendes Verformungsvermögen für die praktische Anwendung.

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Durch die Textilbetonverstärkung kommt es neben einer Erhöhung der Tragfähigkeit auch zu einer deutlichen Verbesserung des Verhaltens unter Gebrauchslast. Die Kraft-Verformungs-Linien zeigen, dass die Bauteile erst bei einem signifikant höheren Lastniveau in den Zustand II übergehen. Zur Bewertung der Verformungen unter Gebrauchslast in Bild 56 bzw. 57 sollen exemplarisch zwei Szenarien betrachtet werden:

- Im ersten Szenario ist die Verstärkung aufgrund einer Steigerung der Gebrauchslast erforderlich, z. B. wegen einer Umnutzung mit höheren Verkehrslasten. Es wird angenommen, dass bei der unverstärkten Stahlbeton-

platte das Gebrauchslastniveau wegen Stahlversagen bei etwa $1/1,75$ der Bruchlast liegt und bei den verstärkten Platten aufgrund des spröden Versagens der textilen Bewehrung bei etwa $1/2,1$ der Bruchlast. In beiden Fällen liegen die Verformungen unter Gebrauchslast bei etwa 8 mm.

- Ein anderes Szenario könnte die Verstärkung einer vorhandenen Platte sein aufgrund zu großer Durchbiegungen. In diesem Fall ist das Gebrauchslastniveau von unverstärktem und verstärktem System identisch und die Verformungen sind nach der Verstärkung deutlich kleiner. Die Verstärkung mit Textilbeton wäre also auch eine Alternative, wenn die Aufgabe der Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit zu lösen ist.

Die Rissabstände der untersuchten unverstärkten Stahlbetonplatten lagen im Bereich von 10 bis 15 cm. Bei den verstärkten Platten verkleinerten sich die Rissabstände in der Stahlbetonplatte auf durchschnittlich 5 bis 8 cm und in der Feinbetonschicht konnten Risse mit einem durchschnittlichen Abstand von 11 mm beobachtet werden [111], was in etwa dem Abstand der Querräden

des Textils entsprach, siehe Bild 60a¹⁴⁾. Bei ähnlichen Verformungen von unverstärkter und verstärkter Stahlbetonplatte verringerten sich die durchschnittlichen Rissabstände um den Faktor 10! Im gleichen Maß verringern sich auch die Rissbreiten. Bild 60b wurde an einer vorgeschädigten Stahlbetonplatte aufgenommen (zur Vorschädigung siehe unten).

Die Rissbildung einer vorhandenen Konstruktion kann durch eine Verstärkung mit Textilbeton positiv beeinflusst werden. Unbestritten ist sicherlich der ästhetische Gewinn durch die geringeren Rissbreiten. In welchem Maße die mit der Barrierewirkung der Feinbetonschicht und dem feinere Rissbild verbundenen Auswirkungen auf Transportvorgänge in der Betondeckung der Altkonstruktion die Dauerhaftigkeit beeinflussen können, ist

¹⁴⁾ Die Risse wurden in Bild 60 mit schwarzer Tinte auf der vor dem Versuch wasserundurchlässig versiegelten Bauteiloberfläche sichtbar gemacht. In der unteren Hälfte von Bild 60b ist der originale Zustand der Oberfläche sichtbar. Die Rissbreiten sind im Vergleich zum unverstärkten Zustand sehr viel kleiner.

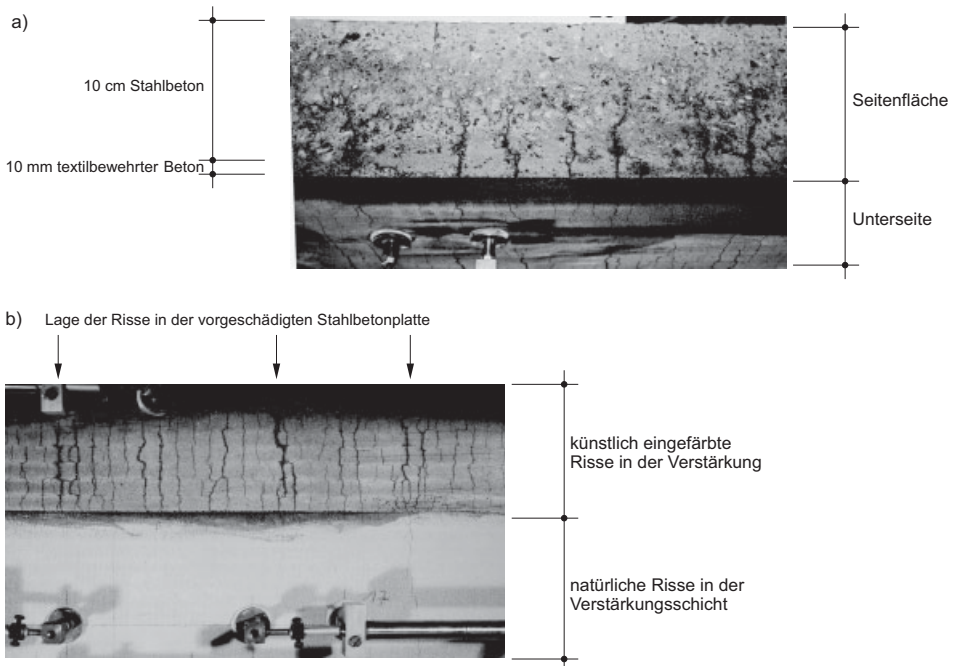
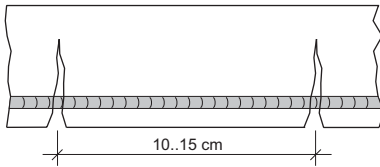
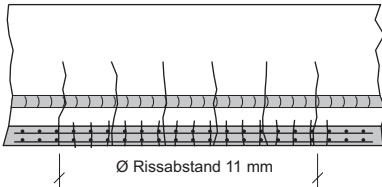


Bild 60. Rissbilder bei verstärkten Stahlbetonplatten mit und ohne Vorschädigung mit Biegeverstärkung aus Textilbeton [64]; a) Rissbild einer verstärkten Platte an der Längs- und an der Unterseite, b) Rissbild auf der Textilbetonschicht einer vorgeschädigten und anschließend verstärkten Stahlbetonplatte



a) Rissverlauf unverstärkte Stahlbetonplatte



b) Rissverlauf mit Textilbeton verstärkte Stahlbetonplatte

Bild 61. Vereinfachte schematische Darstellung der Rissbilder einer unverstärkten und einer verstärkten Stahlbetonplatte (nach [111])

Gegenstand laufender Forschungsvorhaben. Es herrscht die Überzeugung vor, dass sich die Dauerhaftigkeit signifikant verbessern dürfte.

Einfluss einer Vorschädigung

In den seltensten Fällen wird die Aufgabenstellung in der Verstärkung einer ungeschädigten (ungerissenen) Konstruktion bestehen. In Abhängigkeit von der Lastgeschichte werden die Bauteile ein ausgeprägtes Rissbild aufweisen. Ein Großteil der Belastung wird auch während der Verstärkungsarbeiten wirksam bleiben, z. B. das Eigengewicht und andere ständige Lasten. Es stellt sich die Frage, wie diese Vorschädigung und die Applikation der Verstärkungsschicht auf belastete Bau-

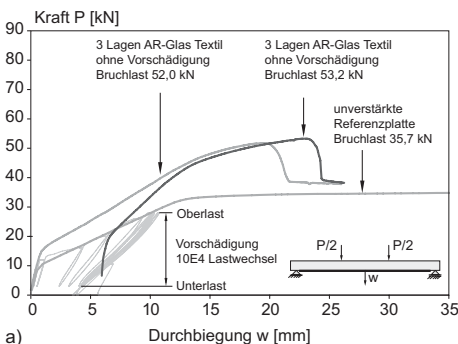
teile mit geöffneten Rissen sich auf das Tragverhalten einer verstärkten Konstruktion auswirken. Zur Untersuchung dieser Fragestellung wurden unverstärkte Stahlbetonplatten wie folgt vorgeschädigt:

1. quasi-statische Belastung bis 80 % der Bruchlast zur Einstellung eines weitgehend abgeschlossenen Rissbildes,
2. 10.000 Lastzyklen mit einer Unterlast von 40 % und einer Oberlast von 75 % der Bruchlast,
3. Aufbringen einer permanenten Last in Höhe von 60 % der Bruchlast.

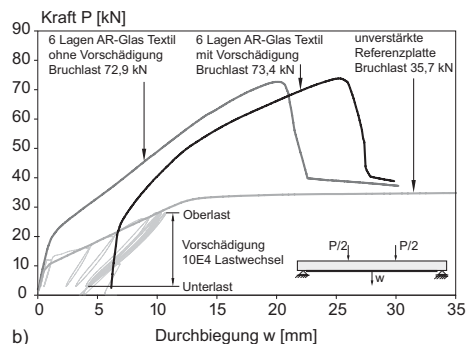
Unter dieser Dauerlast wurden die Platten mit 3 bzw. mit 6 Lagen textiler Bewehrung aus AR-Glas verstärkt und nach dem Aushärten der Verstärkung im Vier-Punkt-Biegeversuch deren Tragverhalten untersucht. Die wesentlichen Ergebnisse sind in Bild 62 als Kraft-Verformungs-Diagramme dargestellt. Durch die Vorbelastung kann die Verstärkungsschicht erst für zusätzlich aufgebrachte Lasten wirksam werden. Dann jedoch verläuft der Gradient der Kraft-Verformungs-Linie steiler als beim nicht vorgeschädigten Vergleichsbauenteil. Der Verformungszuwachs durch Verkehrslasten fällt also bei vorgeschädigten Bauteilen niedriger aus. Allerdings ist die absolute Größe der Verformungen bei den vorgeschädigten Platten bis in den Bruchzustand signifikant größer. Auf die Bruchlast hat die Vorschädigung keine sichtbaren Auswirkungen, wenn man von einem tendenziell höheren Niveau absieht [64].

Verbundverhalten

Die möglichen Verbundversagenstypen wurden in Abschnitt 7.2.1 dargestellt. Bei den bisher am Institut für Massivbau durchgeführten mehr als 70 Einzelversuchen an verstärkten Stahlbetonplatten



a)



b)

Bild 62. Tragverhalten von ungeschädigt und vorgeschädigt verstärkten Platten [111]; a) Verstärkung mit 3 Lagen textiler Bewehrung aus AR-Glas, b) Verstärkung mit 6 Lagen textiler Bewehrung aus AR-Glas

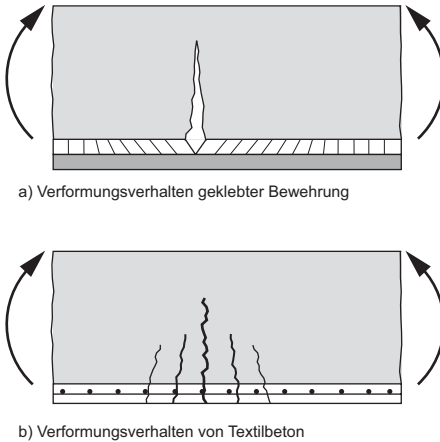


Bild 63. Gegenüberstellung des Verbundverhaltens von Textilbetonverstärkung und FVK-Verstärkung

konnte in keinem Fall ein Verbundversagen festgestellt werden. Versagensursache war in allen Fällen ein Zugbruch der textilen Bewehrung im Bereich des maximalen Biegemoments. Diese Ergebnisse befreien nicht von der Nachweisführung für die verschiedenen Verbundversagenstypen, zeigen jedoch, dass das Verbundversagen bei Biegeverstärkungen aus Textilbeton von weit geringerer Bedeutung ist als bei Verstärkungen mit FVK.

Plausibel wird dieser Unterschied durch die unterschiedliche Charakteristik von Verstärkungen aus Textilbeton und FVK. Die Textilbetonverstärkung überträgt die Verbundkräfte flächig in den Altbeton und ihr Verformungsverhalten ist kompatibel bzw. vergleichbar zu dem des Stahlbetons (Rissbildung). Demgegenüber werden bei FVK die

Kräfte sehr konzentriert eingeleitet und die Inkompatibilität zwischen dem durch Rissbildung geprägten Verformungsverhalten des Stahlbetons und der kontinuierlichen Verformung der Verstärkung kann durch die Verzerrungen in der Klebefuge nur in engen Grenzen angeglichen werden.

7.3.3 Bemessung/Nachweisführung

Für die Nachweisführung im Grenzzustand der Tragfähigkeit kann zunächst auf die traditionelle Biegebemessung aus dem Stahlbetonbau zurückgegriffen werden. Die Verstärkungsschicht aus Textilbeton wird vereinfachend als weitere Zugkraft in der Zugzone eingeführt. Zur Ableitung der Bemessungsgleichungen wird die Gültigkeit der klassischen Annahmen vorausgesetzt [13]:

- die Hypothese vom Ebenbleiben der Querschnitte (Bernoulli),
- Vernachlässigung der Zugfestigkeit des Betons,
- starrer Verbund zwischen Bewehrung und Beton,
- linearer Dehnungsverlauf im Querschnitt,
- idealisierte Spannungs-Dehnungs-Linien für die Werkstoffe.

Da die Bruchdehnungen der textilen Bewehrungen kleiner sind als die der vorhandenen Stahlbewehrung tritt der Grenzzustand der Tragfähigkeit ein, wenn entweder die Grenzdehnung des Betons in der Druckzone oder die Grenzdehnung der textilen Bewehrung in der Zugzone erreicht wird.

Aus den getroffenen Annahmen ergibt sich die Dehnungs- und Spannungsverteilung im Querschnitt, aus der wiederum die Ersatzkräfte für das innere Kräftegleichgewicht resultieren (Bild 64). Das Gleichungssystem ergibt sich wie üblich aus dem inneren Kräfte- und Momentengleichgewicht. Eine geschlossene Lösung ist nicht mehr

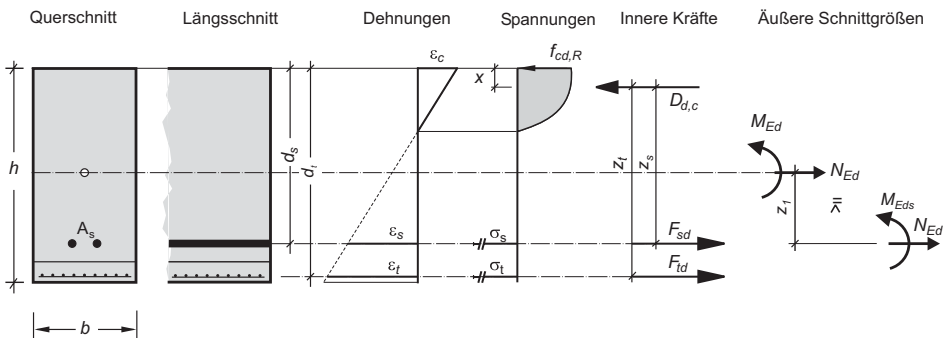


Bild 64. Querschnitt, Dehnungs- und Spannungsverlauf sowie Ersatzkräfte für Querschnittsbemessung für Parabel-Rechteck-Funktion in der Betondruckzone [13]

möglich. Aufgrund der zusätzlichen Unbekannten in der Zugzone kann das Gleichungssystem nur iterativ gelöst werden [13].

Eine näherungsweise geschlossene Lösung ohne Iteration oder Bemessungstafeln gelingt bei Verwendung der rechteckförmigen Spannungsverteilung der Druckzone [111], siehe Bild 65.

Das Biegeproblem wird auf das Gleichgewicht von Druck- und Zugzone zurückgeführt. Die zulässige Betondruckkraft

$$F_{cd} = b \cdot \chi \cdot f_{cd} \cdot k \cdot x = b \cdot f_{cd,R} \cdot x_R$$

mit $f_{cd,R} = \alpha_R \cdot f_{cd}$ steht mit der zulässigen Gesamtkraft F_{rd} der Zugzone (der Resultierenden aus Stahlzugkraft und Textilzugkraft)

$$F_{rd} = F_{sd} + F_{td}$$

im Gleichgewicht. Entsprechend muss die Zugkraft auf den gemeinsamen Schwerpunkt der Bewehrungen bezogen werden. Dazu wird die resultierende statische Höhe entsprechend der Steifigkeiten der Bewehrung ermittelt:

$$d_r = \frac{E_s A_s d_s + E_t A_t d_t}{E_s A_s + E_t A_t}$$

Aus dem Gleichgewicht des inneren und äußeren Momentes um den gemeinsamen Bewehrungsschwerpunkt

$$M_{Edr} = F_{cd} \cdot z_r = b \cdot f_{cd,R} \cdot x_R \cdot \left(d_r - \frac{x_R}{2} \right)$$

erhält man durch Umformen

$$\begin{aligned} \frac{M_{Edr}}{b \cdot f_{cd,R}} &= d_r \cdot x_R - \frac{x_R^2}{2} \rightarrow 0 \\ &= x_R^2 - d_r \cdot x_R + 2 \frac{M_{Edr}}{b \cdot f_{cd,R}} \end{aligned}$$

Als Lösung für diese quadratische Gleichung ergibt sich

$$\omega_{1R} = 1 - \sqrt{1 - 2\mu_{Eds,R}} \leq 1,0$$

mit

$$\omega_{1R} = \frac{x_R}{d_r} \leq 1,0 \quad \text{und} \quad \mu_{Eds,R} = \frac{M_{Edr}}{b \cdot d_r^2 \cdot f_{cd,R}}$$

Der Hebelarm der inneren Kräfte ergibt sich durch Umformen zu

$$z_r = \zeta_r \cdot d_r \quad \text{mit} \quad \zeta_r = 1 - \frac{\omega_{1R}}{2}$$

Mit der nun bekannten Betondruckkraft kann über das Normalkraftgleichgewicht der inneren Kräfte

$$\Sigma N = F_{rd} - F_{cd}$$

eine Bemessung der Zugzone erfolgen. Dazu sind die Kräfte in den einzelnen Bewehrungslagen entsprechend des Anteils der Steifigkeiten und des Hebelarms an der Gesamtzugkraft F_{rd} aufzuteilen:

$$F_{sd} = \begin{cases} \frac{F_{rd}}{\frac{z_s}{z_r} + \frac{E_t A_t}{E_s A_s} \frac{z_t}{z_r}} & \text{für } 0 \leq F_{sd} < F_{s,y} \\ \frac{F_{rd}}{A_s f_{yd}} & \text{für } F_{sd} = F_{s,y} \end{cases}$$

$$F_{td} = \begin{cases} \frac{F_{rd} \frac{E_t A_t}{E_s A_s} \frac{z_t}{z_r}}{\frac{z_s}{z_r} + \frac{E_t A_t}{E_s A_s} \frac{z_t}{z_r}} & \text{für } 0 \leq F_{sd} < F_{s,y} \\ \frac{F_{rd} \cdot z_r - A_s \cdot f_{yd} \cdot z_s}{z_t} & \text{für } F_{sd} = F_{s,y} \end{cases}$$

Bei einer Verstärkungsmaßnahme ist in der Regel eine Betonstahlbewehrung vorhanden, die im Grenzzustand der Tragfähigkeit ins Fließen

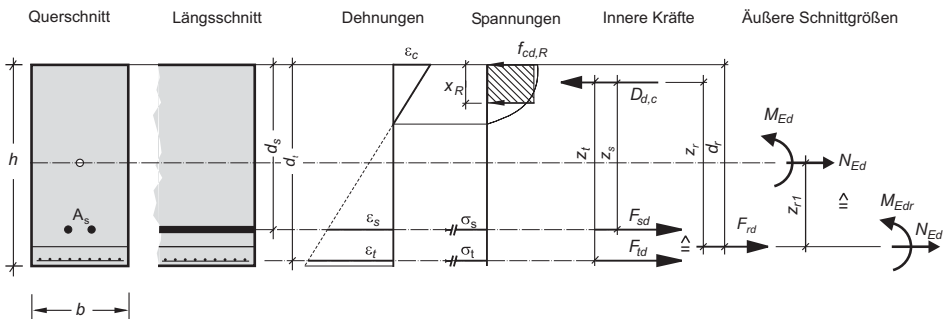


Bild 65. Querschnitt, Dehnungs- und Spannungsverlauf und Ersatzkräfte für Querschnittsbemessung mit rechteckförmiger Spannungsverteilung in der Betondruckzone

kommt. Unter dieser Voraussetzung ist die Berechnung der erforderlichen Textilfläche leicht möglich. Im Nachgang sind mit den ermittelten Kräften und der Druckzonenhöhe die Kompatibilität und die Grenzen der Dehnungen zu überprüfen. Es ist sicherzustellen, dass sich die den ermittelten Kräften entsprechenden Dehnungen tatsächlich einstellen können [111].

7.3.4 Interaktion von Stahl- und Textilbewehrung

Das vorgestellte Bemessungsmodell gibt die tatsächliche Kräfteaufteilung in der Zugzone zwischen Stahlbewehrung und textiler Bewehrung nur bedingt wieder. Aus Gründen der Verträglichkeit ist der Schlupf der Bewehrungen am Riss vorgegeben. Die Spannung in der Bewehrung ist dann von der Verbundsteifigkeit und dem Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Bewehrungsmaterials abhängig. Beide Bewehrungsarten unterscheiden sich im Verbundverhalten und im Verformungsverhalten. Die Gegenüberstellung der Schubspannungs-Schlupf-Beziehungen in Bild 66 verdeutlicht den großen Unterschied der Verbundeigenschaften. Wie bereits gezeigt, beeinflussen sich die Rissbilder in der jeweiligen Bewehrungsebene gegenseitig. Die Kräfteaufteilung zwischen beiden Bewehrungen hängt maßgeblich von folgenden Faktoren ab:

- Verhältnis der Dehnsteifigkeiten,
- Verbundeigenschaften,
- Verhältnis von Verbundumfang und Querschnittsfläche,
- Abstand der Bewehrungsachse zur neutralen Achse,

- Risszustand und vorliegendes Rissbild,
- Belastungsdauer und Geschwindigkeit.

Die Lösung der Differenzialgleichung des verschieblichen Verbundes ermöglicht die Beschreibung von Dehnungen, Spannungen und Verschiebungen (Rissöffnungen) der Bewehrung in Abhängigkeit der Rissbreite. Unter Kenntnis der Querschnittsgeometrie und der Materialparameter kann auf diese Weise die Kräfteaufteilung zwischen verschiedenen Bewehrungen mit unterschiedlichem Material- und Verbundverhalten ermittelt werden. Umfangreiche Untersuchungen zu dieser Problematik liegen bereits für Umlagerungen in Spannbetonbauteilen [91] und geklebten FVK-Verstärkungen [117] vor. Für Textilbeton wurden in [112] die Filamentgarne als homogener Querschnitt idealisiert und mit dazu kompatiblen, an Auszugversuchen ermittelten Schubspannungs-Schlupf-Beziehungen abgebildet. Ein charakteristisches Ergebnis der Simulation am Zugstab ist in Bild 67 dargestellt.

Bild 67a zeigt die Aufteilung der Zugkraft zwischen Stahlbewehrung und textiler Bewehrung. Beginnend mit dem Erstriss steigen die Spannungen in beiden Bewehrungen an, wobei der Anstieg im Stahl aufgrund der größeren übertragbaren Verbundspannung steiler ausfällt. Mit Erreichen der Fließspannung stagniert der Spannungszuwachs im Bewehrungsstahl und verhardt bei weiterer Belastung (Rissöffnung) auf nahezu konstantem Niveau. Ab diesem Punkt erhöht sich der Spannungsgradient der Textilbewehrung deutlich. Die zusätzliche Belastung bei steigender Rissöffnung wird nahezu ausschließlich von der textilen Bewehrung aufgenommen. Der Versagenszustand

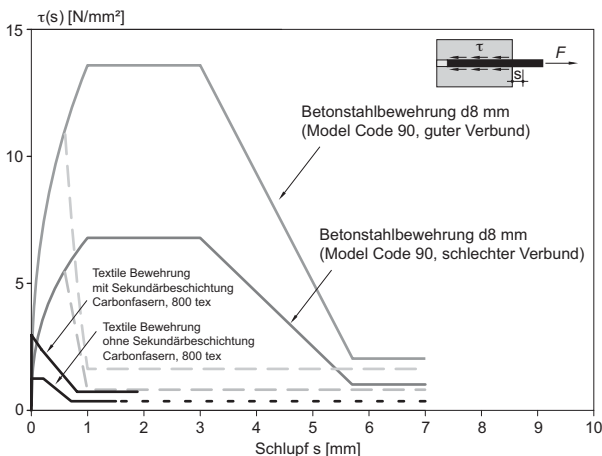


Bild 66. Unterschiedliche Verbundeigenschaften von Textilien und Stahlbeton [112]

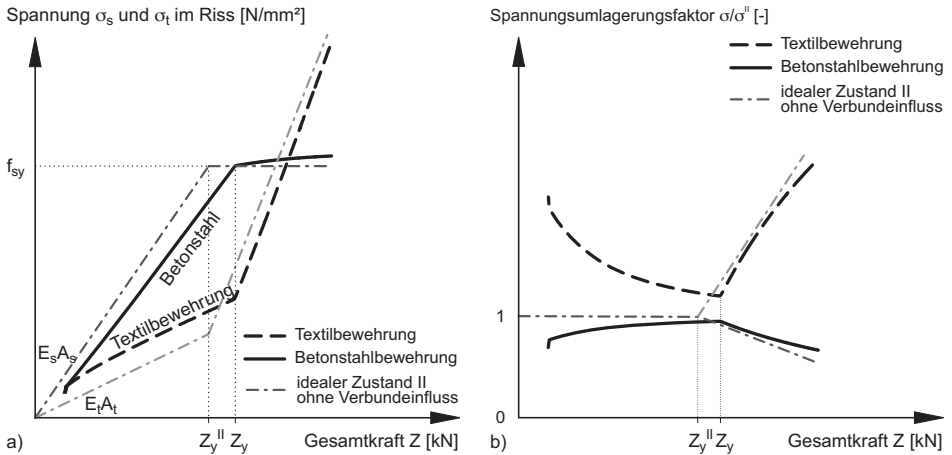


Bild 67. Beispielhafte Ergebnisse einer Parameterstudie zu Umlagerungen [112]; a) Spannungen in der Bewehrung, b) Spannungsumlagerungen

tritt ein, wenn die textile Bewehrung bei Erreichen der Grenzzugdehnung auf Zug versagt.

Der Unterschied zum idealisierten Zustand II (ohne Verbundeinfluss) zeigt die Größe der verbundbedingten Umlagerungen (Bild 67b). Sie wachsen bis zum Erreichen der Fließspannung des Stahls, sinken danach wieder und sind im GZT von untergeordneter Bedeutung [112]. Die verbundbedingten Spannungsumlagerungen bezogen auf den idealisierten Zustand II (ohne Verbundeinfluss) werden als Spannungsumlagerungsfaktor im Bild 67b dargestellt. Faktoren größer 1,0 stehen für eine Umlagerung auf die Bewehrung, Faktoren kleiner 1,0 für eine Entlastung. Ab dem Fließen des Stahls werden die Umlagerungen durch die textile Bewehrung dominiert [112].

Gegenstand der laufenden Forschungen ist eine Übertragung auf Biegebauteile und die Ableitung von Verbundbeiwerten für das Zusammenwirken von textiler Bewehrung und Stahlbewehrung. Ziel ist die Entwicklung wirklichkeitsnäherer und wirtschaftlicher Bemessungsmodelle.

7.3.5 Langzeitverhalten

Erfahrungen zum Langzeitverhalten liegen in Form von Vier-Punkt-Biegeversuchen an mit verschiedenen Materialien verstärkten Stahlbetonplatten mit einer Dauerlast in Höhe von 70 bzw. 85 % der Bruchlast über einen Zeitraum von ca. 300 Tagen vor. Ein Versagen oder Indizien eines sich ankündigenden Versagens waren nicht feststellbar. Für verstärkte Platten mit Carbonfasern

ergab der anschließende Traglastversuch eine Resttragfähigkeit geringfügig über der Kurzzeitfestigkeit. Bei einer verstärkten Platte mit AR-Glasfaserbewehrung lag die Resttragfähigkeit ca. 8 % unter dem Vergleichswert der Kurzzeitfestigkeit [111].

Die wenigen bisher vorliegenden Daten zum Langzeitverhalten unter Belastung bestätigen die positiven Eigenschaften der Carbonbewehrung auch bei hohem Dauerlastanteil. Trotz der kleinen Datenbasis muss bei Verwendung von AR-Glas hingegen nur eine bedingte Eignung bei hohem Dauerlastanteil konstatiert werden.

7.3.6 Brandverhalten und Brandwiderstand

Bei Verstärkungen im Innern von Gebäuden sind Anforderungen an den Brandwiderstand zu erfüllen. Aus durchgeführten Brandversuchen lassen sich erste Aussagen zum Verhalten von Stahlbetonplatten mit Biegeverstärkung aus Textilbeton treffen. Geprüft wurden bisher 9 verstärkte Stahlbetonplatten mit unterschiedlichen Bewehrungen und Belastungsniveaus. Als Bewehrung kamen unbeschichtete und sekundär beschichtete Textilien aus AR-Glasfasern und Textilien aus sekundär beschichteten Carbonfasern zur Anwendung. Aus der an Referenzplatten ermittelten Tragfähigkeit wurde ein fiktives Gebrauchslastniveau in Höhe von 50 % der Bruchlast festgelegt [44]. Vor dem Brandversuch wurden die Platten alle bis 125 % der fiktiven Gebrauchslast statisch belastet und anschließend unter einem statischen Belastungsniveau zwischen 66 und 125 % der fiktiven Gebrauchslast einer Brandbelastung entsprechend

der Einheits-Temperaturkurve (ETK) mit einer Dauer von 60 bzw. 90 Minuten ausgesetzt.

Während der Brandbelastung war zunächst ein wegen der ungleichförmigen Temperaturbelastung bedingter Verformungszuwachs feststellbar. Die erwarteten Abplatzungen traten nicht auf. Auch nach 90 Minuten Branddauer waren keine Abplatzungen an den Probekörpern feststellbar. Nach dem Brand war ein sehr regelmäßiges Rissbild sichtbar. Die Rissabstände entsprachen den Positionen der Garne der textilen Bewehrung, vgl. Bild 68. Bei einem fiktiven Gebrauchslastniveau von 66 bzw. 100 % trat bis zu einer Versuchsdauer von 90 Minuten kein Versagen ein. Bei 125 % Gebrauchslast versagten die verstärkten Platten nach 46 Minuten (textile Bewehrung aus AR-Glas mit Sekundärbeschichtung) bzw. 70 Minuten (textile Bewehrung mit sekundärbeschichteten Carbonfasern) durch Zugbruch der textilen Bewehrung.

Bei den Probekörpern, die während der Brandbelastung nicht versagten, wurde anschließend im Vier-Punkt-Biegeversuch die Resttragfähigkeit

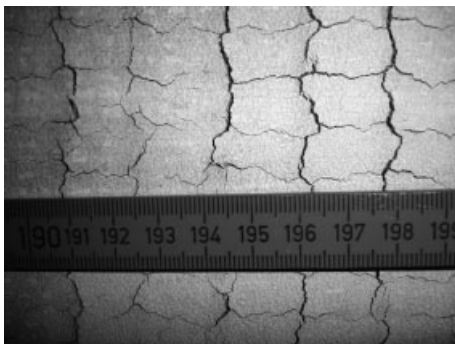
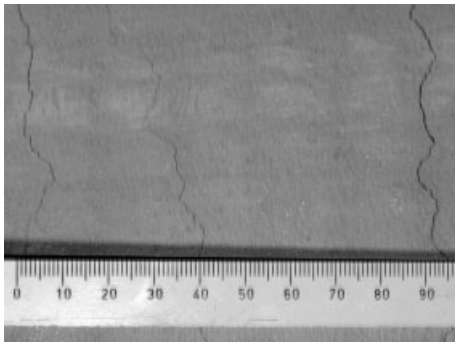


Bild 68. Typische Rissbilder von verstärkten Stahlbetonplatten vor und nach der Brandbelastung [112]; a) vor der Vorbelastung, b) nach der Brandbelastung

bestimmt. Bei den Verstärkungen aus AR-Glas entsprach die Resttragfähigkeit etwa der unverstärkten Referenzplatte. Die textile Bewehrung aus AR-Glas hatte durch die Brandbeanspruchung ihre Tragfähigkeit nahezu vollständig verloren. Bei verstärkten Platten mit Carbonfasern konnte eine signifikante Verstärkungswirkung gegenüber der unverstärkten Referenzprobe auch nach der Brandbeanspruchung ermittelt werden.

Die bisher vorliegenden Versuchsergebnisse sind hinsichtlich eines nennenswerten Brandwiderstandes textilbetonverstärkter Konstruktionen außerordentlich vielversprechend. In einem derzeit laufenden Forschungsvorhaben des Sonderforschungsbereiches 528 werden die Mechanismen des Tragverhaltens unter Brandbelastung detaillierter untersucht. Es wird davon ausgegangen, dass die durch die textile Bewehrung initiierten fein verteilten Risse bis in die Altbetonschicht hinein reichen und dem Dampfdruck sehr wirksame Entspannungsmöglichkeiten bieten. Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt ist das temperaturabhängige Tragverhalten der Verstärkungsschicht aus Textilbeton. Da auch die Eigenschaften des Betonstahls, des Betons und des Verbundes zwischen Beton und Stahlbewehrung eine ausgeprägte nichtlineare Temperaturabhängigkeit zeigen, können die während der Brandbelastung ablaufenden Lastumlagerungen zwischen textiler und stählerner Bewehrung derzeit noch nicht detailliert erklärt werden. Gelingt dies jedoch, wäre ein Einsatz von Textilbetonverstärkungen auch mit einer Heißbemessung bis hin zur Bauwerksklasse 4 (nach Musterbauordnung) denkbar.

7.4 Querkraftverstärkung

7.4.1 Verstärkungsaufgabe

Die Beschreibungen des Lastabtrags für Querkraft beruhen im Wesentlichen auf zwei Modellen: dem Druckbogen-Zugband-Modell und dem Fachwerk mit Druck- und Zugstreben. Das Druckbogen-Zugband-Modell besitzt eine hohe Steifigkeit und dominiert den Lastabtrag bei geringen Schubschlankheiten¹⁵⁾ a/d . Das Fachwerkmodell ist weicher und übernimmt mit steigender Schubschlankheit a/d einen größeren Lastanteil. Das Querkraftversagen eines Bauteils kann einem von vier Versagensarten zugeordnet werden [68] (vgl. Bild 69):

¹⁵⁾ Bei der Belastung eines Balkens durch eine Einzellast wird bei der Betrachtung des jeweiligen Schubfeldes der Quotient aus dem Abstand a zwischen Einzellast und Auflager und der statischen Nutzhöhe d als Schubschlankheit bezeichnet (vgl. Bild 69)

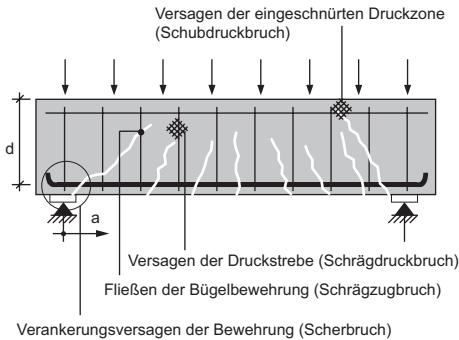


Bild 69. Unterscheidung der Querkraftversagensarten von Biegebauteilen mit Schubbewehrung

- Bei geringen Schubslankheiten ($a/d < 1,5$) werden die Lasten vorwiegend über ein Sprengwerk mit Zugband direkt in die Auflager abgetragen. Das Versagen tritt durch Verankerungsversagen der Bewehrung im Auflager oder durch Versagen der Druckzone ein und wird als Scherbruch bezeichnet.
- Bei mittleren Schubslankheiten ($1 < a/d < 3$) ist der Schubdruckbruch typisch. Er entsteht, wenn ein Biegeriss bei steigender Belastung wächst und die Druckzone einschnürt. Mit zunehmender Rissbreite sinkt der über Rissreibung abtragbare Lastanteil und es findet eine Lastumlagerung in die Druckzone statt. Bei ausreichender Bügelbewehrung wird die Ausbildung eines Sprengwerks unterstützt. Das Versagen tritt durch Druckbruch des Betons ein.
- Bei hohen Schubslankheiten ($a/d > 3$) werden die Querkraften vorrangig durch das Fachwerkmodell mit Zugstreben in Form der Bügelbewehrung und schrägen Betondruckstreben abgetragen. Versagt die Bügelbewehrung, spricht man von einem Schrägzugbruch, bei Versagen der Betondruckstreben von einem Schrägdruckbruch.

Neben dieser stark vereinfachten Modellvorstellung wird das Tragverhalten noch durch die Rissreibung, die Dübelwirkung und einwirkende Längskräfte maßgeblich beeinflusst. Eine Querkraftverstärkung mit Textilbeton kann die Tragfähigkeit der Zugstreben erhöhen und eignet sich in erster Linie für Bauteile mit mittlerer und hoher Schubslankheit, bei denen eine nicht ausreichende Bügelbewehrung die Querkrafttragfähigkeit begrenzt. Die Verstärkung wird seitlich an den Stegen appliziert.

Das vollständige Umschließen der Druck- und Zugzone ist Voraussetzung für eine hohe Wirksamkeit der Querkraftverstärkung. Ist es nicht möglich, Druck- und Zugzone zu umschließen, so ist besonderes Augenmerk auf eine ausreichende Verankerung der Querkraftverstärkung zu legen: Ggf. sind zusätzliche Verankerungsmaßnahmen erforderlich. Die Effizienz der Verstärkung kann erhöht werden, wenn die textilen Bewehrungen so angeordnet werden, dass die Rovings die sich ausbildenden Druckstreben im rechten Winkel kreuzen.

7.4.2 Tragverhalten

Experimentelle Untersuchungen

Die Wirksamkeit von Querkraftverstärkungen mit Textilbeton wurde an Balken ohne Schubbewehrung mit Rechteckquerschnitt und an Plattenbalken mit Schubbewehrung untersucht.

Die Rechteckbalken für den Vier-Punkt-Biegeversuch besaßen eine Spannweite von 4,50 m bei einer Höhe von 30 cm und einer Breite von 15 cm. Die Prüflast wurde 1 m vom Auflager entfernt eingeleitet, was einer Schubslankheit von $a/d = 4$ entspricht. Im Versuchsprogramm wurden die Anzahl der Verstärkungslagen und die Ausbildung der Verankerung variiert. Bei Variante 1 wurde das Textil vollständig um den Querschnitt gewickelt, wobei es sich an der Oberseite überlappte (vollständige Verankerung). Bei Variante 2 wurde die Verstärkung U-förmig appliziert. Sie endete an der Oberkante der Träger. Die Textilbetonverstärkung wurde nur in den 1 m langen Randbereichen der Balken zwischen den Auflagern und den Lasteinleitungspunkten angebracht.

Die Geometrie der verwendeten Stahlbeton-Plattenbalken ist in Bild 70 dargestellt. Die Bügelbewehrung entspricht der Mindestschubbewehrung nach DIN 1045-1. Die Verstärkungsschicht aus Textilbeton wurde über die gesamte Trägerlänge U-förmig um den Steg appliziert und endete an der Unterkante der Platte.

Weitere Versuche an Balken und Plattenbalken mit realitätsnahen Abmessungen und ähnlichen Ergebnissen finden sich in [94].

Für die Querkraftverstärkung wurde eine spezielle textile Struktur entwickelt (Bild 71). Die Verstärkungsfäden verlaufen unter 45° , um sich der Richtung der Hauptzugspannungen anzupassen. In Kettrichtung ist ein Hilfsfaden eingearbeitet, der planmäßig keine Bewehrungsfunktion übernimmt, sondern für eine ausreichende Strukturstabilität sorgt.

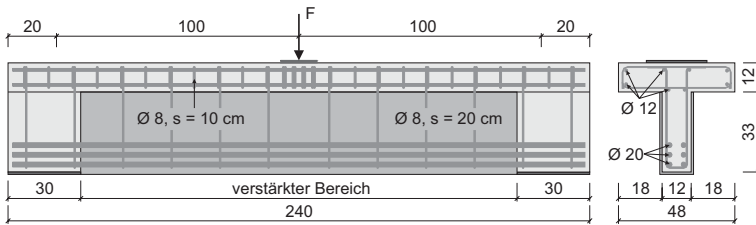


Bild 70. Geometrie der Plattenbalken mit Bügelbewehrung und Textilbetonverstärkung [30]

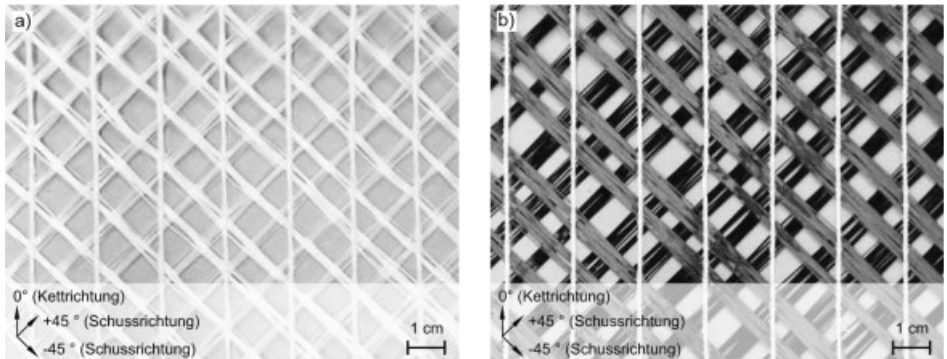


Bild 71. Für die Querkraftverstärkung entwickeltes Textil aus AR-Glas und aus Carbon mit Verstärkungsfäden in $\pm 45^\circ$ -Richtung und Stabilisierungsfäden in Kettrichtung; a) Variante aus AR-Glas, b) Variante aus Carbon

Kraft-Verformungs-Verhalten

Das Diagramm in Bild 72 zeigt das typische Kraft-Verformungs-Verhalten des unverstärkten Referenzbalkens und verschiedener verstärkter Rechteckbalken. Im Gegensatz zu einer Biegeverstärkung zeichnen sich die verstärkten Bauteile hier nicht durch eine messbar höhere Steifigkeit aus, denn in dem für die Verformung wesentlichen Bereich in Trägermitte wurde die Verstärkung ausgespart. Der unverstärkte Referenzbalken versagte bei 117 kN aufgrund eines von einem Schubriss ausgehenden Verankerungsversagens der Stahlbewehrung. Bei den verstärkten Balken wechselte der Versagensmechanismus hin zu einem Schrägzugbruch bei 2-lagiger Textilbetonverstärkung. Bei einem weiteren Balken mit 3-lagiger Verstärkung lag die Querkrafttragfähigkeit über der Biegetragfähigkeit. Die Tragfähigkeit wurde durch ein Versagen der Biegedruckzone begrenzt.

Bezüglich der unterschiedlichen Verankerungen wurden keine Unterschiede im Tragverhalten beobachtet. Ein Verbundversagen trat weder im Altbeton (Typ 1), in Form einer Delamination

(Typ 3), noch als Verankerungsversagen der textilen Bewehrung (Typ 4) auf. Bei der U-förmigen Verstärkung war die seitliche Verankerung in der verbleibenden Druckzone offensichtlich ausreichend [30].

Mit der zweilagigen Textilbetonverstärkung konnte die Querkrafttragfähigkeit der Balken um ca. 45 % gesteigert werden. Mithilfe zweier Rechteckbalken mit unbewehrter Feinbetonverstärkung identischer Schichtdicke und einer dem unverstärkten Balken entsprechenden Tragfähigkeit konnte nachgewiesen werden, dass die beobachtete Tragfähigkeitserhöhung bei Verstärkung mit Textilbeton auf die Wirkung der textilen Bewehrung zurückzuführen ist.

Die Belastungsversuche an den Plattenbalken ergaben ein etwas differenzierteres Ergebnis (Bild 73). Die Tragfähigkeit steigt durch die Verstärkung mit Textilbeton prinzipiell an. Während jedoch bei einer dreilagigen Verstärkung das Versagen durch einen Schrägzugbruch eintrat, wurde die Tragfähigkeit bei höheren Verstärkungsgraden durch die von der Verstärkungsschicht in das Bauteil übertragbare Verbundkraft begrenzt. Bei

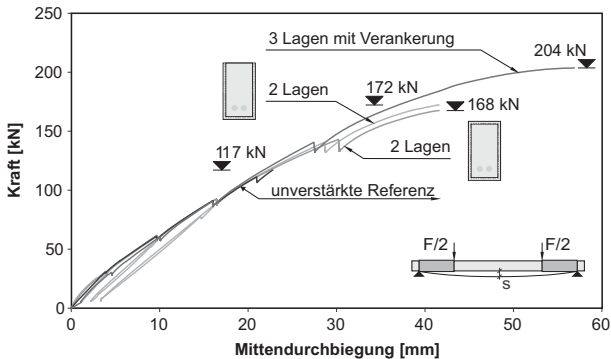


Bild 72. Kraft-Verformungs-Diagramm von verstärkten Rechteckbalken [30]

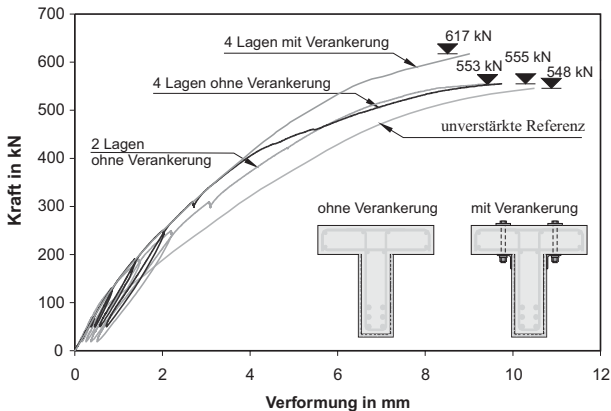


Bild 73. Kraft-Verformungs-Diagramm von verstärkten Plattenbalken [17]

einer vierlagigen Textilbetonverstärkung leitete ein Verbundbruch im Altbeton (Typ 1) das Versagen des Bauteils ein. Außerdem wurden eine Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung (Typ 3) sowie ein Verankerungsversagen der Fasern (Typ 4) festgestellt.

Ob ein Verbundversagen im Altbeton (Typ 1) oder eines in der Ebene der textilen Bewehrung (Typ 3) eintritt, ist von den Beanspruchungen des Verbundes und dem Bauteilwiderstand gegenüber den einzelnen Verbundversagenstypen abhängig. Der Verbund wird durch eine Kombination von Scher- und Haftzugspannungen beansprucht. Die Scherspannungen resultieren aus der Behinderung der Relativverschiebung zwischen dem Stahlbetonquerschnitt und der daran starr gekoppelten Verstärkungsschicht. Werden über den Verbund gleiche Verformungen erzwungen, entstehen als Folge

Normalkräfte (Bild 74). Entlang der Bauteilachse hängt die Beanspruchung des Verbundes von der Dehn- und Biegesteifigkeit der beiden Teilquerschnitte und vom Abstand ihrer Schwerpunkte ab [84]. Aufgrund des stark nichtlinearen Tragverhaltens des bewehrten Betons ist eine geschlossene Lösung des zugehörigen gekoppelten Differenzialgleichungssystems bisher nicht gelungen.

Ausgehend von den beiden Grenzfällen eines vollständig ungerissenen Trägers (Zustand I) und eines vollständig gerissenen Trägers (Zustand II) wurde in Bild 75 der prinzipielle Verlauf der Relativverschiebungen zwischen dem Stahlbetonkörper und der Verstärkungsschicht entwickelt. Im Bereich des maximalen Momentes liegen die Relativverschiebungen an der Grenzlinie für den Zustand II. In Auflagernähe wird sich der Träger

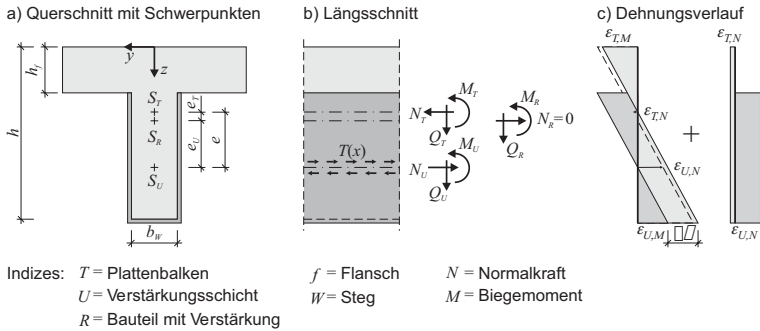


Bild 74. Schnittkraftzerlegung und Dehnungsverlauf am Verbundquerschnitt [84]

weitgehend im Zustand I befinden und die Relativverschiebungen nähern sich der Grenzlinie für den Zustand I an. Generell wächst die Beanspruchung des Verbundes mit sinkender Biegesteifigkeit und steigendem Schwerpunktabstand der Teilquerschnitte [84].

Neben den Scherspannungen in den betrachteten Verbundfugen treten auch Zugspannungen senkrecht zur Betonoberfläche auf. Sie entstehen zum einen durch die nur einseitig in die Verstärkungsschicht eingetragenen Scherspannungen, zum anderen aus der Verankerung der textilen Bewehrung innerhalb der Verstärkungsschicht. Diese Haftzugspannungen und die Scherspannungen überlagern sich und beeinflussen die hinsichtlich der Verbundversagenstypen 1, 3 und 4 erreichbare Querkrafttragfähigkeit [84].

Messungen der Relativverschiebungen bei verstärkten Plattenbalken zwischen Unterkante Platte und Verstärkungsschicht zeigen, dass sich das Ablösen der Verstärkungsschicht durch überproportionales Verformungswachstum bereits bei 30 bis 40 % der Bruchlast ankündigt. Die Größe der gemessenen Relativverschiebungen korreliert mit der Darstellung in Bild 75 [84].

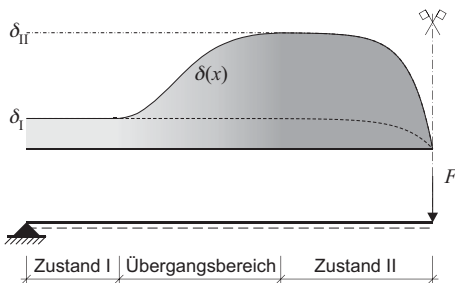


Bild 75. Theoretischer Verlauf der Relativverschiebungen am Einfeldträger [84]

Das Verstärkungssystem kann so ausgelegt werden, dass hinsichtlich des Verbundversagens die Tragfähigkeit des Altbetons (Typ 1) maßgebend wird. Durch eine ausreichende Rautiefe lässt sich das Versagen in der Grenzfläche (Typ 2) vermeiden, durch Auswahl geeigneter textiler Bewehrungen eine Delamination (Typ 3) und ein Verankerungsversagen (Typ 4). Dann wird die Tragfähigkeit nur noch durch die Festigkeit des Altbetons begrenzt.

Durch den Einsatz zusätzlicher mechanischer Verankerungselemente kann die Tragfähigkeit des Verbundes noch gesteigert werden. Untersuchungen hierzu sind Gegenstand der laufenden Forschung.

Rissbildung

Die positive Beeinflussung des Rissbildes kommt im direkten Vergleich von Bild 76 mit Bild 77 zum Ausdruck. Dargestellt sind Aufnahmen bei Erreichen des Bruchzustandes an einem unverstärkten Plattenbalken und einem verstärkten Plattenbalken. Die zahlreichen feinen Risse in der

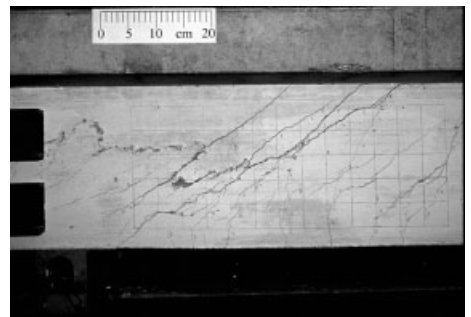


Bild 76. Rissbild eines unverstärkten Plattenbalkens [18]

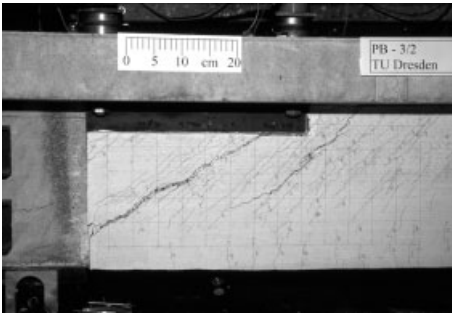


Bild 77. Rissbild eines mit 4 Lagen Textilbeton verstärkten Plattenbalkens [18]

Textilbetonverstärkung verlaufen deutlich flacher als die Risse am unverstärkten Bauteil. Der für das Versagen maßgebende Riss hingegen zeigt in beiden Fällen eine nahezu identische Neigung bezogen auf die Bauteilachse.

7.4.3 Bemessung

Die verbreitete Modellvorstellung zur Beschreibung der Querkrafttragfähigkeit geht auf die Fachwerkanalogie von *Mörsch* zurück. Neben diesem idealisierten Modell aus Zugstreben (Bügelbewehrung, textile Bewehrung) und Betondruckstreben tragen in der Praxis eine Reihe weiterer Mechanismen zum Lastabtrag bei:

- Rissuferverzahnung bzw. Rissreibung,
- Biegesteifigkeit der in der Druckzone eingespannten Betonzähne,
- Dübelwirkung der Längs- und Bügelbewehrung an den Rissen.

Diese Tragwirkungen können zwar in Modellen begründet, aber ihr genauer Anteil in der Praxis schwer erfasst werden. Sie werden zusammenfassend als Betontraganteil bezeichnet. In DIN 1045-1 findet sich derzeit ein empirisch abgeleitetes, an zahlreichen Versuchsdaten kalibriertes Modell.

Bei der Querkraftverstärkung kommt erschwerend hinzu, dass nicht nur die Tragfähigkeit der gemischt bewehrten Zugstreben zu erfassen ist. Aus dem wesentlich feineren Rissbild des verstärkten Bauteils lässt sich ableiten, dass der über Rissreibung übertragene Lastanteil steigt, während die Steifigkeit der in der Druckzone eingespannten Betonzähne möglicherweise geringfügig sinkt. Die bisherigen Erkenntnisse legen nahe, dass die Betondruckstreben im verstärkten Bauteil flacher verlaufen. Damit findet eine Lastumlagerung hin zu den Zugstreben im Fachwerkmodell statt. Die durch die Verstärkung erhöhte Tragfähigkeit der Zugstreben kann durch diesen Mechanismus nur

zu einem Teil in eine höhere Querkrafttragfähigkeit des Bauteils umgesetzt werden [84].

Eine zufriedenstellende Lösung für ein ingenieurmäßiges Bemessungsmodell für Querkraftverstärkungen aus Textilbeton ist Gegenstand laufender Forschungsarbeiten im Sonderforschungsbereich 528, liegt aber bisher nicht vor. Für ein empirisch begründetes Modell ist die Datenbasis bisher nicht ausreichend und in mechanischen Modellen sind die einzelnen Tragwirkungen wegen der Materialstreuungen und der kleinen experimentellen Datenbasis bisher nicht mit ausreichender Genauigkeit erfassbar.

7.5 Normalkraftverstärkung

7.5.1 Verstärkungsaufgabe

Typische Bauteile mit überwiegender Normalkraftbeanspruchung sind Stützen. Mit zunehmender Schlankheit und sinkender Ausmitte gewinnen Tragwerksverformungen (Theorie II. Ordnung) einen wachsenden Einfluss auf die Größe des Biegemomentes im Bruchzustand. Für die Lösung der Bemessungsaufgabe wird das offensichtliche Stabilitätsproblem allerdings in einen Festigkeitsnachweis überführt. Im Grenzzustand der Tragfähigkeit können folgende *Versagenstypen* auftreten:

1. Fließen der Bewehrung auf der mehr gedrückten Querschnittsseite,
2. Fließen der Bewehrung auf der gezogenen Querschnittsseite,
3. Versagen des Betons auf Druck und
4. Ausknicken der Längsbewehrung.

Eine Verstärkung aus textilbewehrtem Beton kann – abhängig vom maßgebenden Versagensmechanismus – auf unterschiedliche Art zur Erhöhung der Tragfähigkeit angewandt werden. Zu den potenziellen Verstärkungsaufgaben:

- Für den Versagenstyp 1 kann eine Textilbetonverstärkung nicht sinnvoll eingesetzt werden, da die Fasern keine Druckkräfte übernehmen können und Textilbetonverstärkungen so dünn sind, dass die zusätzliche Betonschicht nur einen unwesentlichen Beitrag zum Lastabtrag leisten könnte.
- Durch eine in Bauteillängsrichtung aufgebraute textile Bewehrung kann die Tragfähigkeit der Stütze bei Versagenstyp 2 erhöht werden. Das entspricht im Grunde einer Biegeverstärkung und soll hier nicht weiter verfolgt werden. Für den Fall eines Biegezugversagens der Stahlbewehrung sei auf die Ausführungen im Abschnitt 7.3 verwiesen.
- Für den Versagenstyp 3 kann die Tragfähigkeit erhöht werden, wenn es gelingt, durch eine Umschnürung einen mehraxialen Spannungszustand zu erzeugen und so die nutzbare Festigkeit des Kernbetons zu steigern.

- Eine Erhöhung der Tragfähigkeit mittels Übernahme von Druckkräften durch den Feinbeton in der Verstärkungsschicht kann die Tragfähigkeit bei Versagenstyp 3 ebenfalls erhöhen. Da auch für mehrlagige textile Bewehrungen nur wenige Millimeter Feinbeton benötigt werden, ist die Verstärkungswirkung in dieser Hinsicht sehr stark begrenzt.
- Beim Versagenstyp 4 kann die Tragfähigkeit erhöht werden, in dem die Textilbetonverstärkung die Längsbewehrung am Ausknicken behindert.

Da eine Textilbetonverstärkung immer aus einem Textil mit Verstärkungsfasern in Bauteillängs- und -querrichtung sowie Feinbeton besteht, werden stets alle genannten Mechanismen einen Teil zur Erhöhung der Tragfähigkeit beitragen.

Ziel einer Verstärkung von normalkraftbeanspruchten Bauteilen mit Textilbeton ist in erster Linie die *Realisierung einer wirksamen Umschnürung des Kernbetons*. Erste Untersuchungen an runden und quadratischen Stützen haben gezeigt, dass bei runden Stützen eine Umschnürungswirkung aktiviert werden kann, während bei eckigen Stützen mit kleinem Kantenradius keine Umschnürungswirkung sichtbar war [83]. Dies deckt sich mit Erkenntnissen früherer Untersuchungen, nach denen die Tragfähigkeitssteigerung einer Textilbetonverstärkung bei runden Stützen effektiver ist als bei Stützen mit quadratischem Querschnitt [107].

Bei Erdbebenlasten (große horizontale Beanspruchung mit erheblichen plastischen Verformungen) kann die Sicherung der Längsbewehrung gegen Ausknicken und die Vermeidung des Absplitters der Betondeckung einen entscheidenden Beitrag zur Tragfähigkeit leisten [12].

7.5.2 Tragverhalten

Experimentelle Untersuchungen

Die Möglichkeit der Aktivierung einer Umschnürungswirkung wurde in Abhängigkeit der Querschnittsform an einer Versuchsreihe mit kurzen Stützen mit einer Höhe von 300 mm untersucht (Bild 78). Der Querschnitt wurde vom Quadrat mit 150 mm Kantenlänge (Probekörper Nr. 1) bis hin zum Kreis mit 150 mm Durchmesser (Probekörper Nr. 6) abgestuft. Der Ausrundungsradius wurde dabei in Schritten von 15 mm erhöht (Bild 78, Parameterachse 1). Probekörper Nr. 7 dient der Untersuchung des Maßstabeffektes. Die Geometrie ist so gewählt, dass bei verkleinerter Kantenlänge a der Radius r dem zuvor untersuchten Probekörper Nr. 2 entspricht (Parameterachse 2) und gleichzeitig das Verhältnis zwischen Radius und Kantenlänge r/a dem weiteren zuvor untersuchten Probekörper Nr. 3 (Parameterachse 3).

Die zu verstärkenden Stützen bestanden aus einem unbewehrten Normalbeton der Festigkeitsklasse C25/30 mit 8 mm Größtkorn. Die Textilbetonverstärkung besteht aus einem Feinbeton und der textilen Bewehrung, in diesem Fall drei unterschiedlichen biaxialen Gelegen aus Carbon und AR-Glas mit Sekundärbeschichtung (Bild 79).

Das Textil 1 bestand aus AR-Glas Rovings der Feinheit 1200 tex und einem Kettfadenabstand von 7,2 mm (Bild 79a), das Textil 2 aus Carbonfasern der Feinheit 800 tex mit identischem Fadenabstand (Bild 79b) und das dritte aus Carbonfasern der Feinheit 3500 tex mit einem Kettfadenabstand von 10,8 mm. Der Bewehrungsquerschnitt des ersten und zweiten Textils ist etwa gleich, das dritte Textil hat einen wesentlich höheren Fasergehalt. Die Garne in Querrichtung (Schussrichtung) bewirken lediglich die Stabilisierung der Gelege und übernehmen im Versuchskörper keine Bewehrungsfunktion.

Das in Bild 78 dargestellte Versuchsprogramm wurde in 5 Versuchsserien untersucht: In einer Referenzserie mit unverstärkten Proben (Serie 1), in einer Serie mit einer unbewehrten Feinbetonschicht (Serie 2) und mit den drei Typen der textilen Bewehrungen (Serien 3 bis 5), siehe Tabelle 12. Serie 2 dient der Quantifizierung des Traganteils des Feinbetons. Serien 3 und 4 unterscheiden sich in der Lagenanzahl, jedoch nicht in der Dehnsteifigkeit der Bewehrung und Serie 5 wurde mit etwa der 5-fachen Steifigkeit der Bewehrung konzipiert. Die Proben wurden in einer hydraulischen Prüfmaschine weggesteuert bis zum Bruch belastet.

Die Ergebnisse (Bild 80) zeigen, dass der Traganteil des Feinbetons (Serie 2) vernachlässigbar ist [85]. Bei allen Proben mit textiler Bewehrung konnte eine signifikante Steigerung der Tragfähigkeit erreicht werden. Dargestellt ist jeweils der Mittelwert aus beiden Versuchen mit gleicher Probekörpergeometrie innerhalb jeder Serie. Je mehr sich die Stützengeometrie der Kreisform annähert, desto größer ist die Steigerung der Tragfähigkeit.

In Bild 81 ist die Laststeigerung gegenüber der unverstärkten Referenzserie für die jeweilige Probekörpergeometrie dargestellt. Klar erkennbar ist der erhebliche Einfluss der Querschnittsgeometrie. Die Ergebnisse zeigen, dass es keinen Grenz-

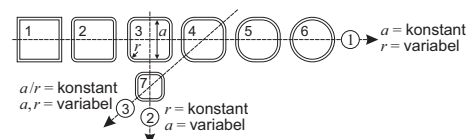


Bild 78. Schematische Übersicht über die variierten Versuchsparameter

Tabelle 12. Übersicht der Verstärkung der einzelnen Versuchsserien [86]

Verstärkung						
Serie	Material	Feinheit	Abstand	Querschnitt	Lagen	Steifigkeit
Nr.		[tex]	[mm]	[mm ² /m]		[MN/m]
1	keine	–	–	–	–	–
2	Feinbeton	–	–	–	0	–
3	AR-Glas	1.200	7,2	61,1	6	27,3
4	Carbon	800	7,2	62,5	2	27,9
5	Carbon	3.500	10,8	179,6	4	146,6

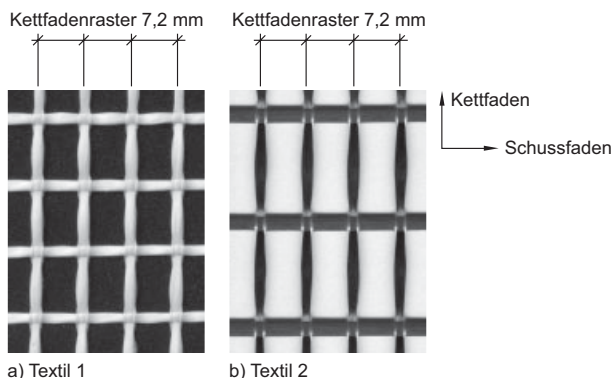


Bild 79. Textile Bewehrungen für die Umschnürung von Stützen

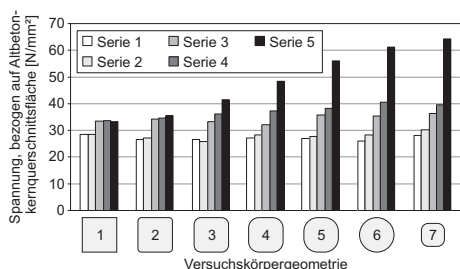


Bild 80. Tragfähigkeit der verstärkten Stützen in Abhängigkeit der Geometrie, Mittelwert aus zwei Proben [86]

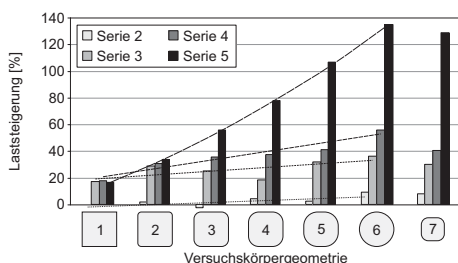


Bild 81. Zuwachs der Tragfähigkeit bei den verstärkten Stützen in Abhängigkeit der Querschnittsgeometrie [86]

radius für die Kantenausrundung gibt, ab der eine Umschnürungswirkung wirksam ist. Stattdessen ergibt sich mit zunehmender Eckausrundung eine kontinuierliche Zunahme der Verstärkungswirkung bzw. der Wirksamkeit der Umschnürung.

Bei runden Stützen entsteht ein weitgehend ungestörter dreiaxialer Spannungszustand innerhalb der Umschnürung. Bei quadratischen bzw. eckigen Stützen wölben sich die Bereiche entlang der Querschnittskanten, denn die Umschnürung kann

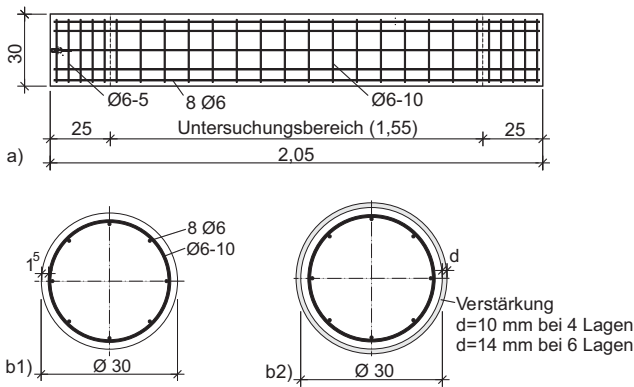


Bild 84. Geometrie und Bewehrung der runden Stahlbetonprobekörper für Torsionsverstärkung [96]; a) Längsschnitt, b) Querschnitte ohne und mit Verstärkung

Zugstreben tragfähigkeit bewirkt. Die verwendete textile Bewehrung aus AR-Glasfasern besitzt Verstärkungsfäden im Winkel von $\pm 45^\circ$ zur Kettrichtung (Bild 85). Das in Kettrichtung verlaufende Garn dient der Stabilisierung der textilen Struktur. Hergestellt und geprüft wurden Probekörper ohne Verstärkung und mit 4 und mit 6 Lagen textiler Bewehrung ertüchtigte Proben. Die einzelnen Lagen wurden mit Übergreifungsstößen von 15 bzw. 23 cm vollständig um die Probekörper gewickelt. Die Stöße in den einzelnen Lagen waren versetzt um den Umfang angeordnet [96]. Als Belastung wurde über hydraulischen Pressen mit Verformungssteuerung ein reines Torsionsmoment eingebracht.

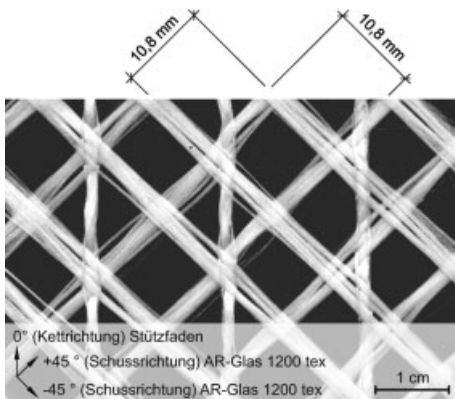


Bild 85. Aufbau der textilen Bewehrung für die Torsionsverstärkung [96]

Tragverhalten

Die Versuchsergebnisse sind als Momenten-Verwindungs-Diagramme in Bild 86 dargestellt. Beim Erreichen der Erstrisslast zeigen alle Proben einen sehr ausgeprägten Steifigkeitsabfall. Die

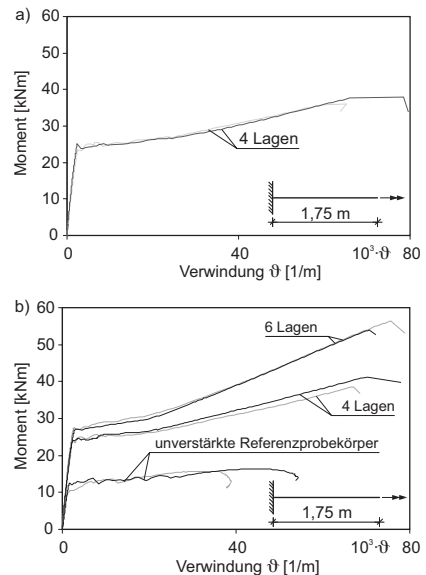


Bild 86. Moment-Verwindungs-Diagramm für Probekörper ohne und mit Torsionsverstärkung aus Textilbeton [96]; a) Verstärkung mit 15 cm Übergreifungslänge, b) Verstärkung mit 23 cm Übergreifungslänge

unverstärkte Referenzprobe verharrt – wie bei Mindestbewehrung nicht anders zu erwarten – bei zunehmenden Verformungen zunächst auf diesem Lastniveau. Nach Abschluss der Rissbildung steigt die Kraft bis zum Erreichen der Tragfähigkeit noch einmal an – bei gleichzeitig starkem Verformungswachstum. Die verstärkten Proben zeigen nach Abschluss der Rissbildung einen ausgeprägten Steifigkeitsanstieg in Abhängigkeit der Anzahl der Verstärkungslagen. Das Versagen tritt plötzlich durch Zugbruch der textilen Bewehrung ein. Die Proben mit 23 cm Übergreifungslänge erreichen etwas höhere Bruchlasten als die mit nur 15 cm Übergreifungslänge.

7.6.3 Bemessungsvorschlag

Vereinfachend kann das mittlere aufnehmbare Gesamttorsionsmoment des verstärkten Kreisquerschnitts als Summe der Torsionstragfähigkeit der Anteile aus dem Stahlbetonquerschnitt und der Textilbetonverstärkung ermittelt werden:

$$T_{Rm} = T_{Rm,s} + T_{Rm,t}$$

mit

$T_{Rm,s}$ mittleres aufnehmbares Torsionsmoment des Stahlbetonbauteils;

$T_{Rm,t}$ mittleres aufnehmbares Torsionsmoment der Textilbetonverstärkung.

Die rechnerische Ermittlung der Tragfähigkeit des Stahlbetonanteils erfolgt nach DIN 1045-1 [119]. Mit dem Stabwerksmodell, welches senkrecht aufeinander stehende Zugstreben und schräge Druckstreben besitzt (Bild 87a), ergibt sich die mittlere Tragfähigkeit des Stahlbetonanteils zu:

$$T_{Rm,s} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot A_{ks} \cdot \frac{A_{sl}}{u_{ks}} \cdot f_{ym,sl} \cdot \tan \theta \\ 2 \cdot A_{ks} \cdot \frac{A_{sw}}{s_w} \cdot f_{ym,w} \cdot \cot \theta \end{array} \right.$$

mit

$T_{Rm,s}$ mittleres aufnehmbares Torsionsmoment (Stahlbeton)

A_{ks} Kernfläche der Stahllängsbewehrung

u_{ks} Umfang der Kernfläche

A_{sl} Querschnittsfläche der Torsionslängsbewehrung

A_{sw} Querschnittsfläche der Bügelbewehrung

s_w Abstand der Bügelbewehrung

$f_{ym,sl}$ mittlere Streckgrenze der Stahllängsbewehrung

$f_{ym,w}$ mittlere Streckgrenze der Bügelbewehrung

θ Druckstrebenwinkel (siehe Bild 87).

Für den Traganteil der Textilbetonverstärkung wird eine modifizierte Variante des Modells aus DIN 1045-1 [119] vorgeschlagen. Das Stabwerkmodell besitzt wendelförmig umlaufende Zug- und Druckstreben (vgl. Bild 87b). Das mittlere aufnehmbare Torsionsmoment durch den Textilbeton $T_{Rm,t}$ ergibt sich zu:

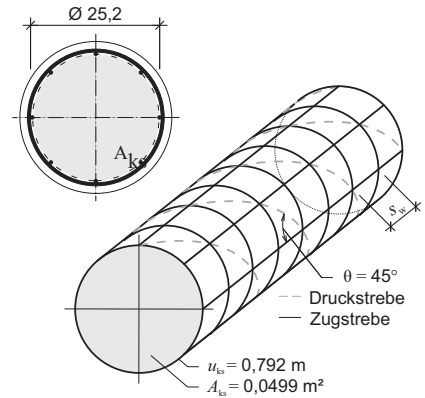
$$T_{Rm,t} = 2 \cdot A_{kt} \cdot \frac{A_t \cdot \sin \alpha}{s_t} \cdot f_{tm} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \cdot k_{\Delta lt}$$

mit

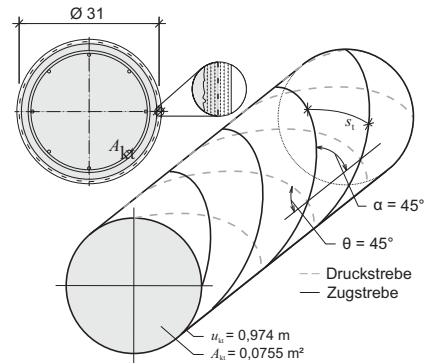
A_{kt} Kernfläche der Textilbewehrung

A_t Querschnittsfläche der Textilbewehrung

s_t Abstand der Rovings



a) Altbeton und Stahlbewehrung



b) Textilbetonverstärkung

Bild 87. Stabwerksmodelle zur Beschreibung der Torsionstragfähigkeit [96]

f_{tm}	mittlere Zugfestigkeit der textilen Bewehrung
θ	Druckstrebenwinkel zur Bauteilachse (Bild 87b)
α	Winkel der Bewehrung zur Bauteilachse (Bild 87b)
$k_{\Delta lt}$	Korrekturfaktor für die Mehrmenge des Textils im Übergreifungsbereich

Der Faktor $k_{\Delta lt}$ beschreibt die Mehrmenge des Textils im Übergreifungsbereich durch:

$$k_{\Delta lt} = \frac{u_{kt} + l_{t,vorh} - l_{t,erf}}{u_{kt}}$$

mit

u_{kt}	Umfang der Kernfläche A_{kt}
$l_{t,vorh}$	vorhandener Übergreifungsbereich des Textils
$l_{t,erf}$	erforderlicher Übergreifungsbereich des Textils

In Bild 88 sind die mit diesem Modell und im Versuch ermittelte Tragfähigkeiten gegenübergestellt und zeigen eine befriedigende Übereinstimmung. Für quadratische Querschnitte finden sich Angaben zu den durchgeführten Versuchen, den Versuchsergebnissen und ein Vorschlag für ein Bemessungsmodell in [95].

7.7 Zusammenfassung

Durch gezielten Einsatz von Textilbeton im Bereich auftretender Zugbeanspruchungen kann die Tragfähigkeit von Stahlbetonbauteilen gesteigert werden. Die wesentlichen Erkenntnisse aus den gezeigten Untersuchungen lauten:

- In allen gezeigten Fällen erhöht sich die Tragfähigkeit der Bauteile im Grenzzustand der Tragfähigkeit signifikant. Besonders ausgeprägt ist die Verstärkungswirkung bei der Biegeverstärkung und bei der Torsionsverstärkung.
- Bei Biege- und Torsionsverstärkung sind die Verformungen auf dem Gebrauchslastniveau aufgrund einer höheren Steifigkeit und des späteren Übergangs in den gerissenen Zustand deutlich kleiner.
- Gegenüber dem unverstärkten Zustand reduzieren sich die Rissbreiten und Rissabstände im Stahlbetonbauteil um den Faktor 2, im oberflächennahen Bereich sogar bis Faktor 10!
- Mit Textilbeton verstärkte Bauteile besitzen eine ausreichende Verformungsfähigkeit, um auch weiterhin die für unbestimmte Tragwerke typischen, rissbildungsbedingten Umlagerungen zu ermöglichen.
- Die Verstärkungsschichten sind in allen Fällen nur einige Millimeter dick. In einer 10 bis 15 mm dicken Verstärkungsschicht können 2 bis 4 Bewehrungslagen eingebaut werden.

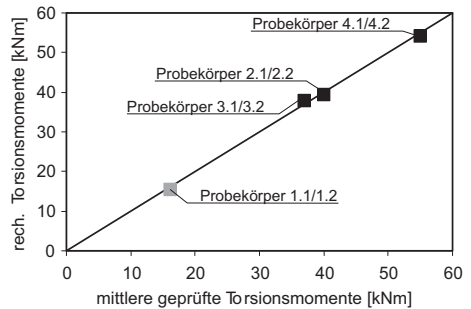


Bild 88. Gegenüberstellung von berechneten Versagenslasten und gemessenen Versagenslasten [96]

Die Verfügbarkeit ingenieurmäßiger Bemessungsmodelle ist für die verschiedenen Arten der Verstärkung unterschiedlich:

- Für *Verstärkungen der Biegezugzone* liegen bisher die umfangreichsten Untersuchungen vor, die Tragmechanismen sind bekannt und es existiert bereits ein brauchbares ingenieurmäßiges Bemessungsmodell. Offen sind noch Fragen der Interaktion zwischen Stabstahlbewehrung und textiler Bewehrung. Die Klärung dieser Frage ist Voraussetzung, um Fehleinschätzungen des Tragverhaltens zu vermeiden, wenn der experimentell abgesicherte Anwendungsbereich verlassen wird.
- Für *Torsionsverstärkungen* steht ebenfalls ein brauchbares Ingenieurmodell für die Bemessung im GZT zur Verfügung. Es liefert eine erstaunlich gute Übereinstimmung zwischen Modellprognose und experimentellem Ergebnis.
- Bei der *Querkraftverstärkung* verhindert derzeit die unzureichende Datenbasis die Entwicklung eines empirisch begründeten Ingenieurmodells. Für ein mechanisch begründetes Modell ist es mit dem derzeitigen Wissensstand nicht möglich, die freien Modellparameter zu bestimmen. Eine Querkraftverstärkung ist derzeit nur auf der Basis eines begleitenden experimentellen Nachweises der Tragwirkung zu empfehlen.
- Für die *Verstärkung normalkraftbeanspruchter Bauteile* liegt ein brauchbarer Vorschlag für den Betontraganteil der Textilbetonverstärkung vor, allerdings ist der Betontraganteil bei praktisch üblichen Dimensionen nicht signifikant. Eine Umschnürung zur Erhöhung der Tragfähigkeit des Kernbetons ist bereits experimentell nachweisbar. Ein ingenieurmäßiges Bemessungsmodell liegt allerdings noch nicht vor. Die Bereitstellung eines solchen Modells ist Gegenstand laufender Forschungsarbeiten.

8 Herstellung von Verstärkungen aus Textilbeton

8.1 Allgemeines

Vor der Ausführung der Verstärkung stehen die Bestandsaufnahme und die Ermittlung des Verstärkungsbedarfs an. Diese Teilaufgaben sind nicht Thema dieses Beitrags. An dieser Stelle sei daher auf hervorragende Fachbeiträge anderer Autoren verwiesen. So gibt es bereits umfassende Darstellungen zur Tragwerksplanung im Bestand [45], zur zerstörungsfreien Prüfung und Zustandserkundung [106] oder zur Schadensidentifikation von Betonstrukturen [105].

Grundsätzlich gehören Verstärkungsarbeiten immer in die Hand eines erfahrenen Unternehmens. Für die Herstellung von Verstärkungen aus textilbewehrtem Beton wird dringend empfohlen, dass das mit der Ausführung beauftragte Unternehmen einschlägige Erfahrungen bei der Verarbeitung von Spritzbeton und Betonersatzsystemen vorweisen kann. Als Nachweis sollte der Bauherr die Ausbildung als Düsenführer nach ZTV-ING [19] und den SIVV-Befähigungsnachweis [40] fordern. Zusätzlich muss Erfahrung im Umgang mit textilen Bewehrungen vorhanden sein. Da bei der Einführung einer neuen Technologie die Zahl der Anbieter mit einschlägigen Erfahrungen zunächst gering ist, bietet das Deutsche Zentrum Textilbeton (DZT) entsprechende Praxiskurse zum Erlernen des notwendigen theoretischen Hintergrundes und der praktischen Handhabung an. Kontaktadressen sind am Ende des Beitrags aufgeführt.

8.2 Untergrundvorbereitung

Für die Übertragung der Kräfte in die Verstärkungsschicht ist ein guter Verbund zwischen der bestehenden Konstruktion und der Verstärkungsschicht von entscheidender Bedeutung. Betonoberflächen erreichen im Regelfall ohne besondere Behandlung keine ausreichende Verbundtragfähigkeit. An neueren Bauteilen können Reste von Trennmitteln und Zementschlämme vorhanden sein. An älteren Bauteilen stehen häufig organische Aufwachsungen (z. B. Moos) und andere Verunreinigungen sowie durch Bewitterung wenig tragfähige Oberflächenschichten einem guten Verbund entgegen.

Durch ein geeignetes Verfahren sind diese wenig tragfähigen, arteigenen und artfremden Schichten an der Oberfläche zu entfernen, bis das Größtkorn des Altbetons freigelegt ist. Dafür stehen mehrere Verfahren zur Verfügung [51]:

- Stemmen,
- Hochdruckreinigen und Druckwasserstrahlen,
- Sandstrahlen bzw. Strahlen mit festen Strahlmitteln,

- Hochdruckwasserstrahlen,
- Flammstrahlen,
- Betonfräsen,
- Schleifen.

Für ausführliche Informationen zu Standardverfahren und nichtkonventionellen Verfahren zur Oberflächenbearbeitung, deren Funktionsprinzipien, Anwendungsbereich, Effektivität und Kosten wird auf weiterführende Literatur verwiesen [100].

Die Tragfähigkeit des Untergrundes kann mit einem Haftzugprüfgerät ermittelt werden. Nach ZTV-ING [19] gelten als Mindestwert der Oberflächenzugfestigkeit $1,5 \text{ N/mm}^2$.

Zur Vorbereitung einer Betonoberfläche für die Verstärkung mit Textilbeton eignet sich Sandstrahlen am besten. Es ist bis 5 mm Abtragsstärke zugleich auch das wirtschaftlichste Verfahren (Bild 89). Der große Staubanfall kann durch Befeuhtung reduziert werden.

Das Stemmen bietet sich zur Entfernung lokaler Fehlstellen (Kiesnester) an, alternativ auch Wasserstrahlen mit Drücken bis 500 bar. Hochdruckwas-

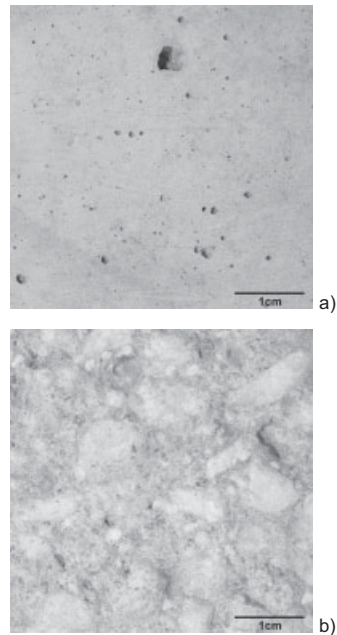


Bild 89. Betonoberflächen; a) unbehandelte, völlig ungeeignete Betonoberfläche und b) sandgestrahlte Betonoberfläche mit freigelegtem Größtkorn als Voraussetzung für einen innigen Verbund zur Verstärkungsschicht

serstrahlen erzeugt eine sehr raue Oberfläche und eignet sich eher für große Abtragtiefen. Flammstrahlen, Betonfräsen und Schleifen sind aus verschiedenen Gründen weniger gut geeignet [51].

Für die Rauheit gibt es in den einschlägigen Vorschriften Richtgrößen. Für Verstärkungen aus Textilbeton wurde gezeigt, dass eine mittlere Rautiefe von $R_t = 1 \text{ mm}$ für eine ausreichende Verzahnung zwischen Feinbetonmatrix und Altbetonuntergrund sorgt [82]. Die Rautiefe kann mit dem Sandflächenverfahren nach Kaufmann ermittelt werden [66]. DIN 1045-1:2008-08, 10.3.6 (1) definiert für die Rauigkeit und Oberflächenbeschaffenheit die Begriffe „sehr glatt“, „glatt“, „rau“, „verzahnt“. Die für Textilbetonverstärkungen erforderliche Rauheit entspricht der Definition rau und sollte durch Freilegen der Gesteinskörnung bzw. des tragfähigen Korngerüsts erreicht werden. Das Größtkorn muss sichtbar sein.

Vor dem Beginn der eigentlichen Verstärkungsarbeiten müssen größere Unebenheiten, lokale Ausbrüche und Fehlstellen in einem separaten Arbeitsgang mit einem auf den Untergrund abgestimmten Betonersatzsystem ausgeglichen bzw. verschlossen werden. Vorhandene größere Risse ($> 0,5 \text{ mm}$) sollten verpresst werden.

Vor dem Betonauftrag muss oberflächlich anhaftender Staub gründlich entfernt und die Oberfläche gut vorgemischt werden, damit den dünnen Betonschichten nicht das für die Hydratation notwendige Wasser zu schnell entzogen wird. Die Intensität des Vornässens ist auf die Saugfähigkeit des Untergrundes abzustimmen und ggf. innerhalb von 24 Stunden vor der Betonage mehrfach zu wiederholen. Optimal ist es, wenn die Oberfläche über einen längeren Zeitraum matt feucht bleibt. Stehendes Wasser auf der Bauteiloberfläche ist zu vermeiden.

8.3 Ausführung

Zur Applikation des Feinbetons unter den Bedingungen einer Ortbetonbaustelle eignet sich in den meisten Fällen das Sprühverfahren (s. Abschn. 5.3) am besten. Durch die Aufprallenergie ergibt sich eine gute Verzahnung mit dem rauen Betonuntergrund. Gleichzeitig wird der Beton verdichtet, wodurch die Druckfestigkeit von gespritztem Feinbeton um bis zu 15 % über der von „normal“ betonierten Vergleichsproben liegt. Grundsätzlich sind die höhere Betondruck- und -zugfestigkeit vorteilhaft für die Wirksamkeit der Verstärkung, insbesondere hinsichtlich des Vermeidens eines Delaminationsversagens.

Es wurde allerdings in Abschnitt 5.3 bereits darauf hingewiesen, dass zu hohe Spritzdrücke nicht nur zu einer großen Rückprallmenge führen, sondern dass die empfindlichen Fasern beim Aufbringen

der darüber liegenden Feinbetonschicht geschädigt werden können und damit an Zugfestigkeit verlieren. Aus diesem Grund sind mit den vorgesehenen Geräten Eignungsprüfungen mit variiertem Spritzabstand durchzuführen. Dazu werden in kleinformartige Spritzformen mit den Abmessungen von $30 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ Materialproben mit ein oder mehreren Bewehrungslagen gespritzt. Aus den Scheiben werden dann streifenförmige Materialproben mit Abmessungen von 6 cm Breite, 55 cm Länge geschnitten und im Dehnkörperversuch geprüft. Beurteilt werden Rissbildung, Verformungsverhalten, Festigkeit und Versagensmodus. Anhand dieser Werte kann durch Vergleich mit Referenzproben die Eignung von Spritzgerät und Spritzdruck eingeschätzt werden.

Auf horizontalen Flächen, die von oben verstärkt werden sollen, ist die Problematik der Zulässigkeit des Spritzverfahrens¹⁶⁾ zu beachten. Die Autoren vertreten die Meinung, dass mit einer – ohnehin notwendigen – Absenkung des Sprühdruks und einer geeigneten Feinbetonrezeptur quasi rückprallfrei gespritzt werden kann. Unter Laborbedingungen konnten in zahlreichen Versuchen sehr positive Erfahrungen gesammelt werden. Die Sprühtechnik mindert auch die Staubbelastung für das Personal und damit Aufwendungen für Gesundheitsschutz und Reinigung. Ohne Sprühnebel an der Düse sind zudem bessere Voraussetzungen für die Herstellung einer gleichmäßigen Feinbetonschicht gegeben, weil der Düsenführer die Arbeitsstelle ungehindert einsehen kann.

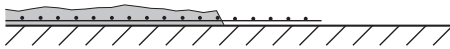
Alternativ – und besonders in schwer zugänglichen Bereichen zu empfehlen – ist auch lagenweises Laminieren von Hand möglich: Dabei ist jedoch insbesondere bei der ersten Feinbetonlage auf eine gute Verbindung des frischen Betons mit dem Altbeton zu achten. Problematisch kann eine mehrlagige Applikation sein, wenn bei händischem Auftrag des Feinbetons Gefügestörungen in älteren Lagen verursacht werden. Abgesehen von der Schwierigkeit, derartige Fehler zu bemerken, muss in solchen Fällen die gesamte Verstärkungsschicht erneuert werden.

Bei kleineren Flächen bis ca. 5 m^2 und ohne größere Öffnungen können die Verstärkungsarbeiten in der Regel ohne besonderen Planungsaufwand ausgeführt werden. Je nach Saugfähigkeit des Untergrundes und in Abhängigkeit von der Ge-

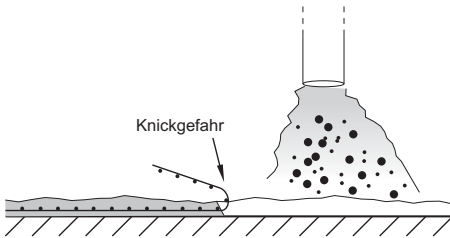
¹⁶⁾ Spritzbeton darf nach einschlägigen Vorschriften nicht auf horizontale Flächen von oben aufgebracht werden. Der anfallende Rückprall würde auf der Oberfläche zu liegen kommen und den Verbund sowie die Mischungszusammensetzung negativ beeinflussen.

schwindigkeit des Feinbetonauftrags und den Witterungsbedingungen müssen größere Flächen jedoch in Abschnitten hergestellt werden. Wenn der Wasserverlust der planmäßig nur 3 bis 5 mm dünnen Feinbetonschichten zu hoch ist, steifen sie u. U. so schnell an, dass das Eindrücken und Einarbeiten der textilen Bewehrung nicht mehr möglich ist. Zur Vermeidung solcher Probleme können einerseits zur Bestimmung der Verarbeitungszeiten Probeflächen angelegt werden, andererseits haben ein eingespieltes Team und geeignete Hilfsmittel entscheidenden Einfluss auf den Arbeitsfortschritt bei der Einbettung der textilen Bewehrung und damit auf die Größe der in einem Betonierabschnitt ausführbaren Fläche.

Bei langen Flächen kann das Problem zum Teil gelöst werden, indem die Arbeitsgänge Feinbeton-



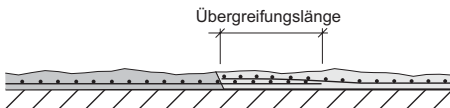
a) 1. Betonierabschnitt mit überstehender Bewehrung



b) 2. Betonierabschnitt mit zurückgebogener Bewehrung



c) Bewehrung wird in 2. Betonierabschnitt eingebettet



d) 2. Bewehrungslage mit Übergreifungslänge einbetten

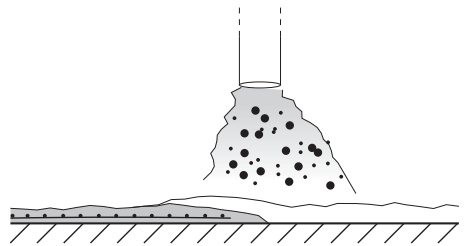
Bild 90. Ausführung der Arbeitsfuge mit Anschlussbewehrung wie im Stahlbetonbau (Variante A)

auftrag, Einbetten und Einarbeiten des Textils nicht abwechselnd, sondern kontinuierlich und versetzt ausgeführt werden. Ab einer bestimmten Größe oder geometrischen Komplexität ergibt sich aber in jedem Fall die Notwendigkeit von Arbeitsfugen. Für die Ausführung von Arbeitsfugen bieten sich zwei Varianten an:

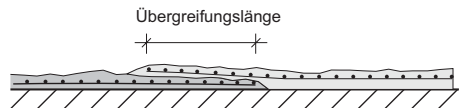
- Bei *Variante A* (Bild 90) wird die Arbeitsfuge nach dem gleichen Prinzip hergestellt wie im Stahlbetonbau. Die Bewehrung steht über den 1. Betonierabschnitt über, wird für das Einbringen des Feinbetons zurückgeklappt, dann in den frischen, 2. Betonierabschnitt eingebettet. Anschließend kann die zum 2. Betonierabschnitt gehörende Bewehrung direkt darauf eingearbeitet werden. Kritisch ist der Moment des Zurückklappens, bei dem darauf geachtet werden muss, dass der Biegeradius an die Steifigkeit der Bewehrung angepasst wird. Ist der Biegeradius zu klein, kann die Bewehrung am Ansatz knicken und Schaden nehmen (Bild 92).
- Bei *Variante B* (Bild 91) wird die Bewehrung vollständig eingebettet und die zu stoßende, 2. Lage in eine auf den ersten Betonierabschnitt überlappend aufgetragene Feinbetonschicht eingebettet.



a) 1. Betonierabschnitt mit eingebetteter Bewehrung



b) 2. Betonierabschnitt überlappt mit 1. Betonierabschnitt



c) 2. Bewehrung mit Übergreifung einbetten

Bild 91. Ausführung der Arbeitsfuge mit indirektem Anschluss (Variante B)

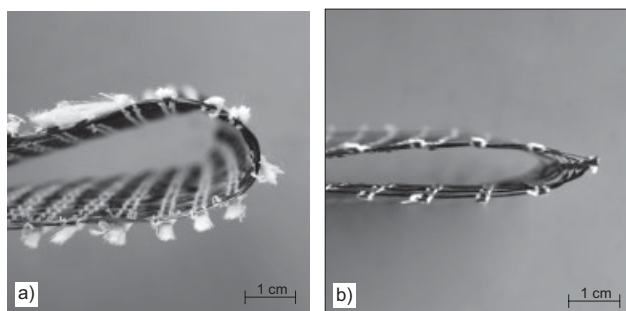


Bild 92. Gefahr der Faserschädigung bei zu geringem Biegeradius;
a) ausreichend großer Biegeradius, b) Knick bei zu kleinem Biegeradius

Vorteil bei Variante B ist, dass die Knickproblematik bei Variante A nicht entsteht. Nachteilig ist, dass die Bewehrung nicht geradlinig geführt werden kann, die Breite des ausgeführten Stoßes schwer kontrollierbar ist und durch den größeren Abstand der beiden Bewehrungslagen senkrecht zur Stoßebene erhöhen sich die Beanspruchungen des Feinbetons bei der Übertragung der Verbundkräfte. Außerdem müssen die Kräfte über die Arbeitsfuge im Beton übertragen werden. Dadurch, dass zwei Betonschichten übereinander eingebaut werden müssen, wird auch die Verstärkung an dieser Stelle doppelt so dick. Wenn mehrere Lagen gestoßen werden müssen, ist Variante B ungeeignet. In den meisten Fällen ist Variante A die technisch sinnvollere Variante.

Müssen mehrere Lagen gestoßen werden, sind die Stöße um eine halbe Stoßlänge versetzt anzuordnen. Detaillierte Untersuchungen zur Ausbildung von Stößen sind Gegenstand laufender Forschungsarbeiten im Sonderforschungsbereich 528.

Am günstigsten ist es ohne Frage, wenn die Betonierabschnitte frisch in frisch¹⁷⁾ hergestellt werden können. Das wird aber nur bei kleinformigen Bauteilen realisierbar sein. Wenn der Feinbeton bereits teilweise erhärtet ist, ist die Oberfläche vor dem Aufbringen der nächsten Schicht mit Druckwasserstrahlen zu behandeln, um so die Oberfläche aufzurauen. In jedem Fall müssen Verunreinigungen entfernt und der Untergrund angefeuchtet werden. Auch hier gilt, dass die Oberfläche vor dem Aufbringen des Feinbetons matt feucht sein muss.

¹⁷⁾ Mit „frisch in frisch“ wird allgemein noch nicht erhärteter Beton umschrieben. Eine klare Definition für diesen Zustand gibt es leider nicht. Je länger die Betonage des vorhergehenden Abschnitts zurück liegt, desto mehr unterscheiden sich die verbundenen Schichten in der Festigkeit und im Schwindverhalten.

Die Oberfläche der letzten Feinbetonschicht sollte möglichst spritzraue verbleiben. Auf keinen Fall sollte die Oberfläche von Textilbetonverstärkungen verrieben werden, da durch das Verreiben Gefügestörungen bis hin zum Auftreten von flächigen Fehlstellen die Folge sein können. Als zulässig wird das Glätten von Hand erachtet, wenn der spritzraue Untergrund für weitere Arbeitsschritte hinderlich ist. Bestehen Anforderungen an eine bestimmte Oberflächenstruktur, sind diese in einem separaten Arbeitsgang nach dem ausreichenden Erhärten der Textilbetonverstärkung auszuführen.

8.4 Konstruktionsregeln für Textilbeton

8.4.1 Betondeckung

Die Betondeckung erfüllt im Stahlbetonbau mehrere Funktionen, nämlich den Korrosionsschutz der Bewehrung, die Sicherstellung des Verbundes und die Sicherstellung eines ausreichenden Feuerwiderstandes. Da die bei Textilbeton eingesetzten Fasern nicht durch das alkalische Milieu geschützt werden müssen, verbleiben als Funktion die Sicherstellung des Verbundes und ggf. der Schutz der Fasern bei einer Brandeinwirkung.

Bisher wird angenommen, dass die aus DIN 1045-1:2008-08, Abschn. 6.3 bekannten Regeln zur Mindestbetondeckung $c_{\min}$ zur Sicherstellung des Verbundes auf die Herstellung mit Textilbeton übertragbar sind.

$$c_{\min} \geq \begin{cases} d_{f1} \\ D_{\max} \end{cases}$$

mit

d_{f1} Durchmesser des Einzelfadens innerhalb der textilen Bewehrung

$$d_{f1} = 1,0 \dots 2,0 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot A_{f1}}{\pi}}$$

$D_{\max}$ Größtkorn des Zuschlags

Geometrische Abweichungen vom idealisierten Kreisquerschnitt und die – praktisch nicht erreichbare – theoretisch maximale Packungsdichte können durch einen Vorfaktor größer 1,0 berücksichtigt werden. Bei 12k-Carbonfasern und 1 mm Größtkorn liegt die Mindestbetondeckung dann bei nur 1 mm.

Generell sind bei Textilbeton die Anforderungen an die Einbaugenauigkeit der Bewehrung und an die Einhaltung der geplanten Bauteildicke höher als bei Stahlbeton. Das ergibt sich schon aus den typischen Bauteilabmessungen von Textilbeton, welche in der gleichen Größenordnung liegen, wie zulässige Abweichungen von der geplanten Bauteildicke bei Stahlbetonbauteilen. Die Fertigungsgenauigkeit muss also den verringerten Bauteildimensionen angepasst werden. Zur Berücksichtigung von unplanmäßigen Abweichungen ist die Mindestbetondeckung um ein Vorhaltemaß Δc angemessen zu vergrößern. Allerdings ist dieses Vorhaltemaß bei Textilbeton wesentlich geringer als bei Stahlbeton. Derzeit liegen für Textilbeton noch keine statistischen Untersuchungsergebnisse zu Abweichungen von der planmäßigen Lage vor. Bei Herstellung einzelner Bauteile unter Laborbedingungen sind diese Differenzen i. d. R. kleiner als 1 mm.

Bei der Verstärkung von Tragwerken wird empfohlen, die erste und letzte aufzubringende Feinbetonschicht mit 3 bis 5 mm zu bemessen, wobei der kleinere Wert für dünnere Fasern (low-tow) und der höhere Wert für dickere Fasern (heavy-tow) gilt.

8.4.2 Mindest- und Höchstdicken

Die *Mindestdicke* eines Bauteils ergibt sich aus den Abmessungen der Bewehrung zzgl. der an beiden Oberflächen erforderlichen Betondeckung. Technisch sind Bauteildicken von 5 mm ohne Frage herstellbar. Aber auch andere Aspekte müssen berücksichtigt werden und sind in den meisten Fällen maßgebend für die Festlegung der Bauteildicke, z. B. die Begrenzung der Verformungen im Tragzustand und statische Anforderungen an die Druckzonenhöhe oder aus dem Durchstanzen. Für Verstärkungen der Zugzone von Stahlbetonbauteilen mit einer einlagigen Bewehrung ist das Mindestmaß von 5 mm hingegen eine sinnvolle untere Grenze.

Aufgrund bisheriger Erfahrungen aus zahlreichen Laborversuchen und ausgeführten Verstärkungsmaßnahmen kann grundsätzlich mit einer 4 bis 5 mm dicken Feinbetonschicht je Verstärkungslage gerechnet werden. Dieses Maß wird auch für Lastannahmen zum Eigengewicht der Verstärkungsschicht empfohlen. Auf die Nutzhöhe des Bauteils haben Lageabweichungen innerhalb der Textilbetonverstärkungsschicht vernachlässigbar

kleine Auswirkungen, denn die Nutzhöhe wird maßgebend von den Bauteilabmessungen des zu verstärkenden Stahlbetonbauteils bestimmt.

Eine Obergrenze für die *maximale Bauteildicke* gibt es aus technischen Gründen nicht. Theoretisch ist denkbar, auch Bauteile von mehreren Dezimetern oder Metern Dicke aus Textilbeton herzustellen. Allerdings muss man die Frage nach der Wirtschaftlichkeit stellen, sobald die geplanten Abmessungen für Stahlbeton übliche Größenordnungen erreichen. Es ist offensichtlich wenig wirtschaftlich, Bauteile mit 10 cm Dicke oder mehr durch lagenweises Laminieren von millimeterdünnen Betonschichten herzustellen. Sinnvoll ist die Anwendung von Textilbeton in solchen Fällen nur dann, wenn dadurch anderweitige Vorteile entstehen, die die Mehrkosten für die Herstellung, das Material etc. rechtfertigen.

Aus praktisch-wirtschaftlichen Erwägungen ist die Anwendung von Textilbeton bei Bauteildicken bis ca. 4 cm, in besonderen Fällen möglicherweise auch bis 5 cm denkbar. Bei praktisch ausgeführten Objekten lagen die Bauteildicken bisher im Bereich zwischen 10 bis 30 mm für platten- und scheibenförmige Elemente.

8.4.3 Verankerungslängen

Eine ausreichende Verankerungslänge stellt sicher, dass kein Auszugversagen der Bewehrung stattfindet. Die notwendige Verankerungslänge hängt von den Verbundeigenschaften des verwendeten Textils und der Betonfestigkeit ab. Allgemein gilt, dass die Verankerungslängen für textile Bewehrungen wesentlich kürzer sind als die für Stabstahlbewehrung.

Für Strukturen mit einer 12k-Carbonfaser und vergleichbarem geometrischem Aufbau wie die in Bild 28a dargestellte Standardstruktur des DZT wurde mithilfe der Schubspannungs-Schlupf-Beziehung eine Verankerungslänge von 78 mm berechnet und in speziellen Versuchen mit variabler Verbundlänge bestätigt. So kurze Verankerungslängen sind für die Anwendung als Verstärkung grundsätzlich von Vorteil [71]. Mit Berücksichtigung eines angemessenen Sicherheitszuschlages ergeben sich für diese Struktur 150 mm für die praktische Ausführung.

Die auf den Durchmesser bezogenen Verankerungslängen sind bei Textilbeton wesentlich größer als bei Stabstahlbewehrung, z. B. 150:1 im obigen Beispiel gegenüber 4:1 für einen herkömmlichen Bewehrungsstab $\varnothing 8$. Vergleicht man jedoch die absoluten Größen der Verbundlängen von Stabstahlbewehrung und textiler Bewehrung, sind sie bei Textilbeton jedoch immer noch erheblich kleiner als bei Stahlbeton.

Bekanntermaßen ist die Wirksamkeit des Verbundes zum Beton sehr stark von der Oberflächenpro-

filtrierung abhängig, die bei textilen Bewehrungen nur sehr feingliedrig ist. Eine Erhöhung der Rauigkeit der Textilien und damit der Verbundspannung ist technisch relativ einfach umsetzbar, z. B. durch eine Besandung, stärker strukturierende Nähfäden oder eine in die Beschichtung eingeprägte Profilierung. Allerdings steigen damit auch die Beanspruchungen des Betons gleichermaßen an. Dies müsste durch eine größere Betondeckung kompensiert werden, was aber nicht wünschenswert ist.

8.4.4 Bewehrungsstöße

Von sehr kleinen Bauteilen abgesehen, ist der Bewehrungsstoß ein unverzichtbares Konstruktionselement jeder bewehrten Betonbauweise mit kontinuierlicher Bewehrung. Die Lieferlängen der textilen Gelege sind theoretisch unbegrenzt. Aus praktischen Gründen der Handhabbarkeit werden die textilen Bewehrungen auf Kartonröhren mit Gesamtmassen von 50 kg ausgeliefert. Für die in Abschnitt 3.5 genannten Strukturen entspricht das einer Länge zwischen 80 und 400 m, was also kein begrenzender Faktor bzw. Grund für die Anordnung eines Stoßes ist. Dennoch können bei Textilbeton Stöße aus verschiedenen Gründen erforderlich werden:

- Die *Lieferbreite* der textilen Strukturen ist von der Arbeitsbreite der Textilmaschine abhängig und beträgt bei den in Dresden hergestellten Gelegen derzeit etwa 1,25 m. Bei der flächigen Verstärkung von Platten werden deshalb Stöße der Bewehrung in Querrichtung erforderlich.
- Aus betontechnologischen Gründen kann die Notwendigkeit der Anordnung von Übergreifungsstößen resultieren, weil die Größe der im Verfahren Frisch-in-Frisch verarbeitbaren Fläche durch das Ansteifen des Betons begrenzt ist.
- Bei der Verstärkung „von oben“ bzw. auf der Oberseite von Bauteilen wird die Ausführung dadurch erschwert, dass die frisch hergestellte Verstärkung nicht begehbar ist. Stehen keine geeigneten Hilfsmittel wie z. B. Gerüste zur Verfügung, kann ggf. eine abschnittsweise Fertigung oder die Herstellung im Pilgerschrittverfahren sinnvoll sein. Neben der Frage der Länge des Übergreifungsstoßes kommt hier die Frage der technologischen Ausführung hinzu.
- An Kreuzungspunkten von Bauteilen und bei Durchdringungen werden spezielle Zuschnitte benötigt, die sich mit der Grundbewehrung überlappen. Gleiches gilt für einspringende Ecken an Rändern oder Öffnungen.
- Je nach örtlichen Randbedingungen kann auch die „Reichweite des ausführenden Arms“ beim Einbetten des Textils maßgebend für die

Größe und Anzahl der Zuschnitte und damit für die Notwendigkeit von Bewehrungsstößen ausschlaggebend sein.

Es ist also festzustellen, dass vor allem technologische Randbedingungen Übergreifungsstöße bedingen.

Die Übergreifungslänge wird wie beim Stahlbeton wesentlich von der erforderlichen Verankerungslänge beeinflusst. Zusätzlich wird der umgebende Beton durch die Übertragung der Kräfte von einem in das andere Bewehrungselement beansprucht. Liegen Stöße übereinander, entstehen die maßgebenden Zugspannungen im Feinbeton senkrecht zur Bauteiloberfläche. Deshalb liefert die erforderliche Verankerungslänge für ein Textil nur einen unteren Grenzwert für die Länge eines Bewehrungsstoßes. In ausgeführten Projekten wurden Übergreifungsstöße mit 15 cm realisiert [35]. Detaillierte Untersuchungen zu Einflussgrößen und notwendigen Verankerungslängen sind Gegenstand laufender Forschungsarbeiten. Ziel ist die Bereitstellung von Verankerungslängen und Praxisempfehlungen für die Ausbildung von Bewehrungsstößen.

8.5 Nachbehandlung

Generell sind dünne Schichten aus Textilbeton wesentlich stärker als massige Betonbauteile durch die Folgen eines Wasserverlustes im jungen Betonalter gefährdet. Wird der dünnen Betonschicht das benötigte Wasser entzogen und nicht anderweitig wieder zugeführt, wird die Festigkeitsentwicklung des Betons gestört und es können Schwindrisse entstehen. Klimatische Einwirkungen (Wind, Sonneneinstrahlung) können die Austrocknung zusätzlich befördern. Eine geeignete Nachbehandlung ist deshalb sehr wichtig.

Wesentliche Maßnahmen der Nachbehandlung sind das Zuführen von Wasser an den zugänglichen Oberflächen und der Schutz von Verdunstung. An senkrechten und horizontal von oben verstärkten Flächen hat sich das Abdecken mit feuchten Tüchern und Folien und regelmäßiges Befeuchten bewährt. Flächen über Kopf wurden mehrmals täglich befeuchtet. Erfahrungen mit chemischen Nachbehandlungsmitteln, die auf die betonierten Flächen aufgesprüht werden (Curing) und sich damit auch für von unten zu verstärkende Flächen eignen, liegen noch nicht vor. Bei offener Bewitterung ist ein zusätzlicher Schutz gegen Wind und Sonne empfehlenswert.

8.6 Überwachung und Qualitätskontrolle

Da praktische Erfahrungen bei Verstärkungen mit Textilbeton nur in begrenztem Umfang verfügbar sind, ist die Anfälligkeit für Fehler naturgemäß höher als bei etablierten Verfahren. Bei Trag-

werksverstärkungen handelt es sich zudem um einen besonders sensiblen Bereich, denn von der korrekten Ausführung aller Arbeitsschritte hängt ab, ob die geplante Tragfähigkeit erreicht wird. Die Überwachung und die Qualitätskontrolle sind damit entscheidend für die Tragsicherheit der verstärkten Bauteile bzw. Gebäude.

Um den damit verbundenen Anforderungen gerecht zu werden, hat das Deutsche Zentrum Textilbeton (DZT) ein mehrstufiges Konzept zur Überwachung und Qualitätskontrolle erarbeitet. Es sieht folgende Einzelmaßnahmen vor:

Nachweis der Eignung des ausführenden Unternehmens: Als Eignungsnachweis für ausführende Unternehmen wird gefordert, dass mindestens der Düsenführer oder der Vorarbeiter Inhaber des Düsenführerscheins und des SIVV-Scheins ist und einschlägige Erfahrungen in der Tragwerksverstärkung (Spritzbeton, Instandsetzung von Betontragwerken, Verstärkung mit CFK, ...) vorhanden sind. Speziell für Textilbeton sollten ein oder mehrere Referenzobjekte mit Textilbeton vorgewiesen werden können. Alternativ wird die Teilnahme an einem entsprechenden Lehrgang empfohlen, wie sie vom DZT angeboten werden.

Lehrgänge zur Qualifizierung: Das DZT bietet auf Nachfrage interessierten ausführenden Unternehmen Lehrgänge speziell zur Qualifizierung des Personals für Verstärkungsarbeiten mit Textilbeton an. Neben dem theoretischen Rüstzeug zum Umgang mit Textilbeton sind vor allem praktische Übungen in einem speziellen Versuchsstand Bestandteil der Ausbildung. Den Unternehmen ist freigestellt, eigene Technik im Lehrgang zu verwenden. Das ist sinnvoll, denn dann kann die Qualifikation des Personals mit dem Eignungsnachweis für die vorhandene Maschinenteknik verbunden werden.

Überwachung der Ausführung: Die Ausführungsarbeiten werden durch einen Mitarbeiter des DZT oder einer von ihm beauftragten Einrichtung überwacht. Bisher wurde die vorbereitete Betonoberfläche abgenommen, die Ausführung der Textilbetonverstärkung permanent überwacht und die Nachbehandlung stichprobenartig geprüft und abgenommen. Die permanente Überwachung ist sicherlich ungewöhnlich. Da es sich aber um die ersten Anwendungen im großtechnischen Maßstab handelte, waren sich alle Beteiligten einig, dass diese Verfahrensweise notwendig und sinnvoll ist. In allen Fällen konnten während der Ausführung Fehler rechtzeitig erkannt und dadurch vermieden werden. Als Nebeneffekt gab es an zahlreichen Stellen Rückkopplungen, die als Fragestellung in die laufende Forschung eingeflossen sind.

Begleitende Probenentnahme und Labortests: Mit der In-situ-Probenentnahme und der Kennwertermittlung im Labor werden die in der Bemessung ange-

nommenen Materialkennwerte bestätigt. Entnommen und geprüft werden Feinbetonproben zur Ermittlung der Dichte, der Biegezugfestigkeit und der Druckfestigkeit sowie Textilbetonproben zur Ermittlung des Kraft-Verformungs-Verhaltens einschließlich der Zugfestigkeit. Für den Feinbeton werden Mörtelprismen der Abmessungen 40 mm × 40 mm × 160 mm verwendet, für den Textilbeton werden kleinformartige Platten von 60 cm Länge und 30 cm Breite in separaten Schalungen angefertigt. Der Schichtenaufbau und damit die Probendicke stimmt mit der realen Verstärkungsschicht überein und wird bei der Probenentnahme durch das Personal des ausführenden Unternehmens hergestellt. Da eine Beprobung der hergestellten Verstärkungsschicht sehr aufwendig wäre, stellt diese Methode der Probenentnahme sicher, dass die wesentlichen Einflussfaktoren auf das Leistungsvermögen der Verstärkungsschicht berücksichtigt werden können.

Dokumentation gegenüber dem Bauherrn: Zusätzlich zum Bautagebuch, dass durch das ausführende Unternehmen geführt wird, werden besondere Vorkommnisse und etwaige auftretende Probleme und die Ergebnisse der Laboruntersuchungen an den entnommenen Materialproben dokumentiert.

Dieses Konzept zur Überwachung und Qualitätssicherung hat sich bereits in der Praxis bewährt. Die ersten Objekte konnten ohne Mängel und innerhalb des geplanten Ausführungszeitraums ausgeführt werden. In den Abschnitten 8.8 und 8.9 werden zwei der bisher ausgeführten Objekte vorgestellt.

8.7 Rechtsgrundlagen für die Anwendung

8.7.1 Normen und Regelwerke

Gegenwärtig existieren noch keine bauaufsichtlich eingeführten Normen oder Richtlinien, die Bemessung, Konstruktion und Ausführung von Verstärkungen aus Textilbeton regeln. Die Autoren dieses Beitrags sehen Bestrebungen bzw. Nachfragen zur Normung zum gegenwärtigen Zeitpunkt eher skeptisch. Aus Sicht des Planers und des ausführenden Unternehmens sind bauaufsichtlich eingeführte Normen und Regelwerke ohne Zweifel wünschenswert, weil sie Sicherheit für Planung und Ausführung bieten. Andererseits kostet die Erstellung von Regelwerken erheblichen Aufwand und jedes Regelwerk schreibt zwangsläufig den Stand der Technik bis zur folgenden Überarbeitung fest. Der Vorteil dieses Mechanismus liegt in der einfachen Anwendbarkeit. Nachteilig ist, dass Weiterentwicklungen, die durch das Regelwerk nicht abgedeckt sind, eine erhebliche Barriere in Form einer Zustimmung im Einzelfall oder einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung überwinden müssen und so ne-

ben den reinen Entwicklungskosten zusätzliche bürokratische Hürden nach sich ziehen.

Je weiter der Anwendungsbereich eines Regelwerks gefasst ist, desto ungünstiger wirken sich mangelnde Erfahrung und Modellunsicherheiten auf die Wirtschaftlichkeit aus. Das trifft in besonderem Maß auf neue Werkstoffe und Technologien zu, denn fehlendes Wissen und mangelnde Erfahrung muss zwangsläufig durch einen erhöhten Sicherheitsabstand kompensiert werden.

8.7.2 Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ)

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (abZ) werden vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) für Bauprodukte und Bauarten erteilt, für die es keine allgemein anerkannten Regeln der Technik gibt oder die davon wesentlich abweichen. Allgemein anerkannte Regeln der Technik sind im Bereich des Betonbaus insbesondere die eingeführten DIN-Normen oder die Richtlinien des DAFStb. Die Rechtsgrundlage bilden die Landesbauordnungen, vgl. Musterbauordnung, § 3 zu Anforderungen, § 18 zur abZ und § 21 zu Bauarten.

Die vom DIBt erteilte abZ ist der Nachweis, dass das nicht geregelte Bauprodukt die bauaufsichtlichen Anforderungen erfüllt. Dazu sind im Fall einer Bauwerksverstärkung aus Textilbeton insbesondere Standsicherheit, Dauerhaftigkeit und ggf. Aspekte des Brandschutzes zu zählen.

Bisher wurde vom DIBt eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung im Zusammenhang mit Textilbeton erteilt. Dabei handelt es sich um eine Fassadenplatte aus Betonwerkstein mit einer textilen Bewehrung, die im Falle der Rissbildung die Tragfähigkeit und Absturzsicherheit gewährleistet. Die Zulassung Z-33.1-577 [118] für diese Fassadenplatten ist ein wichtiger Meilenstein zur Anwendung von Textilbeton in der Baupraxis.

An eine statisch wirksame Verstärkung von Stahlbetonbauteilen aus Textilbeton werden wesentlich höhere Anforderungen an die Sicherheit gestellt, als an eine Bewehrung in einer kleinformatigen Fassadenplatte mit Abmessungen von maximal 2,40 m.

Ziel laufender gemeinsamer Forschungsvorhaben mit verschiedenen Praxispartnern ist es, eine erste abZ für den Anwendungsbereich Biegeverstärkung von plattenförmigen Stahlbetonbauteilen beantragen zu können. Erfahrungen aus anderen Bereichen haben gezeigt, dass es sinnvoll ist, zunächst ausreichend praktische Erfahrungen mit Projekten auf der Basis von Zulassungen im Einzelfall (ZiE) zu sammeln, denn eine abZ kann die speziellen örtlichen Gegebenheiten nicht berücksichtigen und muss daher im Rahmen des definierten Anwendungsbereichs alle denkbaren Szena-

rien abdecken. Es empfiehlt sich also auch für Verstärkungen aus Textilbeton zunächst mit einer gewissen Anzahl an Projekten den Anwendungsbereich auf der Basis von ZiE zu erschließen.

8.7.3 Zustimmung im Einzelfall (ZiE)

Zustimmungen im Einzelfall (ZiE) werden von der Obersten Bauaufsichtsbehörde der Länder erteilt, soweit diese Aufgabe nicht anderen Einrichtungen übertragen wurde (s. Tabelle 14). Sie erlauben die Anwendung eines Baumaterials oder einer Bauart, für die es keine allgemein anerkannten Regeln der Technik gibt oder die davon wesentlich abweichen. Die zu erfüllenden Anforderungen unterscheiden sich grundsätzlich nicht von denen zur Erlangung einer abZ. Im Unterschied zur abZ beschränkt sich der Verwendungsnachweis bei der ZiE jedoch auf das konkrete Bauvorhaben. Der Nachweis der Eignung kann sehr speziell auf die betreffenden örtlichen Gegebenheiten abgestimmt werden.

Beim derzeitigen Kenntnisstand ist der Weg über eine ZiE eindeutig dem über eine abZ vorzuziehen. Durch die Beschränkung des Eignungsnachweises auf das jeweilige spezifische Objekt wird der Aufwand für eine ZiE im Regelfall deutlich geringer ausfallen als für eine abZ. Bei Textilbeton ergibt sich aus Sicht des Antragstellers die komfortable Situation, dass für den Eignungsnachweis auf zahlreiche experimentelle und theoretische Untersuchungen der Sonderforschungsbereiche 528 an der TU Dresden und 532 an der RWTH Aachen zurückgegriffen werden kann. Insbesondere in Dresden wurde das Tragverhalten von Verstärkungen aus Textilbeton eingehend im Rahmen der Grundlagenforschung untersucht.

Im Bereich der Bauwerksverstärkung mit Textilbeton wurden bisher zwei ZiE von den Ländern Sachsen und Bayern erteilt. In beiden Fällen konnte die ZiE auf der Grundlage der im SFB 528 seit 1999 durchgeführten Untersuchungen und Ergebnisse erteilt werden. Zusätzliche Untersuchungen waren nicht erforderlich. Im folgenden Abschnitt werden beide Projekte vorgestellt.

Die für die ZiE ggf. erforderlichen Versuche oder Prüfungen werden von einer anerkannten Prüfstelle durchgeführt, das sind normalerweise Materialprüfanstalten. In den bisher erteilten ZiE wurden die Untersuchungen jedoch überwiegend durch die an den Sonderforschungsbereichen beteiligten Institute und Labore erbracht. Die vorhandenen Sachkenntnisse und Laborausstattungen aus der laufenden Grundlagenforschung haben den Vorteil, dass spezielle Prüfeinrichtungen und Erfahrungen hinsichtlich der Bewertung der Untersuchungsergebnisse vorhanden sind und so ggf. erforderliche, zusätzliche Untersuchungen problemlos durchgeführt werden können.

Tabelle 13. Oberste Bauaufsichten der Länder bzw. Institutionen, denen die Aufgabe der Erteilung einer ZiE von den Ländern übertragen wurde

Bundesland	Adresse	Ansprechpartner
Baden-Württemberg	Regierungspräsidium Tübingen Referat 27 – Landesstelle für Bautechnik Postfach 2666 72016 Tübingen Tel.: 07071/757-0 Gebührenrahmen: 150–7.500 EUR	
Bayern	Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern Postfach 22 00 36 80535 München Tel.: 089/2192-3281 Gebührenrahmen: 30 –3.000 EUR	Herr Dr.-Ing. Gerhard Rustler, Ministerialrat Tel.: 089/2192-3485 Fax: 089/2192-13485 E-Mail: Gerhard.Rustler@stmi.bayern.de
Berlin	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung VI D 5 – Bautechnisches Prüfamt Württembergische Straße 6 10707 Berlin-Wilmersdorf Tel.: 030/9012-4979 Gebührenrahmen: 5.000–15.000 EUR	Herr Dr.-Ing. Borislav Bojanov Tel.: 030/9012 6852 Fax: 030/9012 3535 E-Mail: Borislav.Bojanov@senstadt.berlin.de
Brandenburg	Landesamt für Bauen und Verkehr Außenstelle Cottbus Bautechnisches Prüfamt Gulbener Straße 34 03046 Cottbus Tel.: 0355/7828-0 Gebührenrahmen: 200–5.000 EUR	
Bremen	Senator für Umwelt, Bau, Verkehr und Europa Abt. 6, Referat 65 Contrescarpe 72 28195 Bremen Gebührenrahmen: 260–5.200 EUR	Herr Peter Habedank Tel.: 0421/361-5263 Fax: 0421/496-5263 E-Mail: Peter.Habedank@bau.bremen.de
Hamburg	Freie und Hansestadt Hamburg Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Amt für Bauordnung und Hochbau (ABH 31) Stadthausbrücke 8 20355 Hamburg Tel.: 040/42840-0 Gebührenrahmen: 90–5.000 EUR	Herr Oliver Brune Tel.: 040/4284-2204 E-Mail: Oliver.Brune@bsu-hamburg.de
Hessen	Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung Referat VI 8 Kaiser-Friedrich-Ring 75 65185 Wiesbaden Gebührenrahmen: 400– 5.000 EUR	Herr Dr. Dieter Pohlmann Tel.: 0611/815-2959
Mecklenburg-Vorpommern	Ministerium für Verkehr, Bau und Landesentwicklung Mecklenburg-Vorpommern Abteilung 3 Bau Referat 310, Abteilung Bautechnik Schloßstraße 6–8 19053 Schwerin Gebührenrahmen: 150–3.000 EUR	Frau Kühne Tel.: 0385/588-8311

Tabelle 13. Fortsetzung

Bundesland	Adresse	Ansprechpartner
Niedersachsen	Niedersächsisches Ministerium für Soziales, Frauen, Familie u. Gesundheit Referat 503 Postfach 141 30001 Hannover Tel.: 0511/120-0 Gebührenrahmen: 325–6.450 EUR	
Nordrhein- Westfalen	Ministerium für Bauen und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen Abteilung VI Bauen Referat VI A 4 Bautechnik/Bauphysik Jürgensplatz 1 40190 Düsseldorf Gebührenrahmen: 50–5.000 EUR	Herr Horst Perski Tel. 0211/3843 6218 E-Mail: Horst.Perski@ mbv.nrw.de
Rheinland-Pfalz	Ministerium der Finanzen Oberste Bauaufsicht Referat 4534 Kaiser-Friedrich-Straße 5 55116 Mainz Gebührenrahmen: 50–3.000 EUR	Herr Hermann Hoegner Tel.: 06131/16 4277 E-Mail: Hermann.Hoegner@ fm.rlp.de@
Saarland	Ministerium für Umwelt Oberste Bauaufsicht Referat C/5 Keplerstraße 18 66117 Saarbrücken Gebührenrahmen: 51–5.112,90 EUR	Herr Robert Becker Tel.: 0681/501 4231 Fax: 0681/501 4101 E-Mail: R.Becker@ umwelt.saarland.de
Sachsen	Landesdirektion Leipzig Landesstelle für Bautechnik Braustraße 2 04107 Leipzig Gebührenrahmen: 50–5.000 EUR	Herr Dr.-Ing. Hans- Alexander Biegholdt Tel.: 0341/977 3910 E-Mail: Hans-Alexander. Biegholdt@ldl.sachsen.de
Sachsen-Anhalt	Ministerium für Landesentwicklung und Verkehr des Landes Sachsen-Anhalt Referat 44 Postfach 3653 39011 Magdeburg Telefon: 0391/567-01 Gebührenrahmen: 200 – 8.000 EUR	
Schleswig- Holstein	Innenministerium Referat IV 653 Düstenbrooker Weg 92 24105 Kiel Tel.: 0431/988-0 Gebührenrahmen: 150–2.000 EUR	
Thüringen	Oberste Bauaufsichtsbehörde Thüringer Ministerium für Bau, Landesentwicklung und Medien Abt. 2, Referat 22 Postfach 900362 99106 Erfurt Gebührenrahmen: 100–5.000 EUR	Herr Dr. Helmut Bietz Tel.: 0361/3791 222 E-Mail: Helmut.Bietz@ tmbm.thueringen.de

8.8 Anwendungsbeispiel Verstärkung einer Hyparschale

8.8.1 Beschreibung des Bauwerks

Die Dachkonstruktion eines in den 1960ern erbauten Hörsaalgebäudes der Fachhochschule Schweinfurt in Form eines hyperbolischen Daches sollte im Rahmen der Modernisierung des gesamten Gebäudekomplexes instand gesetzt werden. Die Hyparschale aus Stahlbeton überspannt den quadratischen Grundriss des „Großen Hörsaals“ mit einer Seitenlänge von 27,60 m und einer maximalen Spannweite von ca. 39 m (Bild 93). Die Schale ist in Nord-Süd-Richtung geneigt, sodass der südliche Hochpunkt 12 m und der nördliche Hochpunkt 7 m über dem Tiefpunkt der Schale liegen. Die in Ost-West-Richtung liegenden Tiefpunkte sind auf massiven Pylonen gelagert. Die Schalenstärke beträgt im Mittelbereich 8 cm und vergrößert sich in Richtung der Randträger auf max. 37 cm an den Hochpunkten und bis zu 77 cm an den Pylonen. Die Randträger sind im Abstand von 6,50 m vor den Hochpunkten durch vier Stützen gehalten. Die äußeren unterseitigen und stirnseitigen Flächen sind in Sichtbeton ausgeführt. Die Oberseite war mit einer – zum Zeit-

punkt des Beginns der Sanierung – sehr schadhafte Dachabdichtung versehen.

Entsprechend der Bestandsaufnahme war die in Bild 94 dargestellte Bewehrung vorhanden. Die obere und untere Biegebewehrung ($\emptyset 6$, $s = 12$ cm) liegt als orthogonales Bewehrungsnetz jeweils parallel zu den Randträgern. Die Trajektorienbewehrung ($\emptyset 10$, $s = 12,5$ cm) kreuzt unter 45° und liegt in Richtung der Hauptbeanspruchung.

Im Rahmen der Bestandsaufnahme wurde festgestellt, dass der materialtechnische Zustand der Stahlbetonschale bis auf unwesentliche Schadstellen an den Unterseiten und den Randbalken gut ist. Allerdings wurden deutliche Abweichungen von bis zu 20 cm von der Sollgeometrie der Schale in Form von Senkungen am südlichen Hochpunkt festgestellt. Eine messtechnische Überwachung der Verformungen in den Jahren 2002 bis 2006 und eine statisch konstruktive Untersuchung mit einer FE-Modellierung für den verformten und unverformten Zustand lieferte keine Anhaltspunkte für einen kritischen Tragwerkszustand, allerdings auch keine Erklärung für den verformten Zustand.



Bild 93. Ansicht des instand gesetzten Hörsaalgebäudes der Fachhochschule Schweinfurt vor der Maßnahme

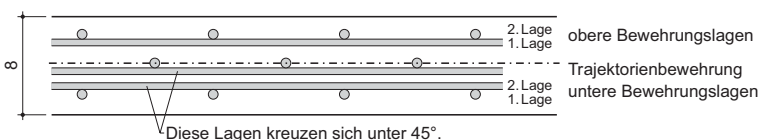


Bild 94. Schalenquerschnitt mit vorhandener Bewehrung

Da nach Entfernen der Dachabdichtung auf der Schalenoberseite keine übermäßig weit geöffneten Risse sichtbar wurden, wird vielmehr die Hypothese gestützt, dass die Verformungen bereits während der Bauzeit eingetreten sind und durch gleichmäßiges Kriechen der Konstruktion über die bisherige Lebensdauer entstanden sind. Es wurde geschlussfolgert, dass eine weitere Verformungszunahme nicht zu erwarten ist und die deformierte Schalenform beibehalten werden kann.

8.8.2 Statische Analyse und Verstärkungsbedarf

Vermutlich wurde die Stahlbetonschale für eine zentrische Zugbeanspruchung bemessen, für die die Trajektorienbewehrung ermittelt und eine symmetrische Biegebewehrung auf Ober- und Unterseite eingelegt wurde bzw. eine getrennte Bewehrungsermittlung für die Trajektorienbewehrung (zentrische Normalkraft) und Biegebewehrung (Momente) durchgeführt. Da keine statischen Unterlagen mehr aus der Bauzeit existieren, bleiben die ursprünglichen Bemessungsannahmen aber unbekannt.

Die maßgebenden Schnittgrößen wurden mit FE-Modellen für die verformte und unverformte Geometrie ermittelt. Das Schalentragwerk wird haupt-

sächlich durch Normalkräfte beansprucht. Allerdings entstehen auch geringe Momentenbeanspruchungen. Gegenüber der Schale im Sollzustand sind die Momente bei der deformierten Schale durch Umlagerungen infolge Verformung etwas abgemindert. Dennoch erzeugen die Momente im Bereich der Stützungen nahe der Hochpunkte eine Exzentrizität. Damit entsteht eine zusätzliche Zugkraft auf der Schalenoberseite und es werden eine hohe Auslastung und geringe Spannungsüberschreitungen in der oberen Bewehrungslage für den Bemessungslastfall im GZT (Eigengewicht mit Wind- und Schneelasten) erkennbar. Wird nur das Eigengewicht im Bemessungslastfall im GZT berücksichtigt, kann die vorhandene Bewehrung für die deformierte Schale als ausreichend angesehen werden. Die obere Bewehrung ist allerdings sehr hoch ausgelastet. In diesem Zusammenhang sei angemerkt, dass zur Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit bei Zugbeanspruchung mit geringer Ausmitte oftmals größere Bewehrungsmengen als die statisch erforderlichen notwendig sind. Daher sollten die Stahlspannungen nicht ausgenutzt werden. Im Bereich der Schale zwischen den Stützungen nahe den Hochpunkten ist die obere Bewehrungslage nicht ausreichend dimensioniert und eine Verstärkung erforderlich (Bild 95).

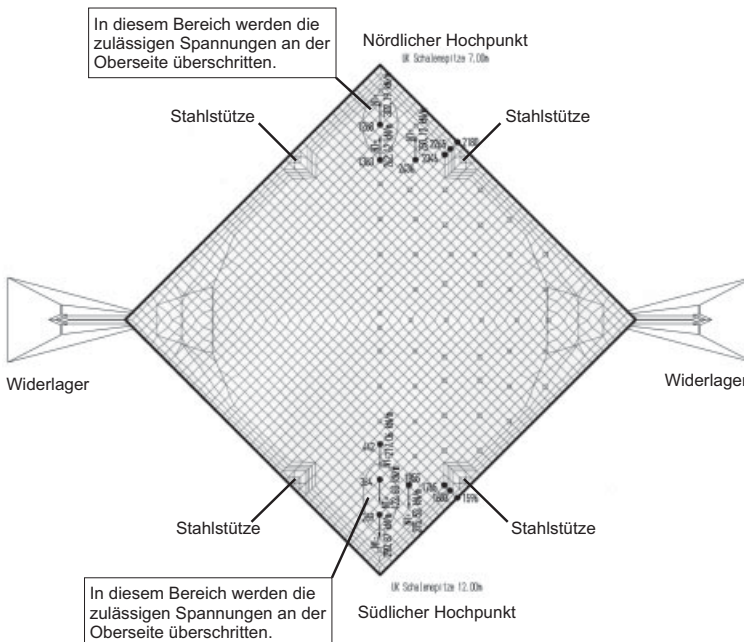


Bild 95. Spannungsüberschreitungen im Bereich der auskragenden Hochpunkte

Für die Ausführung der Verstärkung wurden klassische und etablierte Verfahren zur Verstärkung von Stahlbetonbauteilen wie Spritzbetonverstärkung und geklebte Lamellen aus Stahl oder Faser-verbundkunststoffen diskutiert. Die Verstärkung mit Spritzbeton weist aufgrund der notwendigen Betondeckung der Stahlbewehrung große Schichtdicken (ca. 6 bis 8 cm) und damit ein zu großes Eigengewicht auf, was zu einer vergleichsweise hohen zusätzlichen Belastung der Schale führt. Geklebte Lamellen zeichnen sich zwar durch ein geringes Eigengewicht aus, aber die Tragwirkung ist eher auf einen einaxialen Lastabtrag optimiert und besitzt eine stark konzentrierte Lasteinleitung. Bei der zu verstärkenden Schale handelt es sich jedoch um ein Flächentragwerk. Textilbewehrter Beton vereinigt die Vorteile einer flächigen Verstärkungsschicht mit einem geringen Eigengewicht. Der Instandsetzungsvorschlag der ARGE Schalenbau Rostock in Zusammenarbeit mit dem Institut für Massivbau der Technischen Universität Dresden sah vor, die erforderliche Verstärkung durch Textilbeton mit einer dreilagigen Carbon-Bewehrung auszuführen. Die textile Bewehrung passt sich optimal an die gekrümmte Oberfläche der Schale, leitet die Kräfte flächig und damit sanft in die bestehende Konstruktion ein und ist nur mit einer geringfügigen Erhöhung des Eigengewichts verbunden.

8.8.3 Bemessung der Verstärkung

Die Textilbetonverstärkung wurde für die Aufnahme der Schnee- und Windlasten ausgelegt, weil das Eigengewicht inkl. Textilbetonschicht durch die vorhandene Bewehrung aufgenommen werden kann. Mit diesem konservativen Ansatz kann die vorhandene Vorverformung der Bewehrung bei der Bemessung der Verstärkung unberücksichtigt bleiben und außerdem stellen die vernachlässigten Tragwirkungen eine Tragreserve dar.

Das verwendete textile Bewehrungsgelege wurde am Institut für Textil- und Bekleidungstechnik der Technischen Universität Dresden aus Carbonrovings der Feinheit 800 tex (12k-Faser) der Toho Tenax Europe GmbH gefertigt. Als Rovingabstand wurden 10,8 mm in Kettrichtung und 18 mm in Schussrichtung gewählt (Bild 96). Mit diesem Carbon-Textil wurden bereits im Labor Faserbruchspannungen von bis zu 2400 N/mm² bei einer Bruchdehnung von ca. 9 bis 12 ‰ erreicht.

Für die Bemessung der Verstärkungsschicht aus Textilbeton wurden als Materialkennwerte die charakteristische Zugfestigkeit der Fasern zu $f_{tu} = 1400 \text{ N/mm}^2$, die Grenzdehnung im GZT mit $\epsilon_{tu} = 8 \text{ ‰}$ und der Materialsicherheitsbeiwert konservativ mit $\gamma_t = 2,1$ festgelegt.

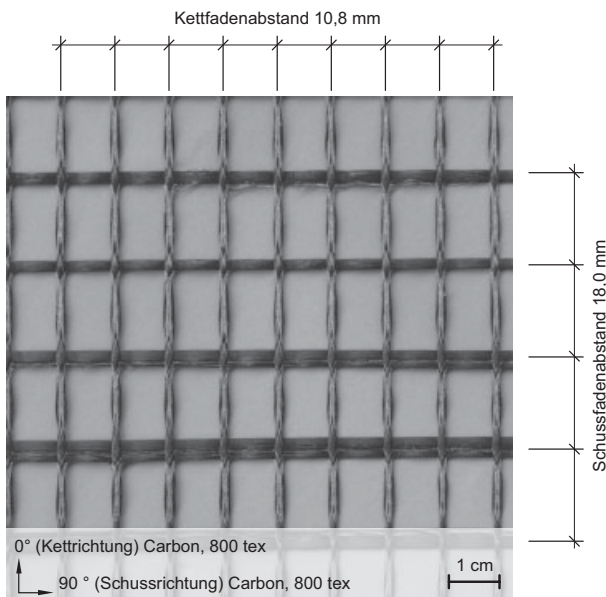


Bild 96. Textile Bewehrung für die Schalenverstärkung mit 12k-Carbonfasern

Die Bemessung ergab eine erforderliche Bewehrungsmenge von 2 Lagen. Gewählt wurden 2 + 1 Lagen textiler Bewehrung, wobei eine Lage als Sicherheitsvorhalt und für den Zustand der Gebrauchstauglichkeit ohne statische Erfordernisse eingelegt wird. Ein ausführlicher Bericht zur statischen Beurteilung des Tragwerks und zur Bemessung der Verstärkung kann in [35] nachgelesen werden.

Für den Einsatz der textilen Bewehrung wurde eine Zustimmung im Einzelfall beantragt und am 16. Oktober 2006 durch die Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern erteilt.

8.8.4 Ausführung der Verstärkungsarbeiten

Nach einem Technologietraining der ausführenden Firma an der Technischen Universität Dresden wurden die Verstärkungsarbeiten im Oktober/November 2006 unter fachkundiger Anleitung und Überwachung der TU Dresden ausgeführt. In Vorbereitung der Bauausführung der Verstärkungsmaßnahme wurden an der TU Dresden experimentelle Untersuchungen zum Haftverbund sowie zur Verankerung der textilen Bewehrung durchgeführt. Danach stellt die Haftzugfestigkeit innerhalb der textilbewehrten Verstärkung kein Versagenskriterium für den Haftverbund des Verstärkungssystems der Schale dar, denn sie liegt deutlich oberhalb der Oberflächenzugfestigkeit des

Altbetons. Eine ausreichende Tragfähigkeit des Altbetonuntergrundes der Schale wurde ebenfalls nachgewiesen, sodass die Tragfähigkeit des Haftverbunds am Gesamtsystem sichergestellt war.

Aus den experimentellen Untersuchungen zur Verankerung wurde die notwendige Länge der Übergreifungsstöße und der Endverankerung abgeleitet. Da die Verstärkungsschicht bis an die Randträger geführt wurde und die Momentenbeanspruchung der Schalenkonstruktion zum Rand hin abklingt, sind keine Probleme bei der Verankerung der Verstärkungsschicht zu befürchten.

Die textilbewehrte Feinbetonverstärkung wurde lagenweise auf die zuvor durch Sandstrahlen aufgeraute und mehrfach befeuchtete Oberfläche der Schale aufgebracht (Bild 97). Durch Auflaminieren wurden abwechselnd Feinbeton und textile Bewehrung in drei Lagen aufgetragen. In der Hauptbeanspruchungsrichtung (Nord-Süd-Ausdehnung) wurden die textilen Bahnen kontinuierlich und ohne Stoß eingebaut. Die 15 cm breiten Übergreifungsstöße in Querrichtung wurden gegeneinander versetzt angeordnet. Die Gesamtdicke der Verstärkung beträgt nur etwa 15 mm (Bild 98).

Die eigentlichen Verstärkungsarbeiten nach dem Vorbehandeln der Oberfläche wurden an zwei Arbeitstagen ausgeführt. An einem Arbeitstag wurden zunächst die ca. 70 m² auf dem weniger stark



Bild 97. Ausführung der Textilbetonverstärkung im nördlichen Bereich der Schale; a) Aufbringen der Feinbetonschicht, b) Einlegen der textilen Bewehrung, c) Einbetten der textilen Bewehrung, d) Aufbringen der letzten Feinbetonschicht

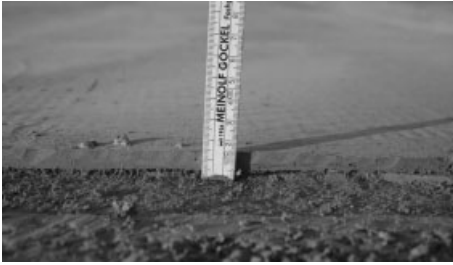


Bild 98. Die Schichtdicke der aufgetragenen Verstärkungsschicht beträgt ca. 15 mm

geneigten nördlichen Bereich ausgeführt, an einem weiteren Tag die Verstärkung auf dem – etwa gleich großen – stärker geneigten südlichen Bereich der Schale.

Erstmals wurde bei der Sanierung der Hyparschale der Fachhochschule in Schweinfurt mit der innovativen Technologie des textiltbewehrten Betons ein Stahlbetontragwerk verstärkt und somit sicherer für die Zukunft gemacht.

8.9 Anwendungsbeispiel Verstärkung einer Tonnenschale

8.9.1 Beschreibung des Bauwerks

Die im Jahr 1903 erbaute alte Ingenieurschule Zwickau wurde in der Zeit von 2007 bis 2009 umgebaut und beherbergt zukünftig das Zwickauer Finanzamt (Bild 99). Im Rahmen des Umbaus bestand vonseiten des Denkmal-

schutzes die Auflage, die historische tonnenförmige Dachkonstruktion eines Seitenflügels zu erhalten. Dieses Tonnendach aus Stahlbeton überspannt stützenfrei einen Saal mit einer Länge von ca. 17 m und einer Breite von ca. 7 m. Insgesamt elf Unterzüge mit einer Breite von 20 cm und einer Höhe von 25 cm sind monolithisch mit einer 8 cm dicken Stahlbetonplatte verbunden. Neun von zehn Dachfeldern besitzen im mittleren Bereich ca. 1 m × 3 m große Lichtöffnungen (Bild 100). Die Dachkonstruktion ruht zum Teil auf Mauerwerk und zum Teil auf Stahlträgern. Bei dem zu verstärkenden Tonnendach handelt es sich um ein gekrümmtes und strukturiertes Flächentragwerk.

8.9.2 Statische Analyse und Verstärkungsaufgabe

Im Rahmen einer Neubewertung der Statik konnte die Tragfähigkeit der Tonnenkonstruktion auf Basis der geltenden DIN 1045-1 nicht nachgewiesen werden. Ein Ersatzneubau und eine Unterspannung der bestehenden Dachkonstruktion kamen aufgrund denkmalschutzrechtlicher Bedenken nicht in Betracht. Traditionelle Verstärkungsverfahren wurden für ungeeignet befunden. Eine Verstärkung mit Spritzbeton würde mit Schichtdicken von etwa 6 bis 8 cm ein zu großes Eigengewicht aufweisen und die filigrane Platten-Balken-Konstruktion in der Ansicht nicht erhalten können. Bei geklebten Lamellen wäre der materielle Aufwand recht hoch geworden, denn die gleichmäßige Lastverteilung in der Platte hätte nur geringe Höchstabstände zugelassen und die Maßnahmen zur Verbundsicherung im Bereich



Bild 99. Ansicht der ehemaligen Ingenieurschule Zwickau, Nutzung nach der Sanierung als Finanzamt Zwickau

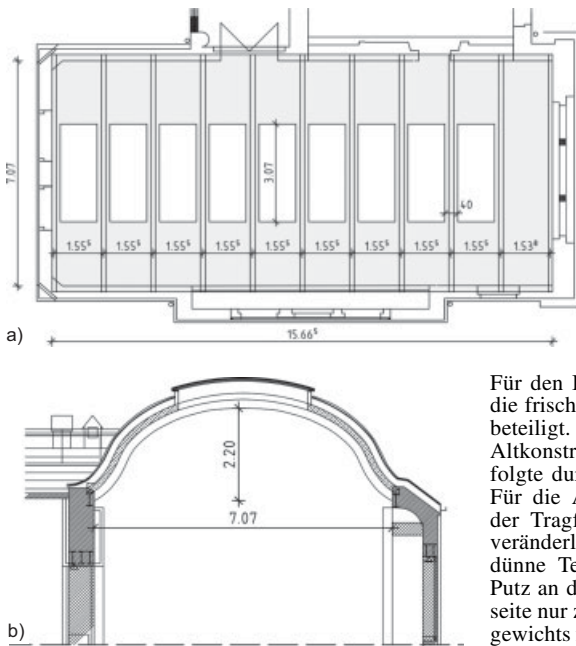


Bild 100. Draufsicht und Querschnitt des Tonnengewölbes im Finanzamt Zwickau; a) Draufsicht, b) Querschnitt

der negativen Krümmung an der Unterseite der Balken wären erheblich gewesen. Eingeschlitzte Lamellen waren aufgrund der Krümmung nicht realisierbar.

Der vom Bauherrn beauftragte Planer wandte sich an das Deutsche Zentrum für Textilbeton und der erarbeitete Vorschlag sah vor, nach der Entfernung der vorhandenen Putzschicht und der Herstellung eines tragfähigen Untergrundes die fehlende Tragfähigkeit durch eine mehrlagige Textilbetonverstärkung mit Carbonfasern wieder herzustellen. Die Textilbetonverstärkung ermöglicht zudem den Erhalt der Originalgeometrie und des filigranen Charakters der historischen Dachkonstruktion. Diese Vorteile gaben den Ausschlag zugunsten der vorgeschlagenen Lösung.

Das Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke der TU Dresden stellte für das Tonnendach ein geschichtetes FE-Modell auf. Mit diesem Modell wurden die Schnittgrößen unter Berücksichtigung des nichtlinearen Verhaltens des Tonnendachs ermittelt. Die Untersuchung von 17 Einwirkungskombinationen an einem Bauzustand und dem Endzustand wies nach, dass die Biegetragfähigkeit des Tragwerks an 10 kritischen Bereichen verstärkt werden musste.

Für den Bauzustand war anzunehmen, dass sich die frische Verstärkung noch nicht am Lastabtrag beteiligt. Der Nachweis der Tragfähigkeit der Altkonstruktion für den Lastfall Eigengewicht erfolgte durch eine Bemessung nach DIN 1045-1. Für die Auflagerbereiche konnte der Nachweis der Tragfähigkeit auch unter der maßgebenden veränderlichen Last erbracht werden, da die sehr dünne Textilbetonverstärkung den vorhandenen Putz an der Innenseite ersetzt und an der Außenseite nur zu einer moderaten Erhöhung des Eigengewichts führt. Der Nachweis der Schubtragfähigkeit konnte bereits unter Ansatz der vorhandenen Stahlbewehrung erbracht werden.

8.9.3 Bemessung der Verstärkung

Als textile Bewehrung wurde die in Bild 101 gezeigte orthogonale Struktur durch das Institut für Textil- und Bekleidungstechnik der TU Dresden hergestellt. Die Carbonrovings besitzen eine Feinheit von 800 tex (12.000 Filamente mit einem Durchmesser von 7 µm) und eine Querschnittsfläche von 0,45 mm². Das Rastermaß beträgt in Kettrichtung 7,2 mm und 14,4 mm in Schussrichtung. Anhand von Dehnkörperversuchen

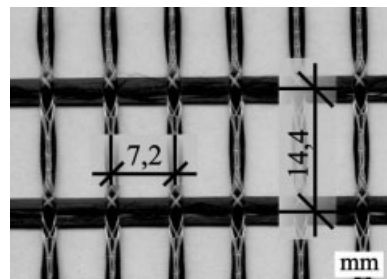


Bild 101. Textile Bewehrung aus 12k-Carbonfasern mit 7,2 mm Kettfadenabstand und 14,4 mm Schussfadenabstand

nach [62] wurden als charakteristische Zugfestigkeit $f_{tu} = 1600 \text{ N/mm}^2$ und eine Bruchdehnung von $\varepsilon_u = 8 \text{ ‰}$ angenommen. Der globale Sicherheitswert wurde mit 3,2 konservativ angesetzt.

Die Biegebemessung ergab im Grenzzustand der Tragfähigkeit unter der ständigen und vorübergehenden Einwirkungskombination an der höchstbeanspruchten Stelle des Plattenbalkenquerschnittes eine erforderliche textile Bewehrung von $\text{erf } A_t = 62 \text{ mm}^2$ an der Unterseite. Dies entspricht einer Verstärkung der Zugzone mit fünf Lagen bei einer Breite von 20 cm. Konstruktiv an den Stegen der Balken angeordnete U-förmige Zulagen dienen dem Anschluss der zusätzlichen Biegebewehrung an den Steg.

Im Bereich der dünnen gekrümmten Betonschale ergab die Bemessung sowohl für die Feldmomente als auch für die Stützmomente in Gebäudelängsrichtung eine zweilagige Verstärkungsschicht aus Textilbeton mit $\text{vorh } a_t = 93 \text{ mm}^2/\text{m}$. Bei der Bemessung wurde die Mindestbewehrung zur Sicherstellung eines duktilen Bauteilverhaltens unter Annahme des Mittelwerts der Betonzugfestigkeit des Feinbetons auf der sicheren Seite liegend zu $\text{erf } a_t = 32 \text{ mm}^2/\text{m}$ ($< \text{vorh } a_t = 93 \text{ mm}^2/\text{m}$) ermittelt. Die vorhandene Haftzugfestigkeit des Altbetonuntergrundes sowie die effektive Fläche des verwendeten Textils gewährleisteten die Aufnahme der Umlenkkräfte an den konkav gekrümmten Flächen der Dachkonstruktion, sodass auf zusätzliche Verbundmittel verzichtet werden konnte.

8.9.4 Ausführung der Verstärkung

Unter Berücksichtigung denkmalschutzrechtlicher, brandschutztechnischer und statisch-konstruktiver Erwägungen wurde die Textilbetonverstärkung zur Ausführung beauftragt. Die Zustimmung im Einzelfall erteilte die Landesstelle für Bautechnik in Sachsen.

Den Auftrag für die Ausführung erhielt die Torkret AG, ein in der Verstärkung von Stahlbetontragwerken sehr erfahrenes Unternehmen mit bereits aus dem vorgenannten Anwendungsbeispiel speziell geschultem Personal. Der Zuschlag konnte nach einer unbeschränkten öffentlichen Ausschreibung mit einem runden halben Dutzend Bewerbern erteilt werden. Es ist bemerkenswert, dass bereits bei der zweiten großmaßstäblichen Pilotanwendung ein so großer Bieterkreis zustande kam.

Die Überwachung der Baumaßnahme erfolgte durch das Deutsche Zentrum Textilbeton in Zusammenarbeit mit dem Institut für Massivbau der TU Dresden. Der Ablauf der Verstärkungsmaßnahme ist nachfolgend dargestellt.

Nach der Entfernung der vorhandenen Putzschichten wurde das Korngerüst des vorhandenen

Altbetons mittels Trockenfeststoffstrahlen (Sandstrahlen) freigelegt. Vorhandene Fehlstellen im Altbeton wurden mit einem Betonersatzsystem ausgebessert und reprofiliert. Die Tragfähigkeit der Verbundfuge konnte anschließend durch die Prüfung der Haftzugfestigkeit des Altbetonuntergrundes nach DIN EN 13813 an der Innen- und Außenseite der Schalenskonstruktion nachgewiesen werden. Die ZTV-ING [19] schreibt diesbezüglich einen Mindestwert von $1,5 \text{ N/mm}^2$ vor. Offene Risse wurden verpresst.

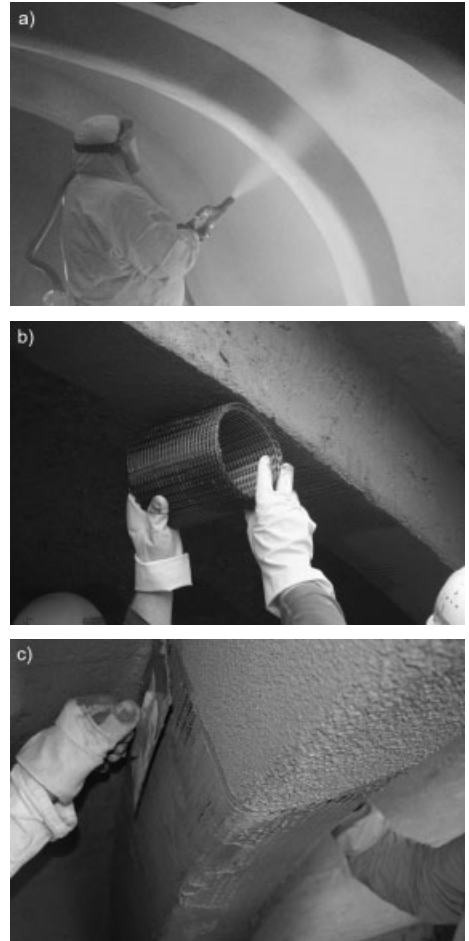


Bild 102. Aufnahmen von der Ausführung der Textilbetonverstärkung im Finanzamt Zwickau; a) Feinbetonauftrag im Sprühverfahren, b) Feinbetonauftrag im Sprühverfahren, c) Einbetten der textilen Anschlussbewehrung für die Biegeverstärkung an den Balken

Nach dem Vornässen des Untergrundes erfolgte der Auftrag der ersten Feinbetonschichten im Nasssprühverfahren. Der pumpfähige Feinbeton wurde vor Ort aus den Einzelkomponenten in einem Zwangsmischer hergestellt, auf die ca. 8 m höher gelegene Arbeitsebene mit einer Mörtelpumpe gefördert und lagenweise mit einer Schichtdicke von ca. 3 mm auf den Untergrund aufgesprüht (Bild 102a). Es folgte das Einarbeiten der textilen Bewehrung in die frische Feinbetonmatrix durch leichtes Eindrücken und Einstreichen mittels Glättkelle (Bild 102b und c). Dieser Ablauf wiederholte sich entsprechend der statisch erforderlichen Anzahl Bewehrungslagen. Den Abschluss der Textilbetonverstärkung bildete eine ca. 3 mm dünne Deckschicht. Die Applikation der einzelnen Verstärkungsschichten erfolgte im Innenbereich des Tragwerks stets frisch in frisch. Auf der Außenseite wurden Arbeitsfugen erforderlich, die nach der in Abschnitt 8.4.4 genannten Variante A ausgeführt wurden. Die Oberfläche wurde im Innenraum spritzrau belassen und auf der Außenseite für die nachfolgende Dichtungsschicht geglättet.

Die ordnungsgemäße Ausführung der Textilbetonverstärkung konnte durch Zuschnitt- und Bewehrungspläne sowie eine sorgfältige Bauausführung und -überwachung sichergestellt werden. Aufgrund der Schwindneigung des Feinbetons erfolgte eine intensive Nachbehandlung. Unmittelbar nach der Herstellung der Feinbetonschicht geschah dies durch Abdecken mit feuchtem Vlies und Folien. Bis zum Alter von sieben Tagen wurde die Betonoberfläche durch täglich mehrmaliges Besprühen bzw. Nässen mit Wasser feucht gehalten.

Ein ausführlicherer Bericht zu den Verstärkungsmaßnahmen ist in [97] nachzulesen. Die Wahl einer Textilbetonverstärkung erlaubte die Anpassung an die komplexe Geometrie, die Steigerung der Tragfähigkeit entsprechend der geltenden Anforderungen bei gleichzeitigem Erhalt der filigranen Tragwerksabmessungen und zudem eine nachhaltige Nutzung der vorhandenen Bausubstanz weit über deren planmäßige Lebensdauer.

9 Vergleich mit alternativen Verstärkungsmethoden

9.1 Allgemeines

Textilbeton ist für die oberflächliche Applikation an Platten, Balken und Stützen geeignet und kann die Biege-, Querkraft-, Normalkraft- und Torsionstragfähigkeit der verstärkten Bauteile bzw. Querschnitte erhöhen. In allen Fällen wird die Erhöhung der Tragfähigkeit in erster Linie durch die Übernahme von Zugkräften in der textilen Bewehrung erreicht. Für diese Verstärkungs-

aufgaben gibt es in der Praxis bereits zahlreiche erprobte Verfahren. In diesem Kapitel werden die wesentlichen Eigenschaften dieser Verfahren beschrieben und Vor- und Nachteile allgemein sowie gegenüber einer Textilbetonverstärkung aufgezeigt.

Die Übernahme von Druckkräften durch den Feinbeton kann ggf. ebenfalls zur Erhöhung der Tragfähigkeit beitragen. Dieser Anwendungsfall soll hier aber nicht betrachtet werden. Aufgrund ihrer derzeit größten Bedeutung in der Bauwirtschaft wurden folgende alternative Verstärkungsverfahren ausgewählt (s. auch Bild 103):

- Spritzbeton mit schlaffer Bewehrung,
- externe geklebte Bewehrungen aus Stahl bzw. Faserkunststoffen (FVK), auch in der Variante oberflächennahe Montage (eingeschlitzt) und
- externe Vorspannung.

Der für die Druckzonenverstärkung eingesetzte Aufbeton wird in den Vergleich nicht mit einbezogen, da er von der Funktion her nicht mit einer Textilbetonverstärkung vergleichbar ist. Bevorzugtes Anwendungsgebiet für unbewehrten Aufbeton ist die Biegeverstärkung durch eine Erhöhung der Tragfähigkeit der Druckzone. Allerdings wird dieser Anwendungsbereich bereits durch den Spritzbeton weitgehend abgedeckt.

9.2 Spritzbeton

Bei der Anwendung von Spritzbeton (Bild 103b) mit schlaffer Bewehrung ist die Verstärkungswirkung weder normativ noch praktisch begrenzt. Mit der dem bestehenden Tragwerk hinzugefügten Menge an schlaffer Bewehrung und Beton kann praktisch jede Verstärkungsaufgabe gelöst werden. Im Endzustand darf der entstandene Querschnitt als homogen betrachtet werden. Neben dem Nachweis der entsprechenden Querschnittstragfähigkeit im Endzustand spielt der Nachweis der Verbundfuge eine wichtige Rolle. Aber auch hier werden nicht die Einsatzmöglichkeiten der Verstärkung mit Spritzbeton limitiert, sondern nur Umfang und Art der ggf. erforderlichen Verbundmittel ermittelt, z. B. Dübel, eingebaute oder eingeklebte Bewehrung.

Grenzen für Spritzbetonverstärkungen können aus der mit der Verstärkung verbundenen Vergrößerung der Querschnittsabmessungen entstehen, da das nutzbare Lichtraumprofil entsprechend verkleinert wird. Zu bedenken ist weiterhin, dass das zusätzliche Eigengewicht erheblich sein kann. In vielen Fällen des Hoch- und Industriebaus ist die Verstärkung mit Spritzbeton derzeit die technisch und wirtschaftlich sinnvollste Methode der Verstärkung.

Bei der Ausführung von Spritzbetonverstärkungen muss zwischen der ersten Bewehrungslage

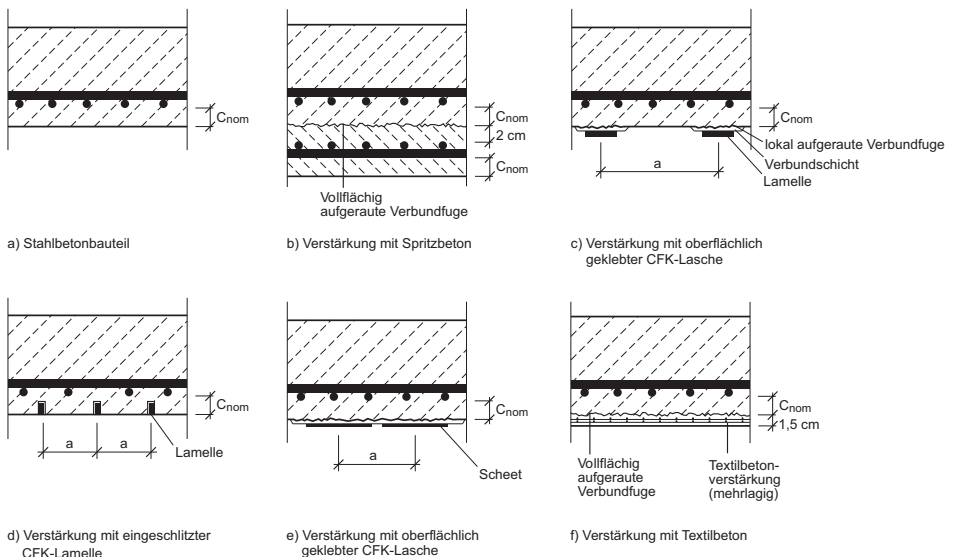


Bild 103. Prinzipdarstellung verschiedener Verstärkungsverfahren

und dem Altbetonquerschnitt ein Mindestabstand von 2 cm eingehalten werden. Die Stabdurchmesser ergeben sich je nach statischen Erfordernissen. Die Betondeckung ergibt sich aus der Expositions-kategorie. Dabei darf eine Abminderung des Vorhaltemaßes nicht berücksichtigt werden. Bei spritzrau belassenen Oberflächen muss die Betondeckung um 5 mm erhöht werden. Die Mindestdicke einer Spritzbetonverstärkung ergibt sich so zu etwa 5 bis 6 cm und liegt damit deutlich über den Werten einer Textilbeton-Verstärkungsschicht [51, 52].

9.3 Geklebte Bewehrungen

Bei dieser Methode werden in der Regel zusätzliche Bewehrungselemente mit Klebstoffen auf Kunstharzbasis auf die zu verstärkende Bauteiloberfläche geklebt (Bild 103c). Die Methode wird in der Praxis bei allen Verstärkungsaufgaben (Biegung, Querkraft, Umschnürung, Normalkraft und Torsion) angewandt. Bis zum Anfang der 1990er-Jahre wurden stählerne Lamellen¹⁸⁾ zur

Biegeverstärkung an die Oberflächen von Stahlbetonbauteilen geklebt. Seit der Verfügbarkeit von Carbonfaserkunststoff-Lamellen (CFK-Lamellen) ab Ende der 1980er-Jahre hat sich die Anwendung geklebter Bewehrungen erheblich vereinfacht. Der bei stählernen Lamellen erforderliche Korrosionsschutz kann entfallen. Die CFK-Lamellen sind wesentlich leichter und zusätzliche Aufwendungen zum Korrosionsschutz sind aufgrund der exzellenten Dauerhaftigkeit nicht notwendig. Zudem besitzen Lamellen aus CFK im Vergleich zu Stahllamellen ein Vielfaches an Festigkeit. Aus der hohen Leistungsfähigkeit resultieren hohe Anforderungen an den Betonuntergrund. So müssen Untergrundunebenheiten, die größer als 1 mm pro 30 cm Länge sind, vor der Applikation der Lamellen ausgeglichen werden.

CFK-Lamellen weisen eine ganze Reihe von Vorteilen auf, z. B.:

- extrem hohe Festigkeit,
- Korrosionsbeständigkeit,
- Beständigkeit gegenüber chemischen Angriffen,
- geringes Eigengewicht und geringe Schichtdicke.

Eine CFK-Lamelle kann bei sehr geringem Eigengewicht sehr hohe Kräfte übernehmen. Als begrenzender Faktor wirkt sich die eindimensionale Form im Zusammenhang mit der Verankerung der großen, durch die Lamelle aufnehmbaren

¹⁸⁾ Aufgrund des Eigengewichts und der Steifigkeit ist die Handhabung der mehrere Meter langen Stahllamellen bei der Verstärkung von unten bzw. von der Seite recht aufwendig und schwierig. Problematisch ist demzufolge auch die Belastung der frischen Klebefuge durch das hohe Eigengewicht der Stahllamelle. Dem muss ggf. mit besonderen Maßnahmen Rechnung getragen werden.

Kräfte über Klebeverbund im Betonbauteil aus. Bemessungsseitig wird der Nachweis der Verankerung bei aufgeklebten Lamellen in vielen Fällen maßgebend, sodass die hohe Festigkeit aufgeklebter Lamellen entweder nur teilweise ausgenutzt werden kann oder zusätzliche Maßnahmen für eine ausreichende Verankerung ergriffen werden müssen. Gemäß abZ ist bei aufgeklebten Stahl- bzw. CFK-Lamellen der Biegeverstärkungsgrad auf das Zweifache der unverstärkten Tragfähigkeit begrenzt.

Durch das Einschlitzten der Lamellen in die Betondeckung (Bild 103d) können die übertragbaren Verbundkräfte erheblich gesteigert werden, da so das Versagen durch Delamination in der Klebefuge aufgrund auftretender Haftzugspannungen praktisch ausgeschlossen wird [110]. Gemäß abZ muss die Dehnung im Gebrauchszustand auf 2 ‰ begrenzt werden. Eine Begrenzung des Verstärkungsgrades entsteht durch die geringe Querschnittsfläche der in Schlitze eingeklebten CFK-Lamellen, da diese nur wenige Millimeter dick sind und in der Betondeckung Platz finden müssen. Um die vorhandene oberflächennahe Stahlbewehrung nicht zusätzlich zu schwächen, müssen eingeschlitzte Lamellen mit entsprechender Sorgfalt ausgeführt werden. Problematisch und stark von den Verarbeitungseigenschaften des Klebers abhängig ist die Homogenität der Klebefuge bzw. deren vollflächige Ausführung – nicht zuletzt deshalb, weil kaum Möglichkeiten zur Kontrolle der Klebefuge bestehen.

Die Werkzeuge zur Verarbeitung der Klebstoffe müssen mit speziellen Reinigungsmitteln gesäubert werden, sofern sie überhaupt wiederholt zum Einsatz kommen können. Während der Verarbeitung werden Lösungsmitteldämpfe frei, die gesundheitlich bedenklich sind. Ggf. sind Atemschutzmaßnahmen erforderlich.

Eine spezielle Form der geklebten Bewehrungen sind Carbon-Tücher oder -Sheets (Bild 103e). Es handelt sich dabei um dichte textile Gelege mit Carbonfasern in Kettrichtung. Im Unterschied zu Lamellen, die als pultrodierte und bereits ausgehärtete Verbundwerkstoffe vermarktet werden, werden Sheets erst auf der Baustelle bei der Applikation in eine Kunstharzmatrix eingebettet. Vorteilhaft ist, dass sich die Sheets bei der Verarbeitung auch an gekrümmte und profilierte Querschnittsformen anpassen lassen, ähnlich wie die textilen Bewehrungen. Außerdem wird die zu verankernde Kraft auf eine größere Fläche verteilt, sodass der Verankerungsnachweis weniger kritisch ist und die teuren Fasern besser ausgenutzt werden können. Nachteilig ist, dass die erreichbare Qualität und Leistungsfähigkeit der Verstärkung sehr stark von den Randbedingungen der Ausführung abhängt (Temperatur, Feuchte, Qualifikation des Personals, ...).

Für detailliertere Informationen zur Verstärkung mit CFK sei auf weiterführende Aufsätze verwiesen, z. B. [4–6] für einen grundlegenden Überblick und [9, 75, 98, 116, 117] für verschiedene Detailfragen, die Gegenstand laufender Forschungen sind.

9.4 Externe Vorspannung

Zu Verstärkungszwecken findet die externe Vorspannung vor allem Anwendung im Brücken- und Ingenieurbau. Hier wurden für typische Brückenquerschnitte, vor allem Hohlkästen, geeignete Lösungen entwickelt. Aufwendig ist die Verankerung der großen Kräfte in den Querträgern oder in neu zu schaffenden Lisenen. Im Hoch- und Industriebau kommt die nachträgliche externe Vorspannung sehr selten zur Anwendung. Im nachfolgenden Vergleich bleibt die Vorspannung unberücksichtigt.

9.5 Technischer Vergleich

Jedes der vorgestellten Verstärkungsverfahren hat sein eigenes Eigenschaftsprofil. Der planende Ingenieur steht vor der Aufgabe, eine technisch sinnvolle und wirtschaftlich umsetzbare Lösung auszuwählen. Um diese Wahl zu erleichtern, wurde versucht, einen möglichst objektiven Vergleich der verschiedenen für den Hochbau geeigneten Verfahren anzustellen. Der Vergleich enthält verschiedene technische Eigenschaften der fertigen Verstärkung und Aspekte, die bei deren Ausführung eine Rolle spielen.

Aufgrund der möglichen Vielfalt an Verstärkungsaufgaben und örtlichen Randbedingungen kann es kein pauschal bestes Verfahren geben. Obwohl die verschiedenen Kriterien bei der Entscheidungsfindung nicht gleichwertig eingehen, ist es wenig zweckdienlich, in diesem Vergleich einzelne positive oder negative Eigenschaften zu wichten. Denn eine konkrete Bewertung ist nur bei Kenntnis der jeweiligen Randbedingungen eines spezifischen Objektes sinnvoll möglich. Es hängt von der Nutzung des zu verstärkenden Tragwerks ab, ob und wie das zusätzliche Eigengewicht oder der Brandwiderstand in die Bewertung einfließen. Und der Ausführungsort oder -zeitraum kann entscheidend dafür sein, ob die mit Kunstharzen geklebten Bewehrungen überhaupt infrage kommen.

Die für den Vergleich gewählte Symbolik (+ +/+ /O/–/–) stellt eine fünfteilige Skala zur Bewertung der einzelnen Kriterien dar und ist wie folgt zu verstehen: Die beste Bewertung ist + +, die schlechteste – –. Nachfolgend noch einige Bemerkungen und Detailinformationen zu den in Tabelle 15 bewerteten Kriterien:

Technische Eigenschaften

DIN/abZ/ZiE: In dieser Zeile steht (++) dafür, dass das Verfahren genormt ist, (+) dafür, dass eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung vorliegt und (O) dafür, dass eine Zustimmung im Einzelfall für die Anwendung erforderlich ist. Da es auch für genormte Verfahren sinnvoll sein kann, für eine nach Norm nicht zulässige Detaillösung eine ZiE zu beantragen, um eine wirtschaftlichere Lösung realisieren zu können, stellt die Bewertung zunächst nur eine Einschätzung des Aufwands und des Einsatzbereiches dar.

Tragkraft: Mit allen Methoden ist eine deutliche Verstärkungswirkung erreichbar, jedoch können mit Spritzbeton sowohl Zug- und Druckkräfte aufgenommen werden und der Menge der Verstärkung sind keine technischen Grenzen gesetzt. Geklebte Bewehrungen und Textilbeton sind nur mit Lagenzahlen im unteren einstelligen Bereich sinnvoll einsetzbar.

Verstärkungsgrad: Für Spritzbeton gibt es hinsichtlich des Verstärkungsgrades keine Begrenzungen, bei geklebten Bewehrungen ist in allen abZ der Verstärkungsgrad auf den Faktor 2 begrenzt. Für Textilbeton konnten im Labor bereits Verstärkungsgrade von mehr als Faktor 3 erreicht werden, ohne dass ein Verbundversagen eintrat.

Verankerung: Insbesondere bei den oberflächlich aufgeklebten Verstärkungssystemen wird der Verankerungsnachweis im Regelfall maßgebend. Die Tragfähigkeit der aufgeklebten Bewehrung kann nur zum Teil ausgenutzt werden, ggf. sind aufwendige Maßnahmen zur konstruktiven Verankerung erforderlich. CFK haben zwar im Regelfall kürzere Verankerungslängen als Stabstahlbewehrung, aber das Problem besteht darin, die in der Bewehrung aufnehmbaren Kräfte in den Beton zu übertragen. Bei den eingeschlitzten Lamellen ist die Situation günstiger als bei den oberflächlich aufgeklebten. Textilbeton benötigt durch seinen flächigen Charakter kürzere Verankerungslängen bei gleichzeitig geringerer Beanspruchungen der Verbundfuge. Durch die Rissbildung ist es voll kompatibel zum Verformungsverhalten der zu verstärkenden Stahlbetonbauteile. Durch den flächigen Charakter werden die Verbundkräfte über eine große Fläche eingetragen.

Zusätzliches Eigengewicht/Schichtdicke: Durch die hohe Mindestdicke und die hohen Stoffvolumina ist das zusätzliche Eigengewicht bei Spritzbeton am größten und muss in der Statik berücksichtigt werden. Das zusätzliche Gewicht geklebter Bewehrungen ist hingegen vernachlässigbar. Das zusätzliche Eigengewicht einer Textilbetonverstärkung ist aufgrund der niedrigen Schichtdicken gering, jedoch nicht vernachlässigbar.

Bauklimatik: Spritzbeton- und Textilbetonverstärkungen verändern die bauklimatischen Eigen-

schaften der zu verstärkenden Stahlbetonkonstruktion kaum. Faserkunststoffverbunde mit Kunstharzen wirken als Diffusionsbarriere und behindern die Wasserdampfdiffusion [48]. Besonders kritisch ist dieser Effekt bei der Umschnürung von Stützen, da dort die Bauteiloberfläche vollständig bedeckt wird. Bei eingeschlitzten Lamellen sind die Auswirkungen hingegen vernachlässigbar.

Feuerwiderstand: Spritzbeton entspricht hinsichtlich der erreichbaren Brandwiderstandsdauer dem Stahlbeton. Über ausgesprochen positive Ergebnisse bei Textilbetonverstärkungen wurde im Abschnitt 7.3.6 berichtet. Unter praktischen Bedingungen scheinen Brandwiderstandszeiten von 90 Minuten ohne zusätzliche Maßnahmen erreichbar. Bei den geklebten Verstärkungen begrenzen die Klebstoffeigenschaften den Einsatztemperaturbereich. Bei den meisten Systemen verliert der Klebstoff beginnend ab 80 °C seine Wirksamkeit. Er erweicht. In den abZ ist der Einsatztemperaturbereich auf 40 °C beschränkt.

Korrosionsschutz der Verstärkungsbewehrung: Bei Spritzbeton wird die Zusatzbewehrung durch eine ausreichend dichte und dicke Betondeckung vor Korrosion geschützt. Stahllamellen lassen sich nur durch Anstriche vor Korrosion schützen. Bei den FVK und bei Textilbeton sind die Fasern von Haus aus dauerhaft¹⁹⁾.

Korrosionsschutz der vorhandenen Bewehrung: Bei Spritzbeton kann die Repassivierung bzw. der Ersatz der Betondeckung durch die Spritzbetonverstärkung übernommen werden. In jedem Fall verringert sich die Geschwindigkeit, mit der die Karbonatisierungsfront in Richtung des Bauteilinneren voranschreitet. Eine ähnliche Schutzwirkung wird von Textilbetonverstärkungen erwartet. Die Quantifizierung dieses Effekts ist Gegenstand laufender Forschungsarbeiten. Bei den geklebten Bewehrungen ist meist keine Erhöhung des Korrosionsschutzes der vorhandenen Bewehrung möglich.

Aspekte der Herstellung

Vorbereitung: Ein ausreichend tragfähiger Untergrund ist für jedes Verfahren erforderlich. Bei aufgeklebten CFK-Lamellen ist nach abZ ein Mindestwert für die Oberflächenhaftzugfestigkeit von 1,5 N/mm² erforderlich. Nach DIN 18551:2005 ist für Spritzbeton ein Wert zu vereinbaren z. B.

¹⁹⁾ In Abschnitt 6.8 wurde erläutert, dass für die Tragwerksverstärkung der Einsatz von Carbonfasern empfohlen wird, das AR-Glasfasern auch unabhängig von der Dauerhaftigkeitsproblematik im Regelfall die unwirtschaftlichere Lösung darstellen werden.

1,5 N/mm², nach ZTV-ING ist 1,5 N/mm² erforderlich. Bei Spritzbeton und Textilbeton ist die Oberfläche vollflächig vorzubehandeln, während bei den oberflächlich geklebten Bewehrungen nur die betroffenen Flächenbereiche vorzubehandeln sind. Bei den eingeschlitzten Lamellen sind statt einer Aufrauung der Oberfläche die notwendigen Schlitzte herzustellen.

Witterungsempfindlichkeit: Spritzbetonarbeiten stellen die gleichen Anforderungen an die Witterungsbedingungen wie Stahlbetonarbeiten. Abgesehen von starkem Niederschlag und Frost ist die Herstellung bei nahezu jedem Wetter auch im Außenbereich möglich. Textilbetonverstärkungen weisen aufgrund der mineralischen Matrix einen ähnlichen Einsatzbereich auf, sind jedoch aufgrund der extrem dünnen Schichten empfindlich gegen Wasserverlust im jungen Betonalter durch

direkte Sonneneinstrahlung und Wind. Geklebte Bewehrungen sind nur unter ganz bestimmten Randbedingungen überhaupt verarbeitbar. So muss die Oberflächentemperatur der Bauteile einen angemessenen Abstand zum Taupunkt haben und der zulässige Temperaturbereich ist allgemein eingeschränkter als bei mineralischen Systemen.

Qualifikation des Personals: Bei Spritzbetonarbeiten gelten die Verarbeitungsregeln des Stahlbetonbaus. Spezielle Kenntnisse werden bei der Ausbildung zum Düsenführer erworben. Bei den geklebten Bewehrungen ist durch den Materialwechsel zu Kunstharzen ein vollständig neuer Arbeitsablauf zu erlernen, der mit der Welt des Betonbaus grundsätzlich nicht vereinbar scheint. Die Verarbeitung geklebter Bewehrungen erfordert Randbedingungen, die eher einem Reinraum als einer

Tabelle 14. Gegenüberstellung und Bewertung der Verstärkungsverfahren

Kriterium	Spritzbeton	Geklebte Bewehrung				Textilbeton
		Stahl	FVK			
			Aufgeklebte Lamelle	Eingeschlitzte Lamelle	Sheet	
Technische Eigenschaften						
DIN/abZ/ZiE	++	+	+	+	O	O
Tragkraft	++	+	+	+	+	+
Verstärkungsgrad	++	--	--	–	--	O
Verankerung	++	–	–	+	+	++
Zusätzliches Eigengewicht bzw. Schichtdicke	–	+	++	++	++	+
Bauklimatik	++	+	+	++	--	++
Feuerwiderstand	++	--	--	--	--	++
Korrosionsschutz der Verstärkungsbewehrung	+	--	++	++	++	++
Korrosionsschutz der vorhandenen Bewehrung	++	--	--	--	--	++
Aspekte der Herstellung						
Vorbereitungsaufwand	O	+	+	+	+	O
Witterungsempfindlichkeit	++	–	–	–	–	+
Qualifikation des Personals	O	--	--	--	--	--
Applikationsaufwand	–	++	++	++	++	–
Brandschutzmaßnahmen	++	--	--	--	--	++
Anpassbarkeit	++	--	--	--	+	++

Baustelle gleichen. Die Verarbeitung von Textilbeton setzt Erfahrungen aus der Spritzbetontechnologie voraus und fordert darüber hinaus einige spezielle Kenntnisse. Vereinfacht ausgedrückt stellt die Verarbeitung von Textilbeton geringere Anforderungen an die Qualifikation des Personals als die Verarbeitung geklebter Bewehrungen – nicht vom Schwierigkeitsgrad her, sondern weil der Textilbeton in erster Linie miniaturisierter Stahlbeton ist (s. Abschn. 1.4).

Applikationsaufwand: Im Vergleich der Verfahren sind für Spritzbeton die größten Stoffvolumina erforderlich und es fallen erhebliche Mengen Rückprall an, die entsorgt werden müssen. Die ggf. erforderlichen zusätzlichen Verbundmittel können einen erheblichen Anteil der Arbeitsleistung bei der Applikation ausmachen. Bei den geklebten Bewehrungen schlägt vor allem die geringe Flächenleistung als Folge der hohen Anforderungen an die Verarbeitungsbedingungen als Aufwand zu Buche. Beim Textilbeton schlägt vor allem der derzeitige Entwicklungsstand in Form eines hohen Arbeitsaufwandes zu Buche. Eine effiziente Verarbeitungstechnologie für Textilbeton muss erst noch entwickelt werden. Bisher liegen erst sehr wenige praktische Erfahrungen mit diesem neuen Werkstoff vor.

Brandschutzmaßnahmen: Bei Spritzbeton und aller Voraussicht nach bei Textilbeton sind für das Erreichen der erforderlichen Brandschutzklassen keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich. Bei geklebten Bewehrungen sind bereits für die niedrigste Klasse F 30 erhebliche Aufwendungen erforderlich, da die verstärkten Bereiche durch umfangreiche Dämmsysteme vor der Erwärmung geschützt werden müssen.

Anpassbarkeit: Spritzbetonverstärkungen lassen sich an jede Geometrie anpassen. Die geklebten Bewehrungen aus Lamellen lassen sich nur an ebenen Tragwerken verwenden. Die aufgeklebten FVK können auch zweiaxial ausgebildet werden, die eingeschlitzten hingegen nur einaxial, da eine Durchdringung in der Betondeckung technisch nicht realisierbar ist. Sheets können sich in wesentlich größerem Umfang dem Kraftfluss und der Querschnittsgeometrie anpassen. Da sie erst auf der Baustelle mit dem Kunstharz zu einem Verbundwerkstoff kombiniert werden, besitzen sie annähernd die gleiche Flexibilität und Formbarkeit wie die textilen Bewehrungen des Textilbetons.

9.6 Wirtschaftlicher Vergleich

Vorbemerkungen

Ein wirtschaftlicher Vergleich der verschiedenen Verstärkungsmethoden, der auch auf andere Projekte übertragbar wäre, ist nur schwer möglich.

Dazu gibt es zu viele Randbedingungen, die die Preise der einzelnen Varianten in die eine oder andere Richtung stark beeinflussen können. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten kann schon ein einzuhaltender Brandschutz ausschlaggebend sein. Ist er bei einer Spritzbetonverstärkung durch die entsprechende Betondeckung ohne zusätzliche Aufwendungen erfüllbar, kann er bei geklebter Bewehrung die Kosten leicht verdoppeln. Die Glasübergangstemperatur der Kunstharzkleber liegt bei deutlich unter 100 °C und führt zu teuren Brandschutzverkleidungen, die im Brandfall das Erreichen eben dieser Temperatur an der Klebefläche verhindern müssen.

Ein hoher Schädigungsgrad des Untergrundes kann bei einer Klebeverstärkung die Verwendung teurer Betonersatzsysteme für den Korrosionsschutz und die Reprofilierung erforderlich machen. Beim Betonauftrag einer Textil- oder Spritzbetonverstärkung werden Schadstellen nach entsprechender Untergrundvorbehandlung ohne Mehraufwand mit Instand gesetzt. Der Ausgleich von Unebenheiten und die Behandlung von Rissen, die zur Korrosion der vorhandenen Stahlbewehrung führen können, spielen beim flächigen Betonauftrag keine wesentliche finanzielle Rolle, müssen aber bei einer Verstärkung mit Stahl-, oder CFK-Lamellen am gesamten Bauteil mit Instand gesetzt werden.

Aber auch der Vergleich der Verfahren Spritzbeton oder Textilbeton hängt von vielen Parametern ab. Bei einer Spritzbetonverstärkung ist es wirtschaftlich unerheblich, ob für die Verstärkung eine Q188 A oder eine Q636 A Matte²⁰⁾ eingebaut wird. Der Arbeitsaufwand ändert sich nicht. Bei Textilbeton müssten für eine vergleichbare Querschnittserhöhung mehrere Lagen Textil in die Feinbetonschicht eingebaut werden. Der Einbau jeder zusätzlichen Lage Textil zwischen den aufzubringenden Feinbetonschichten schlägt sich über den höheren Zeitaufwand und den damit verbundenen Arbeitslohn erheblich im Preis nieder. Muss bei einer Spritzbetonverstärkung die Zulagebewehrung nach den Regeln der gültigen Stahlbetonnorm am Auflager verankert werden, kann es beim Textilbeton im betrachteten Einzelfall (ZiE) „ausreichend“ sein, die Textilbetonschicht vor dem Auflager enden zu lassen. Bei einer Lamellenverstärkung kann es aufgrund der für die Verankerung benötigten Klebefläche zu einer wesentlich höheren Lamellenfläche führen, als für die reine Biegebemessung notwendig.

²⁰⁾ Mattenangaben nach Lagermattenprogramm, Institut für Stahlbetonbewehrung e. V.

Ein konkretes Beispiel

Trotzdem sei hier einmal der Versuch gewagt, an einem der Baupraxis entnommenen, hier aber anonymen Beispiel die verschiedenen Verstärkungssysteme miteinander zu vergleichen. Es sollen 500 m² Deckenfläche über einer Parkgarage verstärkt werden. Eine Decke ist monolithisch mit Haupt- und Nebenerkzeugen verbunden. Darüber soll eine bestehende Laden- und Wohnraumnutzung gewährleistet werden. Ein oberseitiger Betonabtrag führte zu einer nicht mehr ausreichenden Tragfähigkeit. Ein F90-Brandschutz ist sicherzustellen. Die maximale Spannweite der einzelnen Deckenfelder beträgt 1,8 m. Nach Vorgaben des Auftraggebers ist eine Verstärkung nur von unten möglich. Eine Verstärkung mit Aufbeton bzw. der Stützmomente unter Ansatz einer Durchlaufträgerwirkung fallen damit aus. Darum wird die Verstärkung für nebeneinander liegende Einfeldträger nachgewiesen, ein oberseitiges Aufreißen der Decke im Stützmomentenbereich wird in Kauf genommen. Auch eine Verstärkung mit eingeschlitzten CFK-Lamellen fällt aufgrund einer zu geringen vorhandenen Betondeckung aus. Das Einkleben der Schlitzlamellen in einer zusätzlich aufgetragenen Ausgleichsschicht ist wegen erhöhter Anforderungen an den Verbund zwischen Ausgleichsschicht und Untergrund und dem damit verbundenen Risiko für den Unternehmer ausgeschlossen. Im Gegensatz zu einer Spritzbetonverstärkung muss, trotz erfüllter Voraussetzungen und erfolgtem rechnerischem Nachweis, dieser Verbund und damit der Erfolg der Verstärkungsmaßnahme durch Haftzugprüfungen nach der Ausführung belegt werden.

Spritzbetonverstärkung: Die statische Berechnung für die Spritzbetonvariante ergibt einen Zulagequerschnitt von 1,2 cm²/m BSt 500. Gewählt wird eine Q188 A, die alle 25 cm mit Stabstahl übergriffen und 8 cm tief in die Unterzüge mit Reaktionsharmörtel eingeklebt werden muss. Die Matten müssen mit 4 Stahldübeln M8 im Altbeton verankert werden. Das zusätzliche Eigengewicht der Spritzbetonverstärkung kann über das vorhandene Tragsystem abgeleitet werden. Die Maßnahme wird für die Fremdüberwachung angemeldet.

Aufgeklebte CFK-Lamellen: Aufgrund der maximal einzuhaltenden Abstände der Lamellen ergeben sich 1500 lfd. Meter CFK-Lamellen mit dem kleinsten handelsüblichen Querschnitt, die in die einzelnen Felder über die ganze Spannweite geklebt werden. Auf einer Länge von ca. 200 m müssen größere Unebenheiten mit einem Epoxidharmörtel ausgeglichen werden, um die geforderte Ebenheit herzustellen. Die Maßnahme wird durch eine für die Ausführung von CFK-Lamellen zugelassene Stelle fremdüberwacht.

Textilbetonverstärkung: Die Bemessung ergibt eine Lage textile Bewehrung mit dem Standardtextil I des DZT (s. Bild 28a). Die Textilbetonschicht kann in diesem Einzelfall vor den Auflagern enden. Es muss eine ZiE beantragt werden und die Maßnahme wird durch Mitarbeiter der TU Dresden permanent vor Ort überwacht. Dazu kommen noch die erforderlichen Materialprüfungen im Labor und eine vollständige Dokumentation.

Das Ergebnis des wirtschaftlichen Vergleichs für diese drei Lösungsvarianten ist in Tabelle 16 dargestellt, stellt aber auch nur ein mögliches Ergebnis für die eben beschriebenen Randbedingungen dar. Würde für die Spritzbetonlösung eine ZiE beantragt werden, wäre es auch denkbar, die kostenintensive und umfangreiche Verankerung der Zulagebewehrung in den Auflagern nach Stahlbetonbaunorm zu reduzieren.

Die Kosten für die statische Berechnung und die Fremdüberwachung werden mit in die Baustelleneinrichtung eingerechnet. Aufgrund des höheren Fremdüberwachungsaufwands für den Textilbeton und der erforderlichen Zustimmung im Einzelfall sind die Kosten der Baustelleneinrichtung für Textilbeton am höchsten. Bei der CFK-Lamelle dagegen wird aufgrund der geringeren erforderlichen technischen Ausrüstung die Position für die Baustelleneinrichtung am günstigsten.

Für die Verstärkung mit CFK-Lamellen müssen zwar nur die Klebeflächen mit einer Untergrundvorbehandlung versehen werden, aber aufgrund von Schadstellen in den restlichen Betonflächen werden hier zusätzliche Instandsetzungsarbeiten notwendig. Aus diesem Grund fällt die Position der Untergrundvorbehandlung für CFK-Lamellen im Kostenvergleich nicht wesentlich geringer aus. Für den Spritzbetonauftrag bzw. den Feinbetonauftrag für den Textilbeton fallen die Kosten der Untergrundvorbehandlung gleich aus. Obwohl bei diesen Verfahren die Rückprallentsorgung sowie ein höherer Aufwand für Schutzmaßnahmen erforderlich werden, fallen diese Kosten nicht allzu sehr ins Gewicht, da die Räumlichkeiten gut zugänglich und keine aufwendigen Schutzmaßnahmen nötig sind. Ein normales Arbeitsgerüst ist für alle Maßnahmen ausreichend.

Wären bei der Verstärkungsmaßnahme mit Textilbeton mehrere Textillagen erforderlich, überstiegen die Kosten der Textilbetonvariante diejenigen einer Verstärkung mit Spritzbeton. Aufgrund eines höheren Verstärkungsgrades könnte der nach abZ einzuhaltende Biegezugverstärkungsgrad von 2 dazu führen, dass eine Verstärkung mit CFK-Lamellen bei einer höheren Belastung dann nicht mehr zulässig ist. Die Änderung einer Randbedingung könnte die technische Machbarkeit einer Methode komplett infrage stellen und bei

Tabelle 15. Prozentualer Kostenvergleich unterschiedlicher Verstärkungsverfahren, aufgeschlüsselt nach Kostenblöcken

Kostenblock	CFK	Spritzbeton	Textilbeton
Baustellenreinrichtung	8	11	16
Untergrundvorbehandlung	17	19	19
Verstärkung	75	70	46
Zwischensumme	100	100	81
Brandschutz	85	-	(-)
Endsumme	185	100	81

dem Vergleich der Methoden zu einem grundsätzlich anderen Ergebnis führen.

Die Gegenüberstellung der einzelnen Kostenblöcke zeigt, dass eine pauschale Beurteilung der Wirtschaftlichkeit nicht möglich ist und dass die verschiedenen Verfahren nicht nur unterschiedliche technische Eigenschaften aufweisen, sondern auch je nach Randbedingungen wirtschaftlich unterschiedlich bewertet werden müssen. Wenn Sie als Leser jetzt eine Vorstellung davon haben, wann Textilbeton als Verstärkungssystem infrage kommen würde, dann hat der wirtschaftliche Vergleich sein Ziel erreicht.

10 Zusammenfassung

10.1 Gegenwärtige Situation

Die vorgestellten Projekte zeigen, dass Textilbeton einen Entwicklungsstand erreicht hat, der in der Praxis bereits in wichtigen Anwendungsbereichen die Anwendung als Verstärkungsmaterial bei vorwiegend ruhender Beanspruchung erlaubt.

Sobald eine Verstärkung mit Textilbeton erwogen wird, ist dringend zu empfehlen, alle beteiligten Projektpartner – Bauherren, Planer, Prüfingenieur, ausführende Unternehmen, Bauaufsicht – darüber zu informieren. Die vorliegenden Erfahrungen zeigen, dass die Erteilung einer Zustimmung im Einzelfall bei Vorlage vollständiger und aussagekräftiger Antragsunterlagen binnen weniger Wochen möglich ist und kein Hinderungsgrund für einen termingerechten Ablauf der Baumaßnahme darstellt. Jedoch ist mit einem signifikanten Informationsbedarf und zahlreichen Fragen zu rechnen, deren Klärung durchaus auch längere Zeit benötigen kann. Immerhin handelt es sich bei der Verstärkung mit Textilbeton um ein neuartiges Material, das mit einem neuartigen Verfahren ausgeführt wird und es müssen alle Projektbeteiligten überzeugt werden bzw. sein, dass damit die erforderliche

Tragsicherheit dauerhaft gewährleistet werden kann.

Für die Anwendung von Textilbeton in der Bauwerkverstärkung kann auf eine große Menge an Laborversuchen an der Technischen Universität Dresden zurückgegriffen werden, sodass aufwendige Versuche nur in solchen Fällen erforderlich werden, in denen der vorliegende Erfahrungsbereich verlassen wird und sich das Tragverhalten nicht durch die entwickelten Modelle und Simulationen hinreichend genau und zuverlässig abschätzen lässt.

Die textilen Bewehrungen werden in einem hoch-effizienten Prozess hergestellt. Die mit einer Maschine mögliche Jahresproduktionsmenge übertrifft das gegenwärtige Marktvolumen noch um ein Vielfaches. Zur Förderung der Anwendung dieses außerordentlich leistungsfähigen Verstärkungsverfahrens stehen an der Technischen Universität Dresden Herstellungskapazitäten auf Prototypen geeigneter Textilmaschinen zur Verfügung. Ansprechpartner für den Bezug textiler Bewehrungen zur Bauwerksverstärkung wurden in Abschnitt 3.5.3 genannt.

Da die Herstellung des Feinbetons aus Einzelkomponenten auf der Baustelle unwirtschaftlich und fehleranfällig ist, stehen dank der Hilfe engagierter Unternehmen auch fertig konfektionierte Feinbetonmischungen zur Verfügung. Die Kontaktadresse ist in Abschnitt 4.6 zu finden.

Während es in den vergangenen 3 bis 5 Jahren in vielen Fällen schwierig war, Unternehmen zu motivieren, in die Technologie Textilbeton zu investieren, sind wir derzeit von der Menge und Qualität der Anfragen aus dieser Richtung positiv überrascht. Entsprechend dieser aktuellen Entwicklung ist es durchaus wahrscheinlich, dass die Informationen zu Preisen und Anbietern bei Auslieferung des Beton-Kalenders bereits nicht mehr aktuell sind.

10.2 Ausblick

Die laufenden Forschungen zielen zum einen auf die Weiterentwicklung der Materialien zur Steigerung der Leistungsfähigkeit hinsichtlich Festigkeit, Verbundverhalten und Langzeiteigenschaften. Zum anderen wird im Sonderforschungsbereich 528 der Technologietransfer in die Praxis mit mehreren namhaften Partnern aus der Bauindustrie vorangetrieben. Nach der bisher 10-jährigen Bearbeitung eher mechanisch-technischer Fragestellungen rücken jetzt auch die für erfolgreiche Anwendung notwendigen Aspekte einer wirtschaftlichen Herstellung und baustellentauglichen Technologie in den Forschungsschwerpunkt.

Gegenwärtig gibt es starke Bestrebungen, beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) eine Musterzulassung für die Biegeverstärkung von Stahlbetonbauteilen zu erreichen. Parallel zu diesen Aktivitäten ist die Verstärkung weiterer Objekte auf der Basis von ZiE anzustreben und zu fördern. Auf dem Weg von einem neuartigen Verstärkungsverfahren zu einer breiten Einführung in der Baupraxis sind praktische Erfahrungen eine unverzichtbare Stütze bei der Entwicklung der Materialien, der Bemessungswerkzeuge und der Verarbeitungstechnologie.

Voraussetzung für eine hohe und gleichbleibende Produktqualität ist die Definition von Standards für Textilien, Ausführung, Überwachung und Prüfung. Das betrifft besonders die Definition von Qualitätskennwerten für die gesamte Prozesskette auf der Textilseite (z. B. für Filament, Schlichte, Garn, Textil und Sekundärbeschichtung) als auch den Feinbeton (Frisch- und Festbetonkennwerte) und den fertigen Verbundwerkstoff. Die Erarbeitung von Vorschlägen für Prüfverfahren ist Gegenstand eines Technischen Komitees innerhalb des RILEM.

10.3 Weiterführende Literatur

Als weiterführende Literatur sei nochmals auf die bereits in der Einleitung empfohlenen Quellen hingewiesen:

- Der mittlerweile nicht mehr ganz aktuelle Sachstandbericht des DAfStb aus dem Jahr 1999 gibt einen Überblick über die Verwendung von Textilien Bewehrungen auch abseits der Bauwerksverstärkung [28].
- Wesentlich aktueller und auch ausführlicher ist der Sachstandbericht des RILEM, aus deutscher Sicht leider in englischer Sprache verfasst [14].
- Auf jeden Fall empfehlenswert sind die Tagungsbände zu den Kolloquien der beiden Sonderforschungsbereiche aus den Jahren 2001 [53], 2003 [29], 2006 [54] und 2009 [34]. Letzterer ist als Open Access Publikation

ohne Zugriffsbeschränkung unentgeltlich online verfügbar²¹⁾.

Speziell für die Bauwerksverstärkung befindet sich im Sonderforschungsbereich 528 der TU Dresden ein Praxishandbuch in Planung. Es wird nach derzeitiger Planung gegen Ende 2011 erscheinen und eine wesentlich umfangreichere Darstellung der Entwicklungen auf dem aktuellen Stand bieten.

10.4 Ansprechpartner

Wichtigster Ansprechpartner für die Planung von Tragwerksverstärkungen aus Textilbeton ist derzeit das Deutsche Zentrum Textilbeton (DZT). Das DZT ist eine Ausgründung der Technischen Universität unter dem Dach der TUDAG, mit dem Ziel, die Forschungsergebnisse des Sonderforschungsbereiches 528 in die Baupraxis zu transferieren. Das DZT steht für alle Fragen zum Textilbeton, insbesondere aber zur Anwendung als Verstärkungsmaterial für Stahlbetontragwerke zur Verfügung. Es berät potenzielle Anwender und Bauherren über Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsbereiche, begleitet den Bauprozess über alle Phasen der HOAI bis hin zur Überwachung und Abnahme des verstärkten Bauwerks. Zur Qualifikation von Mitarbeitern ausführender Unternehmen bietet das DZT Qualifizierungslehrgänge an.

Dazu bedient es sich der Expertise der mehr als 50 Wissenschaftler des Sonderforschungsbereiches 528, zu denen ein intensiver Kontakt besteht. Das DZT ist Teil eines Netzwerks zahlreicher Unternehmen aus allen Teilen der Prozesskette zur Herstellung und Anwendung von Textilbeton, die sich zur Förderung der Anwendung und Entwicklung von Textilbeton in dem Markenverband TUDALIT²²⁾ zusammengeschlossen haben.

Das DZT ist ein Instrument der TU Dresden, um Forschungsergebnisse ohne bürokratische Hemmnisse auf direktem Weg der Bauindustrie zur Verfügung zu stellen.

Kontaktdaten:

Deutsches Zentrum Textilbeton
Chemnitzer Str. 46b
01187 Dresden

Internet: www.textilbetonzentrum.de
Email: info@textilbetonzentrum.de

Silvio Weiland
Tel.: +49 (0)351 463-3 63 44
Fax: +49 (0)351 463-3 72 89

²¹⁾ Siehe <http://sfb528.tu-dresden.de>

²²⁾ Siehe <http://tudalit.de/>

11 Danksagung

Streng genommen ist es etwas vermessen, die Autorenschaft für diesen Beitrag nur den als Autoren genannten Personen zuzuschreiben. Der Argumentation von [26] folgend, haben wir dieses Recht wohl schon beim ersten Gespräch mit Prof. Konrad Bergmeister als Herausgeber und wenig später unserer freundlichen und verständnisvollen Lektorin Claudia Ozimek von Ernst & Sohn verloren. Aber es gibt noch mehr Gründe, in diese Richtung zu argumentieren. Die meisten Passagen dieses Beitrags haben wir – teilweise mehrfach – an verschiedene Fachkollegen und Praxispartner geschickt, die uns stets freundlich und äußerst hilfsbereit mit Zuarbeiten, Korrekturhinweisen und fachlichen Diskussionen unterstützt haben. Ohne einen bestimmten Grund für die Reihenfolge der Namensnennung möchten wir uns für die wertvolle Unterstützung bei folgenden Personen bzw. Institutionen bedanken:

Herrn Bernd Gehrke von der Fa. Pagel, Herrn Dr. Hans-Alexander Biegholdt von der Landesstelle für Bautechnik, Leipzig, Herrn Dirk Matzdorff von der planzwo GmbH, Herrn Dr. Christoph Hankers und Herrn Ehrhard von der Fa. Torkret, Herrn Bernhard Plaggenborg und Frau Ina Giesbrecht-Müller von der SGL Technologies GmbH, den Kollegen des Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil von der Université de Cergy-Pontoise, Prof. Viktor Mechtcherine, Marko Butler und Simone Hempel vom Institut für Baustoffe der Technischen Universität Dresden, Prof. Chokri Cherif, Thomas Engler vom Institut für Textil- und Bekleidungstechnik, und natürlich auch bei unseren unmittelbaren Kollegen und Mitarbeitern Silke Scheerer, Silvio Weiland, Frank Schladitz, Dr. Regine Ortlepp, Anett Brückner, Enrico Lorenz, Daniel Ehlig, Ulrich van Stipriaan vom Institut für Massivbau der Technischen Universität Dresden. Michael Korte war uns eine große Hilfe bei den vielen neu erstellten und angepassten Zeichnungen.

Unser besonderer Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft, denn sie hat mit der Förderung der Forschungen zum Textilbeton, insbesondere des Sonderforschungsbereiches 528 „Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung“ einen wesentlichen Anteil an der Entstehung der hier zusammenfassend dargestellten Forschungsergebnisse.

12 Literatur

- [1] Abdkader, A.: Charakterisierung und Modellierung der Eigenschaften von AR-Glasfilamentgarnen für die Betonbewehrung. Dissertation, Institut für Textil- und Bekleidungstechnik, TU Dresden, 2004.
- [2] Abdkader, A., Offermann, P.: Textile Werkstoffe und Flächengebilde zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung; Teil 2: Beschreibung der Filamentfestigkeit mit Hilfe mathematischer Methoden. Technische Textilien 44 (2001) 4, 302–303.
- [3] Abdkader, A., Offermann, P., Jesse, F., Curbach, M.: Vorhersage über die zu erwartenden Festigkeiten von AR-glasbewehrtem Beton. Tagungsband zum 12. Internationalen Textextil-Symposium 2003. Frankfurt/Main, 7.–10. April 2003. CD-ROM, Vortrag Nr. 4.13.
- [4] Bergmeister, K.: Verstärkung mit Kohlenstofffasern; Teil 1: Verstärkung von Biegeträgern. Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005) S1, S. 62–68.
- [5] Bergmeister, K.: Verstärkung mit Kohlenstofffasern; Teil 2: Verstärkung von Stützen. Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005) S1, S. 69–73.
- [6] Bergmeister, K.: Ertüchtigung im Bestand – Verstärkungen mit Kohlenstofffasern. Bergmeister, K., Fingerloos, F., Wörner, J.-D. (Hrsg.): Beton-Kalender 2009, Teil 2. Verlag Ernst & Sohn, 2009, 97, S. 187–230.
- [7] Blumberg, H., Hillermeier, K., Scholten, E.: Carbon fiber status and development. Chemical Fibers International 50 (2000) April, S. 157–160.
- [8] Bobeth, W.: Textile Faserstoffe. Beschaffenheit und Eigenschaften. Berlin, Heidelberg: Springer, 1993.
- [9] Borchert, K.: Epoxidharze im konstruktiven Einsatz Massivbau in ganzer Breite. Förderverein der TU München e.V. und Roland Niedermeier, F. M. (Hrsg.): Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Konrad Zilch. Berlin: Springer, 2005, S. 189–194.
- [10] Bournas, D. A., Lontou, P. V., Papanicolaou, C. G., Triantafillou, T. C.: Textile-Reinforced Mortar (TRM) versus FRP Confinement in Reinforced Concrete Columns. ACI Structural Journal 104 (2007) 6, S. 740–748.
- [11] Bournas, D. A., Triantafillou, T. C., Papanicolaou, C. G.: Retrofit of Seismically Deficient RC Columns with Textile-Reinforced Mortar (TRM) Jackets. Curbach, M. & Jesse, F. (Hrsg.): Textilbeton – Theorie und Praxis. Tagungsband zum 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, 3.6.–5.6.2009. Dresden : Technische Universität Dresden, Sonderforschungsbereich 528, 2009, S.471–490.
- [12] Bournas, D. A., Triantafillou, T. C., Zygouris, K., Stavropoulos, F.: Textile-Reinforced Mortar versus FRP Jacketing in RC Columns with Continuous or Lap-Spliced Deformed Bars. ASCE Journal of Composites for Construction (2009) – in Druck.
- [13] Bösche, A.: Möglichkeiten zur Steigerung der Biegetragfähigkeit von Beton- und Stahlbetonbauteilen durch den Einsatz textiler Bewehrungen – Ansatz für ein Bemessungsmodell. Dissertation, Dresden: Fakultät Bauingenieurwesen, Technische Universität Dresden, 2007 – urn:nbn:de:swb:14-1197896918623-70942.
- [14] Brameshuber, W. (Hrsg.): Textile Reinforced Concrete State-of-the-Art Report of RILEM TC

- 201-TRC. RILEM report rep036, Bagneux: RILEM Publications, 2006, 285 S.
- [15] Brameshuber, W., Brockmann, T., Hinzen, M.: Bemessungsrelevante Kennwerte von Feinbeton für einaxiale Druckbeanspruchung. Beton- und Stahlbetonbau, 2007 (102) S. 371–379.
 - [16] Brockmann, T.: Mechanical and Fracture Mechanical Properties of Fine Grained Concrete for TRC Structures. Grosse, C. U. (Hrsg.): Advances in Construction Materials 2007, Springer, 2007, S. 119–129.
 - [17] Brückner, A., Ortlepp, R., Curbach, M.: Textile Reinforced Concrete for Strengthening in Bending and Shear. Materials and Structures 39 (2006), S. 741–748.
 - [18] Brückner, A., Ortlepp, R., Weiland, S., Curbach, M.: Textile Structures for Shear Strengthening. In: Alexander, M.; Beushausen, H.-D. und Dehn, F. (Hrsg.): International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retro-fitting, Cape Town, 21.–23.11.2005. Taylor & Francis, 2005, S. 456–457.
 - [19] Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING). Sammlung Brücken- und Ingenieurbau, Verkehrsblatt-Verlag, 2003, 369 S.
 - [20] Butler, M.: Zur Dauerhaftigkeit von Verbundwerkstoffen aus zementgebundenen Matrices und alkaliresistenten Glasfaser-Multifilamentgarnen. Dissertation, Dresden: Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden, 2009.
 - [21] Butler, M., Hempel, S., Mechtcherine, V.: Zeitliche Entwicklung des Verbundes von AR-Glas- und Kohlenstofffaser-Multifilamentgarnen in zementgebundener Matrix. Curbach, M. und Jesse, F. (Hrsg.): Textilbeton – Theorie und Praxis. Tagungsband zum 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, 3.6.–5.6.2009. Dresden: Technische Universität Dresden, Sonderforschungsbereich 528, 2009, S. 213–226.
 - [22] Butler, M., Mechtcherine, V., Hempel, S.: Experimental investigations on the durability of fibre-matrix interfaces in textile-reinforced concrete. Cement and Concrete Composites 31 (2009) 4, S. 221–231.
 - [23] Butler, M., Mechtcherine, V., Hempel, S.: Auswirkungen der Matrixzusammensetzung auf die Dauerhaftigkeit von Betonen mit textilen Bewehrungen aus AR-Glas. Beton- und Stahlbetonbau 104 (2009) 8, S. 485–495.
 - [24] Button, D., Colvin, J., Cunliffe, J. et al.: Glass in Building: Guide to Modern Architectural Glass Performance. Button, D. and Pye, B. (Hrsg.), Pilkington Glass Ltd, Flachglas AG, Libby Owens Ford, Pilkington Floatglas AB, Pilkington (Australia) Ltd., Butterworth Architecture, 1993.
 - [25] Carter, C. B., Norton, M. G.: Ceramic Materials. New York: Springer, 2007, 726 S.
 - [26] Cole, P.: The only paper I ever wrote. Cancer Causes and Control 9 (1998) 2, S. 229–231.
 - [27] Comite Euro-International du Beton (Hrsg.): CEB-FIB Model Code 1990. Bulletin d'Information No. 313/214, Thomas Telford, 1993.
 - [28] Curbach, M. et al.: Sachstandbericht zum Einsatz von Textilien im Massivbau. Schriftenreihe des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton, Heft 488, Beuth, 1998.
 - [29] Curbach, M.: Textile Reinforced Structures. Proceedings of the 2nd Colloquium on textile reinforced structures (CTRS2), Dresden, Germany, 29.9.–1.10.2003. Dresden: Technische Universität Dresden, Sonderforschungsbereich 528, 2003.
 - [30] Curbach, M., Brückner, A.: Textile Strukturen zur Querkraftverstärkung von Stahlbetonbauteilen. Curbach, M. (Hrsg.): Textile Reinforced Structures: Proceedings of the 2nd Colloquium on textile reinforced structures (CTRS2), Dresden, Germany, 29.9.–1.10.2003. Technische Universität Dresden, Sonderforschungsbereich 528, 2003, S. 347–360.
 - [31] Curbach, M., Jesse, F.: Beton im Textilbeton – Die Entwicklung. Lohaus, L. (Hrsg.): Ingenieurbaustoffe – Konstruktive Wege in die Zukunft. Festschrift zum 60. Geburtstag von Harald Schorn. Universität Hannover, Institut für Baustoffe und Materialprüfung, Eigenverlag, 2001, S. 29–44.
 - [32] Curbach, M., Jesse, F.: Verstärken von Stahlbetonbauteilen mit textilbewehrtem Beton: Kurzer Bericht zu aktuellen Entwicklungen. Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005) S1, S. 78–81.
 - [33] Curbach, M., Jesse, F.: Eigenschaften und Anwendung von Textilbeton. Beton- und Stahlbetonbau 104 (2009) 1, S. 9–16.
 - [34] Curbach, M.; Jesse, F. (Hrsg.): Textilbeton – Theorie und Praxis. Tagungsband zum 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, 3.6.–5.6.2009. Dresden: Technische Universität Dresden, Sonderforschungsbereich 528, 2009.
 - [35] Curbach, M., Hauptenbuchner, B., Ortlepp, R., Weiland, S.: Textilbewehrter Beton zur Verstärkung eines Hyparschalentragwerks in Schweinfurt. Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007) S. 353–361.
 - [36] Curbach, M., Schicktan, K., Jesse, F., Hartig, J.: Stochastische Eigenschaften der Zugfestigkeit freier und zementös eingebetteter Filamentbündel aus AR-Glas. Möller, B. W. (Hrsg.): Neue Bauweisen – Trends in Statik und Dynamik, Tagungsband zum 10. Dresdner Baustatik Seminar, Technische Universität Dresden, 29.9.2006. Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke, 2006, S. 91–100.
 - [37] Cuypers, H., Wastiels, J., Iiterbeeck, P. V. et al.: Durability of glass fibre reinforced composites experimental methods and results. Composites: Part A 37 (2006), S. 207–215.
 - [38] Daniels, H.E.: The statistical theory of the strength of bundles of threads. Proceedings of the Royal Society of London, 1945, A183, S. 405–435.
 - [39] Denninger, F.: Lexikon Technische Textilien. Frankfurt/M.: Deutscher Fachverlag, 2009, 504 S.
 - [40] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E. V., Ausbildungsbeirat Verarbeiten von Kunststoffen im Betonbau, Berlin (Hrsg.): SIVV-Handbuch. Schützen, Instandsetzen, Verbinden und Verstärken von Betonbauteilen. Ausgabe 2008, Fraunhofer IRB Verlag, 2009, 404 S.

- [41] Dilger, K., Mund, F., Diltthey, U. et al.: Einsatz einer polymeren Phase zur Verbundverbesserung. Curbach, M. (Hrsg.): *Textile Reinforced Structures*. Proceedings of the 2nd Colloquium on textile reinforced structures (CTRS2), Dresden, Germany, 29.9.–1.10.2003. Technische Universität Dresden, Sonderforschungsbereich 528, 2003, S. 133–144.
- [42] Diltthey, A., Schleser, M., Raupach, M., Orlowsky, J.: Textilbeton mit polymergetränkter Bewehrung. *Beton* 57 (2007) 3, S. 92–99.
- [43] Ehlig, D., Jesse, F., Curbach, M.: *Textile Reinforced Concrete (TRC) under Fire Loading*. Djausal, A., Alami, F. und Naaman, A. E. (Hrsg.): 9th International Symposium on Ferrocement and Thin Reinforced Cement Composites, 18–20 May 2009, Bali, Indonesia. S. 331–344.
- [44] Ehlig, D., Jesse, F., Curbach, M.: Stahlbetonplatten verstärkt mit Textilbeton unter Brandbeanspruchung. Curbach, M. und Jesse, F. (Hrsg.): *Textilbeton – Theorie und Praxis*. Tagungsband zum 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, 3.6.–5.6.2009. Technische Universität Dresden, Sonderforschungsbereich 528, 2009, S. 515–527.
- [45] Fingerloos, F., Schnell, J.: *Tragwerksplanung im Bestand*. Bergmeister, K., Fingerloos, F. und Wörner, J.-D. (Hrsg.): *Beton-Kalender* 2009, Teil 2, Verlag Ernst & Sohn, 2009, 97, S. 3–51.
- [46] Franke, G.: AiF-Forschungsvorhaben Nr. 11 981 B: Flächengebilde zur Sanierung von stahlbewehrten Betonelementen – Maste, Schalen, Platten. Institut für Textil- und Bekleidungsstechnik, Technische Universität Dresden, 2001.
- [47] Gao, S. L., Mäder, E., Abdkader, A., Offermann, P.: Environmental resistance and mechanical performance of alkali-resistant glass fibers with surface sizings. *Journal of Non-Crystalline Solids* 325 (2003) 1–3, S. 230–241.
- [48] Gieler, R. P., Dimmig-Osburg, A.: *Kunststoffe für den Bautenschutz und die Betoninstandsetzung*. Der Baustoff als Werkstoff. Basel: Birkhäuser Verlag, 2006, 495 S.
- [49] Gossila, U.: *Flachdecken aus Stahlfaserbeton*. *Beton- und Stahlbetonbau* 101 (2006) 2, S. 94–102.
- [50] Grunert, J. P.: *Fertigteile aus selbstverdichtendem Stahlfaserbeton ohne Betonstahlbewehrung*. *Beton- und Stahlbetonbau* 100 (2005) S2, S. 81–84.
- [51] Hankers, C.: *Spritzbeton für die Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbeton*. *Beton- und Stahlbetonbau* 103 (2008) Heft S2, S. 18–25.
- [52] Hankers, C., Matzdorff, D.: *Bauen im Bestand – Verstärkung mit Spritzbeton*. *Bauingenieur* 81 (2006) 7/8, S. 303–310.
- [53] Hegger, J.: *Textilbeton – 1. Fachkolloquium der Sonderforschungsbereiche 528 und 532*. Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen: Eigenverlag, Lehrstuhl und Institut für Massivbau, RTWH Aachen, 2001.
- [54] Hegger, J., Brameshuber, W., Will, N. (Hrsg.): *Textile Reinforced Concrete*. RILEM Proceedings pro050, Bagneux: RILEM Publications, 2006, 418 S.
- [55] Hegger, J., Will, N., Curbach, M., Jesse, F.: *Tragverhalten von textilbewehrtem Beton*. *Beton- und Stahlbetonbau* 99 (2004) 6, S. 452–455.
- [56] Hempel, S., Butler, M.: *Microscopic investigations on durability of textile reinforced concrete*. Proc. 11th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials. Fernandes, I., Guedes, A., Noronha, F. et al. (Hrsg.): 11th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, 5–9 June 2007, Porto, Portugal. 2007, S. 53–64.
- [57] Hilsdorf, H. K., Reinhardt, H. W.: *Beton. Eibel, J. (Hrsg.): Beton-Kalender*. – Taschenbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau sowie die verwandten Fächer. Ernst & Sohn, 1997, S. 1–150.
- [58] Holzenkämpfer, P.: *Ingenieurmodelle des Verbundes geklebter Bewehrung für Betonbauteile*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 473. Berlin: Beuth Verlag, 1997, S. 117–209.
- [59] International Federation for Structural Concrete (Hrsg.): *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*. Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete (fib), 2001, Bulletin No. 14, 130 S.
- [60] International Federation for Structural Concrete (Hrsg.): *FRP reinforcement in RC structures*. Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete (fib), 2007, Bulletin No. 70, 147 S.
- [61] Jeschke, K.: *Fußgänger-Brücke hergestellt aus pultrudierten GFK-Profilen sowie Konstruktionen in chemischen und korrosiven Bereichen*. Tagungsband kreative Ingenieurleistungen – Innovative Bauwerke – Zukunftsweisende Bewehrungen und Verstärkungsmöglichkeiten. TU Darmstadt, 1998, Beitrag XXI.
- [62] Jesse, F.: *Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix*. Dissertation, Dresden: Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden, 2004 – urn:nbn:de:swb:14-1122970324369-39398.
- [63] Jesse, F., Schick Tanz, K., Curbach, M.: *Obtaining Characteristic Material Strength of Textile Reinforced Concrete (TRC) from Laboratory Tests*. Djausal, A., Alami, F. und Naaman, A. E. (Hrsg.): 9th International Symposium on Ferrocement and Thin Reinforced Cement Composites, 18–20 May 2009, Bali, Indonesia. S. 305–318.
- [64] Jesse, F., Weiland, S., Curbach, M.: *Flexural Strengthening of RC-Structures with Textile Reinforced Concrete*. Dubey, A. (Hrsg.): *Textile Reinforced Concrete (TRC) – German/International Experience*. Proceedings of ACI Fall Convention. Kansas City, November 2005. ACI, 2008, ACI Special Publication, SP-250CD-4.
- [65] Kang, B.-G., Focke, I., Brameshuber, W., Benning, W.: *Quantitativ räumliche Auswertung der Mikrostruktur eines in Beton eingebetteten Multifilamentgarns*. Curbach, M. und Jesse, F. (Hrsg.): *Textilbeton – Theorie und Praxis*. Tagungsband zum 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, 3.6.–5.6.2009. Technische Universität Dresden, Sonderforschungsbereich 528, 2009, S. 247–260.

- [66] Kaufmann, N.: Das Sandflächenverfahren. Straßenbau-Technik 24 (1971) 3, S. 131–135.
- [67] Köckritz, U.: In-Situ-Polymerbeschichtung zur Strukturstabilisierung offener nähgewirkter Gelege. Dissertation, Fakultät Maschinenwesen, Technische Universität Dresden, München: Dr. Hut Verlag, 2007, 174 S.
- [68] Kordina, K., Blume, F.: Empirische Zusammenhänge zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit stabförmiger Stahlbetonelemente. Heft 364 der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton. Berlin: Ernst & Sohn, 1985, S. 8–10.
- [69] Krüger, M., Reinhardt, H. W., Raupach, M., Orlowsky, J.: Textilbewehrter Beton unter Brandbeanspruchung; Untersuchungen zum Tragverhalten im Brandfall. Betonwerk + Fertigteil-Technik 71 (2005) 10, S. 38–48.
- [70] Leonhardt, F., Schelling, G.: Torsionsversuche an Stahlbetonbalken. Berlin: Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, 1974.
- [71] Lorenz, E., Ortlepp, R.: Berechnungsalgorithmus zur Bestimmung der Verankerungslänge der textilen Bewehrung in der Feinbetonmatrix. Curbach, M. und Jesse, F. (Hrsg.): Textilbeton – Theorie und Praxis. Tagungsband zum 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, 3.6.–5.6.2009. Technische Universität Dresden, Sonderforschungsbereich 528, 2009, S. 491–502.
- [72] Mäder, E., Plonka, R., Gao, S.-L.: Coatings for Fibre and Interphase Modifications in a Cementitious Matrix. Curbach, M. (Hrsg.): Textile Reinforced Structures: Proceedings of the 2nd Colloquium on textile reinforced structures (CTRS2), Dresden, Germany, 29.9.–1.10.2003. Technische Universität Dresden, Sonderforschungsbereich 528, 2003, S. 121–132.
- [73] Möller, B., Brückner, A., Ortlepp, R., Steining, F.: Verstärken mit textilbewehrtem Beton. Beton- und Stahlbetonbau 99 (2004) 6, S. 466–471.
- [74] Naaman, A. E.: Ferrocement and Laminated Cementitious Composites. Ann Arbor, Michigan: Techno Press 3000, 2000, 372 S.
- [75] Niedermeier, R.: Überprüfung der Verbundtragfähigkeit bei klebarmierten Stahlbetonbauteilen. Förderverein der TU München e. V. und Roland Niedermeier, F.M. (Hrsg.): Massivbau in ganzer Breite. Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Konrad Zilch, Springer, 2005, 225–230.
- [76] Offermann, P., Engler, T., Gries, T., Roye, A.: Technische Textilien zur Bewehrung von Betonbauteilen Beton- und Stahlbetonbau 99 (2004) 6, S. 437–443.
- [77] Ohama, Y.: Carbon-Cement Composites. Carbon 27 (1989) S. 729–737.
- [78] Ohno, S., Hannant, D. J.: Modelling the Stress-Strain Response of Continuous Fiber Reinforced Cement Composites. ACI Materials Journal 91 (1994) 3, S. 306–312.
- [79] Orlowsky, J.: Zur Dauerhaftigkeit von AR-Glasbewehrung in Textilbeton. Dissertation, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, 2004.
- [80] Orlowsky, J., Antons, U., Raupach, M.: Lebensdauer textilbewehrter Betonproben unter Dauerlast 15. Internationale Baustofftagung, 24.–27. September 2003. Weimar: Bauhaus-Universität, 2003, S. 2-0271-2-0280.
- [81] Orlowsky, J., Raupach, M., Cuypers, H., Wasitiels, J.: Durability modelling of glass fibre reinforcement in cementitious environment. Materials and Structures 38 (2005) 2, S. 155–162.
- [82] Ortlepp, R.: Untersuchungen zur Verbundverankerung textilbewehrter Feinbetonverstärkungsschichten für Betonbauteile. Dissertation, Dresden: Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden, 2007 – urn:nbn:de:swb:14-1187166738380-68700.
- [83] Ortlepp, R., Schladitz, F., Curbach, M.: TRC-Strengthening for Normal and Torsion Loads. Proceedings of the 18th International Conference on Computer Methods in Mechanics (CMM2009), Zielona Góra, Poland, May 2009. S. 345–346.
- [84] Ortlepp, R., Brückner, A., Lorenz, E.: Verbundversagensmechanismen im Verankerungsbereich von textilbewehrten Feinbetonverstärkungsschichten. Curbach, M. und Jesse, F. (Hrsg.): Textilbeton – Theorie und Praxis. Tagungsband zum 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, 3.6.–5.6.2009. Technische Universität Dresden, Sonderforschungsbereich 528, 2009, S. 433–446.
- [85] Ortlepp, R., Curbach, M.: Verstärken von Stahlbetonstützen mit textilbewehrtem Beton. Beton- und Stahlbetonbau 104 (2009) 11 – in Druck.
- [86] Ortlepp, R., Lorenz, E., Curbach, M.: Column strengthening with TRC-influences of the column geometry onto the confinement effect. Research Letters in Material Science – zur Veröffentlichung eingereicht am 25.7.2009.
- [87] Ortlepp, S., Jesse, F.: Experimental investigation of Static fatigue strength of textile reinforced concrete. Brameshuber, W. (Hrsg.): 1st International Conference Textile Reinforced Concrete (ICTRC). RILEM pro 50, 2006, S. 131–140.
- [88] Rostásy, F. S., Holzenkämpfer, P., Hankers, C.: Geklebte Bewehrungen für die Verstärkung von Betonbauwerken. Bergmeister, K. und Wörner, J.-D. (Hrsg.): Beton-Kalender 1996, Teil 2, Berlin: Ernst & Sohn, 1996, Jg. 85, S. 547–576.
- [89] Papanicolaou, C. G., Triantafillou, T. C., Papanathanasiou, M., Karlos, K.: Textile reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: out-of-plane cyclic loading. Materials and Structures 41 (2008), S. 143–157.
- [90] Peirce, F. T.: Tensile Tests for Cotton Yarns, "The Weakest Link". Journal of the Textile Institute 17 (1926) 17, S. T355–T368.
- [91] Rudlof, M.: Zur Spannungsumlagerung zwischen Spannstahl und Betonstahl bei Spannbeton mit nachträglichem Verbund. Dissertation, Lehrstuhl und Institut für Massivbau, RWTH Aachen, 1998.
- [92] Schäfer, H.-G.: Verstärken von Betonbauteilen – Sachstandbericht. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 1996, Heft 467, 74 S.
- [93] Scheffler, C., Gao, S., Plonka, R. et al.: Interphase modification of alkali-resistant glass fibres

- and carbon fibres for textile reinforced concrete II: Water adsorption and composite interphases. *Composites Science and Technology* 69 (2009) 7-8, S. 905-912.
- [94] Schladitz, F., Brückner, A., Ortlepp, R., Curbach, M.: Shear Force Strengthening of Large, Reinforced Concrete Components Using Textile Reinforced Concrete (TRC). *Concrete Society and GRCA (Hrsg.): Proceedings of the 15th Congress of the International Glassfibre Reinforced Concrete Association*, Prag, 20.-23.04.2008, 2008, S. 33, Book of Abstracts and CD-ROM.
- [95] Schladitz, F., Curbach, M.: Textile Reinforced Concrete (TRC) as Torsion Strengthening. In: 17th Congress of the International Association for Bridge and Structural Engineering Congress (IABSE), 17.-19.09.2008, Chicago. – CD-ROM.
- [96] Schladitz, F., Curbach, M.: Textilbewehrter Beton als Torsionsverstärkung. Curbach, M. und Jesse, F. (Hrsg.): *Textilbeton – Theorie und Praxis*. Tagungsband zum 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, 3.6.–5.6.2009. Technische Universität Dresden, Sonderforschungsbereich 528, 2009, S. 421-432.
- [97] Schladitz, F., Lorenz, E., Jesse, F., Curbach, M.: Verstärkung einer denkmalgeschützten Tonnenschale mit Textilbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* 104 (2009) 7, S. 432-437.
- [98] Schmidhuber, C.: Neumodellierung des Schubtragverhaltens mit CFK-Lamellen verstärkter Stahlbetonbauteile. Förderverein der TU München e. V. und Roland Niedermeier, F. M. (Hrsg.): *Massivbau in ganzer Breite*. Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Konrad Zilch, Springer, 2005, 237-241.
- [99] Scholze, H.: *Glas. Natur, Struktur und Eigenschaften*. Springer, 1988.
- [100] Schulz, R.-R., Mombert, A. W.: *Handbuch der Oberflächenbearbeitung Beton – Bearbeitung – Eigenschaften – Prüfung*. Basel: Birkhäuser Verlag, 2006, 695 S.
- [101] Schürmann, H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Berlin: Springer, 2007, 246 S.
- [102] Silva, F. A., Mobasher, B., de Toledo Filho, R. D.: Advances in Natural Fiber Cement Composites: A Material for the Sustainable Construction Industry. Curbach, M. und Jesse, F. (Hrsg.): *Textilbeton – Theorie und Praxis*. Tagungsband zum 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, 3.6.–5.6.2009. Technische Universität Dresden, Sonderforschungsbereich 528, 2009, S. 377-388.
- [103] Spauszus, S.: *Werkstoffkunde. Glas*. Leipzig: Verlag für Grundstoffindustrie, 1975, 173 S.
- [104] Stark, J., Ludwig, M.: Frost-Tausalz-Widerstand von HOZ-Betonen. *Betontechnische Berichte* 11 (1997), S. 646-656.
- [105] Strauss, A., Bergmeister, K., Wendner, R., Hoffmann, S.: *System- und Schadensidentifikation von Betontragstrukturen*. Bergmeister, K., Fingerloos, F. und Wörner, J.-D. (Hrsg.): *Beton-Kalender 2009, Teil 2*, Verlag Ernst & Sohn, 2009, Jg. 97, S. 55-134.
- [106] Taffe, A., Wiggenshauser, H.: Zerstörungsfreie Zustandsermittlung und Qualitätssicherung in der Betoninstandsetzung *Beton- und Stahlbetonbau* 100 (2008) Heft S2, S. 2-14.
- [107] Triantafyllou, T. C., Papanicolaou, C. G., Zisimopoulos, P., Laourdekis, T.: Concrete Confinement with Textile-Reinforced Mortar Jackets. *ACI Structural Journal* 103 (2006) 1, S. 28-37.
- [108] Vorechovsky, M.: *Stochastic Fracture Mechanics and Size Effect*. Dissertation, BRNO University of Technology, 2004, 180 S.
- [109] Voss, S.: *Ingenieurmodelle zum Tragverhalten von textilbewehrtem Beton*. Dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Fakultät Bauingenieurwesen, 2008, 246 S.
- [110] Weber, J., Endres, B.: Einsatz von eingeschlitzten CFK-Lamellen an der Rösllautalbrücke bei Schirnding. Förderverein der TU München e. V. und Roland Niedermeier, F. M. (Hrsg.): *Massivbau in ganzer Breite*. Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Konrad Zilch, Springer, 2005, 181-187.
- [111] Weiland, S.: *Interaktion von Betonstahl und textiler Bewehrung bei der Biegeverstärkung mit textilbewehrtem Beton*. Dissertation, Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden. – in Vorbereitung.
- [112] Weiland, S., Curbach, M.: Interaktion gemischter Bewehrungen bei der Verstärkung von Stahlbeton mit textilbewehrtem Beton. Curbach, M. und Jesse, F. (Hrsg.): *Textilbeton – Theorie und Praxis*. Tagungsband zum 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, 3.6.–5.6.2009. Technische Universität Dresden, Sonderforschungsbereich 528, 2009, S. 553-564.
- [113] Wiederhorn, S. M.: Influence of water vapor on crack propagation in soda-lime glass. *Journal of the American Ceramic Society* 50 (1967) 8, S. 407-414.
- [114] Wiederhorn, S. M., Bolz, L. H.: Stress corrosion and static fatigue of glass. *Journal of the American Ceramic Society* 53 (1970) 10, S. 543-548.
- [115] Younes, A., Seidel, A., Engler, T., Cherif, C.: Materialverhalten von AR-Glas- und Carbonfilamentarmen unter Dauerlast sowie unter Hochtemperaturbeanspruchung *Textilbeton – Theorie und Praxis*. Curbach, M. und Jesse, F. (Hrsg.): Tagungsband zum 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, 3.6.–5.6.2009. Technische Universität Dresden, Sonderforschungsbereich 528, 2009, S. 1-16.
- [116] Zehetmaier, G.: Verstärken mit Klebearmierung – Einfluss des Verbundverhaltens auf Zuggrüßkräfte Massivbau in ganzer Breite. Förderverein der TU München e. V. und Roland Niedermeier, F. M. (Hrsg.): *Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Konrad Zilch*, Springer, 2005, 231-236.
- [117] Zehetmaier, G. M.: *Zusammenwirken einbetonierter Bewehrung mit Klebearmierung bei verstärkten Betonbauteilen*. Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München, 2006.

- [118] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-33.1-577: „betoShell“-Platten aus Betonwerkstein mit rückseitig einbetonierten Befestigungselementen zur Verwendung als hinterlüftete Außenwandbekleidung oder als abgehängte Decke, Zulassungsbescheid vom 29.7.2008.
- [119] DIN 1045-1:2008-08: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; Teil 1: Bemessung und Konstruktion.
- [120] DIN 1048-5:1991-06: Prüfverfahren für Beton; Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper.
- [121] Norm DIN 18551:2005-01: Spritzbeton, Herstellung und Güteüberwachung.
- [122] DIN EN 196-1:2005-05: Prüfverfahren für Zement, Teil 1: Bestimmung der Festigkeit; Deutsche Fassung EN 196-1:2005.
- [123] DIN EN 206-1:2001-07: Beton. Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206-1.
- [124] DIN EN 1015-3:2007-05: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch); Deutsche Fassung EN 1015-3:1999+A1:2004+A2:2006.
- [125] DIN EN 1015-11:2007-05: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel.
- [126] DIN 60000:1969-01: Textilien, Grundbeurteilungen.
- [127] DIN 60001-1:2001-03: Textile Faserstoffe; Teil 1: Naturfasern und Kurzzeichen.
- [128] EN 1992-1-1:1992: Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. (Eurocode 2)