

9. Seismische Nachverstärkung mit FRP von Stahlbetonstützen und Rahmen

Stahlbetonstützen

Verstärkungstechniken für Stahlbetonstützen

Viele ältere Stahlbetonstützen weisen eine zu geringe Erdbebenresistenz auf. Die Biegeduktilität oder der Biege- und Torsionswiderstand der Stütze ist ungenügend.

Die Probleme treten einerseits auf, weil die Stöße der Innenbewehrung in den kritischen Anschlussbereichen zu kurz sind und andererseits, weil die Verankerungslänge der Innenbewehrung an den Anschlussbauteilen zu gering gewählt wurde. Typische Überlappungslängen im Druckbereich, mit einer Länge des 20-fachen Bewehrungsdurchmesser können die gesamten Fließkräfte der Bewehrungsstäbe nicht übertragen. Während eines Erdbebens zeigen nicht ausreichend verankerte Bewehrungsstäbe ein ungünstiges Verhalten. Bei zyklischen Biegebeanspruchungen und eventuellen zusätzlichen Zugbeanspruchungen neigen solche Bauteile vorzeitig zum Versagen. Besonders kritisch sind ungenügende Überlappungen der Anschlusseisen bei Fundamentanschlüssen. Bei Erdbebenbeanspruchung bildet sich in diesem Falle ein unerwünschtes plastisches Gelenk. Solche mangelhafte Konstruktionsdetails sind unglücklicherweise bei älteren Gebäuden und Brücken häufig anzutreffen. Oftmals ist auch die Querkraftaufnahmefähigkeit von Stützbauteilen ungenügend.

Zur Nachverstärkung von solch mangelhaften Stützbauteilen bietet sich die Ummantelung an. Die Erdbebenresistenz eines im Anschlussbereich umschnürten Druckbauteils wird durch die Radialspannungen erhöht. Zur nachträglichen Umschnürung (Ummantelung) stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Anlässlich von Grossversuchen wurden drei unterschiedliche Umschnürungen verglichen:

- Stahluummantelung
- Betonummantelung
- Umschnürung mittels FRP

Herkömmliche Stahl- sowie Betonummantelungen sind bekannt und werden nicht erläutert.

FRP Umschnürungen von Stahlbetonstützen

Während den letzten Jahren wurde die Wirkungsweise von FRP umschnürten Stahlbetonstützen durch mehrere wissenschaftliche Studien nachgewiesen. Bemessungsgrundlagen für die Projektierung von FRP Umschnürungen liegen vor.

(z.B. "Seismic design and retrofit of bridges" von M.J.N. Priestley, F. Seible und G.M. Calvi)

Eine FRP Umschnürung von Rechteckstützen ist problematischer als eine Umschnürung von Rundstützen. Die Radialspannungen konzentrieren sich auf die Eckpunkte. Damit eine definierte Umschnürungskraft (Radialumspannung) aufgebracht werden kann, entwickelte S&P ein Vorspannsystem. Dank der Vorspannung wird ein definierter dreidimensionaler Spannungszustand erzeugt. Bei schlaffen FRP Umschnürungen stellt sich der dreidimensionale Spannungszustand erst im Zuge der Querdehnung des Bauteils ein. Dank der

Vorspannung kann der Verstärkungsgrad der FRP Umschnürung erhöht werden. Mit der neuen Methode kann somit auch bei Rechteckstützen eine ausreichend grosse Radialspannung mobilisiert werden.

Im Gegensatz zu Stahlummantelungen erleiden FRP umschnürte Stützen keinen Wirkungsverlust. Weitere Experimente zeigten, dass mit FRP Umschnürungen ein mögliches Schubversagen sehr wirkungsvoll verhindert werden kann. FRP Umschnürungen erhöhen den ungewollten Biege widerstand nur minimal. Die Bemessung für FRP umschnürte Stützbauteile erfolgt grundsätzlich gleich wie die Bemessung von Schubdübeln aus Stahl. Die Grenzdehnung für die Bemessung des FRP wird bei ca. 50% der Faserbruchdehnung eingesetzt. Die grosse Sicherheitsreserve garantiert, dass der Schubmechanismus der Stahlbetonstütze durch exzessive Betondehnungen nicht geschwächt wird.

Die FRP Umschnürungen bewahren sich aus folgenden zwei Gründen:

- Auf der Zugseite des Fließgelenkes der Stütze bewirkt die FRP Umschnürung, dass die Bewehrungsüberlappungen bzw. Verankerung der vertikalen Innenbewehrung verbessert wird, und die Fließkraft der Bewehrungsstäbe entsprechend voll ausgenützt werden kann.
- Auf der Druckseite des Fließgelenkes verhindert die Umschnürung das Ausknicken der Längsbewehrung sowie das Abplatzen der Betondeckung.

Umschnürung zur Steigerung der Biegeduktilität

Im Vordergrund steht die Verbesserung der Duktilitätskapazität. Stützen mit ungenügender innerer Bügelbewehrung können grosse nicht elastische Rotationen im plastischen Gelenk nicht aushalten. FRP Umschnürungen eignen sich zur Erhöhung der Duktilitätskapazität von solchen Stützbauteilen. Versuche mit FRP umschnürten Rundstützen zeigten deutlich, dass die Duktilität im Vergleich zu traditionellen Stahlummantelungen effizienter erhöht werden kann. Der Grund liegt im linearelastischen Verhalten der FRP Umschnürung. Bei Stahlummantelungen können unter seismischer Beanspruchung Verformungen in Tangentialrichtung auftreten. Nach einer Erstbelastung bleiben Restverformungen bestehen. Die Wirksamkeit des Stahlmantels wird somit für eine nachfolgende Erdbebenbelastung vermindert. Mit jedem neuen Belastungszyklus sind somit höhere Tangentialdehnungen erforderlich. Infolge des linear elastischen Verhaltens von FRP kumulieren die Schäden nicht. Nachfolgende Zyklen führen zu ähnlich grossen Verschiebungen. Die aus Versuchsprogrammen abgeleiteten Bemessungsansätze für FRP Umschnürungen berücksichtigen diese verbesserte Wirkung gegenüber Stahlummantelungen.

Rundstützen

Die maximale Betonstauchung ε_{cu} der Stütze kann wie folgt berechnet werden:

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{2.5\rho_s f_{FRP} \varepsilon_{FRP}}{f'_{cc}} \quad [M.J.N. Priestley, F. Seible, G.M. Calvi]$$

Wobei das Volumenverhältnis der Umschnürung ρ_s für kreisförmige Stütze wie folgt definiert ist:

$$\rho_s = \frac{4t_{FRP}}{D}$$

f_{FRP} und ε_{FRP} bedeuten die maximale Spannung sowie Dehnung in der FRP Umschnürung.

Der Betondruckfestigkeit f'_{cc} für eine umschnürte Stahlbetonstütze ist wie folgt definiert:

$$f'_{cc} = f'_c \left[2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f'_l}{f'_c}} - \frac{2f'_l}{f'_c} - 1.254 \right] \quad [\text{M.J.N. Priestley, F. Seibel, G.M. Calvi}]$$

In der Formel steht f'_c für die charakteristische Betondruckfähigkeit und f'_l für die effektive laterale Umschnürungsspannung (Spannung des theoretischen Faserquerschnitts).

Aus den Ausdrücken für ϵ_{cu} und p_s , lässt sich die erforderliche Umschnürungsstärke t_{FRP} (theoretischen Faserdicke der FRP Umschnürung) ableiten:

$$t_{FRP} = \frac{0.1(\epsilon_{cu} - 0.004)Df'_{cc}}{f_{FRP}\epsilon_{FRP}}$$

Rechteckstützen

Pull-Push-Versuche an Rechteckstützen, die mit GFRP umschnürt waren, zeigten ebenfalls eine Duktilitätserhöhung. Fig. 12 zeigt eine rechteckige Stütze, welche mit GFRP umschnürt wurde nach dem Versagen. Beim Versuch wurde eine Verschiebungsduktilität (Bruch) von $\mu_{\Delta} = 8$ erreicht. Dies entspricht einem Verschiebungswinkel von etwa 4%.

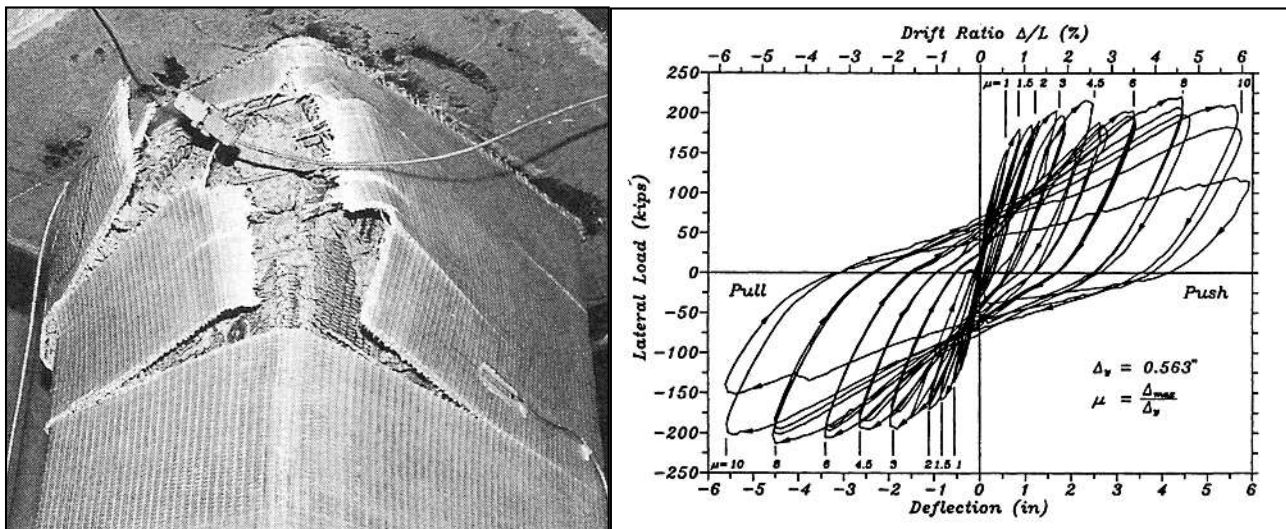


Bild 35: Rechteckstütze mit GFRP Umschnürung
M.J.N. Priestly, F Seible und G.M. Calvi, "Seismic design and retrofit of bridges"

Anlässlich von mehrerer Versuchsreihen wurde aufgezeigt, dass bei Rechteckquerschnitten im Vergleich zu Rundstützen mit identischem Querschnitt eine Erhöhung der Duktilität von ca. 50% erreicht wird.

Die maximale Betonstauchung ε_{cu} der Rechteckstütze wird wie folgt berechnet:

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.25\rho_s f_{FRP} \varepsilon_{FRP}}{f'_{cc}} \quad [\text{M.J.N. Priestley, F. Seible, G.M. Calvi}]$$

Für Rechteckstützen wird das Volumenverhältnis der Umschnürung wie folgt berücksichtigt:

$$\rho_s = 2t_{FRP} \left[\frac{b+h}{bh} \right]$$

Darin bedeuten b und h die Querschnittsabmessungen.

Aus den Ausdrücken für ε_{cu} und ρ_s , lässt sich erneut die theoretische erforderliche Umschnürungsstärke des FRP ableiten:

$$t_{FRP} = \frac{0.4(\varepsilon_{cu} - 0.004)f'_{cc}}{f_{FRP}\varepsilon_{FRP}} \left[\frac{bh}{b+h} \right]$$

Umschnürungsbereich

In Tabelle 5 sind die erforderlichen Umschnürungsbereiche (l) angegeben. Es wird zwischen einseitig oder doppelseitig eingespannten Stützen unterschieden. L_a und L_b bedeuten die Abstände des Auflagers bis zum Momentennullpunkt.

Einspannung der Stütze	Stützendurchmesser	Stützenlänge	Bereich
Einseitig	D	L	$D \leq l \leq 0.25 L$
Doppelseitig: M_a	D	L_a	$D \leq l \leq 0.25 L_a$
M_b		L_b	$D \leq l \leq 0.25 L_b$

Tabelle 5: Umschnürungsbereich

Umschnürung zur Verbesserung der Bewehrungsstösse

Infolge Krafteinleitung aus der Stahleinlage in den Beton entstehen Mikrorisse im Beton. Solche Risse reduzieren die Klemmwirkung und entsprechend die Einbindung des Betonstahls. Mittels der FRP Umschnürung (speziell mit einem vorgespannten FRP System) wird die Klemmwirkung nachträglich verbessert.

Die Bemessung erfolgt anhand der nachfolgenden Formel:

$$\rho_s = 2 \left[\frac{A_b f_s / \mu p l_s - f_a}{0.0015 E_{FRP}} \right]$$

- f_a : aktive Umschnürungsspannung
 A_b : Fläche der Längseisen
 f_s : Spannung im Längseisen
 μ : Reibungskoeffizient (1.4)
 p : Länge der gerissenen Oberfläche im Stossbereich
 l_s : Stosslänge

Die vorgespannten S&P A-Straps eignen sich speziell für dieses Anwendungsgebiet. Gewebe mit einem tiefen E-Modul, beispielsweise aus G-Fasern sind für diese Anwendung weniger geeignet.

Umschnürungsbereich

Ist die Verstärkung des Stosses der einzige Grund der FRP Umschnürung, dann macht es keinen Sinn, die Umschnürung oberhalb des Stosses auszuführen. Diese Situation ist nur dann notwendig, wenn sich der Stoss nicht im Bereich eines plastischen Gelenkes befindet.

Umschnürung als externe Schubverstärkung

FRP Umschnürungen sind wie Stahlummantelungen sehr effizient, um die Schubtragfähigkeit eines Bauteils zu verbessern. Da sich FRP bis zum Bruch linearelastisch verhält, wird der Bemessungswert für externe Stahlverstärkung leicht modifiziert. Es gilt für die Bemessung eine Grenzdehnung des FRP von 0.2-0.3% einzuhalten. Für diese Anwendung wird idealerweise das hochmodulige S&P C-Sheet 640 mit einer Bruchdehnung von 0.4% eingesetzt.

Die nachträgliche Schubverstärkung kann wie folgt berechnet werden:

Kreisförmige Stützen

$$V_{FRP} = \frac{\pi}{2} t_{FRP} f_{FRP} D \cot \theta \quad [M.J.N. Priestley, F. Seible, G.M. Calvi]$$

D: Durchmesser der Stütze

θ : 35°

Rechteckförmige Stützen

$$V_{FRP} = 2 t_{FRP} f_{FRP} h \cot \theta$$

h: Abmessung der Stütze parallel zur Schubbeanspruchung

θ : 35°

Umschnürungsbereich

In Bereichen von plastischen Gelenken, bei reduzierter Schubkapazität, sollte die FRP Umschnürung über eine Höhe von 2D für Rundstützen oder 2h für Rechteckstützen appliziert werden.

Biegesteifigkeit der Stütze

Durch nachträgliche Umschnürungen bzw. Ummantelungen von Stützen, wird die Biegesteifigkeit erhöht. Dadurch werden grössere Kräfte angezogen. Diesem Punkt gebührt spezielle Aufmerksamkeit. Die Zunahme der Biegesteifigkeit ist von der gewählten Verstärkungstechnik, den Materialparametern sowie von der Stützengeometrie abhängig.

Tabelle 6 zeigt die Zunahme der Biegesteifigkeit einer Stütze in Abhängigkeit der gewählten Umschnürung.

Stütze	Verstärkungsart	Stahl	Beton	FRP
Kreisförmig	Plastisches Gelenk	10 - 20	20 - 50	0 - 5
	Schub	20 - 40	25 - 75	0 - 5
Rechteckig	Plastisches Gelenk	20 - 40	20 - 50	0 - 10
	Schub	40 - 70	25 - 75	0 - 5

Tabelle 6: Steifigkeitszunahme (%)

Bei nachträglichen FRP Umschnürungen ist die Zunahme der Biegesteifigkeit der Stütze massgeblich geringer als bei Stahl- oder Betonummantelungen.

Vergleich der Verstärkungstechniken

In Tabelle 7 werden die unterschiedlichen Verstärkungstechniken verglichen. Die Resultate zeigen, dass FRP Umschnürungen im Vergleich zu den klassischen Methoden gut abschneiden. Der Hauptvorteil der FRP Umschnürung liegt darin, dass trotz hoher Duktilitätsverbesserung die Zunahme der Steifigkeit gering bleibt. Entsprechend werden durch den verstärkten Bauteil keine zusätzlichen Kräfte angezogen. Ein frühzeitiges Versagen des Rahmensystems wird dadurch ausgeschlossen.

Mit den vorgespannten S&P A-Straps wird ein definierter dreidimensionaler Spannungszustand erreicht. Eine Erhöhung der Betondruckfestigkeit ist infolge der Vorspannung möglich, ohne dass eine grosse Axialstauchung des Druckbauteils erfolgt. Dank der erhöhten Betondruckfestigkeit können in diesem Falle höhere Lasten eingeleitet werden.

Infolge der schnellen und einfachen Applikation, werden bei FRP Umschnürungen die Betriebsunterbrechungen wesentlich reduziert. Zusätzlich benötigt die dünnschichtige FRP Verstärkung weniger Anpassungsarbeiten bei anliegenden Bauteilen.

Technik	Gewichts- Zunahme	Verkleinerung der Geometrie	Radial- spannungen	Steifigkeits- zunahme	Applikation	Korrosion
Stahlummantelung	-	-	-	-	-	-
Betonummantelung	-	-	-	-	-	0
FRP Umschnürung	+	+	++*	+	+	++

Tabelle 7: Verstärkungstechniken im Vergleich

* Vorspannung problemlos

Stahlbetonrahmen

Damit der Statiker in der Lage ist, seismisch beanspruchte Bauten richtig zu bemessen, sollte er die üblichen Schadensarten, welche bei Erdbebeneinwirkungen entstehen können, kennen. Die häufigsten Schadensarten von Stahlbetonrahmen werden nachfolgend beschrieben.

“Short Column”

Frühzeitig entstandene Schubrisse im Beton können auf eine ungenügende Querkraftaufnahmefähigkeit im Anschlussbereich Stütze/Balken resp. Stütze/Platte zurückgeführt werden. Diese Rissbildung ermöglicht das Öffnen der inneren Bügelbewehrung und führt zum Versagen des Stützbauteils. Dieses Versagen kann mit einer Querkraftverstärkung aus FRP im Anschlussbereich der Stützen verhindert werden. Da die Gesamtduktilität des Bauwerkes zusätzlich im Auge behalten werden muss, eignet sich als FRP Umschnürung speziell das gewobene S&P G-Sheet 90/10. FRP Umschnürungen mit der C-Faser sind infolge des hohen E-Moduls für diese Anwendung weniger geeignet. Die Anforderungskriterien bezüglich Bauwerksduktilität würden unter diesen Umständen geringer erfüllt.



Bild 36: “Short Column”

Schwach ausgebildete Knotenpunkte



Bild 37: Schwach ausgebildeter Knotenpunkt

Weitere Versagensarten sind zu schwach ausgebildete Knotenpunkte oder die mangelnde Tragfähigkeit infolge eines geschwächten Querschnittes. Eine zusätzliche oft auftretende Versagensart ist die ungenügende Übergreifungslänge der vertikalen Innenbewehrung im Stützenbauteil am Säulenanschluss. Mittels vertikal eingeschlitzten oder oberflächlich geklebten CFK-Lamellen, welche im Knotenanschlussbereich mit dem S&P G-Sheet 90/10 umschnürt werden, kann die Nachverstärkung erfolgen.

Fliessgelenke



Bild 38: Schubversagen in einem Fliessgelenk

Biegebalken können bei Fliessgelenken infolge ungenügender Schubbewehrung versagen, wie im Bild dargestellt. Als Verstärkungsmassnahme wird eine FRP Umschnürung mit dem hochmoduligen S&P C-Sheet 640 eingesetzt.

Eine weitere Versagensart ist die ungenügende Biegezugkapazität des Balkens in Feldmitte, beziehungsweise seitlich der Auflager. In diesem Falle eignen sich die S&P Lamellen CFK eingeschlitzt oder oberflächlich aufgeklebt als Verstärkungsmassnahme.

Methodik bei FRP Nachverstärkungen

In zahlreichen Forschungsarbeiten wurde nachgewiesen, dass durch eine nachträgliche Umschnürung des Stahlbetons in den Bereichen die als plastische Gelenke wirken, die Tragfähigkeitsverbesserung und damit die Duktilität des Stahlbetonrahmens gesteigert werden konnte. Anhand von "Pull-Push-Tests" wurde die Wirksamkeit des S&P G-Sheet zur Erhöhung der Duktilität nachgewiesen. Die Versuche zeigten ausserdem, dass mit GFRP eine grössere Duktilitätssteigerung erreicht werden kann, als mit einer C-Faser Umschnürung. Dies ist auf die höhere Bruchdehnung der Glasfaser zurückzuführen. Zur seismischen Nachverstärkung von Säulen werden idealerweise Systeme verwendet, welche entweder eine Erhöhung der Umschnürungskräfte in den Bereichen von plastischen Gelenken oder über die gesamte Säulenlänge bewirken.

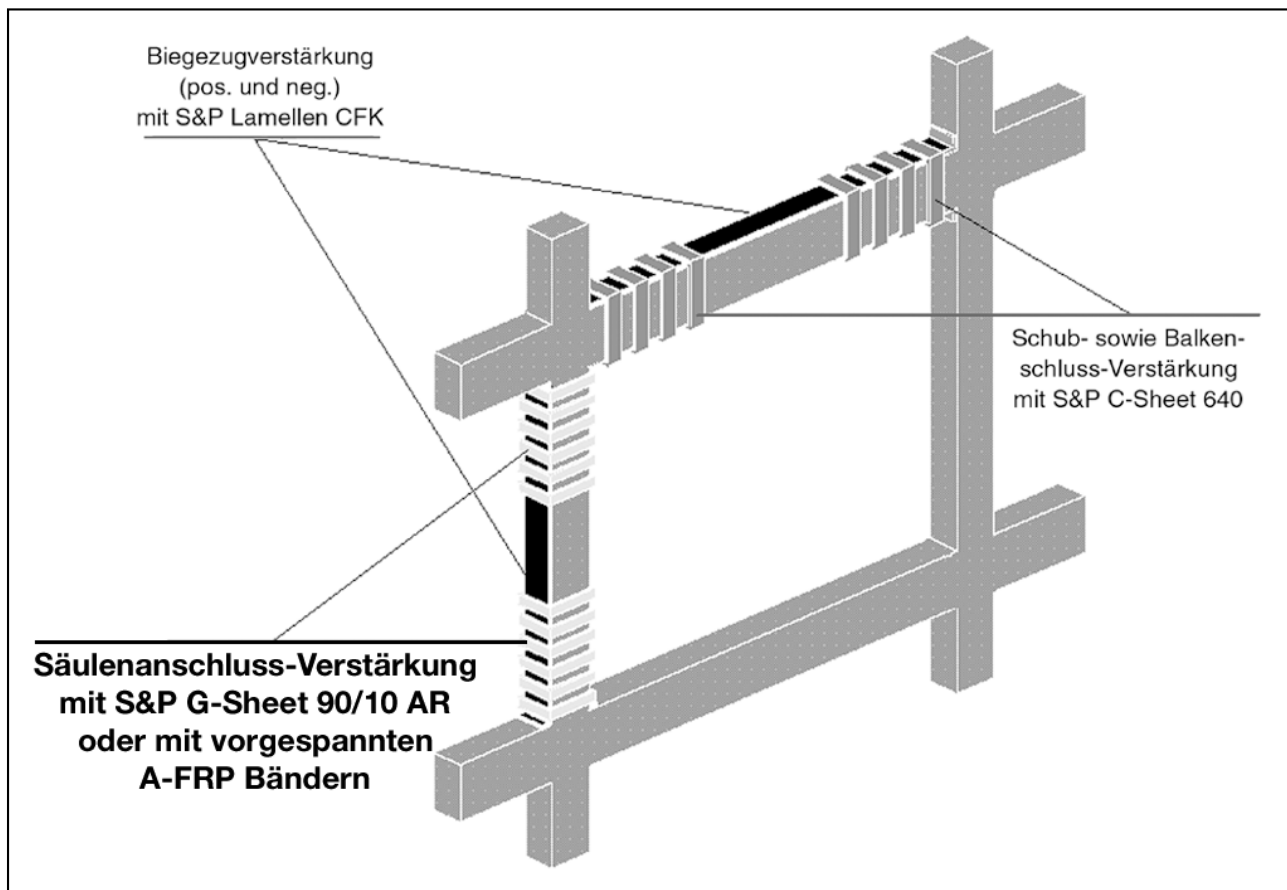


Bild 39: Stahlbetonrahmenverstärkung

Grossversuche zeigten, dass FRP Umschnürungen im Vergleich zu Nachverstärkungen mit einem Stahlmantel technisch vorteilhaft und zusätzlich kostengünstiger sind. Dank einer FRP Umschnürung der Säule bzw. des Säulenanschlusses tritt das Betonversagen erst unter grösserer Dehnung auf. Die durch der FRP Umschnürung verhinderte Querdehnung dient zusätzlich als Verstärkung gegen das Ausknicken der Längsbewehrung.

Vor der FRP Umwicklung sollten die Risse in den Tragelementen mit Epoxydharz kraftschlüssig injiziert werden.

10. Explosions- und Aufprallschutz mit S&P FRP Systemen

Explosionsschutz

Schäden durch kriegerische Einflüsse sowie Explosionen, welche an Bauwerken entstanden sind, gilt es oftmals zu beheben. Verstärkung gegen Explosionseinwirkung ist auch in der chemischen Industrie ein Erfordernis. Während industrielle Explosionen abschätzbar sind und entsprechend modelliert werden können, ist das Abschätzen der resultierenden Einwirkung einer Bombe unmöglich. Traditionelle Industriegebäude sind oftmals unterarmiert. Leicht armierte Tragwerke aus Mauerwerk sind in der Praxis ebenfalls anzutreffen. Solche Tragwerke haben eine minimale Widerstandsfähigkeit gegen Explosionseinwirkungen. Herkömmliche Verstärkungsmethoden aus Stahl sind teuer und aufwendig. FRP bietet sich als zeitsparende und kostengünstige Lösung an.