

10 Verstärkung von Brückenbauwerken mit Faserverbundwerkstoffen

Dipl.-Ing. Peter Onken

bow ingenieure, Braunschweig

Dipl.-Ing. Dirk Grunewald

S & P Reinforcement GmbH, Krißfel

10.1 Einleitung

Verkehrslasterhöhungen, Setzungen, veränderte statische Systeme, Korrosion von Bewehrung aber auch Erdbeben- und Anpralllasten sind verschiedene Einflüsse, die im Zuge der Nutzungsdauer von Brücken dazu führen können, dass die ursprüngliche Tragsicherheit oder Gebrauchstauglichkeit nicht mehr gewährleistet sind. In vielen Fällen ist eine Nachverstärkung des Brückenbauwerks unumgänglich. In den letzten Jahren haben sich Verstärkungssysteme mit geklebter Bewehrung aus FRP (Fibre Reinforced Polymer) zunehmend am Markt durchgesetzt. Die rasante technische Entwicklung auf diesem Gebiet hat inzwischen zahlreiche FRP-Systeme hervorgebracht, die Verstärkungsmaßnahmen an Stahlbeton- und Spannbetonbrücken zukünftig erheblich erleichtern werden.

10.2 Übersicht über FRP Verstärkungssysteme und Materialien

Neben der Verstärkung mit schubfest angeklebter Bewehrung aus Kohlefaserlamellen, die in Europa seit etwa 10 Jahren als leichtes Substitut für angeklebte Stahllaschen eingesetzt werden, wurden durch gemeinschaftliche Anstrengungen von Industrie und Forschungseinrichtungen zahlreiche neue Verstärkungssysteme entwickelt [1], z.B.:

- oberflächlich geklebte FRP Verstärkungssysteme aus Geweben und Gelegen
- in Schlitze eingeklebte Kohlefaserlamellen
- vorgespannte Kohlefaserlamellen
- Umschnürung von Bauteilen mit FRP Geweben bzw. Gelegen
- Umschnürung von Bauteilen mit vorgespannten FRP Bändern

Je nach Anwendungsgebiet werden neben Kohlefasern als Ausgangsmaterial für Verstärkungssysteme auch zunehmend Fasern aus Aramid oder Glas eingesetzt [2]. Bei Faserverbundwerkstoffen werden die Ausgangsfasern in eine Polymer-Matrix eingelegt. Die Fasern können uni-direktional oder bi-direktional im Faserverbundwerkstoff angeordnet sein. Im Wesentlichen wird zwischen folgenden Verbundwerkstoffen unterschieden:

Faser-Gelege – uni-direktionale Anordnung Die Verstärkungsfasern werden parallel zueinander auf ein Traggitter aufgeklebt. Der Elastizitätsmodul dieser uni-direktionalen Gelege ist durch die gestreckte Anordnung der Fasern entsprechend hoch. Sie eignen sich besonders zur Erhöhung der Tragfähigkeit eines Bauteiles.

Faser-Gewebe – bi-direktionale Anordnung Bei einer bi-direktionalen Anordnung der Verstärkungsfasern erfolgt die Herstellung im Webvorgang. Dadurch sind die Fasern im Gewebe leicht gewellt. Entsprechend eignen sich diese Produkte weniger zur Erhöhung der Tragfähigkeit eines Bauteils. Gewebe werden idealerweise zur Verbesserung der Duktilität verwendet. Die Verstärkungsfasern werden bei Kraftereinwirkung zunächst leicht gestreckt, bevor sie größere Kräfte aufnehmen können.

Vorgefertigte FRP Lamine Zur Herstellung vorgefertigter FRP Lamine werden die Ausgangsfasern bereits im Lieferwerk in einer Epoxydharzmatrix getränkt, thermisch ausgehärtet und als vorgefertigtes Composite (Laminat) auf die Baustelle geliefert. Je nach Einsatzgebiet lassen sich sowohl uni- wie bi-direktionale Lamine herstellen. Die bekanntesten Lamine sind die sogenannten CFK-Lamellen, die überwiegend zur Traglastverstärkung eingesetzt werden.

10.3 Ausgangsfasern für FRP-Systeme

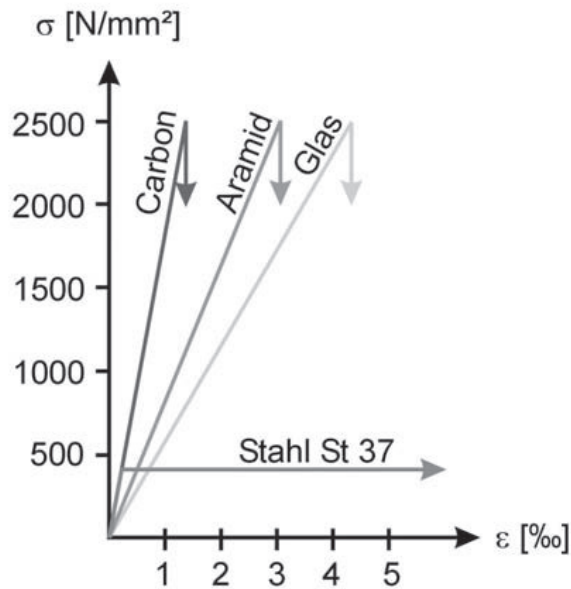
Die einzelnen Verstärkungssysteme, ob nun Gewebe, Gelege oder vorgefertigte Lamine können aus einem Fasertyp oder aus Faserkombinationen (Hybride) bestehen. Dabei kommen je nach Verwendungszweck unterschiedliche Fasermaterialien zum Einsatz:

AR-Glas Alkaliresistente Glasfasern, geeignet als Umschnürungsbewehrung von Betonstützen oder für die Verstärkung von Mauerwerk in Kombination mit einer wasserdampfdichten, zementvergüteten Matrix. Ideal zur Verbesserung der Duktilität im Rahmen seismischer Verstärkungsmaßnahmen.

Aramid Aramidfasern besitzen eine hohe Zähigkeit. Aramidgewebe werden beispielsweise für die Herstellung von kugelsicheren Westen verwendet. Im Rahmen der Bauwerksverstärkung bringt die hohe Zähigkeit Vorteile bei der Nachverstärkung von Druckstützen. Vorzugsweise werden Aramidfasern als zusätzlicher Aufprallschutz, z.B. bei Brückenpfeilern o.ä. Bauteilen eingesetzt. Wegen der geringen Querdruckempfindlichkeit lassen sich FRP-Systeme aus Aramidfasern auch unter Vorspannung gut applizieren.

Kohlefasern Kohlefasern lassen sich aufgrund ihrer hohen Steifigkeit (hoher E-Modul) ideal im Bereich der Bauteilverstärkung einsetzen, z.B. bei der Traglasthöhung von Biegebauteilen. Kohlefasern zeichnen sich durch folgende Werkstoffeigenschaften aus: geringer thermischer Ausdehnungskoeffizient, geringes Ermüdungsverhalten und ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit. Die physikalischen und chemischen Werkstoffeigenschaften sowie die mechanischen Langzeiteigenschaften von FRP-Systemen aus Kohlefasern wurden im Rahmen von Untersuchungen zahlreicher Prüfinstitute nachgewiesen.

Bild 10.1 zeigt die mechanischen Eigenschaften (Spannungs-Dehnungs-Linien) der unterschiedlichen Ausgangsfasern im Vergleich. Alle Fasermaterialien zeichnen sich durch ein ausgeprägt lineares Werkstoffverhalten bis zum Bruch aus.



Fasertyp	Zugfestigkeit kN/mm ²	E-Modul Mpa
C (Carbon)	240 – 650	2500 – 4000
A (Aramid)	125	3000 – 4000
G (Glas)	65 – 70	1700 – 3000
Polyester	12 – 15	2000 – 3000
Betonstahl (zum Vergleich)	210	550

Bild 10.1: σ - ϵ -Diagramm und Kennwerte unterschiedlicher Ausgangsfasern

10.4 FRP-Systeme

10.4.1 FRP-Systeme für Handlamination

FRP Sheets (Gelege/Gewebe) lassen sich sowohl im Trocken- oder Nassverfahren als auch als vorimprägnierte Prepregs applizieren. Die Aufgabe der Matrix besteht darin, die Kräfte aus einer Faser in die nächste Faser respektive in den Untergrund einzuleiten. Für die Bemessung von Verstärkungsmaßnahmen werden nur der theoretische Faserquerschnitt sowie die theoretischen Faserkennwerte herangezogen. Die theoretische Sheet-Dicke eines Geleges oder Gewebes ermittelt sich aus dem Quotienten des Fasergewichts und der Dichte der Verstärkungsfasern:

$$\text{Theoretische Sheet-Dicke} = \frac{\text{Fasergewicht in Verstärkungsrichtung}}{\text{Dichte der Verstärkungsfaser}}$$

Anwendungsbedingt ist beim Handlaminieren eine optimale Faseranordnung nicht immer gewährleistet. So besteht z.B. die Gefahr, dass Fasern beim Anrollen beschädigt oder die Sheets durch unebene Untergründe in Wellenform angeklebt werden. Aus diesem Grunde wird empfohlen, die Faserkennwerte für die Bemessung zusätzlich abzumindern. Je nach Produkt (Gelege oder Gewebe) sollte die rechnerische Steifigkeit der Sheets um 15 bis 30 Prozent reduziert werden.

10.4.2 FRP-Systeme aus vorgefertigten Laminaten

Uni- oder bi-direktionale Laminat werden werksmäßig auf Doppelbandpressen oder im Strangzugverfahren hergestellt. Die vorgefertigten Gewebe oder die uni-direktionalen Faserstränge werden kontinuierlich im Epoxydharz getränkt und unter Wärmeinwirkung ausgehärtet. Verfahrenstechnisch beträgt die maximale Faserverfüllung von uni-direktionalen Laminaten etwa 70 %. Aus den Eigenschaften der Fasern und der Matrix lassen sich die theoretischen Steifigkeitskennwerte einer uni-direktionalen

Schicht bestimmen. Sowohl der E-Modul als auch die Zugfestigkeit der Matrix sind für die Berechnung der Kennwerte vernachlässigbar, sodass diese Eigenschaften von uni-direktionalen Laminaten annähernd bei 70 % der theoretischen Faserkennwerte liegen. CFK-Lamellen werden nach einem neuen Verfahren hergestellt. Für die Herstellung von Hybriden werden verschiedene Carbonfasern mit unterschiedlichem E-Modul sowie unterschiedlicher Zugfestigkeit eingesetzt. Normalerweise verläuft der E-Modul eines Hybridlaminates nicht linear. Die hochmoduligen Carbonfasern mit einer geringeren Bruchdehnung reißen früher als die tiefmoduligen Fasern. In neueren Hybridlaminaten (S & P CFK-Lamellen) hingegen werden die C-Fasern mit der höheren Dehnung beim Herstellvorgang vorgespannt. Dies führt zu einem linearen Verlauf des Elastizitätsmoduls der Lamine.

Tabelle 10.1: Kennwerte von CFK-Lamellen

Dicke [mm]	Breite [mm]	E-Modul [kN/mm ²]	Zugfestigkeit [Mpa]	Bruchdehnung [%]
1,2 – 1,4	10 bis 150	150 bis 300	2400 – 3000	1,2 bis 1,5

Während beim Handlaminieren nur mit dem theoretischen Faserquerschnitt und mit den Kennwerten der Faser gerechnet wird, werden bei Verwendung von vorgefertigten CFK-Lamellen der tatsächliche Lamellenquerschnitt und die effektiven Kennwerte des Laminats zugrunde gelegt. Die werksmäßige Herstellung der Lamine erfolgt nach dem ISO 9001 Qualitätsstandard.

10.5 Verstärkungssysteme

10.5.1 Biegezugverstärkung mit FRP-Systemen

10.5.1.1 Oberflächlich geklebte CFK-Lamellen

Für die Verstärkung von Beton- und Stahlbetonbauteilen werden überwiegend oberflächlich angeklebte FRP-Systeme eingesetzt [3]. Die größte Verbreitung finden dabei Kohlefaserlamellen zur Biegezugverstärkung, die inzwischen in zahlreichen Ländern bauaufsichtlich zugelassen sind (Bild 10.2). CFK-Lamellen werden mit einem systemgeprüften Epoxydharzkleber schubfest an die Biegezugzone des Betonbauteils angeschlossen. Dadurch erhält das Stahlbetonbauteil in Ergänzung zur linear-elastisch-plastischen Innenbewehrung aus Betonstahl einen zusätzlichen ideal-elastischen Zuggurt aus CFK-Lamellen.

Maßgebend für die Bemessung von Verstärkungsmaßnahmen mit extern angeklebten CFK-Lamellen ist die rechnerische Verbundtragfähigkeit der Betondeckungsschicht. Wegen der begrenzten Verbundtragfähigkeit werden oberflächlich geklebte CFK-Lamellen rechnerisch lediglich bis zur Hälfte der Bruchdehnung ausgenutzt. Bei höheren Beanspruchungsgraden ist dagegen mit Entkoppelungseffekten zu rechnen.

10.5.1.2 Oberflächlich geklebte CFK-Sheets

Bei Traguntergründen mit geringer Oberflächenzugfestigkeit oder bei kleinen Verstärkungsgraden besteht auch die Möglichkeit CFK-Sheets einzusetzen. Die vergleichsweise große Oberfläche der CFK-Sheets ermöglicht bei Biegeverstärkungen eine bessere Verbundkraftübertragung mit dem Untergrund.



Bild 10.2: CFK-Lamellen für die Biegezugverstärkung von Massivbrücken

10.5.1.3 In Schlitze eingeklebte CFK-Lamellen

Speziell für das Einschlitzen in Stahlbetonbauteile werden CFK-Lamellen mit einer geringen Breite von 10–25 mm hergestellt. Beim diesem Verfahren werden mit einer Betonfräse Schlitze von ca. 3 mm Breite und etwa 15–30 mm Tiefe in den Untergrund eingeschnitten. Die Schlitze werden mit einem systemgeprüften Epoxydharzkleber gefüllt. Danach werden die Lamellen hochkant in den Epoxydharzkleber eingepresst (Bild 10.3 und 10.4).



Bild 10.3: Einschlitzen der Betonoberfläche



Bild 10.4: Auftragen des Klebers

Die mechanische Wirkungsweise eingeschlitzter Lamellen wurde in mehreren Forschungsvorhaben eingehend untersucht [4]. Eingeschlitzte Lamellen zeichnen sich im Vergleich zu oberflächlich geklebten Lamellen durch eine äußerst hohe Verbundtragfähigkeit aus. Dadurch kann die hohe Zugfestigkeit der Lamelle bis zum Versagen der Kohlefaser ausgenutzt werden. In Bild 10.5 sind exemplarisch die Ergebnisse von Verbundversuchen mit eingeschlitzten und oberflächlich angeklebten Lamellen dargestellt. Wegen der geringen Querschnittsfläche lassen sich hohe Verstärkungsgrade mit eingeschlitzte CFK-Lamellen kaum wirtschaftlich realisieren.

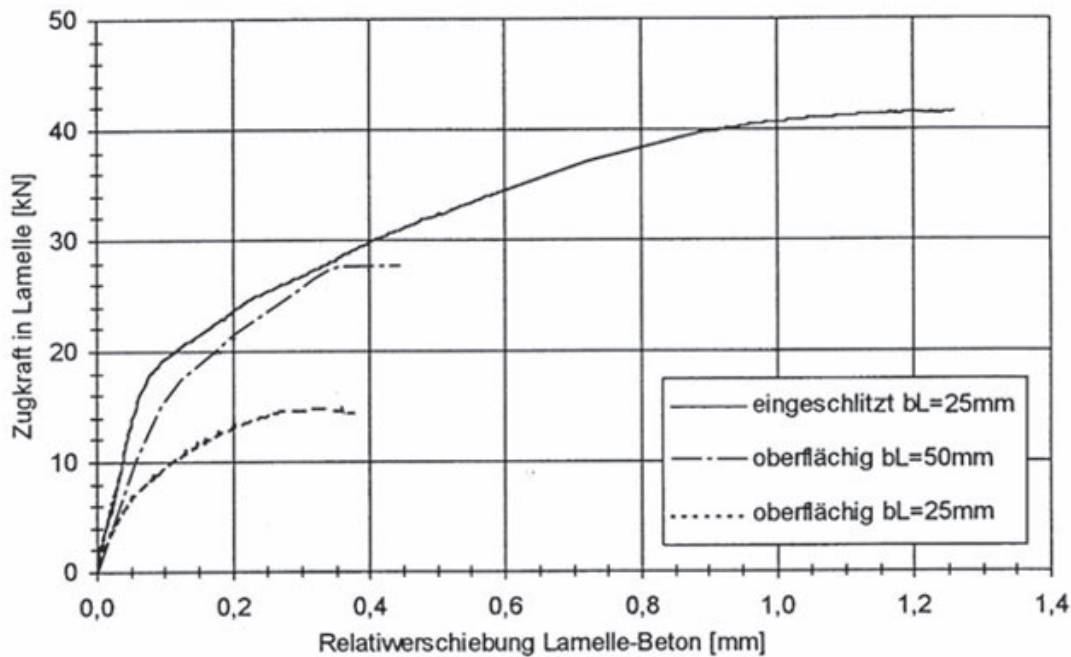


Bild 10.5: Ergebnisse von Verbundversuchen mit eingeschlitzten und oberflächlich angeklebten CFK-Lamellen.

10.5.2 Schub- und Torsionsverstärkung mit FRP

Im Rahmen von Biegezugverstärkungsmaßnahmen ist in aller Regel auch die Schubtragfähigkeit des Bauteils zu überprüfen. Daraus erwächst häufig die Notwendigkeit einer Querkraftverstärkung. Neben der klassischen Querkraftverstärkung mit angeklebten Stahlbügeln werden zur Erhöhung der Schubtragfähigkeit zunehmend angeklebte CFK-Sheets und auch CFK-Lamellen eingesetzt (Bild 10.6 und Bild 10.7). Dies gilt insbesondere auch für die Torsionsverstärkung. Bei der Querkraftverstärkung werden die Kräfte in der Regel nach der Fachwerkanalogie ermittelt und entsprechend der Steifigkeit auf die innere Stahlbügelbewehrung und auf die aufgeklebten CFK-Sheets bzw. Lamellen aufgeteilt. Für die Querkraftverstärkung haben sich CFK-Sheets mit einem hohen E-Modul ($> 600 \text{ kN/mn}^2$) als besonders vorteilhaft erwiesen.

Bei Torsionsbeanspruchung oder auch bei höherer Querkraftbeanspruchung müssen die zusätzlich angeklebten CFK-Sheets oder Lamellen in der Druckzone geschlossen oder zumindest verankert werden.

10.5.3 Vorgespannte FRP-Systeme

Grundsätzlich können FRP-Systeme schlaff oder im vorgespannten Zustand zur Verstärkung von Bauteilen eingesetzt werden. Zahlreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass die Eignung vorgespannter FRP-Systeme im Wesentlichen von den gestellten Anforderungen und dem Einsatzgebiet abhängt [6, 7]. Anders als bei externer Vorspannung mit Spanngliedern aus Stahl ist bei vorgespannten FRP-Systemen wegen des Klebeverbundes mit dem Untergrund im Bruchzustand der Nachweis als Vorspannung mit Verbund möglich. Hochmodulige Kohlenstofffasern sind besonders geeignet für hohe Vorspannkräfte in Verbindung mit geringen Dehnwegen, z. B. für die externe Vorspannung im Brückenbau. Vorteilhaft ist auch die äußerst geringe Relaxation von Kohlefasern im Gebrauchszustand. Andererseits neigen Kohlefasern dazu, infolge Querpressung oder bei exzentrischer Beanspruchung, z. B.

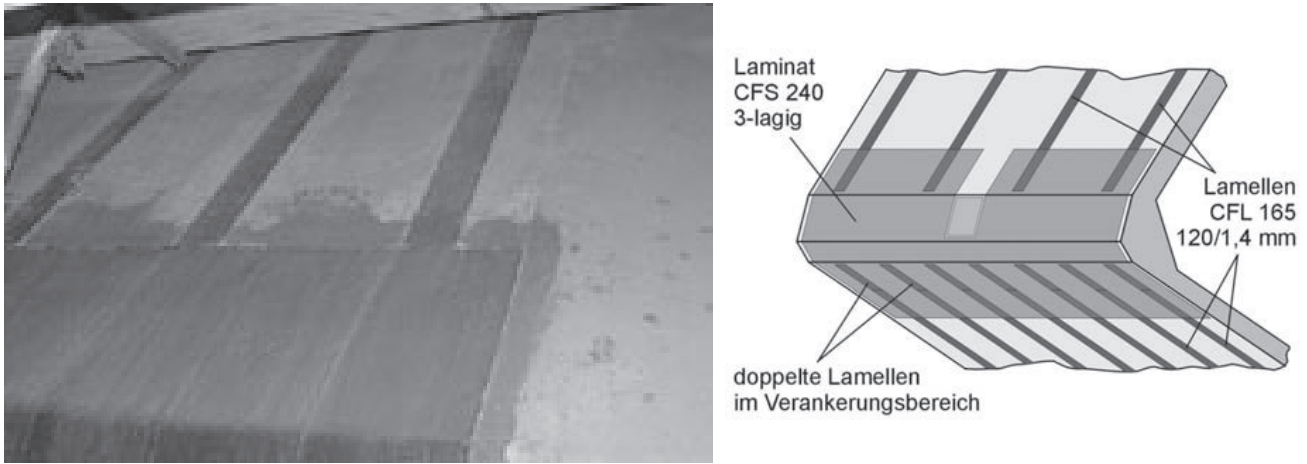


Bild 10.6: Querkraft- und Torsionsverstärkung der West Gate Bridge, Melbourne [5].

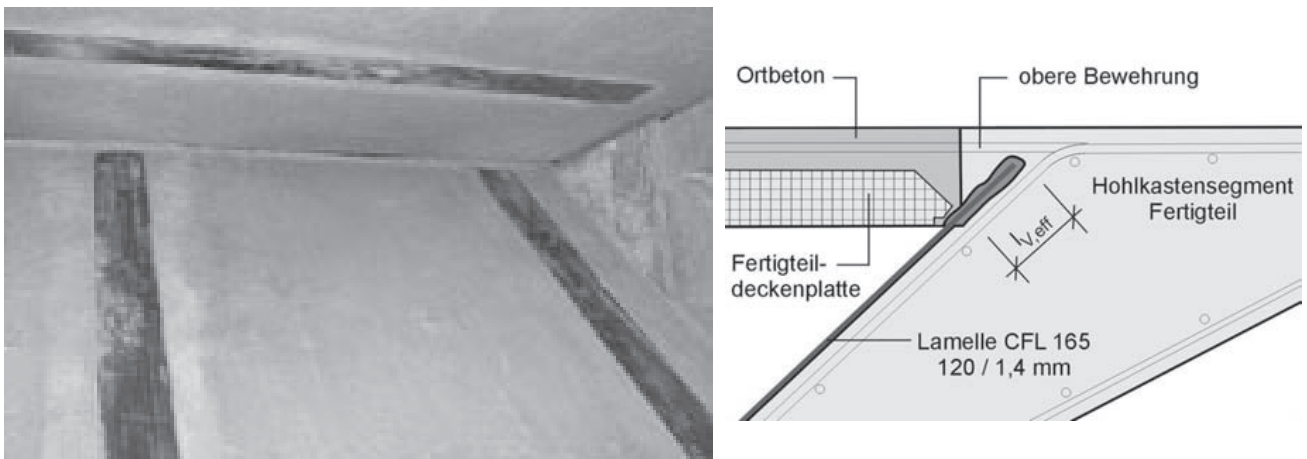


Bild 10.7: Verankerung der angeklebten Querkraft- und Torsionsbewehrung bei der Verstärkung der West Gate Bridge.

beim Vorspannen, vorzeitig zu versagen. Daher müssen CFK-Lamellen beim Vorspannen besonders sorgfältig fixiert werden, damit die hohen Zugkräfte ohne Schädigung des Fasermaterials eingeleitet werden können. Unproblematischer als die spröden Kohlenstofffasern sind Aramidfasern. Gelege oder Gewebe aus Aramid lassen sich wegen der geringen Querdrukempfindlichkeit besonders einfach verankern. Auch wenn Vorspannkräfte umgelenkt werden müssen, z.B. bei Umschnürungen oder Umwicklungen sind vorgespannte FRP-Systeme aus Aramid besonders vorteilhaft. Die Bild 10.8 und 10.9 zeigen Anwendungsbeispiele vorgespannter FRP-Systeme.

10.5.4 Umschnürte Bauteile

FRP-Systeme eignen sich auch für die Verstärkung von massiven Stützen. Deren Tragfähigkeit lässt sich durch die Umschnürung mit FRP-Systemen wesentlich erhöhen. Der belastete Beton erfährt durch die Umschnürungswirkung einen dreiaxialen Spannungszustand, der bekanntlich zu einer Steigerung der Betondruckfestigkeit führt. Bei umschnürten Bauteilen erfolgt die Herstellung des Ringschlusses durch den Verbund des FRP-Materials im Überlappungsbereich. Die Tragfähigkeit des Untergrundes ist somit von untergeordneter Bedeutung. An umwickelten Druckstützen, die nur im Verankerungs- bzw. Überlappungsbereich mit Epoxydharz verklebt waren, konnte nachgewiesen werden, dass diese im Vergleich zu vollflächig verklebten Systemen nahezu identische Traglasten erreichen. Auch eine

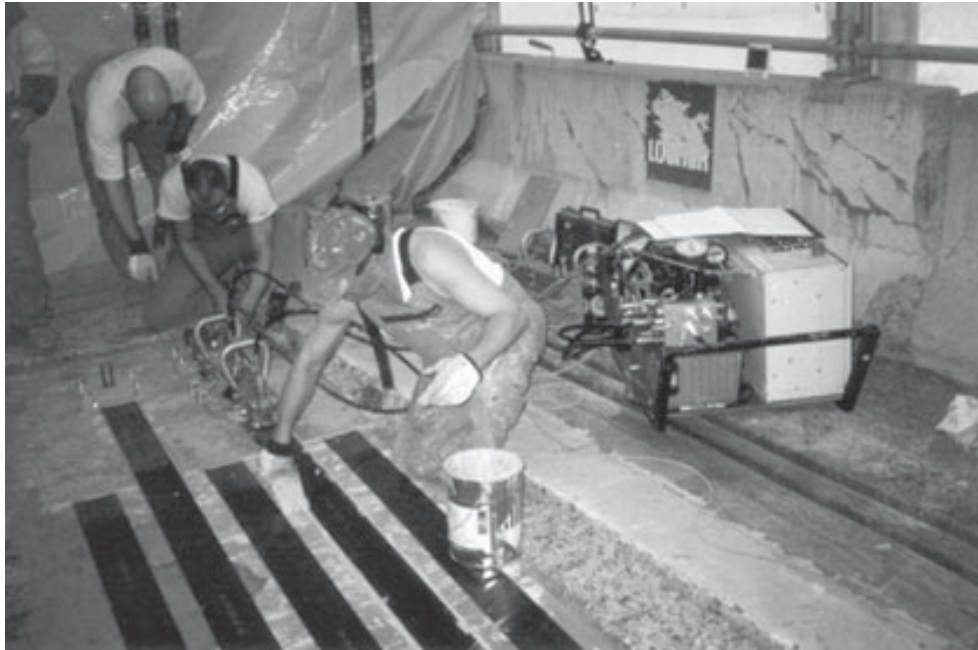


Bild 10.8: Verstärkung einer Brücke mit extern angeklebten vorgespannten CFK-Lamellen im Stützmomentenbereich



Bild 10.9: Umschnürung eines Brückenpfeilers der Brennerautobahn mit vorgespannten Aramidbändern

nachträgliche Biegeverstärkung von Stützen mit FRP ist möglich, z. B. als Ersatz korrodierter Längsbewehrung. Die zusätzliche Verstärkung erfolgt in der Regel in Form eingeschlitzter CFK-Lamellen in Verbindung mit einer Umschnürung aus CFK-Sheets. Die Bild 10.10 zeigen Anwendungsbeispiele für Stützenverstärkungen.



Bild 10.10: Umschnürung von Brückenfeilern mit FRP zur Verstärkung gegen Anpralllasten

10.5.5 Seismische Nachverstärkung von Massivbauteilen

Zur seismischen Nachverstärkung von Massivbauteilen gegen Erdbeben können unterschiedliche FRP-Systeme verwendet werden. Aus Kostengründen werden in der Regel angeklebte Faserverbundwerkstoffe aus Glasfasern eingesetzt. Durch die zusätzlich angeklebte Bewehrung wird die Duktilität der massiven Bauteile merklich erhöht. Durch die Erhöhung der Duktilität tritt ein Versagen der Bauteile erst bei größeren Verformungen auf. In Ausnahmefällen, insbesondere bei hochbeanspruchten Stahlbetonbauteilen, wie Rahmen oder Stützen, werden auch Kohle- oder Aramidfasern zur seismischen Nachverstärkung eingesetzt (Bild 10.11 und 10.12).

10.6 Bemessungsmodelle und Vorschriften

Die internationale Forschung hat in den vergangenen Jahren zahlreiche Bemessungsmodelle und -verfahren für die Anwendung geklebter FRP-Bewehrung entwickelt. Das fib Bulletin Nr. 14 [8] aus dem Jahre 2001 gibt einen guten Überblick über den aktuellen Kenntnisstand. Parallel zur praktischen Entwicklung der Verstärkungssysteme wurden in zahlreichen Ländern (Deutschland, UK, USA, Frankreich und Korea) Richtlinien und Zulassungen für die Anwendung von FRP Verstärkungsmaßnahmen erarbeitet. In Deutschland sind derzeit 3 CFK-Systeme auf Basis von Richtlinien des DIBt bauaufsichtlich zugelassen [9, 10, 11]. Weitere Zulassungen insbesondere für vorgespannte CFK-Systeme sind beim DIBt beantragt und in der Bearbeitung. In Großbritannien [12] und den USA [13] wurden vor kurzem Richtlinien veröffentlicht, in der die Anwendung und Bemessung von FRP Verstärkungsmaßnahmen system- und materialunabhängig geregelt sind. Auch wenn diese Richtlinien nicht alle



Bild 10.11: Brückenpfeiler nach starkem Erdbeben **Bild 10.12:** Seismische Nachverstärkung mit Aramidfasern

derzeit auf dem Markt verfügbaren Systeme erfassen, so bieten sie dem Anwender dennoch eine gute Unterstützung bei der Auswahl, Bemessung und Ausführung von Verstärkungsmaßnahmen mit FRP. Beide Richtlinien sind hinsichtlich der Bemessung eng an das Teilsicherheitskonzept der jeweiligen Normen angelehnt. Die Bemessung von Verstärkungsmaßnahmen ist mechanisch aufwendig und verlangt hinsichtlich der Detailnachweise und -ausführung besondere Kenntnisse. Daher wurden in den letzten Jahren Bemessungshilfen entwickelt, die den Planer bei der Bemessung von Verstärkungsmaßnahmen mit FRP unterstützen. Bild 10.13 zeigt das Programmsystem FRP Lamella, das speziell für die Biegezugverstärkung von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen entwickelt wurde [14]. Darüber hinaus ist seit kurzem auch ein Programm für die Verstärkung von Stahlbetonstützen verfügbar [15]. Weitere Bemessungshilfen sind in Vorbereitung.

10.7 Weitere Anwendungsgebiete und Ausblick

Neben der Verstärkung von Massivbrücken oder -bauteile lassen sich FRP-Systeme auch zur Verstärkung anderer Baustoffe einsetzen. Historische Holzbrücken, Stahlgussteile oder Natursteinelemente wurden bereits erfolgreich mit angeklebten oder eingeschlitzten FRP-Systemen verstärkt. Das potentielle Anwendungsspektrum wurde in den letzten Jahren stark erweitert. Durch die rasch fortschreitende Entwicklung werden weitere Anwendungsgebiete erschlossen, wie z.B. das Verstärken mit geklebter Bewehrung unter Wasser oder bei tiefen Temperaturen. Die Anwendung vorgespannter FRP-Systeme wird durch die Entwicklung neuer Verankerungssysteme eine größere Rolle spielen. Nur dadurch lassen sich die hohen Festigkeiten wirtschaftlich nutzen. Durch die zunehmende Anwendung von FRP-Systemen im Baubereich werden sich die Produktionskosten für Faserverbundwerkstoffe zukünftig bedeutend verringern. Literatur

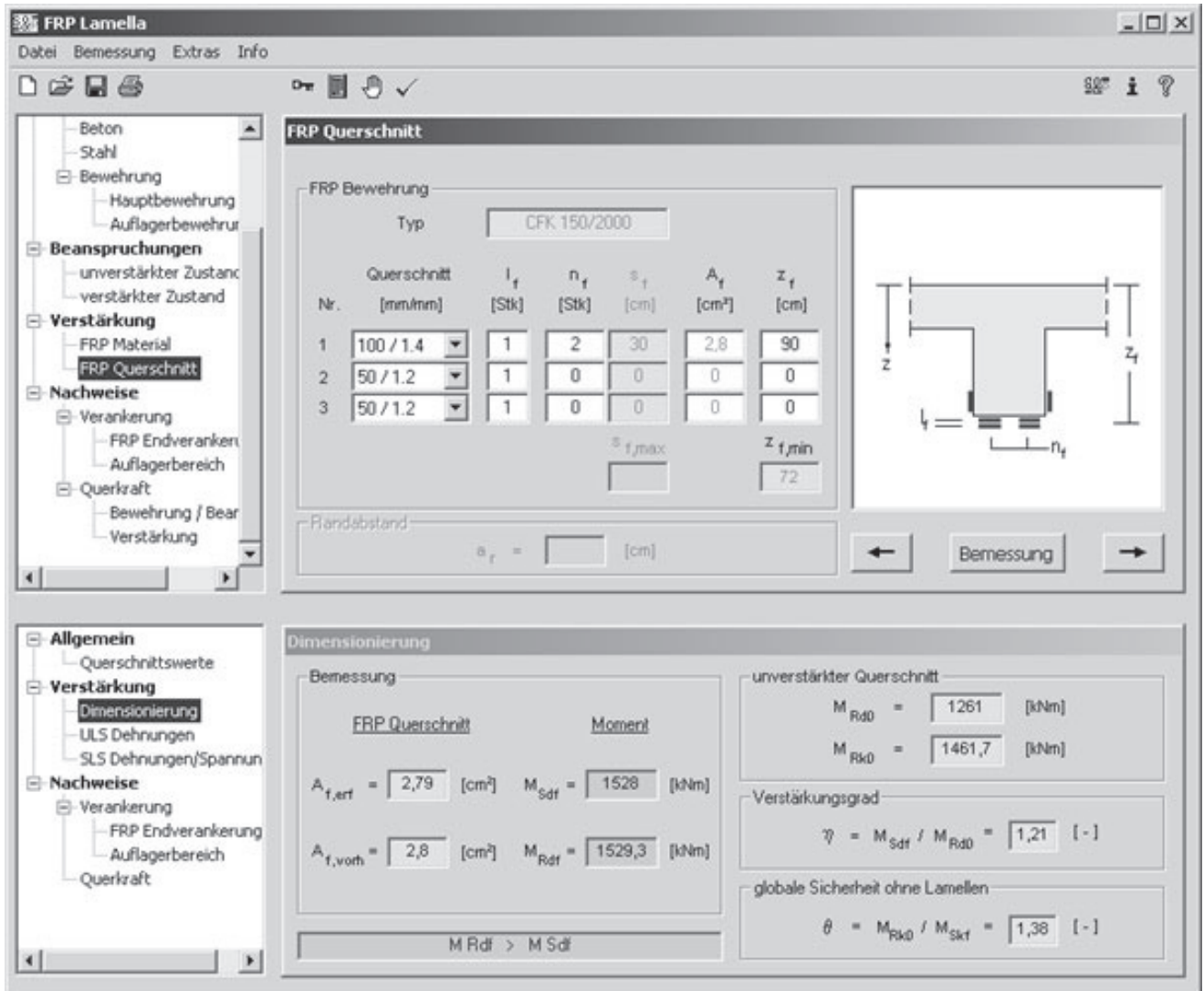


Bild 10.13: Bemessungssoftware FRP Lamella Vers. 3.x für die Biegezugverstärkung mit FRP-Systemen

Literaturverzeichnis

- [1] S & P Clever Reinforcement Company: FRP Produktübersicht. In: *Bemessungsgrundlagen für S & P FRP Systeme*. S & P Reinforcement, Eisenstadt, 2001.
- [2] Rostásy, F.S.: Faserverbundwerkstoffe für das Bewehren, Vorspannen, und Verstärken im Betonbau. In: *Neue Technologien im Bauwesen*. Braunschweiger Bauseminar, iBMB/TU Braunschweig, 1992.
- [3] Grunewald, D.: Konstruktive Bauwerksverstärkung mit Kohlefaserprodukten. *DBZ*, Heft 2/2002.
- [4] Blaschko, M.: *Zum Tragverhalten von Betonbauteilen mit in Schlitze eingeklebten CFK-Lamellen*. Dissertation am Lehrstuhl für Massivbau der TU München, 2001.
- [5] Onken, P.; vom Berg, W.; Neubauer, U.: Verstärkung der West Gate Bridge, Melbourne. In: *Beton- und Stahlbeton 97* (2002), H. 2
- [6] Suter, R.; Jungo, D.: Vorgespannte CFK-Lamellen zur Verstärkung von Bauwerken. In: *Beton- und Stahlbetonbau 96* (2001), H. 5
- [7] Andrä, H.-P.; König, G.; Maier, M.: Einsatz vorgespannter Kohlefaser-Lamellen als Oberflächen-spannglieder. In: *Beton- und Stahlbetonbau 96* (2001), H. 12
- [8] Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures. In: *Technical Report Bulletin 14*, fib – fédération internationale du béton, Juli 2001.
- [9] Richtlinie für das Verstärken von Betonbauteilen durch Aufkleben von unidirektionalen kohlenstofffaserverstärkten Kunststofflamellen, Fassung März 2001, Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, 2001
- [10] Richtlinie für das Verstärken von Betonbauteilen durch Einkleben von unidirektionalen kohlenstofffaserverstärkten Kunststofflamellen in Schlitze im Beton, Fassung März 2001, Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, 2001
- [11] Richtlinie für das Verstärken von Betonbauteilen durch Auflaminieren von unidirektionalen Kohlenstofffaserlaminaten (CFK-Laminat), Fassung Oktober 1999, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin
- [12] Design Guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials. In: *Technical Report 55*, The Concrete Society, Dezember 2000.
- [13] Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. In: *ACI Committee 440, American Concrete Institute*, Farmington Hills, Michigan, 10/2002.
- [14] Onken, P.; vom Berg, W.; Matzdorff, D.: *FRP Lamella, Bemessungssoftware zur Biegezugverstärkung von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen mit FRP-Systemen*. bow ingenieure, Braunschweig/Hamburg.

- [15] Onken, P.; Matzdorff, D., vom Berg, W.: *FRP Colonna, Bemessungssoftware zur Verstärkung von Stahlbetonstützen durch Umwicklung mit FRP Materialien*. bow ingenieure, Braunschweig/Hamburg.