

A large, stylized white globe graphic is positioned on the left side of the page. It features a grid of latitude and longitude lines, with the lines being thick and slightly 3D, giving it a sense of depth. The globe is partially cut off by the right edge of the page.

Grundlagen
für **S&P FRP-Systeme**



Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. FRP Verstärkungssysteme	
2.1 S&P CFK-Lamellen	4
2.2 S&P Sheets (Gelege und Gewebe)	4
2.2.1 Gelege (uni-direktionale Anordnung)	4
2.2.2 Gewebe (bi-direktionale Anordnung)	4
2.2.3 Epoxidharz Matrix	4
3. Ausgangsfasern für S&P FRP Systeme	5
4. Technische Grundlagen	6
4.1 Grundsätze und Konstruktive Regeln für die Bemessung	7
5. FRP Systeme mit S&P CFK-Lamellen	8
5.1 Oberflächlich geklebte S&P CFK-Lamellen	8
5.2 Endverankerungen von oberflächlich geklebten S&P CFK-Lamellen	10
5.3 Eingeschlitzte S&P CFK-Lamellen	12
5.4 Vorgespannte S&P CFK-Lamellen	15
5.4.1 Plattenversuche	15
5.4.2 Balkenversuche	17
5.5 Mauerwerksverstärkungen mit S&P CFK-Lamellen	18
6. FRP Systeme mit S&P Sheets (Gelege/Gewebe)	21
6.1 Dampfoffenes S&P Epoxidharz-System	21
6.2 Verstärkung von Unterzügen	22
6.3 Verstärkung von Biegezug- und Zugelementen	23
6.4 Verstärkung von Druckgliedern	24
6.5 Seismische Nachverstärkungen	26
6.6 Explosions- und Aufprallschutz	29
6.6.1 Explosionsschutz	29
6.6.2 Aufprallschutz	29
7. Brandschutzmassnahmen	31
8. Qualitätssicherung	32
8.1 Traggrund	32
8.1.1 Bestimmung Druckfestigkeit Traggrund	32
8.1.2 Bestimmung Haftzugfestigkeit Traggrund	32
8.1.3 Vorbereiten des Traggrundes	32
8.1.4 Ebenheit Traggrund	33
8.1.5 Feuchtigkeit Traggrund	33
8.1.6 Taupunkttemperatur	33
8.2 S&P FRP Materialien	33
8.3 Kontrolle bei der Ausführung	33
8.3.1 Verbund	33
8.3.2 Hohlräume	34
8.4 Arbeitssicherheit	34
8.5 Literaturhinweise	34

1. Einleitung

Bauwerke (Stahl, Beton, Holz) werden für eine vorgegebene Belastung dimensioniert und entsprechend hergestellt. Verschiedene Umstände können im Zuge der fortschreitenden Lebensdauer des Bauwerkes dazu führen, dass die ursprünglichen Annahmen für die Baustatik nicht mehr gelten:

- Nutzungsänderung des Bauwerks
- Alterung der Baustoffe
- Korrosion der Bewehrungseinlage
- Erdbeben / Brandfall / Explosionen
- geänderte Normen bezüglich Tragsicherheit bzw. Belastungsannahmen usw.

Ebenso besteht die Möglichkeit Berechnungs- oder Ausführungsfehler zu korrigieren.

Für die Ausarbeitung eines umfassenden Instandsetzungskonzeptes muss eine Bestandsaufnahme durchgeführt werden. Zur statischen Nachverstärkung von Bauwerken stehen grundsätzlich die folgenden Möglichkeiten zur Verfügung:

- Anpassung der Tragstruktur (neue Stützen, Unterzüge usw.)
- Applikation von zusätzlicher Bewehrung (schlaff oder vorgespannt)

Bei einer Verstärkung der bestehenden Tragstruktur bieten sich Faserverbundwerkstoffe FRP (Fibre Reinforced Polymer) an.



Bild 1: S&P CFK-Lamelle



Bild 2: S&P A-Sheet 120



Bild 3: S&P C-Sheet



Bild 4: S&P G-Sheet

2. FRP Verstärkungssysteme

Bewehrungsstahl und Faserverbundwerkstoffe haben unterschiedliche Werkstoffmerkmale. Während sich Betonstahl elastisch-plastisch verhält, sind sämtliche FRP Werkstoffe linearelastisch. Dieser Eigenschaft ist bei der Planung und Bemessung Rechnung zu tragen.

Bei einem Faserverbundwerkstoff FRP werden Ausgangsfasern in eine Polymer-Matrix eingelegt. Die Ausgangsfasern können uni-direktional oder bi-direktional im Faserverbundwerkstoff angeordnet sein. FRP Verbundwerkstoffe werden als Verstärkungselemente für bestehende Bauteile eingesetzt.

2.1 S&P CFK-Lamellen

FRP Fasern werden bereits im Herstellwerk in einer Matrix getränkt, thermisch ausgehärtet und als vorgefertigtes Composite (Lamelle) auf der Baustelle angeliefert. Die bekannten Lamellen, welche in der Bauwerksverstärkung eingesetzt werden, sind die *S&P CFK-Lamellen 150/2000* oder *200/2000*. Diese beiden Lamellentypen unterscheiden sich bezüglich E-Modul und Bruchdehnung. Je nach Einsatz bietet S&P diverse Standardbreiten und -dicken an.

2.2 S&P Sheets (Gelege und Gewebe)

2.2.1 Gelege (uni-direktionale Anordnung)

Bei einem Gelege sind die Fasern in Längsrichtung (uni-direktional) gestreckt angeordnet. Dadurch nehmen die Fasern sofort Kraft auf. Sie eignen sich zur Erhöhung der Tragfähigkeit bezüglich Biegezug und Querkraft von Bauteilen.

Bei der maschinellen Herstellung werden die Verstärkungsfasern auf ein Traggitter geklebt und als Rollenware in verschiedenen Breiten und Flächengewichten angeboten.

2.2.2 Gewebe (bi-direktionale Anordnung)

Bei einem Gewebe sind die Fasern in beide Richtungen (bi-direktional) durch den Webevorgang leicht gewellt angeordnet. Dadurch nehmen die Verstärkungsfasern erst nach einer gewissen Dehnung, wenn sie gestreckt sind, Kräfte auf. Entsprechend eignen sich Gewebe idealerweise zur Erhöhung der Duktilität eines Bauteiles.

2.2.3 Epoxidharz Matrix

Als Matrix zur Kraftübertragung von Gelegen und Geweben kommen kalt aushärtende Epoxidharze zum Einsatz.

Die Applikation der Gelege/Gewebe erfolgt in Abhängigkeit des Flächengewichts entweder im Trockenverfahren (dry lay up) oder im Nassverfahren (wet lay up).

Für das Nassverfahren hat S&P eine Imprägniermaschine (S&P Wet-lay-up Maschine) entwickelt um eine einwandfreie Vorimprägnierung von dickeren Sheets zu gewährleisten.

3. Ausgangsfasern für S&P FRP Systeme

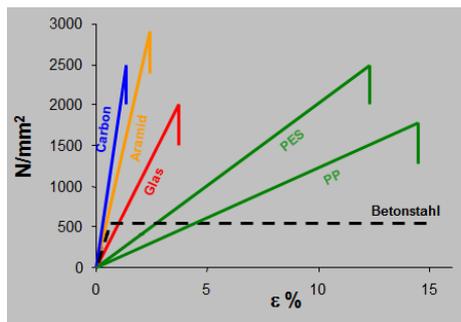


Bild 5: Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Fasertyp	E-Modul kN/mm ²	Zugfestigkeit N/mm ²
C (Carbon)	240 – 640	2'650 – 4'500
A (Aramid)	120	2'900
G (Glas)	65 – 73	2'800 – 3'300
PES / PP	< 15	> 1'800
Betonstahl	205	550

S&P stellt objektspezifisch Lamellen (Laminates) oder Sheets (Gelege/Gewebe) aus einem Fasertyp her. Die wesentlichen Eigenschaften der Fasern werden nachfolgend aufgelistet:

Kohlenstofffasern auch **Carbonfasern (C)** sind industriell hergestellte Fasern aus kohlenstoffhaltigen Materialien, die in graphitartig angeordneten Kohlenstoff umgewandelt werden. Einzelfasern (Filamente) werden zu einem Filamentgarn zusammengefasst und aufgespult. Dieses Ausgangsprodukt wird zu Gelege/Geweben weiterverarbeitet. In Kombination mit Epoxidharzen entstehen kohlefaserverstärkte Kunststoffe kurz CFK. Kohlefasern zeigen hohe Festigkeiten und Steifigkeiten (E-Modul) in axialer Richtung. Kohlefasern sind korrosionsbeständig und weisen eine geringe Dichte auf. Kohlenstofffasern weisen einen negativen Wärmeausdehnungskoeffizienten in Faserrichtung auf und werden bei Erwärmung kürzer.

Aramidfasern (A) sind goldgelbe organische Kunstfasern. Die Fasern zeichnen sich durch sehr hohe Festigkeit, hohe Schlagzähigkeit, hohe Bruchdehnung, gute Schwingungsdämpfung sowie Beständigkeit gegenüber Säuren und Laugen aus. Sie sind darüber hinaus sehr hitze- und feuerbeständig. Die Fasern haben, ähnlich wie Kohlenstofffasern, einen negativen Wärmeausdehnungskoeffizienten in Faserrichtung. Ihre spezifische Festigkeit und ihr Elastizitätsmodul sind deutlich niedriger als jene von Kohlenstofffasern. Die verarbeiteten Fasern gelten praktisch als unzerstörbar und werden in diversen Bereichen wie Raumfahrt, Schutzbekleidung, Explosionsschutz usw. eingesetzt.

Glasfaser (G) sind aus Glas bestehende lange dünne Fasern. Aus einer Glasschmelze werden dünne Fäden gezogen und zu Rovings für die Herstellung von Geweben weiterverarbeitet. Glasfasern sind alterungs- und witterungsbeständig, chemisch resistent und unbrennbar. Die Glasfaser hat isotrope mechanische Eigenschaften. Glasfasern verhalten sich bis zum Bruch linear elastisch. Die hohe Festigkeit der Glasfaser beruht auf der großen fehlerfreien Länge in der Faserform. Die Bruchdehnung einer einzelnen Faser beträgt bis zu 4.5 Prozent. Anders als Aramid- oder Kohlenstofffasern hat die Glasfaser eine amorphe Struktur.

AR-Glas (AR = Alkaline Resistant): Für die Anwendung in Beton entwickelte Glasfaser. Sie ist gegenüber einer basischen Umgebung weitgehend resistent.

E-Glas (E = Electric): gilt als Standardfaser für glasfaserverstärkte Kunststoffe.

4. Technische Grundlagen

Für die Verstärkung von Ingenieurbauwerken aus Stahl- oder Spannbeton mit S&P CFK-Lamellen oder S&P Sheets stehen dem Ingenieur die S&P Bemessungssoftwares „FRP Lamella“ oder „FRP Colonna“ zur Verfügung. Die Programme lassen sich sowohl für den Entwurf von Verstärkungsmassnahmen als auch für die Erstellung von prüffähigen Nachweisen im Rahmen einer statischen Bemessung verwenden. Je nach Anwendungsort werden die jeweiligen Landesnormen berücksichtigt. In der Schweiz erfolgt die Bemessung nach dem Eurocode 2 und der SIA 166.

Im Dokument Bemessungsgrundlagen sind neben den wichtigsten Materialkennwerten, Berechnungsformeln auch entsprechende Berechnungsbeispiele vorhanden. Im Handbuch zum Bemessungsprogramm werden das Handling und die Eingabeoptionen ausführlich beschrieben.

Die Bemessungsmodelle und die Softwares „FRP Lamella / FRP Colonna“ berücksichtigen die materialspezifischen Kennwerte der Verstärkungsfasern sowie der Klebstoffsysteme von S&P. Beim Auswechseln einer Systemkomponente sind die der Software zugrundeliegenden Berechnungsmodelle nicht mehr gültig. Unter diesen Umständen wird jede Haftung des Systemlieferanten abgelehnt.

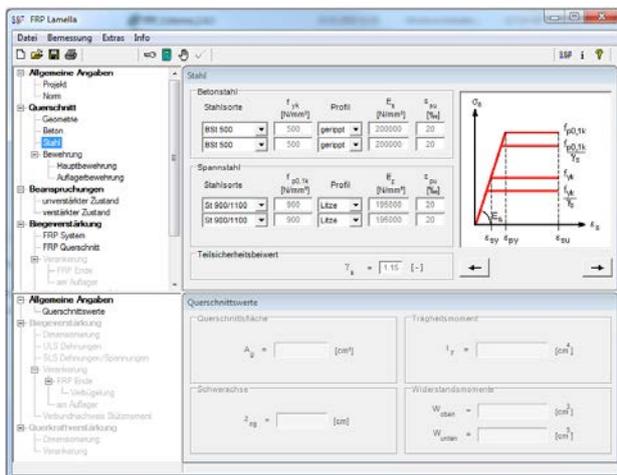


Bild 6: FRP Lamella

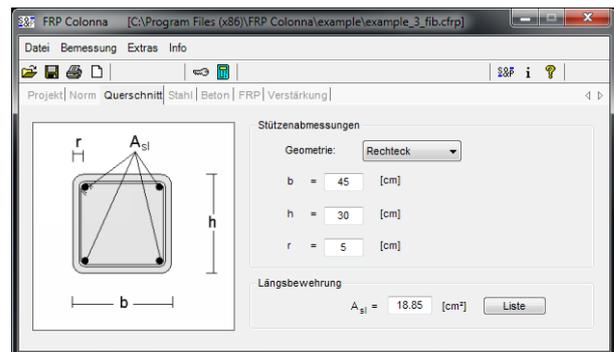


Bild 7: FRP Colonna

Durch den Download der Software verpflichtet sich der zuständige Ingenieur/Planer, die Software ausschliesslich für S&P FRP Systeme zu verwenden, andernfalls sind an die S&P Clever Reinforcement Company AG Lizenzgebühren zu entrichten.

S&P hat für Ingenieurleistungen eine Haftpflichtversicherung abgeschlossen. Für die Richtigkeit der Eingabedaten sowie die Angaben für die Bemessung ist der zuständige Ingenieur/Planer verantwortlich.

Auf Anfrage bietet S&P für Projekte folgende Dienstleistungen an:

- Erarbeitung / Prüfung Verstärkungskonzept
- Statische Bemessung
- Erstellen von Ausschreibungsunterlagen
- Qualitätskontrolle am Bauwerk

4.1 Grundsätze und Konstruktive Regeln für die Bemessung

Für die Bemessung nach SIA 166 sind folgende **Grundsätze** zu beachten:

- Sicherheitskonzept $E_d \leq R_d$
- Ausfall Klebebewehrung $E_d = E (G_k, P_k, A_d, \psi_{2i} Q_{ki}, X_d, a_d)$
- Grenzdehnung Klebebewehrung Biegezug $\varepsilon_{f,lim,d} \leq 8 \text{ ‰}$
- Bemessungswert der Tangentialkomponente der Längsspannung bei $\varepsilon_{f,lim,d} = 2 \text{ ‰}$ (Druckglieder)
- Verbundbruchkraft nicht linear zur Verankerungslänge
- Nachweis der Verankerung im ungerissenen Bereich
- Verankerung der Biegebewehrung am Auflager in Analogie zum Fachwerkmodell
- Nachweis der Zugkraftänderung im Abstand von 200 mm
- Klebebewehrung auf Mauerwerk ist im Beton zu verankern
- Geklebte Schubbewehrung nur wenn im unverstärkten Gebrauchszustand keine Schubrisse vorhanden sind
- FRP-Systeme sind Zugelemente
- Dicke Lamellen 1 bis 5 mm / Breite Lamellen bis 200 mm

S&P Empfehlungen und konstruktive Regeln für die Verstärkung mit S&P FRP-Systemen:

- Maximale Entlastung Bauwerk vor Verstärkung (minimale Vordehnung)
- Grenzdehnung $\varepsilon_{f,lim,d}$ **S&P CFK-Lamelle**:
 - Aufgeklebt 6 - 8 ‰
 - Eingeschlitzt 8 bis 10 ‰
 - Vorgespannt 12 ‰ (Vordehnung $\leq 6 \text{ ‰}$)
- Grenzdehnung $\varepsilon_{f,lim,d}$ **S&P Sheets**:
 - Biegezug 8 ‰
 - Stützen 4 ‰
 - Querkraft 2 bis 4 ‰
- Randabstand Lamellen = Betondeckung der Bügelbewehrung
- Achsabstand Lamellen $s_{f,max} =$
 - 0.2 x Stützenweite
 - 5 x Plattenstärke
 - 0.4 x Auskragung
- Maximal 2 Lamellen übereinander
- Maximal 5 Lagen Sheets übereinander
- Schlittiefe maximal Betondeckung der Bewehrung minus 5 mm
- Schlitzbreite maximal Lamellenstärke plus 5 mm
- Achsabstand Schlitzlamellen $s_{f,min} \geq 32 \text{ mm}$ (Grösstkorn im Beton) oder Schlittiefe plus Schlitzbreite
- Kantenradius für Sheets-Umwicklungen mindestens 25 mm
- Abstand der Sheets für Querkraft = maximal 0.8 x Bauteilhöhe
- Brandschutz bei $\gamma_{Me,RC} \leq 1.0$
- UV-Schutz für Epoxidharzkleber
- Schutz vor mechanischer Beschädigung
- Applikationsanweisungen des Systemlieferanten für Traggrund und Produkte

5. FRP Systeme mit S&P CFK-Lamellen

Uni-direktionale Lamellen werden werksmässig auf der Doppelbandpresse oder im Strangzugverfahren hergestellt. Die uni-direktionalen Faserstränge werden kontinuierlich im Epoxidharz getränkt und unter Wärmeeinwirkung ausgehärtet. Verfahrenstechnisch bedingt ist eine maximale Faserverfüllung des Laminates von ca. 70 % möglich. Aus den Eigenschaften der Fasern und der Matrix lassen sich theoretisch die Elastizitätskonstanten einer uni-direktionalen Schicht bestimmen. Da der E-Modul sowie die Zugfestigkeit der Matrix für die Berechnung des Laminates vernachlässigbar sind, liegen der E-Modul sowie die Zugfestigkeit des Laminates annähernd bei 70 % der theoretischen Faserkennwerte.

Während beim Handlaminieren nur mit dem theoretischen Faserquerschnitt und mit den Kennwerten der Faser gerechnet wird, darf beim Verarbeiten der vorgefertigten S&P CFK-Lamellen mit dem Querschnitt der Lamelle sowie mit den effektiven Kennwerten der Lamellen gerechnet werden.



Bild 8: Einbau einer S&P CFK-Lamelle

S&P CFK-Lamelle

Für die Bemessung können die effektiven Kennwerte der Lamellen verwendet werden.

Die Kennwerte werden durch S&P nach einem ISO 9001 Qualitätskonzept kontrolliert. Die Lamellenkennwerte müssen im Unterschied zu den FRP Gelegen/Geweben nicht durch einen zusätzlichen **Reduktionsfaktor** abgemindert werden ($\gamma = 1.0$).

Für Projekte kann S&P auf Anfrage spezielle S&P CFK-Lamellen mit höherem E-Modul oder grösseren Abmessungen herstellen.

Die theoretischen Kennwerte der *S&P CFK-Lamellen* können aus den technischen Datenblätter (www.sp-reinforcement.eu) entnommen werden.

5.1 Oberflächlich geklebte S&P CFK-Lamellen

Die *S&P CFK-Lamelle* wird mit dem systemgeprüften Klebstoff *S&P Resin 220* schubfest an die Zugzone des zu verstärkenden Bauteils appliziert. Dadurch erhält man ein Stahlbetonbauteil mit einem elastisch-plastischen (Betonstahl) und einen linear-elastischen Zuggurt (*S&P CFK-Lamelle*). Mit Verbundversuchen wurden Rechenmodelle der Verbundtragfähigkeit sowie für die Verankerungslängen formuliert.

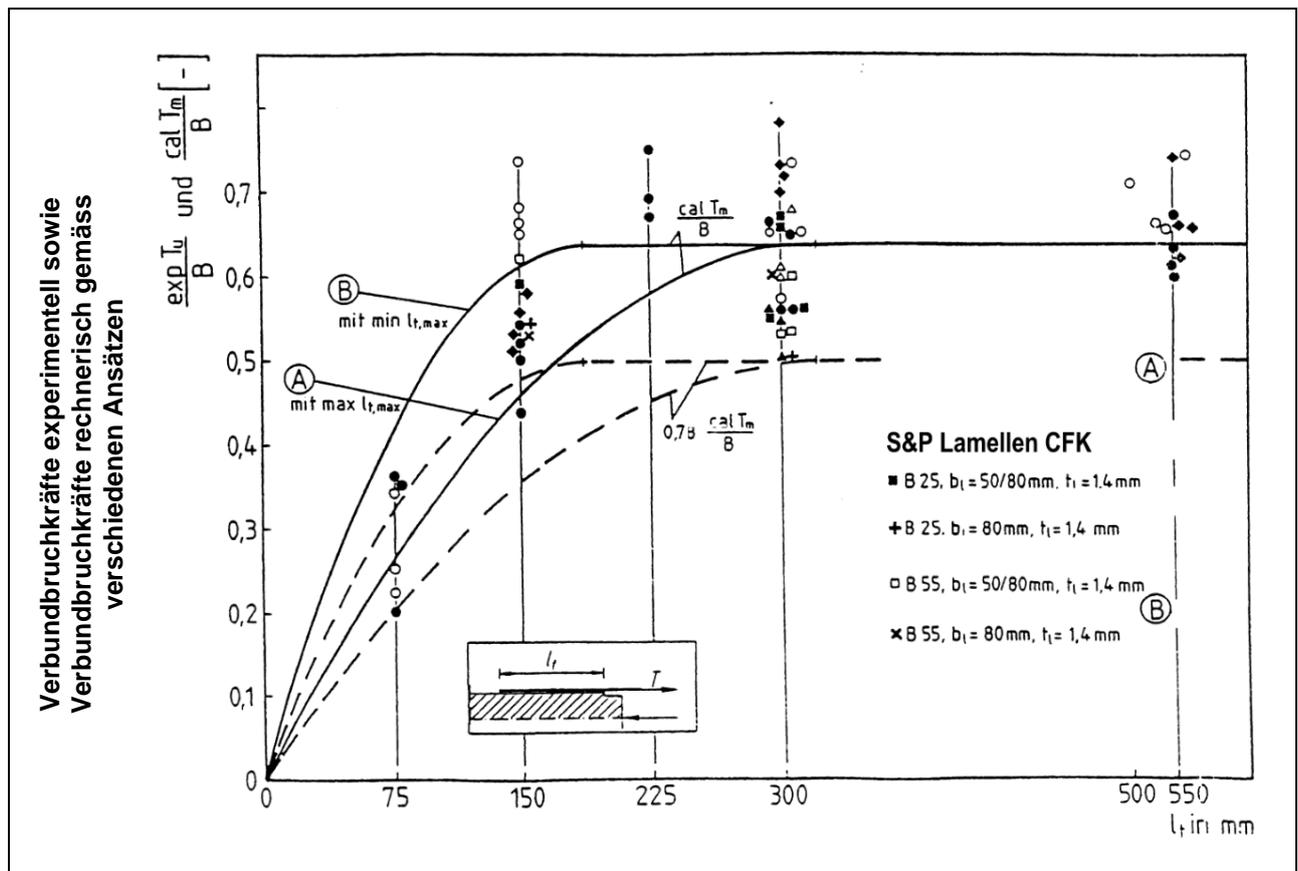


Bild 9: Verbundbruchkräfte an S&P CFK-Lamellen in Abhängigkeit von der Verbundlänge (TU Braunschweig D)

Die maximale Verbundkraft wird bei rund 300 mm Klebelänge der S&P CFK-Lamelle erreicht. Bei grösseren Klebelängen kann die Verbundkraft nicht mehr erhöht werden.

Die maximale **Verbundkraft** einer oberflächlich geklebten **S&P CFK-Lamelle** von 80 mm Breite beträgt **ca. 35 – 40 kN** (auf ungerissenem Betonuntergrund).

Das bestehende Berechnungsmodell des Verbundes geklebter Bewehrung auf Beton beruht im Wesentlichen auf der nicht-linearen Spröbruchmechanik und lässt sich für beliebige elastische Lamellenwerkstoffe formulieren.

Zwischen zwei Biege- oder Schubrisen werden die Verbundkräfte jeweils in den Traggrund eingeleitet. Bei positiven Biegemomenten (Feldmoment) wird der Verankerungsnachweis im ungerissenen Beton geführt. Dabei ist die verbleibende Restzugkraft zu verankern. Bei negativen Biegemomenten (Stützmoment) wird die Lamelle bis zum Momenten-Nullpunkt geführt und dort mit dem Versatzmass und der Verbundlänge verankert. Für oberflächlich geklebte S&P CFK-Lamellen ist der Verankerungsnachweis in jedem Fall zu führen. Die von S&P entwickelte Software „FRP Lamella“ tätigt den entsprechenden Verankerungsnachweis für S&P FRP Systeme.

Im Rahmen von Zulassungsverfahren für die *S&P CFK-Lamelle* in Frankreich, Deutschland, England, Korea usw. wurden auch Lamellen im Verbund mit Biegebalken geprüft.

Biegeversuche an schlanken Platten zeigten, dass ein vorzeitiges Delaminieren von Lamellen CFK ohne Endverankerungen bereits ab einer Dehnung von 6 bis 8 ‰ möglich ist. Die Grenzdehnung für die Bemessung von Lamellen CFK wurde aus diesem Grunde in national und international anerkannten Normen und Richtlinien bei maximal 8 ‰ festgelegt.

Empfohlene Bemessungsdehnung (Grenzdehnung $\varepsilon_{f,lim,d}$) von oberflächlich geklebten *S&P CFK-Lamellen* beträgt maximal 8 ‰, für schlanke Bauteile maximal 6 ‰.



Bilder 10 / 11 / 12: oberflächlich geklebte Lamellen

5.2 Endverankerungen von oberflächlich geklebten *S&P CFK-Lamellen*

Steigt das Biegemoment nahe beim Auflager steil an oder müssen mehrere *S&P CFK-Lamellen* übereinander geklebt werden, ist es oft nicht möglich, den Verankerungsnachweis zu erbringen. Unter diesen Umständen werden zusätzliche Endverankerungen am Lamellenende benötigt.

A) *S&P* Endverankerungssystem

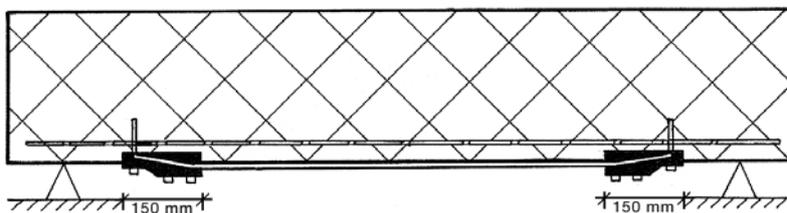


Bild 13: Patentiertes *S&P* Endverankerungssystem

Durch zwei Aluminiumschuhe an den Lamellenenden wird das frühzeitige Delaminieren von *S&P CFK-Lamellen* verhindert. Diese speziellen *S&P* Endverankerungen garantieren einen aktiven Anpressdruck auf die Lamelle. Zudem werden durch den erzwungenen Radius die Lamellenkräfte optimal in den Traggrund eingeleitet.

B) Versuche mit S&P Endverankerung



Bild 14: Beschädigter Beton

An der HES-SO Fribourg (CH) und TU München (D) wurden Verbundversuche mit dem S&P Verankerungssystem für schlaff geklebte S&P CFK-Lamellen durchgeführt. Hierbei wurden drei verschiedene Betonqualitäten und drei verschiedene Lamellendimensionen getestet. Bei den Versuchen wurde ein unbewehrter Betonblock verwendet. Das Versagen bei allen Versuchen erfolgte durch Betonbruch. Die Bruchkraft ist abhängig von der Betonqualität und der Anordnung der Verankerungsplatten.

Die **Verbundkraft** der verankerten S&P CFK-Lamelle von 80 mm Breite beträgt rund **150 kN**.

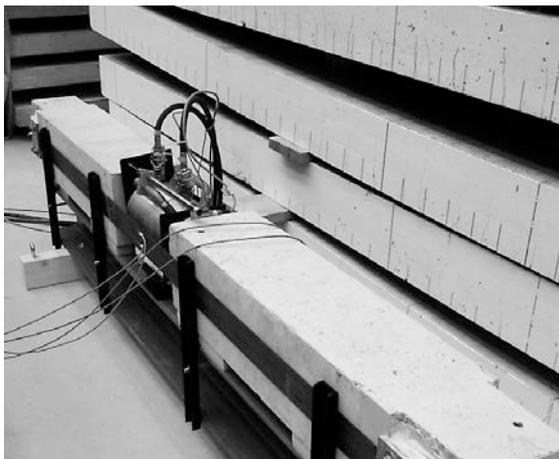


Bild 15: Test an der HES-SO-Fribourg (CH)

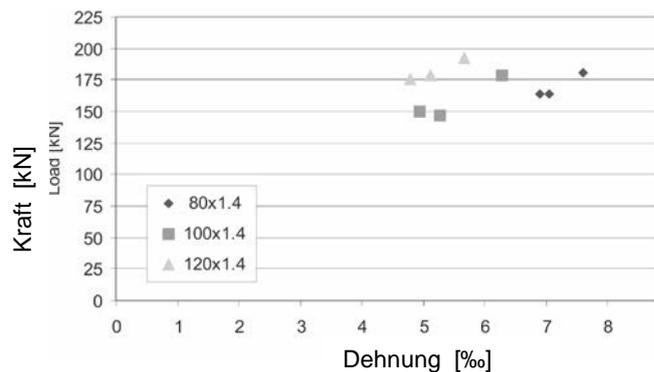
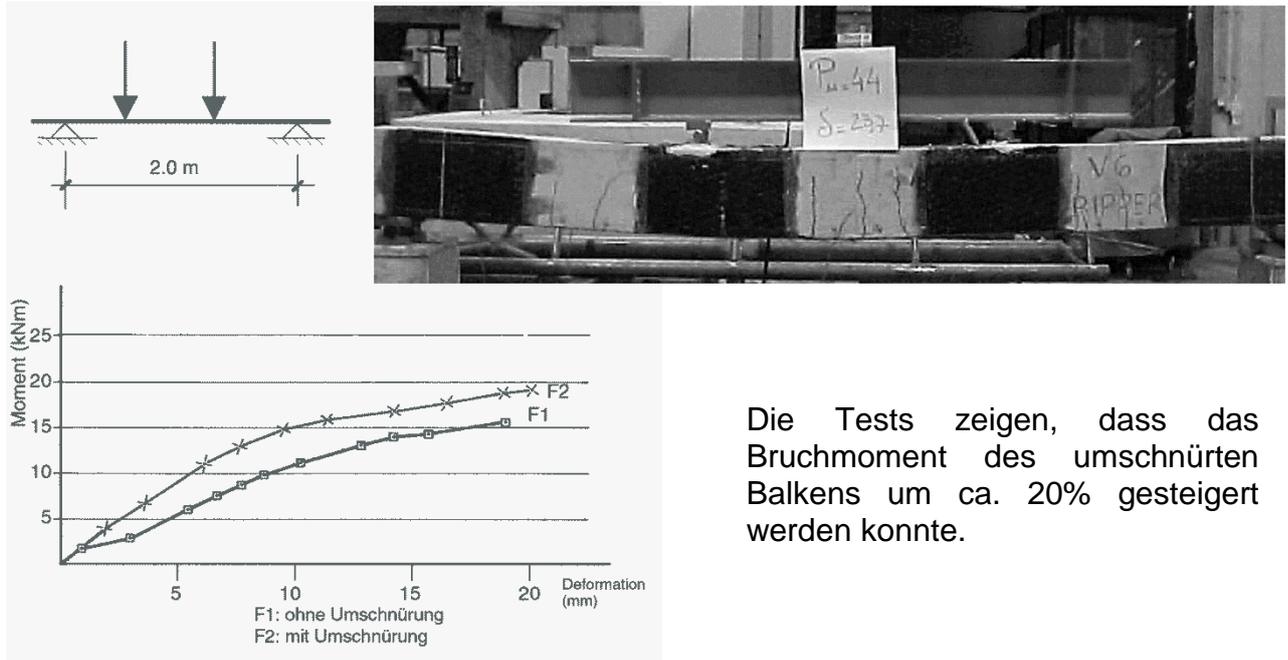


Bild 16: Test Resultate (für Beton Qualität C20/25)

C) Endverankerung mit S&P C-Sheet 640

Die Enden der S&P CFK-Lamelle werden mit dem S&P C-Sheet 640 umwickelt. An der Universität Lissabon (PT) wurde eine entsprechende Versuchsreihe durchgeführt.

Testanordnung



Die Tests zeigen, dass das Bruchmoment des umschnürten Balkens um ca. 20% gesteigert werden konnte.

Bild 17: Versuche an der Universität Lissabon (PT)



Bilder 18 / 19: endverankerte Lamellen an Decke oder Unterzug

5.3 Eingeschlitzte S&P CFK-Lamellen

Die S&P CFK-Lamellen mit Breiten von 10 bis 20 mm und Dicken von 1.4 bis 2.8 mm werden speziell für das Einschlitzen in Beton oder in Holzbauteilen eingesetzt.

Bei der Applikation werden in der Regel mit einer Betonfräse Schlitze von 5 – 8 mm Breite und 15 – 25 mm Tiefe in den Traggrund eingeschnitten. Danach werden die S&P CFK-Lamellen senkrecht in die Schlitze eingelegt und mit Epoxidharzkleber vergossen. Weitere Details siehe S&P Applikationsanleitung.

Die Wirkungsweise von eingeschlitzten Lamellen wurde an der TU München (D), der TU Porto (PT) sowie an der TU Rolla (USA) eingehend untersucht. Das Tragverhalten wurde mit Verbundversuchen getestet. Eingeschlitzte Lamellen zeigen eine hohe und robuste Verbundtragfähigkeit auf. Ein Versagen durch Schubrissversatz, wie bei der aufgeklebten *S&P CFK-Lamelle* trat nicht ein. **Dadurch kann die hohe Zugfestigkeit der Lamelle - bis zum Versagen der C-Faser - ausgenutzt werden.**

Verschiedene Versuchsbalken aus Stahlbeton wurden an der TU München (D) im Dreipunktbiegeversuch mit einer Stützweite von 2.5 m geprüft.

Es wurde jeweils eine *S&P CFK-Lamelle* 50/1.2 mm oberflächlich aufgeklebt oder zwei *S&P CFK-Lamellen* 25/1.2 mm eingeschlitzt (gleicher Querschnitt).

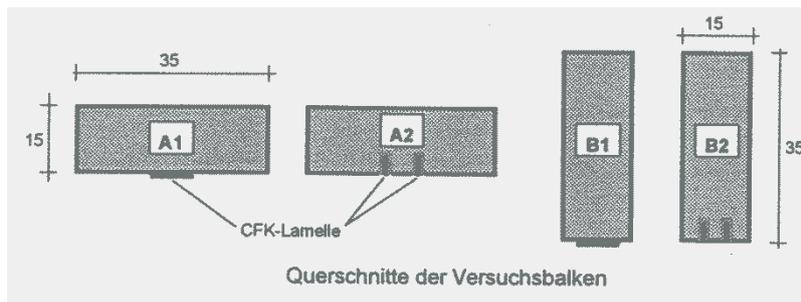


Bild 20: Versuchsaufbau

- Bei Versuchsbalken A1 und B1 erfolgte das Versagen durch Abschälen der *S&P CFK-Lamelle*.
- Bei Versuchsbalken A2 erfolgte das Versagen durch einen Zugbruch der eingeschlitzten Lamelle.
- Bei Versuchsbalken B2 mit geringer Schubbewehrung aus Stahl erfolgte ein Schubversagen im Beton.

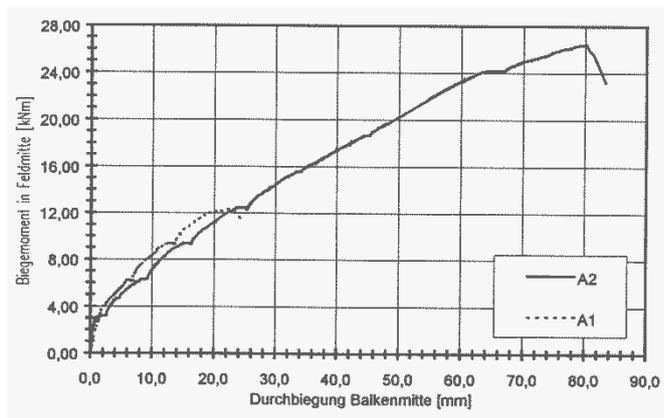


Bild 21: Momenten-Durchbiegungslinie der Versuche A1 und A2

Interpretation Versuchsbalken A

Bei gleicher Steifigkeit konnte die Bruchlast dank der Einschlitzlamelle mehr als verdoppelt werden. Dies ist auf die hohe Ausnutzung der *S&P CFK-Lamelle* zurückzuführen.

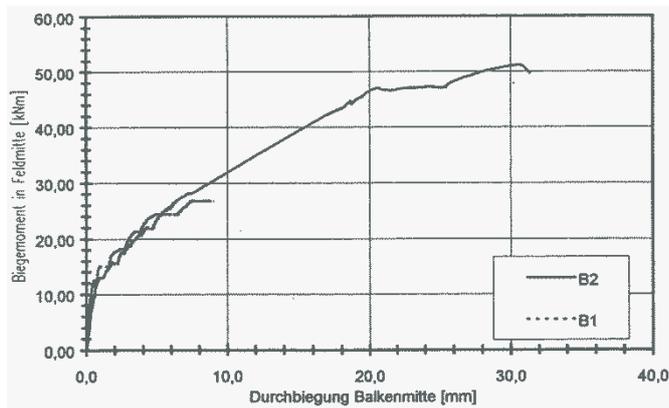


Bild 22: Momenten-Durchbiegungskurve der Versuche B1 und B2

Interpretation Versuchsbalken B

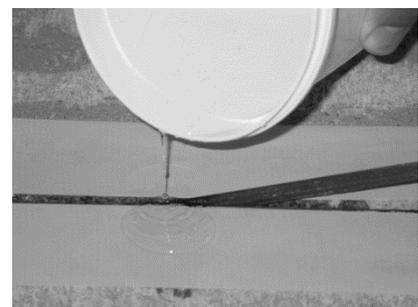
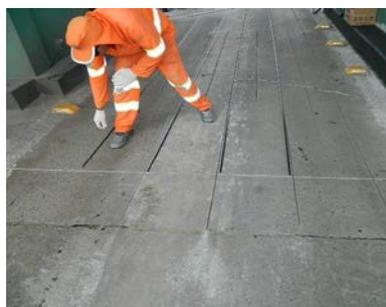
Das Last-Verformungsverhalten ist nahezu identisch. Mit Ausnahme der Tatsache, dass der Balken mit der eingeschlitzten S&P CFK-Lamelle eine wesentlich höhere Bruchlast erreichte.

Vorteile der eingeschlitzten Lamelle

- Da grössere Kräfte verankert werden können, wird die Lamelle besser ausgenutzt; somit wird ein geringerer Lamellenquerschnitt benötigt.
- Die Verankerungslänge bei Negativmomenten wird reduziert.
- Einschlitzeln ist oft preiswerter als das Ausgleichen und Aufrauhen für oberflächlich geklebte Lamellen.
- Die Einschlitzlamelle ist gegen mechanische Beschädigung geschützt.

Das ideale **Einsatzgebiet** für S&P Einschlitzlamellen ist die Verstärkung von Deckenoberflächen (Negativ-/Stützmoment). Auch vertikale Applikationen (Wände/Stützen) sind möglich. Die Bemessung erfolgt mit der S&P Software „FRP Lamella“.

Empfohlene Bemessungsdehnung (Grenzdehnung $\epsilon_{f,lim,d}$) von eingeschlitzten S&P CFK-Lamellen beträgt maximal 8 bis 10 ‰.



Bilder 23 / 24 / 25: eingeschlitzte Lamellen in Beton

5.4 Vorgespannte S&P CFK-Lamellen

Für das Vorspannen von S&P CFK-Lamellen hat S&P ein Vorspannsystem entwickelt. Dieses System wird durch ein weltweites Netz von spezialisierten Verarbeitern in Zusammenarbeit mit den S&P Anwendungstechnikern exklusiv eingesetzt.



Bilder 26 / 27: Patentiertes S&P Vorspannsystem aus Aluminium

Bild 28: Vorspannung mit Gradienten-Verankerung

5.4.1 Plattenversuche

Durch die HES-SO Fribourg (CH) wurden anlässlich einer Versuchsreihe Betonplatten mit schlaffen sowie vorgespannten S&P CFK-Lamellen verstärkt. Die folgenden Grafiken zeigen den Versuchsaufbau und die Resultate in Kurzform.

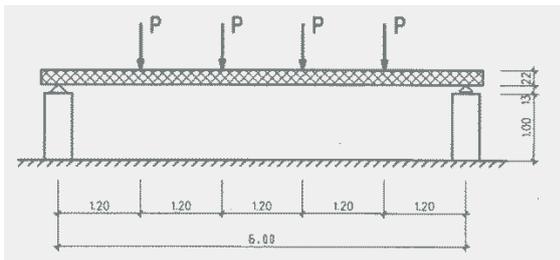


Bild 29: Versuchsaufbau

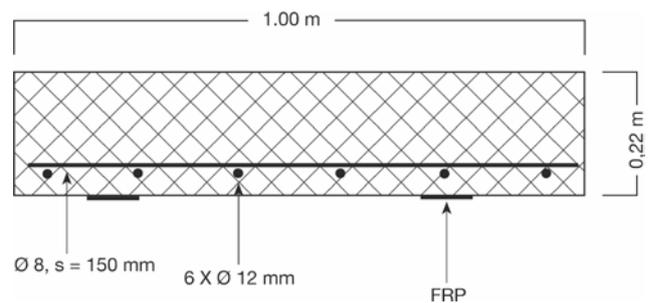


Bild 30: Querschnitt der Betonplatte

	Stahl		FRP	Vorspannung ‰	Vorspannung (N/mm ²)	Vorspannkraft (kN)
	längs	quer				
LC1 Referenz	6 Ø 12	(Ø8 s =150)	keine	-	-	-
LC5 FRP	6 Ø 12	(Ø8 s =150)	2 S&P CFK-Lamellen 150/2000, Typ 80/1.2 mm	-	-	-
LP2 FRP 4 ‰	6 Ø 12	(Ø8 s =150)		4	640	122
LP4 FRP 6 ‰	6 Ø 12	(Ø8 s =150)		6	960	184

Tabelle 1: Bewehrung der Probekörper

Versuchsergebnisse

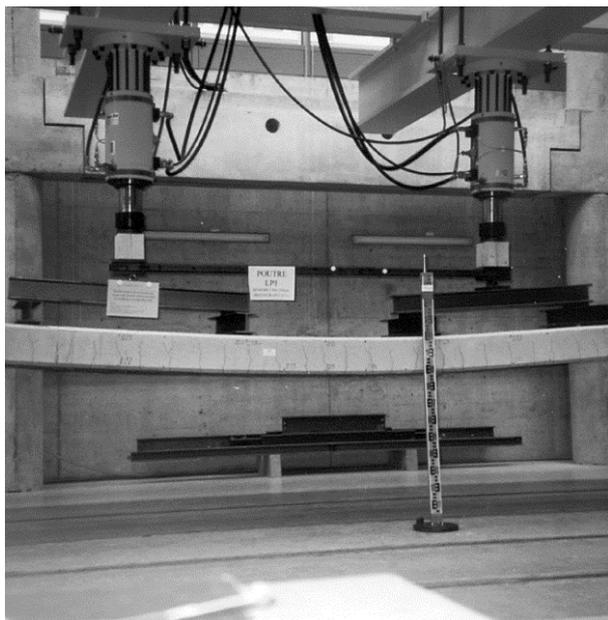


Bild 31: Prüfanlage HES-SO Fribourg (CH)

Die mit vorgespannten *S&P CFK-Lamellen* verstärkten Versuchsbalken zeigen im Gebrauchszustand eine stark reduzierte Durchbiegung und geringere Rissbreiten. Infolge der überlagerten Normalkraft verbleiben die Betonquerschnitte bis weit über die maximalen Gebrauchslasten im ungerissenen Zustand.

Der Bruch tritt bei stark erhöhten Lasten und höheren Durchbiegungen auf.

Die Erhöhung des Bruchwiderstandes beträgt für die mit schlaffen *S&P CFK-Lamellen* verstärkten Versuchsplatte 32 %. Für die vorgespannten Platten beträgt die Erhöhung 82 % (Vordehnung 4 ‰) resp. 113 % (Vordehnung 6 ‰).

Die gemessenen Zusatzdehnungen der vorgespannten *S&P CFK-Lamellen* wurden im Vergleich zu den schlaff geklebten *S&P CFK-Lamellen* nochmals gesteigert.

S&P CFK-Lamelle	Betonplatte	Bruchlast P (kN)	Bruchmoment (kNm)	Bruchdehnung (‰)	Bruchmoment (%)
keine	LC1 Referenz	16.4	82.6	-	100
2 x 80/1.2 mm	LC5 FRP	24.0	109.4	6.0	132
2 x 80/1.2 mm	LP2 FRP 4 ‰	35.3	150.1	13.7	182
2 x 80/1.2 mm	LP4 FRP 6 ‰	42.6	176.4	14.9	213

Tabelle 2: Resultate Versuchsplatten

Fazit

Die Vorspannung der *S&P CFK-Lamelle* übt einen sehr positiven Einfluss auf das Verhalten von verstärkten Stahlbetonbauwerken aus. Im Gebrauchszustand werden Verformungen und Rissbildung reduziert. Das aufnehmbare Bruchmoment wird wesentlich erhöht. Mit den handlichen *S&P* Vorspannpresen ist es möglich, die *S&P CFK-Lamellen* stufenweise bis auf eine Dehnung von 6 ‰ vorzuspannen. Das System eignet sich speziell für das Verstärken von Bauwerken mit grossen Spannweiten oder sehr hohen Lasten.

5.4.2 Balkenversuche

An der Universität in Gliwice (PL) wurden anlässlich einer Forschungsarbeit Biegebalken mit schlaffen sowie vorgespannten *S&P CFK-Lamellen* verstärkt. Anhand der Versuchsreihe sollte das Verhalten der Träger unter Last analysiert werden. Zusätzlich sollte der Einfluss des Vorspanngrades auf die Wirksamkeit der Nachverstärkung erarbeitet werden.

Die Bruchversuche der Serie *S&P CFK-Lamellen 150/2000 Typ 90/1.4 mm* werden nachfolgend in Kurzform aufgezeigt.

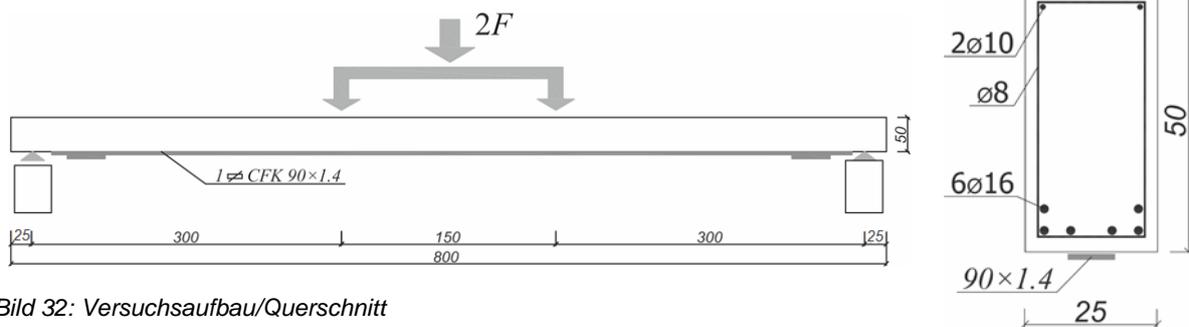


Bild 32: Versuchsaufbau/Querschnitt

Balken	Stahl	S&P CFK-Lamelle	Vorspannung ‰	Vorspannung (N/mm ²)	Vorspannkraft (kN)
B1 Referenz		keine	-	-	-
B4 C FRP	6 Ø 16mm ($f_y=340\text{N/mm}^2$)	S&P CFK-Lamelle 150/2000 Typ 90/1.4 mm	-	-	-
B1 C-FRP 3 ‰			3	495	62
B6 C-FRP 6 ‰			6	990	125

Tabelle 3: Ausgangsgrößen

Versuchsergebnisse

Die verstärkten Träger weisen eine enorme Erhöhung an Biegetragfähigkeit im Bruchzustand auf. Die Balken mit vorgespannten Lamellen haben unter gleicher Last eine geringere Durchbiegung gegenüber den Balken mit schlaffen Lamellen. Bei allen verstärkten Trägern konnte man eine starke Verringerung der Rissbreite feststellen. Das Versagen eines Balkens mit vorgespannten CFK-Lamellen ist frühzeitig erkennbar (hohe Verformung). Die Erhöhung des Bruchwiderstandes beträgt für die mit schlaffen *S&P CFK-Lamellen* verstärkten Versuchsbalken 32 % gegenüber dem Referenzbalken. Bei den vorgespannten *S&P CFK-Lamellen* beträgt die Erhöhung der Traglast um 42 % bei einer Vordehnung von 3 ‰ und 58 % bei einer Vordehnung von 6 ‰.

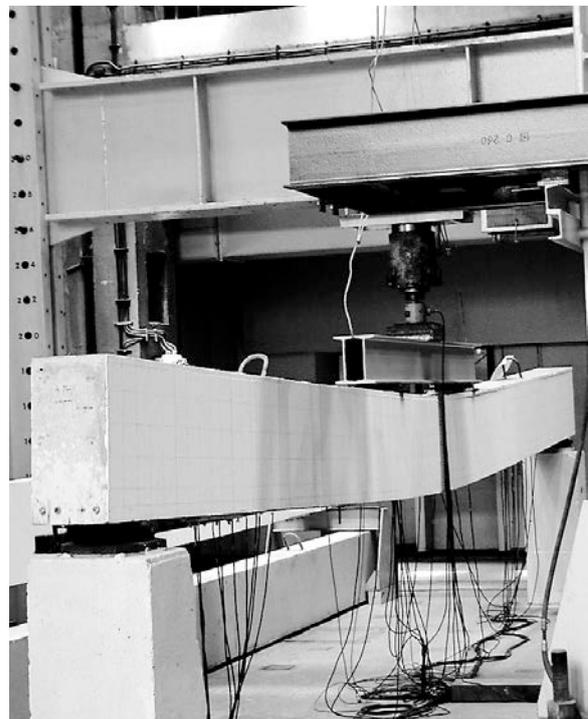
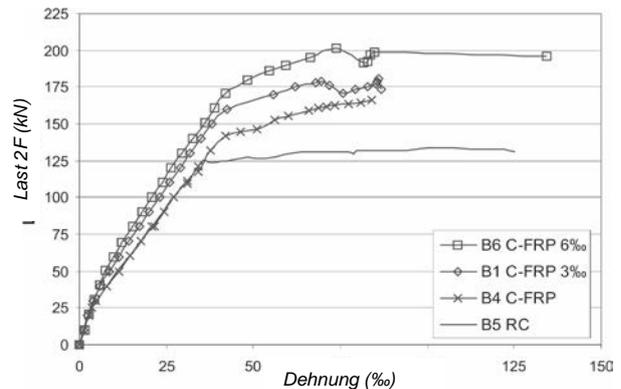
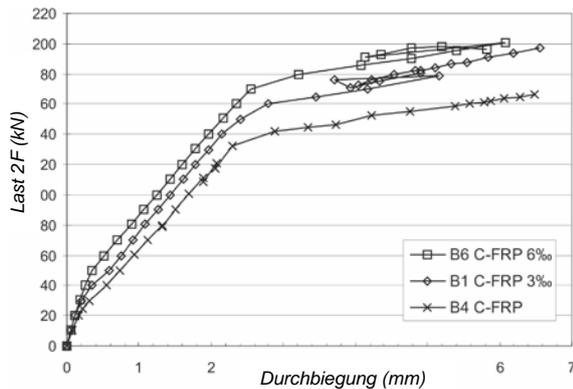


Bild 33: Versuche an der Universität Gliwice (PL)

S&P CFK-Lamelle	Betonbalken	Bruchlast 2F (kN)	Bruchmoment (kNm)	Bruchmoment (%)
keine	B5 Referenz	122	204	100
90/1.4 mm	B4 C-FRP	166	270	132
90/1.4 mm	B1 C-FRP 3 ‰	179	289	142
90/1.4 mm	B6 C-FRP 6 ‰	202	323	158

Tabelle 4: Resultate Bruchkraft/Bruchmoment



Bilder 34 / 35: Versuchsergebnisse: Dehnungen in den Lamellen und Durchbiegungen

Schlussfolgerung

Wie für Platten, welche mit *S&P CFK-Lamellen* extern vorgespannt wurden, wurden auch für Balken positive Resultate gefunden. Die Durchbiegung und Rissbreite wurde reduziert. Die Bruchlast konnte markant gesteigert werden. Beim Vorspannen kommen niedermodulige Lamellen zum Einsatz.

Empfohlene Bemessungsdehnung (Grenzdehnung $\varepsilon_{f,lim,d}$) von vorgespannten CFK Lamellen beträgt maximal 12 ‰ (Vordehnung durch Vorspannen 4 bis 6 ‰).

Mit vorgespannten Lamellen werden viele Anwendungen im Bauwesen möglich:

- Nachverstärkung von überbelasteten Bauteilen
- Externe Vorspannung von Bauwerken mit korrodierten, internen Spannkabeln
- Sanierung von Koppelfugen
- Begrenzung von Durchbiegungen
- Reduktion der Rissbreiten

5.5 Mauerwerksverstärkungen mit S&P CFK-Lamellen

Mauerwerk ist kostengünstig und entsprechend eine weltweit verbreitete Bauweise. Dank guten bauphysikalischen Eigenschaften wird Mauerwerk auch in Zukunft eingesetzt. Die Festigkeit von Mauerwerk ist wegen unterschiedlichen Stein- und Mörtelqualitäten grossen Schwankungen unterworfen. Die Verstärkung von Mauerwerk

vorab für seismische Beanspruchung spielt bei der Bauwerksertüchtigung zunehmend eine wichtige Rolle.

Für die Verstärkung von Mauerwerk können sowohl Lamellen oder Sheets (siehe Kapitel 6) eingesetzt werden. Bei einer Verstärkung mit Lamellen ist der Krafteinleitung gebührend Rechnung zu tragen.

Im Verstärkungskonzept werden *S&P CFK-Lamellen* diagonal und vertikal über ein bestehendes Mauerwerk angeordnet und in den angrenzenden Betonbauteilen verankert. Versuche an der EMPA Dübendorf (CH) zeigen, dass die Zugkraft einer *S&P CFK-Lamelle* von 50 mm Breite und 1.2 mm Dicke beim Einschlitzen in eine Tiefe von 25 - 30 cm in einem angrenzenden Betonbauteil verankert werden kann. Mauerwerk, das mit dieser Methode verstärkt wurde, verhält sich bis etwa $\frac{2}{3}$ der maximalen Schubkraft $V_{A,max}$ elastisch. Siehe dazu Bild 36. Infolge des Ablösens der *S&P CFK-Lamellen* unter Krafteinwirkung vom Mauerwerk, kann in den oberen Verformungsstufen die Deformation stark gesteigert werden, ohne dass der Tragwiderstand wesentlich zunimmt. Die Mauerwerkswände verfügen über grosse Verformungsreserven, wodurch eine hohe Duktilität erreicht wird. Die Erdbebenresistenz (Wand BW6) kann gegenüber einer nicht verstärkten Tragwand (Referenz BW5) um rund das Vierfache gesteigert werden. Wie Bild 36 zeigt, kann die Duktilität der Wand mehr als verdreifacht und zugleich der Tragwiderstand um den Faktor 1.4 gesteigert werden. Die CFK Lamellen wurde im Versuch einseitig angeordnet.

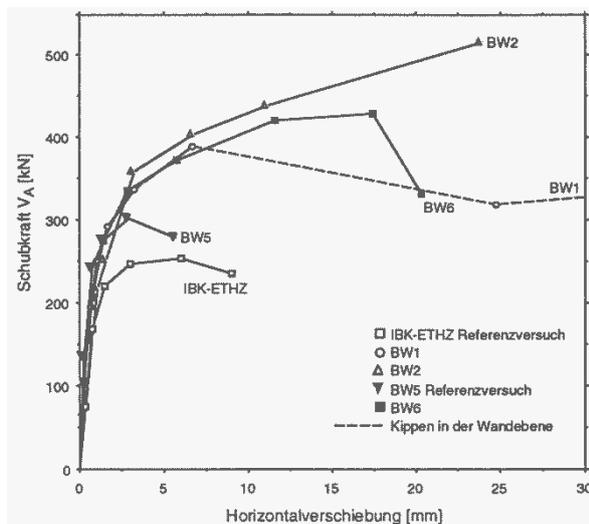


Bild 36: Vergleich FRP verstärktes Mauerwerk mit Referenzversuch

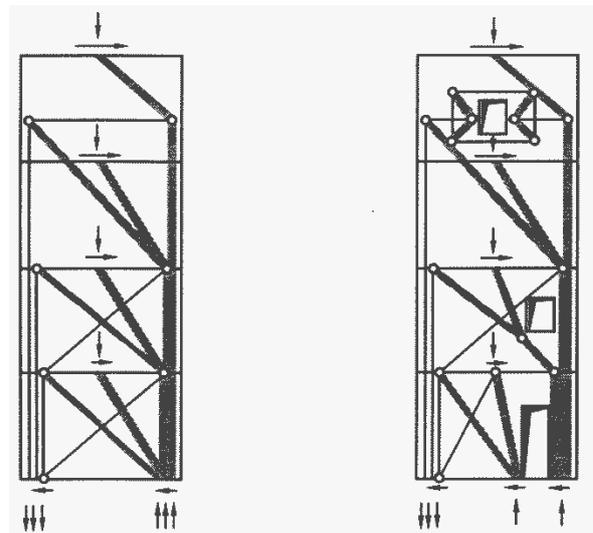


Bild 37: Tragwand ohne und mit Öffnungen

Die horizontale Erdbebenersatzkraft Q_{acc} sowie Eigengewicht und Nutzlast greifen in den Geschosdecken an und müssen über die Tragwände in den Untergrund abgeleitet werden. In den Tragwänden der untersten Geschosse entstehen dabei grosse Schubkräfte, kombiniert mit grossen Normalkräften. Der Tragwiderstand wird durch das ungünstige Verhältnis von Normalkraft zu Schubkraft oftmals überschritten. Somit ist in den unteren Geschossen eine Verstärkung anzuordnen, welche die hohen Kräfte über vertikale und diagonale Zugbänder ableiten.

Die Anordnung der Verstärkung ist wesentlich von der Schnittkraftkombination M_z , N_x und V_y abhängig. Für die kritischen Tragwände resultieren unterschiedliche Anforde-

rungen an die Verstärkung. In Bild 37 ist aufgezeigt, wie die Resultierenden um Aussparungen herumgeführt werden. Speziell zu untersuchen sind die Verankerungen der Lamellen und die Bereiche der maximal beanspruchten Druckzonen der Tragwände. Das aufgeführte Beispiel zeigt, dass die Methode der Spannungsfelder sehr universal eingesetzt werden kann.



Bilder 38 / 39 / 40: Verstärkung Mauerwerk (Erdbeben) mit S&P CFK-Lamellen mit Verankerung in Betondecke

6. FRP Systeme mit S&P Sheets (Gelege/Gewebe)

Die *S&P Sheets* (Gelege/Gewebe) können im Trocken- oder Nassverfahren appliziert werden. Die Aufgabe der Matrix besteht darin, die Kräfte aus einer Faser in die nächste Faser sowie in den Untergrund einzuleiten. Für die Bemessung der Tragwerksverstärkung werden der theoretische Faserquerschnitt und die theoretischen Faserkennwerte herangezogen.

Die theoretische Sheet-Dicke für die Bemessung eines Geleges resp. Gewebes wird wie folgt bestimmt:

Sheetquerschnitt



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

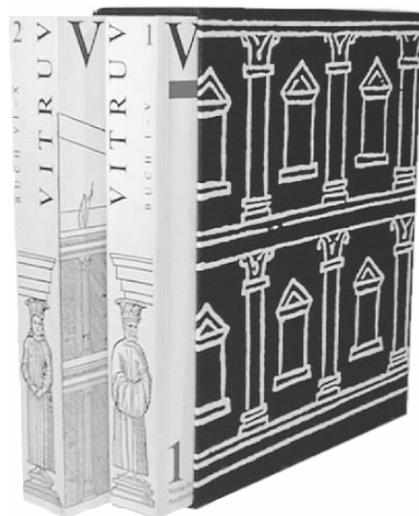
Beim Handlaminieren ist die Faseranordnung applikationsbedingt nicht immer optimal. Auch besteht die Gefahr, dass die Fasern beim Anrollen beschädigt werden. Aus diesem Grund ist es zu empfehlen, den theoretischen Elastizitätsmodul der Faser für die Bemessung um einen Reduktionsfaktor (γ) abzumindern.

Der empfohlene **Reduktionsfaktor (γ)** beträgt:

für S&P Carbon-Gelege	$\gamma = 1.2$
für S&P Aramid-Gewebe	$\gamma = 1.3$
für S&P Glas-Gewebe	$\gamma = 1.4$

Die theoretischen Kennwerte der S&P Sheets können aus den technischen Datenblättern (www.sp-reinforcement.eu) entnommen werden.

6.1 Dampfoffenes S&P Epoxidharz-System



ACI FRP Richtlinie 440
(Kapitel 8.3.3 Dauerhaftigkeit) Die gültige US Richtlinie 440 für externe FRP Verstärkungen schreibt vor: Bei Bauteilen mit vollflächiger FRP Umschnürung müssen bauphysikalische Abklärungen in Bezug auf Dampfdruck und Wasserdampfdiffusion vorgenommen werden.

Bild 41: Ein Bauwerk muss von innen nach aussen wasserdampfdurchlässig sein. (VITRUV Baumeister ca. 50 Jahre v. Chr.)

Bei der vollflächigen Umwicklung von mineralischen Baustoffen (z.B. Beton) sind bauphysikalische Betrachtungen zwingend zu berücksichtigen. 30 – 50 % der Bauteiloberfläche soll wasserdampfdurchlässig ausgebildet werden. Ein vollflächiges Umwickeln mit einer Epoxidharz Matrix ist entsprechend nicht zulässig.

S&P Resicem ist eine spezielle zementvergütete Epoxidharz Matrix. Das Zusammenwirken der beiden grundsätzlich verschiedenen Bindemittel geschieht durch ein Hineinwachsen der Zementkristalle bei Wasserdampfdruck in das vorher entstandene Gerüst aus Epoxidharz. Das Matrixsystem welches bei der Applikation noch dampfdicht ist, wird mit fortschreitender Wasserdampfbelastung dampfdurchlässig. Der Zement in der Matrix bietet für die korrosionsanfällige Innenbewehrung ein zusätzliches Alkalidepot. Der Wasserdampfdiffusionsbeiwert einer FRP Umwicklung mit *S&P Resicem* für eine FRP Schichtdicke von ca. 1 mm wird sich bei ca. 3'000 – 5'000 einpendeln. Eine Applikation auf einen Traggrund mit bis 12 % Eigenfeuchte ist möglich.

Grenzwert der Wasserdampfdurchlässigkeit einer Beschichtung

$$S_d = \mu_{H_2O} \times \text{Schichtstärke (m)} < 4 \text{ m}$$

S_d : Widerstand der Schicht gegen Wasserdampfdiffusion

μ_{H_2O} : Wasserdampfdiffusionsbeiwert der Beschichtung

S&P Resicem $\mu_{H_2O} = 3'000 - 5'000$

(FRP Schichtdicke von ca. 1 mm)

S&P Resin 50/55 (Epoxidharz) $\mu_{H_2O} = 1'000'000$

(FRP Schichtdicke von ca. 1 mm)

somit

S_d : einer 2-lagigen FRP Beschichtung mittels *S&P Resicem*.

0.8 mm Gesamtdicke (Matrix + Verstärkungsfaser)

$$S_d = 4'000 \times 0.0008 = \underline{3.2 \text{ m} < 4 \text{ m}} \checkmark$$

Die Wasserdampfdurchlässigkeit des FRP Systems mit *S&P Resicem* ist somit nachgewiesen.

6.2 Verstärkung von Unterzügen

Im Zuge von Biegezugverstärkungen von Stahlbetonunterzügen oder dgl. ist in der Regel auch die Schubtragfähigkeit des Bauteils zu überprüfen. Gemäss SIA Norm 262 ist die Querkraft durch die Bewehrung (Stahl, CFK) zu übertragen (keine Mitwirkung des Betons).

Ist eine Schubverstärkung erforderlich, bietet S&P das C-Sheet 640 an. Dieses Gelege enthält Fasern mit einem extrem hohen E-Modul von 640 kN/mm². Für die Dimensionierung wird mit einer maximalen Dehnung von 2 ‰ gerechnet. Das heisst, das *S&P C-Sheet 640* überträgt bei maximal 2 ‰ Dehnung die volle Querkraft - in Analogie mit der bestehenden Stahlbewehrung - zum Auflager. Eine höhere Dehnung der Sheet kann zum vorzeitigen Versagen des Bauteiles führen, weil Schubversagen bei geringen Deformationen unangekündigt auftreten (kein Fließbereich wie beim Biegezugversagen).

Die S&P Bemessungssoftware „FRP Lamella“ berechnet die erforderlichen Lagen und die massgebenden Abstände der Sheets. Je nach Bemessungssituation muss die zusätzliche Querkraftbewehrung in der Druckzone verankert werden. Diese kann entweder mit Deckenschlitzen oder Stahlverankerungen erfolgen.

Bei nachträglichen Ausbrüchen von Türen, Fenster, Aussparungen usw. ist die abgetrennte Schubbewehrung in den Leibungsbereichen durch S&P C-Sheet 640 ev. S&P C-Sheet 240 zu kompensieren.

Für die Applikation der S&P C-Sheet sind die S&P Applikationsanleitungen zu berücksichtigen.



Bilder 42 / 43 / 44: Verstärkung Stahlbetonträger mit S&P C-Sheet 640 vollflächig oder punktuell (Fachwerkanalogie) mit Verankerung in die Druckzone

6.3 Verstärkung von Biegezug- und Zuelementen

Sollte eine Verstärkung von Biegezug mit S&P CFK-Lamellen nicht möglich sein, können auch S&P C-Sheet 240 eingesetzt werden. Der Haupteinsatzbereich zeigt sich bei Traggründen mit reduzierter Haftzugfestigkeit (f_{ctH} von 1.0 bis 1.5 N/mm²). Die Anzahl der Lagen kann mit den technischen Kennwerten analog zu den Lamellen berechnet werden. Ein weiterer Einsatzbereich der S&P C-Sheet 240 zeigt sich für die Verankerung von S&P CFK-Lamellen im Bereich von Deckenabsätzen, -rändern oder Wandenden. In diesen Fällen lässt sich das S&P C-Sheet 240 mit einem minimalen Radius (≥ 25 mm) um allfällige Ecken applizieren. Details siehe S&P Applikationsanleitung.



Bild 45: Applikation auf Deckenoberseite



Bild 46: Applikation als Endverankerung

6.4 Verstärkung von Druckgliedern

Für die Verstärkung von runden und rechteckigen Druckgliedern kommen S&P Sheets aus Carbon-, Glas oder Aramidfasern zum Einsatz. Die Wahl der Fasern ist je nach statischen Anforderungen sowie der Wirtschaftlichkeit vom Ingenieur festzulegen. Grundsätzlich werden die Fasern für folgende Anforderungen vorgeschlagen:

Erhöhung Duktilität:	Gewebe aus Glasfasern	S&P G-Sheets
Tragfähigkeit:	Gelege aus Carbonfasern	S&P C-Sheets
Explosions-/Anprallschutz:	Gewebe aus Aramidfasern	S&P A-Sheets

Die Einsatzgebiete und deren Wirkungsweisen wurden in diversen Versuchen wissenschaftlich getestet. Folgende Illustrationen zeigen den Pull-Push-Test mit FRP-Systemen und deren Resultate:

Im Test wurden zwei FRP Systeme mit einer Referenzstütze verglichen:

- S&P C-Sheet 240 (E-Modul 240 kN/m²) => 1.0 kg/m² Faseranteil horizontal
- S&P G-Sheet 90/10 (E-Modul 65 kN/m²) => 3.6 kg/m² Faseranteil horizontal

Da der E-Modul der G-Faser nur ca. 25 % des E-Moduls der C-Faser beträgt, wurde für den Vergleich das 3.6-fache Flächengewicht (in Umschnürungsrichtung) des G-Sheet 90/10 appliziert.

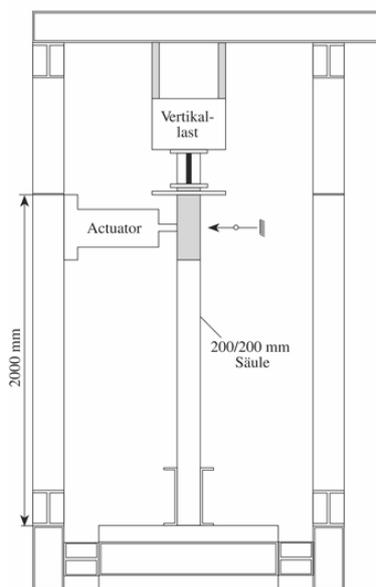


Bild 47: Pull-Push Test

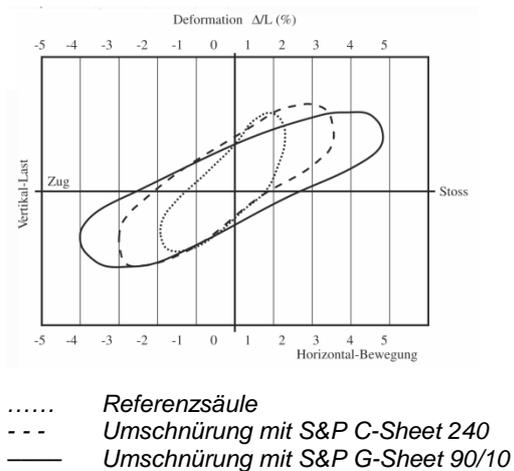


Bild 48: Ergebnis eines Pull-Push-Tests

Die Versuchsergebnisse zeigen deutlich, dass eine mit G-Fasern verstärkte Stütze ein duktileres Verhalten gegenüber der mit C-Fasern verstärkten Stütze aufweist. Entsprechend werden Stützbauteile in seismisch gefährdeten Gebieten vorwiegend mit G-Fasern umwickelt.

In Grossversuchen an der Technischen Universität Gent (B) wurden runde Stützen von 2.0 m Höhe und einem Durchmesser von 400 mm mit unterschiedlichen FRP Systemen umschnürt.

- FRP Systeme:
- S&P C-Sheet 240 (Gelege) mit 1.0 kg/m² Faseranteil horizontal
 - S&P C-Sheet 640 (Gelege) mit 1.6 kg/m² Faseranteil horizontal
 - Glas-Sheet (Gewebe) mit 3.6 kg/m² Fasern horizontal



Bild 49: Schadensbild nach der Belastung

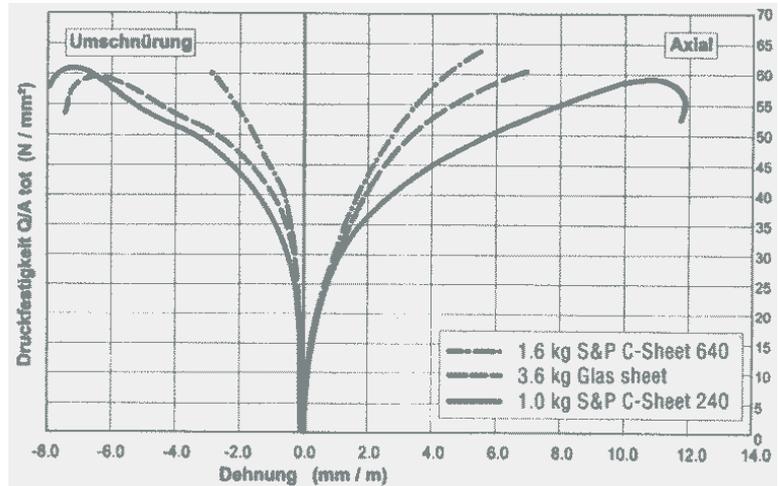


Bild 50: Versuchsergebnisse TU Gent (B)

Eine Umschnürung mit dem S&P C-Sheet 240 eignet sich zur Verstärkung von Druckbauteilen. Mit 1.0 kg/m² C-Fasern in Umschnürungsrichtung wurden äquivalente Werte erzielt wie mit 3.6 kg/m² G-Fasern.

Resultate der Referenzsäule (ohne Verstärkung) und der mit 5 Lagen S&P C-Sheet 240 (5 x 200 g/m² = 1 kg/m²) umschnürten Drucksäule:

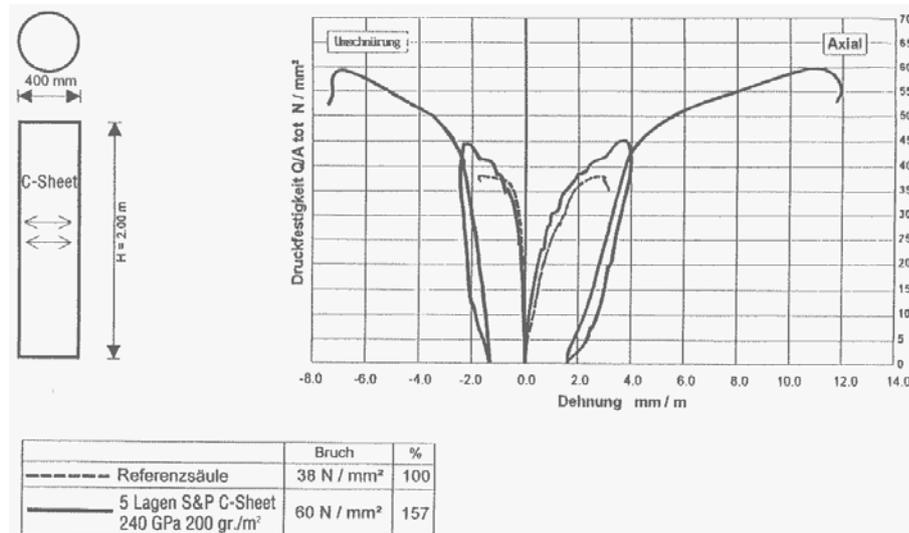


Bild 51: Versuchsergebnisse der TU Gent (B)

Mit der FRP Umschnürung konnte die Druckfestigkeit um 57 % erhöht werden. Im Bruchzustand betrug die Axialverformung der verstärkten Säule 11 mm/m. Im Gebrauchszustand ist diese Axialverformung nicht erwünscht. Entsprechend wird die C-Faserumwicklung zur Abdeckung der Sicherheitsreserve im Bruchzustand appliziert. Ein maximaler Verstärkungsgrad von 1.8 – 2.0 ist möglich.

Während den letzten Jahren wurde die Wirkungsweise von FRP umschnürten Stahlbetonstützen durch mehrere wissenschaftliche Studien nachgewiesen. Diverse 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. Weitere Experimente zeigten, dass mit FRP Umschnürungen ein mögliches Schubversagen sehr wirkungsvoll verhindert werden kann. FRP Umschnürungen erhöhen den Biege widerstand nur minimal.

In zahlreichen Forschungsarbeiten wurde nachgewiesen, dass eine nachträgliche Umschnürung des Stahlbetons - in den Bereichen die als plastische Gelenke wirken - die Tragfähigkeit und die Duktilität von Stahlbetonrahmen steigert. Versuche zeigten ausserdem, dass mit G-FRP eine grössere Duktilitätssteigerung erreicht werden kann, als mit einer C-FRP Systemen. Dies ist auf die höhere Bruchdehnung der Glasfaser zurückzuführen.



Bilder 52 / 53: Stützenumwicklungen mit S&P C-Sheet



Bild 54: Wandverstärkung mit S&P G-Sheet

6.5 Seismische Nachverstärkungen

Viele ältere Stahlbetonbauwerke weisen eine zu geringe Erdbebenresistenz auf. Dabei ist die Duktilität oder der Biege widerstand der Druckglieder (Stützen) ungenügend. Dies zeigt sich insbesondere im Bereich der Bewehrungsüberlappungen sowie in den Endbereichen der Stützen. Konkret bilden sich Fließgelenke in den Verankerungszonen die zum Versagen des Bauteiles führen. Ein weiterer Bruchmechanismus ist das Ausknicken der Längsbewehrung. Verstärkungen mit FRP Umschnürungen haben sich

in der Praxis bewährt und werden erfolgreich eingesetzt. Für die Unterstützung der Bemessung wird die S&P Software "FRP Colonna" eingesetzt.

Für eine richtige Bemessung von seismisch beanspruchten Bauten muss der Ingenieur die Schadensmechanismen erkennen und in der Statik umsetzen können. Die häufigsten Schadensarten von Stahlbetonrahmen werden nachfolgend beschrieben:

Short Column

Frühzeitig entstandene Schubrisse im Beton können auf eine ungenügende Querkraftaufnahmefähigkeit im Anschlussbereich Stütze/Träger 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 (Bauwerksduktilität massgebend).



Bild 55: "Short Column"



Bild 56: Schwach ausgebildeter Knotenpunkt

Schwach ausgebildete Knotenpunkte

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

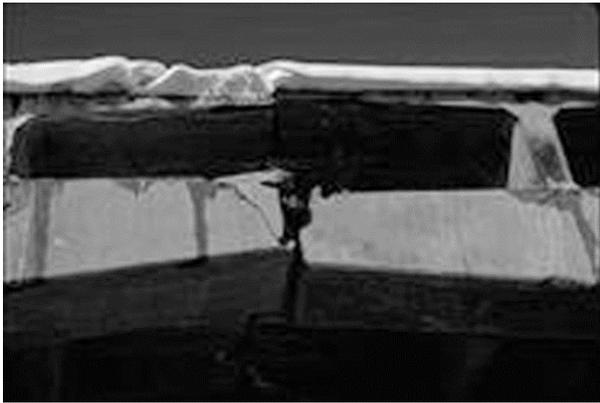


Bild 57: Schubversagen in einem Flie遥gelenk

Flie遥gelenke

Biegebalken k6nnen bei Flie遥gelenken wegen ungen6gender Schubbewehrung versagen, wie im Bild dargestellt. Als Verstärkungsmassnahme wird eine FRP Umschn6rung mit dem hochmoduligen *S&P C-Sheet 640* eingesetzt. Bei ungen6gender Biegezugkapazit6t des Balkens eignen sich *S&P CFK-Lamelle* eingeschlitzt oder oberfl6chig aufgeklebt als Verstärkungsmassnahme.

Methodik bei FRP Nachverstärkungen

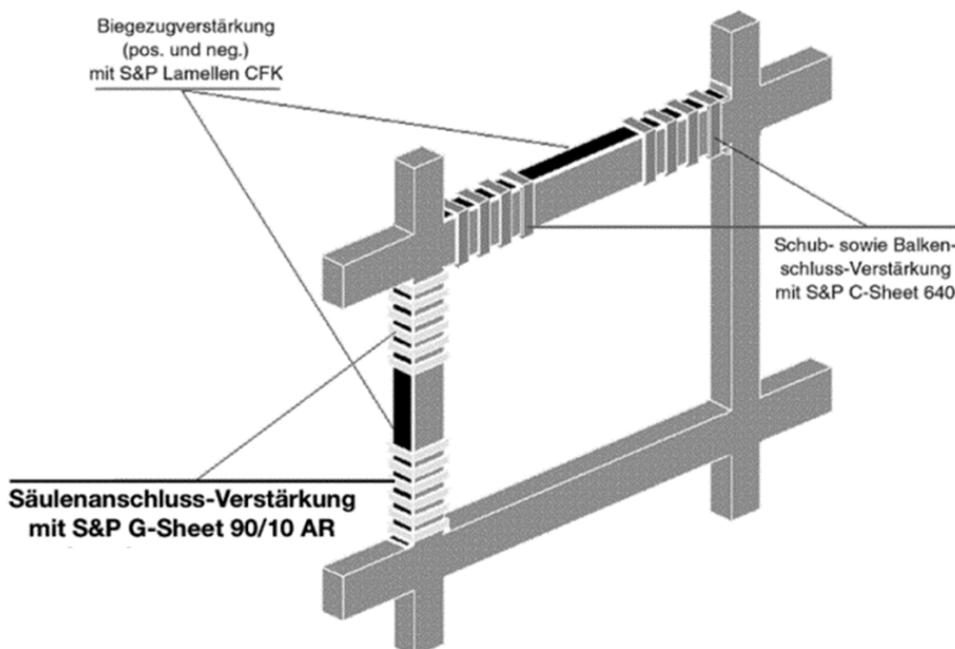


Bild 58: Stahlbetonrahmenverstärkung

Grossversuche zeigten, dass FRP Umschn6rungen im Vergleich zu Nachverstärkungen mit einem Stahlmantel technisch vorteilhaft und zus6tzlich kosteng6nstiger sind. Dank einer FRP Umschn6rung der S6ule tritt das Betonversagen erst unter gr6sserer Dehnung auf. Die durch die FRP Umschn6rung verhinderte Querdehnung dient zus6tzlich als Verstärkung gegen das Ausknicken der L6ngsbewehrung.

Vor der FRP Umwicklung sollten die Risse in den Tragelementen mit Epoxidharz kraftschl6ssig injiziert werden.

Wie bereits im Kapitel 5 erw6hnt k6nnen Bauteile aus Mauerwerk mit Sheets verstärkt werden. Ist prim6r die Duktilit6t des Bauteils zu erh6hen kommen *S&P G-Sheet* zur Anwendung.

6.6 Explosions- und Aufprallschutz

6.6.1 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 unterbewehrt. Leicht bewehrte 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.

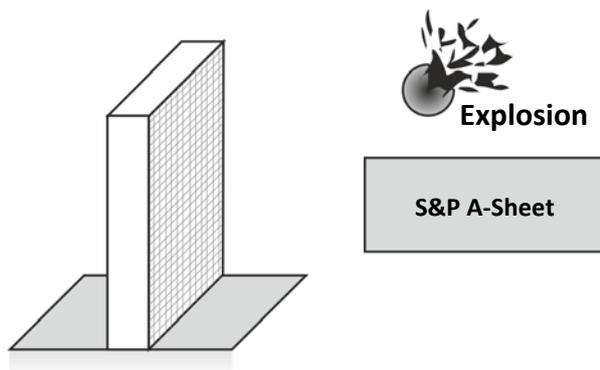


Bild 59: Schutz von explosionsgefährdeten Bauteilen

Das *S&P A-Sheet 120* aus Aramidfasern - bidirektional appliziert - eignet sich als Explosionsschutzmassnahme. Aufgrund der mechanischen Eigenschaften von Aramid (hohe Zähigkeit/Arbeitsvermögen) sind diese Fasern für dieses Einsatzgebiet prädestiniert. Die Widerstandsfähigkeit gegen Explosionseinflüsse von A-FRP verstärktem Mauerwerk konnte um das Fünf- bis Zehnfache gesteigert werden.

6.6.2 Aufprallschutz

Stützen oder Pfeiler beispielsweise von Autobahnüberquerungen sind in der Praxis oft schlank gebaut und exponiert platziert und daher gegen den Aufprall von Fahrzeugen gefährdet. Die horizontalen Kräfte infolge eines aufprallenden Lastwagens können unter Umständen durch die Stütze nicht aufgenommen werden und zu einem Einsturz der Überquerung führen. Mit A-FRP umschnürte Stützen können ausserordentliche Einwirkungen aufnehmen und damit einen Einsturz verhindern.

In England wurde die Wirkungsweise von A-FRP umschnürten Rundstützen gegen Aufprall von Fahrzeugen durch die Faserhersteller getestet. Die A-FRP wurden in Längs- sowie Querrichtung angeordnet. Es wurden Gewebelagen von 290 g/m² Flächengewicht eingesetzt. Durch die HES-SO Fribourg (CH) erfolgte ein identisches Versuchsprogramm an quadratischen Stützen. In Untersuchungsprogrammen wurde der Aufprall an einem Biegebalken simuliert.

Versuchsaufbau:

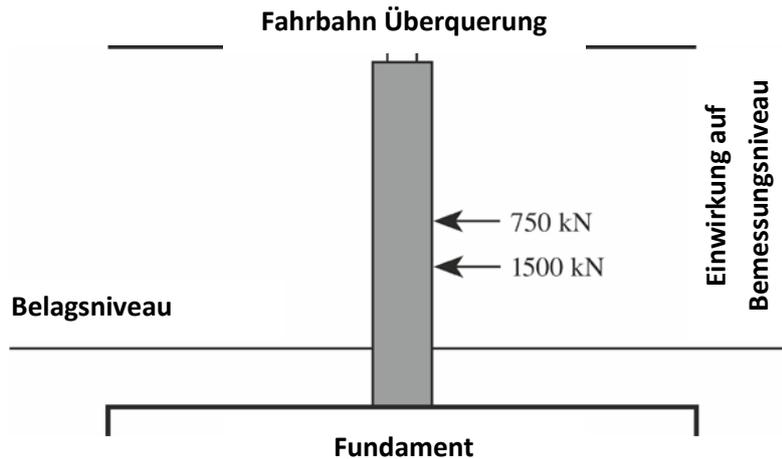


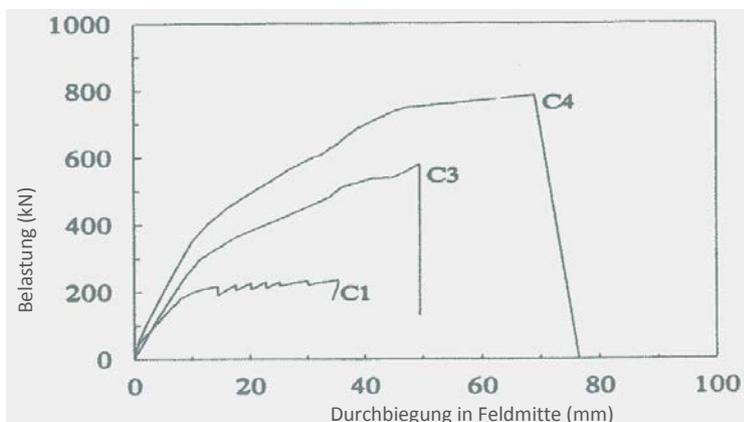
Bild 60: Autobahnstütze mit horizontalen Aufpralllasten

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass Stützbauteile welche in beiden Richtungen (vertikal sowie Umschnürungsrichtung) mittels A-FRP verstärkt wurden, massgeblich mehr Energie dissipieren als unverstärkte Stützbauteile. Mittels C-FRP resp. G-FRP kann Energie kaum dissipiert werden. Die spröderen C- und G-Fasern versagen frühzeitig infolge mangelnder Querkraftaufnahmefähigkeit. Die Aramidfaser hingegen, kann den hohen Verformungen des Stützbauteils dank der Querkraftaufnahmefähigkeit der Faser nachgeben.

Anlog der Versuchsreihen in England wurden drei mit A-FRP verstärkte Rundstützen getestet. Die Ergebnisse werden hier kurz vorgestellt.

Stütze	Anzahl Gewebelagen Längs	Anzahl Gewebelagen quer	Max. Belastung [kN]	Max. Durchbiegung [mm]	Bruchart
C1	0	0	233	34	Fliessen der inneren Bewehrung anschliessend Stauchung des Betons
C3	2	2	580	50	Bruch der Längsfasern
C4	3	2	785	69	Bruch der Längsfasern

Tabelle 5: Testergebnisse von DUPONT UK (Hersteller Aramidfaser)



- C1: Referenzstütze
- C3: 2 Lagen längs
+ 2 Lagen quer
- C4: 3 Lagen längs
+ 2 Lagen quer

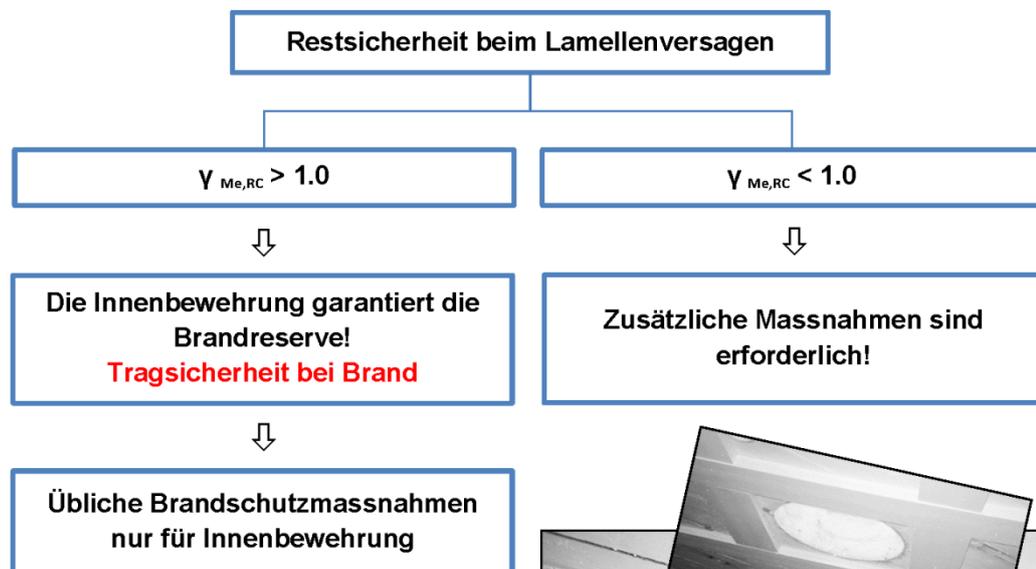
Bild 61: Belastungs-Durchbiegungsdiagramm

7. Brandschutzmassnahmen

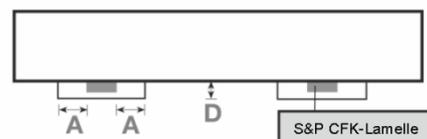
Beim Nachverstärken mit S&P Lamellen aus Stahl oder CFK ist zu berücksichtigen, dass die Klebstoffe auf Epoxy-Basis nur bis zu Temperaturen von 50 °C – 80 °C hitzebeständig sind. Dies führt im Brandfall zum frühzeitigen Versagen der Lamellen.

Die globale Restsicherheit ($\gamma_{Me,RC}$) beim Versagen der Verstärkung mit S&P CFK-Lamellen ist massgebend für die Bestimmung von Brandschutzmassnahmen.

Das S&P Bemessungsprogramm ermittelt die verbleibende Restsicherheit beim Versagen der S&P CFK-Lamelle.



Beispiel: Brandschutzplatten



Feuerwiderstand	A = 100 mm (D)	A = 200 mm (D)
R 30	2 x 20 mm	2 x 20 mm
R 60	2 x 40 mm	2 x 30 mm
R 90	> 110 mm	2 x 40 mm
R 120	> 110 mm	> 110 mm

8. Qualitätssicherung

Bei Anwendung von FRP-Verstärkungen ist der Qualitätssicherung gebührend Rechnung zu tragen. Dazu hat der zuständige Projektverfasser (Bauingenieur) bereits in der Planungsphase zu definieren, welche Prüfungen notwendig sind um die statischen Massnahmen zu bestimmen. Die ausgewählten Prüfungen und Qualitätskontrollen sind im Leistungsverzeichnis aufzulisten.

Die örtliche Bauleitung sowie die ausführende Unternehmung müssen unter allen Umständen sicherstellen, dass die Arbeitsabläufe gemäss der statischen Bemessung erfolgen. Tragende Bauteile werden in jedem Fall erst entfernt, nachdem die FRP Verstärkungsmassnahme appliziert ist und der verantwortliche Bauingenieur die Einwilligung gegeben hat.

8.1 Traggrund

8.1.1 Bestimmung Druckfestigkeit Traggrund

Der Prüfumfang ist so zu wählen, dass man ausreichenden Aufschluss über die Verteilung der Druckfestigkeiten des Traggrundes erhält. Kritische Stellen, insbesondere im Verankerungsbereich, sind mit besonderer Sorgfalt zu untersuchen. Ein mögliches Prüfverfahren ist die Entnahme von Kernbohrungen und die anschliessende Prüfung der Bohrkerne im Labor. Oftmals genügt es jedoch, die Druckfestigkeiten mit dem Beton-Rückprallhammer zu bestimmen.

8.1.2 Bestimmung Haftzugfestigkeit Traggrund

Die Haftzugfestigkeit des Traggrundes ist massgebend für die Auswahl des nachträglichen FRP-Verstärkungssystems. Dies weil Zugkräfte aus dem FRP-System über Schubspannungen in den Traggrund eingeleitet werden.

Je nach FRP-Verstärkungssystem werden folgende Zielwerte der Traggrund-Qualität empfohlen:

FRP Verstärkungssystem	Min. Haftzugwerte f_{ctH} des Traggrundes
S&P G-Sheet	$> 0.2 \text{ N/mm}^2$
S&P C-Sheet / S&P A-Sheet	$> 1.0 \text{ N/mm}^2$
S&P CFK-Lamelle	$> 1.5 \text{ N/mm}^2$

Tabelle 6: min. Haftzugfestigkeiten des Traggrundes f_{ctH}

8.1.3 Vorbereiten des Traggrundes

Der Traggrund für FRP Verstärkungssysteme muss sauber, staub-, öl- und fettfrei sein. Bei Beton ist die Zementhaut mit Sand- oder Kugelstrahlen sowie Schleifen restlos zu entfernen. Farbanstriche, Isolationsmaterialien oder Holzeinlagen sind ebenfalls zu entfernen. Die Vorarbeiten sind so auszuführen, damit das Korngefüge des Betons nicht zerstört wird (kein Stocken). Allfällige grössere Risse sind kraftschlüssig zu schliessen.

8.1.4 Ebenheit Traggrund

Applikationsversuche zeigten, dass sich die frisch applizierten *S&P CFK-Lamellen* bei grösseren Unebenheiten in der Betonoberfläche vom Beton ablösen. Die hohe Biegesteifigkeit der Lamelle bewirkt, dass sich die Lamelle sofort nach dem Anpressen streckt. Die Adhäsion des frischen Klebstoffes reicht nicht aus, um die Lamelle an der Betonoberfläche zu halten. Im Bereich der Vertiefungen bilden sich unter der Lamelle Luftblasen und Hohlstellen im Klebstoff. Diese Fehlstellen schwächen den Verbund und sind im Bereich der Lamellenendverankerungen sehr gefährlich. Krümmungen, welche die FRP Produkte gegen den Beton drücken, sind nicht zu beanstanden.

Beim Hinhalten einer 2 m langen Metalllatte sollten keine Unebenheiten > 5 mm verbleiben. Auf einer Prüfstrecke von 30 cm sind Unebenheiten < 1 mm zulässig. Für Reprofilierungen dürfen ausschliesslich systemgeprüfte Ausgleichsmörtel eingesetzt werden.

8.1.5 Feuchtigkeit Traggrund

Bei Verwendung von S&P Mörtel auf Epoxydbasis (z.B. Resin 50/55/220/230) beträgt der maximale Wassergehalt des Traggrundes 4 %. Bei S&P Mörteln mit Zementzusätzen (z.B. Resicem) liegt der maximale Wassergehalt bei 12 %. Bei einem grösseren Wassergehalt ist das Bauteil entsprechend zu trocknen.

8.1.6 Taupunkttemperatur

Vor der Applikation von FRP-Systemen ist die Taupunkttemperatur zu bestimmen. Dazu werden die relative Luftfeuchtigkeit und die Lufttemperatur gemessen. Daraus kann die zugehörige Taupunkttemperatur ermittelt werden. Zur Beurteilung der Gefahr der Bildung von Kondenswasser ist sie mit der Temperatur der Traggrundoberfläche zu vergleichen. Diese muss mindestens 3 °C höher sein als die Taupunkttemperatur.

8.2 S&P FRP Materialien

Die S&P FRP Materialien (Lamellen, Sheets, Kleber) unterliegen einer laufenden Qualitätskontrolle (ISO 9001). Die technischen Datenblätter geben Auskunft über die relevanten Kennwerte. Für die Applikation der S&P FRP Systeme stehen dem Verarbeiter Applikationsanleitungen zur Verfügung. Die S&P bietet jährlich oder auf Anfrage allen Bauingenieuren und Verarbeitern praktische Kurse an.

Die technischen Datenblätter stehen unter www.sp-reinforcement.eu zur Verfügung.

8.3 Kontrolle bei der Ausführung

Für die laufende Kontrolle der Ausführung stehen dem Anwender diverse Protokolle zur Verfügung. Damit wird lückenlose Aufzeichnung der Werte möglich.

8.3.1 Verbund

Die Qualität des Verbundes von applizierten FRP Verstärkungsmassnahmen ist von grösster Bedeutung. Der Verbund kann durch Haftzugversuche geprüft werden. In der

Regel werden dazu Prüflamellen geklebt. Mit dem Haftzugprüfgerät wird die Haftzugfestigkeit gemessen. Der Bruch erfolgt in der Regel im Traggrund.

Mit dieser Methode besteht die Möglichkeit der Prüfung des Langzeitverhaltens. Dabei können auf diese Art zum Beispiel alle 10 Jahre weitere Haftzugversuche durchgeführt werden.

8.3.2 Hohlräume

FRP Systeme sind nach der Verklebung auf Hohlräume abzuklopfen. Hohlräume, die im mittleren Bereich des FRP Systems liegen, dürfen mit Injektionsharz mit leichtem Druck verfüllt werden.

Sind Hohlräumen im Endbereich vorhanden (Verankerungsbereich des FRP Systems) müssen die FRP Produkte entfernt und neu appliziert werden.

8.4 Arbeitssicherheit

Bei der Verarbeitung von S&P Systemen sind die Informationen und Massnahmen der Sicherheitsdatenblätter und Applikationsanleitungen gültig (www.sp-reinforcement.eu).

Carbonfasern und Epoxidharze können Hautreizungen hervorrufen. Deshalb empfehlen wir eine konsequente Verwendung von:

- Kopfbedeckung
- Schutzbrille mit Seitenschutz gemäss EN 166
- Schutzmaske mit Staubfilter beim Konfektionieren
- langärmelige Arbeitsbekleidung
- Schutzhandschuhe gemäss EN 374
- geschlossene Schuhe

Massnahmen in Bezug auf das Verhalten im Gefahrenfall, erste Hilfe, sachgerechte Entsorgung etc., sind zu beachten!

8.5 Literaturhinweise

Die S&P hat im Rahmen ihrer mehr als 20-jährigen Forschungs- und Entwicklungsarbeit diverse Versuche und Materialprüfungen durchgeführt. Sämtliche relevanten Dokumente und Resultate sind bei der S&P Schweiz einsehbar.