

Konzepte der Betonerhaltung - Verstärkung mittels Faserverbundwerkstoffen

Martin Ebner

martin.ebner@tugraz.at

Institut für Betonbau, TU Graz, Österreich

Lutz Sparowitz

maier@ibb.tu-graz.ac.at

Institut für Betonbau, TU Graz, Österreich

1 Instandsetzung von Betonbauwerken

1.1 Ursache von Schäden

Die häufigsten Schäden bei bewehrten Betonbauteilen (sowohl Stahl-, als auch Spannbetonbauteile) sind „Abwitterungen“ infolge Frost- und Frost-Tausalz-Beanspruchung sowie Betonabplatzungen infolge Korrosion der schlaffen Bewehrung [Bild 1].

Darüber hinaus treten Risse und herstellungs- sowie nutzungsbedingte Oberflächenfehler beim Beton auf, welche ebenfalls eine Korrosion der Stahlbewehrung zur Folge haben können.

Korrosionsschäden an der schlaffen Bewehrung und auch der Spannbewehrung entstehen in der Regel durch ein Zusammentreffen mehrerer ungünstiger Einflüsse. Im wesentlichen kristallisieren sich drei Schadensgruppen heraus:

- Schäden durch Schwächen des Entwurfs, unzutreffende Berechnungsannahmen, unzureichende konstruktive Ausbildung, unzureichender Schutz von horizontalen Flächen, die der Witterung ausgesetzt sind und Wahl ungeeigneter Baustoffe
- Schäden durch Fehler während der Bauausführung
- Schäden durch nicht vorausgesehene oder nicht voraussehbare und somit unplanmäßige Beanspruchung infolge Nutzung (z.B. Zunahme der Verkehrslasten), Betrieb (z.B. Tausalz bei Brücken) und Umwelteinflüssen

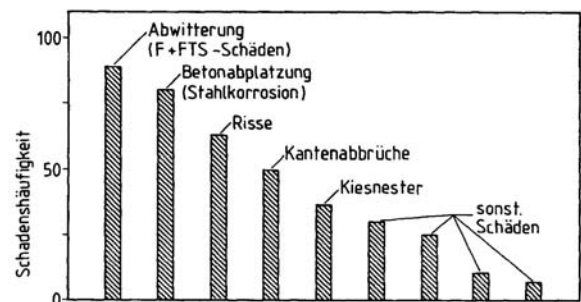


Bild 1 Häufigkeit von Schäden bei Stahlbetonbauten

1.2 Korrosion

Unter Metall-Korrosion (vom lat. Wort *corrodere* = zernagen) versteht man die Reaktion eines metallischen Werkstoffes mit seiner Umgebung, die eine messbare Veränderung des Metalls bewirkt und zu einer Beeinträchtigung der Funktion eines metallischen Bauteils oder eines ganzen Systems führen kann. In den meisten Fällen ist diese Reaktion elektrochemischer Natur, in einigen Fällen kann sie jedoch auch chemischer oder metallphysikalischer Art sein [1].

Wird Bewehrungsstahl ungeschützt im Freien gelagert, beginnt er zu korrodieren, aufgrund seines Bestrebens wieder in die energiearme Form des Erzes zurückzukehren, aus dem er im Hochofen unter beträchtlichen Energieaufwand verschmolzen wurde. Korrosionsschäden treten in der Regel erst nach einer entsprechenden Zeit auf. Dem Korrosionsschutz kommt eine essentielle Bedeutung zu [2].

In bewehrten Betonbauteilen wird der Korrosionsschutz der Bewehrungseinlagen durch die Ummantelung mit einer ausreichenden Betonschicht erzielt.

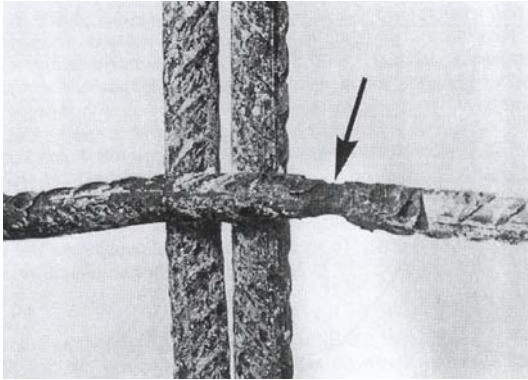


Bild 2 Korrosion der Bewehrung in einem Betonriss



Bild 3 Korrodierte Bewehrungsstäbe (Betondeckung abgeplatzt) infolge Karbonatisierung

Die Schutzwirkung des Betons kann in einen chemischen Schutz und in einen physikalischen Schutz unterteilt werden:

- Chemischer Schutz (aktiver Korrosionsschutz):
Beton besitzt infolge der stark alkalischen Reaktion bei der Hydratation des Zementes einen großen Anteil alkalischer Bestandteile.
Infolge des Kontaktes Bewehrungsstahl/hochalkalisches Betonporenwasser (pH-Wert 12,5 – 13,8) wird der Stahl vor Korrosion geschützt. Diese Korrosionsschutzwirkung wird bei Unterschreitung dieses pH-Bereiches aufgehoben und unterhalb von pH 9,0 setzt starke Korrosion ein.
Das Absinken des pH-Wertes, also der Verlust an Alkalität des Betons wird als Karbonatisierung bezeichnet und bewirkt die Umwandlung von Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zu Calciumkarbonat (CaCO_3).
- Physikalischer Schutz (passiver Korrosionsschutz):
Beton bildet durch seinen Diffusionswiderstand eine Barriere gegen den Zutritt von Gasen (Kohlendioxid, Schwefeldioxid, Sauerstoff) und wässrigen Lösungen, wodurch die Korrosion direkt oder indirekt behindert wird. Dieser Schutz ist umso besser je dichter die Betondeckung ist, d.h. mit höherer werdender Betongüte steigt der physikalische Widerstand. In Rissen mit großen Rissweiten kann es örtlich zu Korrosionsschäden kommen [Bild 2].

1.3 Auswirkungen einer Bewehrungsstahlkorrosion

Wenn die Korrosionsschutzwirkung des Betons für den Stahl versagt, können bei Stahlbeton folgende Korrosionserscheinungen bzw. Schäden auftreten:

- Längsrisse entlang der Bewehrung
- Abplatzungen der Betondeckung
- Im Querschnitt reduzierte Stähle
- Volumsvergrößerung infolge der entstehenden Korrosionsprodukte

Bei Schäden durch Betonstahlkorrosion dominiert i.a. die Erscheinung des

korrosionsbedingten Abplatzens der

Betondeckung [Bild 3], infolge der Sprengwirkung der voluminösen Korrosionsprodukte [Bild 4].

Die Korrosionsprodukte nehmen je nach Sauerstoffanteil 2 bis 6mal mehr Raum ein als das abgetragene Stahlvolumen.

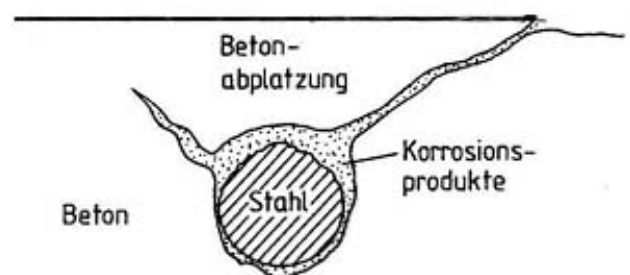


Bild 4 Prinzip der Betonabplatzung infolge Stahlkorrosion

1.4 Maßnahmen zur Sicherung des Korrosionsschutzes

Die wesentlichen Kriterien für die Dauerhaftigkeit von Beton und seiner Bewehrung:

- Hohe Betongüte (Gesamtporosität des Zementsteines niedrig, sowie niedriger WZ-Wert)
- Ausreichende Betondeckung (in der Norm wird diese abhängig von den Umweltklassen geregelt)
- Beschränkung der Rissbreite (für normale Umgebungsbedingungen bei ausreichender Betondeckung soll die mittlere Rissbreite 0,3 bis 0,4 mm nicht überschreiten)
- Wirkungsvolle Ableitung des Oberflächenwassers

1.5 Ziele und Maßnahmen einer Instandsetzung

Mit einer Instandsetzung werden i.a. folgende Ziele verfolgt:

- Anpassung des Istzustandes an den ursprünglich vorgesehenen, jedoch nicht erreichten Sollzustandes.
- Anpassung des Istzustandes an einen infolge Nutzungsänderung oder infolge gestiegener Umweltbelastungen neu zu definierenden Sollzustand.

Die notwendigen Maßnahmen zur Adaptierung des Bauwerkes sind natürlich an die vorhandenen Erfordernisse abzustimmen. Diese Möglichkeiten umfassen z.B. Verstärkung einzelner Bauglieder, Verbesserung des Korrosionsschutzes, Stabilisierung freigelegter Stähle durch Versiegelung, Sanierung der Risse durch Injektion mit Epoxydharzen, Sanierung abgeplatzter Betonteile mit kunststoffmodifiziertem Zementmörtel oder -beton usw.

Vor allem Verstärkungen können sehr gut durch nachträgliches Anbringen von Faserverbundwerkstoffen FRP (fibre reinforcement polymer) realisiert werden.

1.6 Instandsetzungsmaßnahmen

1.6.1 Hydrophobierung

Hydrophobierungen verhindern das Eindringen flüssigen Wassers in den Beton. Sie wirken etwa so, als wäre die Betonoberfläche mit einer Fettschicht überzogen, die flüssiges Wasser abperlen lässt, jedoch für Wasserdampf durchlässig sind, also das Austrocknen des Betons nicht behindert. Der Wassergehalt des Beton wird dadurch zufolge Austrocknung gesenkt mit positiven Effekten hinsichtlich der Geschwindigkeit der Korrosion von Stahleinlagen deren Korrosionsschutz nicht mehr gegeben ist (Karbonatisierung, Chloridverseuchung) sowie hinsichtlich der Frostempfindlichkeit (Vorteil von Hydrophobierungen: leicht zu Applizieren, kostengünstig; Nachteil: ihre Lebensdauer oft nicht sehr lange ist und sie müssen daher von Zeit zu Zeit erneuert werden).

1.6.2 Imprägnierung

Imprägnierungen haben spezielle Wirkungsweisen (auch die Hydrophobierung fällt darunter). Darunter fällt auch die Karbonatisierungsbremse, die vornehmlich vorbeugend sinnvoll ist, also dann, wenn der Korrosionsschutz der Bewehrung noch nicht verlorengegangen ist, wenn aber vorhersehbar ist, daß die Karbonatisierung die Bewehrung in absehbarer Zeit erreichen wird. Wenn die Bewehrung schon innerhalb des karbonatisierten Bereiches liegt, ist die Aufbringung nicht sehr effektiv. Durch das Abhalten des Eindringens von weiterem CO₂ kann es allerdings zu einer Diffusion von korrosionsschützenden Hydroxylionen (OH⁻-Ionen) von tieferen Betonzonen zu den karbonatisierten Betonzonen kommen, so dass der Korrosionsschutz im günstigsten Fall wiederhergestellt werden könnte. Da diese Mittel aber nicht nur das Eindringen von CO₂ unterbinden bzw. bremsen sondern meist auch hydrophobierend wirken, bewirken sie im Regelfall auch eine stärkere Austrocknung, was wiederum der Ionendiffusion entgegen wirkt (Die Diffusion erfolgt in der flüssigen Phase zufolge eines Konzentrationsgradienten).

1.6.3 Dünnbeschichtung

Sie enthalten meist einen hohen Kunststoffanteil und bewirken, dass flüssiges Wasser und aggressive Stoffe (CO_2 ; Chlorid) nicht mehr eindringen können. Die Austrocknung wird jedoch im allgemeinen nicht bzw. nicht wesentlich verbessert, da die Wasserdampfdurchlässigkeit wegen des Kunststoffanteils stark verringert wird. Die positiven Effekte entsprechen denen der Hydrophobierung und der Imprägnierung.

1.6.4 Dickbeschichtung

Sie sind meist zementgebunden. Abgesehen von einem möglichen positiven Effekt hinsichtlich statischer Belange, bewirken sie einen sicheren und dauerhaften Schutz vor dem weiteren Eindringen von Schadstoffen (CO_2 ; Chlorid) und haben langfristig einen günstigen Effekt auf die Geschwindigkeit einer bereits im Gang befindlichen Korrosion der Bewehrung, obwohl durch das Aufbringen der Dickbeschichtung der Wassergehalt des Altbetons und damit die Korrosionsgeschwindigkeit zunächst erhöht wird. OH^- -Ionen können von der Dickbeschichtung in den Altbeton ein- und zur Bewehrung diffundieren, was eine Realkalisierung, also die Wiederherstellung des Korrosionsschutzes in karbonatisierten Betonbereichen bewirken kann. Gleichzeitig diffundieren auch OH^- -Ionen aus tieferen Betonzone in die karbonatisierten Zonen, was ebenfalls zu einer Realkalisierung beitragen kann. Die dabei auftretenden Diffusionsgeschwindigkeiten sind aber leider nur sehr gering (abhängig vom Wassergehalt und werden mit zunehmender Austrocknung immer geringer) so dass dies keinen verlässlichen Schutz darstellt. Ein weiterer positiver Effekt kann von dem Umstand erwartet werden, dass die Diffusion des für die Aufrechterhaltung der Bewehrungskorrosion nötigen Sauerstoffs von außen zum Stahl erschwert wird (längere Diffusionswege, bei engeren Poren des Beschichtungsmörtels als des Altbetons weitere Diffusionsverlangsamung). Dickbeschichtungen können aber besonders bei Anwesenheit von Chlorid nicht als sicherer Korrosionsschutz angesehen werden.

1.6.5 Elektrochemische Realkalisierung

Dabei wird zwischen der Bewehrung und einer vorübergehend auf die Betonoberfläche aufgetragenen Gegenelektrode (Anode, meist ein Titangitter), die in einem leicht wieder entfernbaren elektrolytisch leitendem Material (meist einem Papierschnitzelbrei) eingebettet ist, eine Gleichspannung angelegt. Die positiven Ionen wandern im Gleichspannungsfeld zum negativen Pol, also zur Bewehrung. Der äußere Elektrolyt ist eine Sodalösung (Na_2CO_3) und die darin enthaltenen positiven Natriumionen werden zur Bewehrung transportiert. Da es an der Bewehrung zu einer elektrochemischen Zersetzung von Wasser unter Bildung von elementarem Wasserstoff und OH^- -Ionen kommt, bildet sich an der Bewehrung Natriumhydroxid. Die OH^- -Ionen werden als negativ geladene Ionen im Gleichspannungsfeld von der Bewehrung weg in Richtung der äußeren Anode transportiert, bewirken also eine Realkalisierung der Bewehrung. Die Anwendung ist im Normalfall nach längstens zwei Wochen abgeschlossen. Es empfiehlt sich jedoch eine Oberflächenbeschichtung aufzubringen, damit das wasserlösliche Natriumhydroxid nicht „ausgewaschen“ werden kann. Das Verfahren kann nicht bei Spannbeton angewendet werden (Gefahr einer Wasserstoffversprödung des Spannstahls) und beinhaltet einige Risiken wie die erhöhte Gefahr einer Alkali/Silika-Reaktion.

1.6.6 Elektrochemischer Chloridentzug

Das Verfahren funktioniert wie oben (Stromdichte zwischen etwa 1A und 5A pro m^2 Betonoberfläche), jedoch wird als äußerer Elektrolyt keine alkalische Lösung sondern im Normalfall Leitungswasser benutzt, so dass es zu keiner Erhöhung des Alkaligehalts des Betons kommt (wohl aber zu einer Verschiebung der Alkalien hin zur Bewehrung, so dass die an der Bewehrung vorhandene OH^- -Konzentration stark ansteigt). Im Gleichspannungsfeld wandern die negativen Chlorionen aus dem Beton hinaus. Das Verfahren ist erprobt und es kann vornehmlich dann (für Stahlbeton, nicht für Spannbeton) empfohlen werden, wenn die Chloridfront noch nicht bis hinter die Bewehrung vorgedrungen ist. Aus Bereichen hinter der Bewehrung wird Chlorid

wegen der langen Transportwege und der geringen Stromdichten nur sehr begrenzt entzogen. Es ist also vornehmlich als vorbeugende Methode geeignet, etwa wenn die Chloridfront schon nahezu bei der Bewehrung angelangt ist und wenn die herkömmlicher Reparatur nicht möglich ist. Vorteile: kurze Anwendungszeit von einigen Wochen, die monolithische Struktur des Betons bleibt erhalten, das Aussehen des Bauwerkes wird nicht verändert, kein Staub, kein Lärm, etc.) Nachteile: wie bei elektrochemischer Realkalisierung.

1.6.7 Kathodischer Korrosionsschutz (KKS)

Der kathodische Korrosionsschutz ist seit langem erprobt und ist als Methode zur Erhaltung von Bauwerken aus Stahlbeton mit verlorenem Korrosionsschutz der Bewehrung Stand der Technik. Es ist keine vorübergehende sondern eine dauernde Einrichtung. Auch hier wird zwischen der Bewehrung und einer äußeren Elektrode eine Gleichspannung angelegt, wobei die Bewehrung der negative Pol (Kathode) ist. Die angelegten Stromdichten sind jedoch ganz wesentlich niedriger als beim Chloridentzug oder der Realkalisierung. Sie liegen gewöhnlich unter 50mA/m^2 . Die äußere Elektrode besteht aus einem Metalldrahtgitter (meist Titan), das mittels Spritzbeton an der Oberfläche fixiert wird. Durch den Spritzbeton ist auch die elektrolytisch leitende Verbindung zum Altbeton garantiert. Immer häufiger kommen elektrisch leitende Farben/Beschichtungen zur Anwendung, die den Vorteil haben, dass die Stromverteilung sehr gleichmäßig ist. Als Nachteil wäre die nicht immer dauerhafte Haftung am Beton oder Probleme mit der chemischen Beständigkeit zu nennen.

1.6.8 Korrosionsinhibitoren

Vor einigen Jahren kamen Korrosionsinhibitoren auf den Markt, die als eine Art Reparaturmaterial für Stahlbeton mit verlorengegangenem Korrosionsschutz der Bewehrung anzusehen sind. Sie sind als schnell wandernd beschrieben. Ihre Wirksamkeit wurde jedoch vornehmlich nur bei Zumischung zu Betonproben erwiesen. Untersuchungen der kürzlich beendeten COST Aktion 521 zeigten jedoch, dass sie im Beton nicht ungewöhnlich schnell wandern und dass es zu einer Auftrennung der Wirkstoffe an der Betonoberfläche kommt. Elektrochemische Laboruntersuchungen ergaben bislang keine Bestätigung, daß sie bei Applikation auf die Betonoberfläche wirksam sind. Auch unabhängige Untersuchungen von Praxisanwendungen waren negativ. Die Mittel erscheinen weiterhin interessant (kostengünstig, leicht zu Applizieren) jedoch muß abgewartet werden, ob sie so weiterentwickelt werden können, dass sie zur Anwendung in der Praxis empfohlen werden können.

2 Einsatz von Verstärkungsmethoden

Unter Verstärkungstechniken werden Maßnahmen verstanden, die die Tragfähigkeit, die Gebrauchstauglichkeit bzw. die Dauerhaftigkeit und das Ermüdungsverhalten von Tragelementen nachhaltig verbessern, wobei unter Tragelementen im Stahlbetonbau vorwiegend Platten, Balken, Stützen [Bild 5] und Schubscheiben (Wände) verstanden werden.

Folgende Ursachen erfordern Verstärkungsmaßnahmen:

- Erhöhung der Einwirkung infolge Nutzungsänderung (z.B. höhere Verkehrsbelastung bei Brücken)
- Änderung des statischen Systems durch Umbaumaßnahmen, wie z.B. das

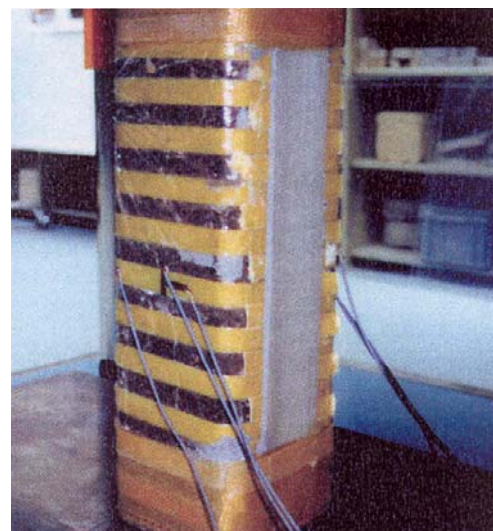


Bild 5 Umschnürung einer Stütze mit CFK-Lamellen

- nachträgliche Herstellen von Durchbrüchen in Decken und Wänden
- Sanierungsmaßnahmen durch Alterung der Baustoffe bzw. Korrosionsschäden an der Bewehrung [siehe Kap.1.4]
- Geänderte Normenvorschriften bezüglich Nutzlasten und/oder Bemessung
- Beheben von Schäden nach außergewöhnlichen Einwirkungen wie Anprall von Fahrzeugen, Explosion, Brand, Erdbeben etc.
- Nachträgliche Aussteifung von Tragkonstruktionen
- Behebung von statischen oder konstruktiven Planungsmängeln

Als Sanierungsmaßnahmen stehen folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

- Injektion von Rissen mit Epoxydharz und von Hohlräumen mit Mikrozementsuspension (Silika) verbessert nicht nur die Steifigkeit und die Dichtigkeit des Bauteils, sondern schützt auch die Bewehrung vor weiterer Korrosion.
- Entfernen von geschädigten Betonzonen, sowie anschließendem Schutz der Stahlteile mit einem geeignetem Primer gegen Korrosion (Betonersatzsysteme) [6].
Die Sanierung der geschädigten Bereiche erfolgt mit kunststoffmodifiziertem Zementmörtel bzw. -beton, wie Spritzmörtel / Spritzbeton (SPCC), Zementmörtel/-beton mit Kunststoffzusatz (PCC = Polymer, Cement, Concrete) und Reaktionsharzmörtel / -beton (PC), welcher mittels Nass- oder Trockenspritzverfahren auf eine vorbereitete Oberfläche aufgebracht wird.
- Ergänzung der Stahlbewehrung durch nachträgliches Anbringen einer bewehrten Betonschicht unter Verwendung von SCC („Selfcompacting Concrete“ – Selbstverdichtender Beton). Durch Einsatz dieses Materials ergeben sich neue Lösungsmöglichkeiten für sehr dünnwandige Bauteile.
- Abtrag von tragenden Teilen der Betonstruktur mittels Hochdruckwasserstrahlen, wodurch die Bewehrung ohne mechanische Beschädigung zur Gänze freigelegt wird. Daraufhin erfolgt der Einbau von zusätzlichen Bewehrungen und einer Betonerfüllung aus Spritz- oder Ortbeton.
Ein besonderes Augenmerk ist hierbei auf die Beton-Beton-Verbundwirkung zu legen und zwar sowohl in statischer als auch in dynamischer Hinsicht. Untersuchungen auf diesem Gebiet sind u.a. an der TU-Graz durchgeführt worden ([10],[11]).
- Änderung des Tragsystems bzw. auch der vorhandenen Lagerungsbedingungen z.B. durch Unterfangungen mit einem Stahlträger oder Unterstellung mit zusätzlichen Stützen.
- Anbringen einer externen Vorspannung mit dauerkorrosionsgeschützten, wo möglich auswechselbaren Spanngliedern.
- An der Betonoberfläche aufgeklebte Lamellen oder in eingefräste Schlitze (Nuten) eingeklebte Bewehrungen aus Stahl oder kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK), wobei die CFK-Lamellen mittlerweile auch schon vorgespannt werden können.
- Neben den uni-direktionalen Bändern (Lamellen, Strips) können auch bidirektionale Matten (Sheets) aufgeklebt werden, welche dann eine oder auch zwei Haupttragwirkungen aufweisen können.

3 Verstärkung mittels CFK-Lamellen

3.1 Allgemeines

Obwohl kohlefaserverstärkte Kunststoffe (Epoxydharz) im Vergleich zu klassischen Baustoffen extrem teuer sind, werden sie heute sowohl technisch als auch wirtschaftlich erfolgreich eingesetzt.

Dabei ist eine sorgfältige Bestandsaufnahme die zwingende Voraussetzung für die Ausarbeitung eines erfolgreichen Sanierungskonzeptes. Bekannte Firmen wie Scherer & Partner, Sika, Stahlton, Holderchem etc. haben dem Verfahren international zum Durchbruch verholfen [5].

Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Methode ist eine entsprechende Betonqualität. Die Haftzugfestigkeit des Betons an der Klebefläche darf für Lamellen $1,5 \text{ N/mm}^2$ und für Sheets $1,0 \text{ N/mm}^2$ nicht unterschreiten.

Eingeschlitzte Lamellen stellen neuerdings eine echte Alternative zu den oberflächlich aufgeklebten Strips dar. Sie sind sowohl gegen mechanische Beschädigungen, als auch gegen UV-Strahlungen geschützt. Darüber hinaus sind nötige Brandschutzmaßnahmen wesentlich billiger. Ein weiterer Vorteil ist die bessere Verbundwirkung, wodurch sich ein höherer Auslastungsgrad ergibt. Neuerdings können Lamellen auch vorgespannt werden. Dadurch können Durchbiegungen und Rissbreiten reduziert werden.

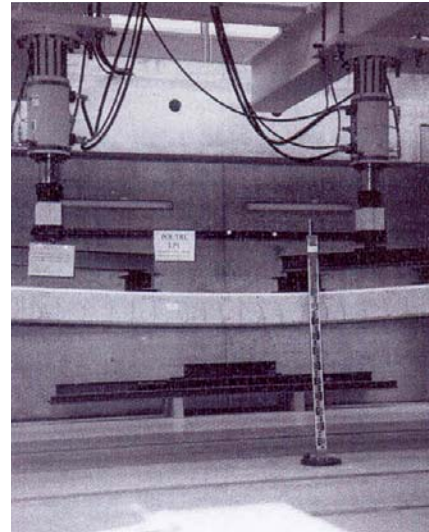


Bild 6 Versuch an der TU Fribourg, CH

3.1.1 Vorteilhafte Eigenschaften [3]

Folgende Vorteile der CFK-Lamellen sind bemerkenswert:

- Hohe Zugfestigkeit
- Geringes Gewicht
- Dünne, leicht biegbare Bänder
- Leichte Handbarkeit auch bei engen Raumverhältnissen oder in großer Höhe
- Sie werden in Rollen in „fast“ unbegrenzter Länge geliefert und können mit einer geeigneten Schere abgelängt werden.
- Hohe Korrosionsbeständigkeit auch bei starker Belastung durch Tausalze oder wässrige Salzlösungen
- Hohe Zeitstandfestigkeit selbst in aggressiver Umgebung
- Die Ermüdungsfestigkeit übertrifft jene von Rippenstahl wesentlich
- Das Kriechen bzw. die Relaxation der Lamellen und der Klebeverbindung unter Gebrauchslasten ist vernachlässigbar
- Es können zwei Lamellen übereinander geklebt werden.
- Bei flächigen Bauwerken können CFK-Strips auch kreuzweise zueinander auf das Bauteil geklebt werden.
- Der Kleber weist eine etwa 10-fach höhere Zugfestigkeit als der Beton auf (dies bewirkt eine sehr gute Verbundwirkung).

Hierzu kommt, dass die flexiblen Bänder leicht handbar sind. Es können zwei Lamellen übereinander geklebt werden oder bei flächigen Bauwerken können CFK-Strips auch kreuzweise zueinander auf das Bauteil geklebt werden.

3.1.2 Nachteilhafte Eigenschaften [3]

Natürlich stehen der Vielzahl an Vorteilen von CFK-Lamellen auch einige Nachteile gegenüber:

- Hohe Materialkosten
- Empfindlichkeit gegen UV-Strahlung
- Empfindlichkeit der Klebeverbindung gegen Durchfeuchtung
- Kleiner E-Modul und geringe Zugfestigkeit quer zur Faserrichtung (führt zu Empfindlichkeit gegen Querverpressung und damit gegen mechanische Beschädigung insbesondere durch scharfe Kanten)
- Die relativ kleinen Querschnittsflächen der CFK-Bänder können zu Problemen bei der Unterbringung der erforderlichen Lamellen führen
- Bauphysik: Eine Epoxydharz Matrix ist wasserdampfdurchlässig
- Geringer Brandwiderstand des Klebers
- Das linear elastische Stoffgesetz der FRP's kann sich negativ auf die Duktilität des Tragwerkes auswirken.

Stoffgesetz Bewehrungsstahl / CFK-Lamelle im Vergleich [Bild 7]:

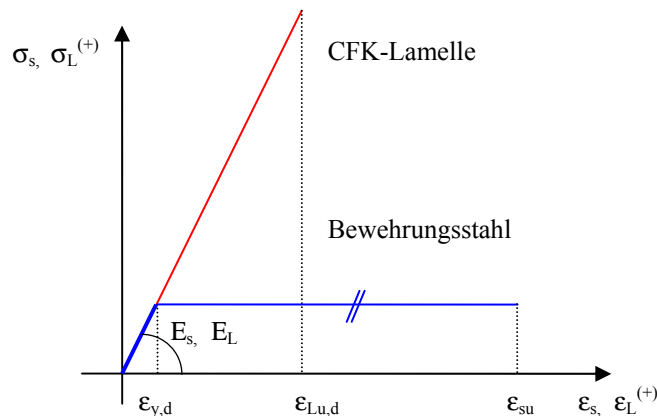


Bild 7 Spannungs-Dehnungslinien im Vergleich

4 Bemessung

4.1 Versagensarten

Bei der Bemessung von Verstärkungen sind stets alle die Tragfähigkeit bestimmenden Komponenten zu beachten, die für das Versagen des verstärkten Bauteils relevant sind.

Grundsätzlich ist zwischen 3 Versagensarten zu unterscheiden:

- Versagen der Betondruckzone, wenn infolge der Druckbeanspruchung die maximale Betonstauchung von $\epsilon_c = 3,5 \text{ ‰}$ erreicht wird. Bei dieser Versagensart muss, um einen plötzlichen Sprödbbruch zu vermeiden die Biegezugbewehrung ins Fließen kommen (der Bauteil muss sein „Versagen“ ankündigen, d.h. er soll sich duktil verhalten)

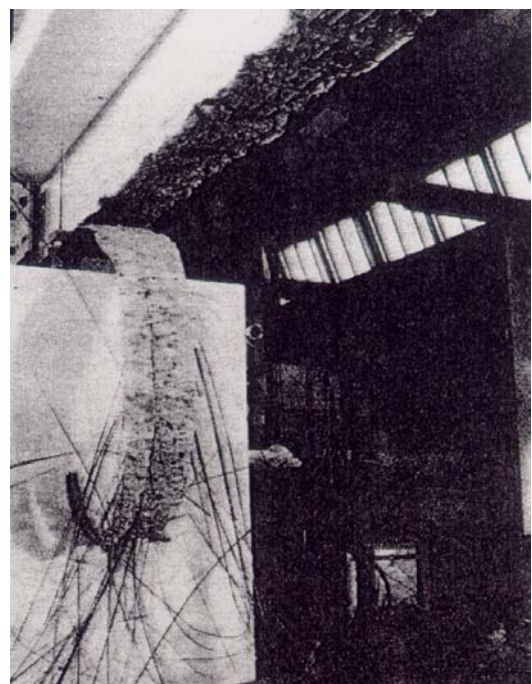


Bild 8 Lamellenbruch nach Erreichen der Traglast

- Versagen der Bewehrung in der Zugzone ($\epsilon_s > \epsilon_{su}$), d.h. zufolge einer zu großen initialen Vordehnung erreichen die Stahleinlagen vor der Lamelle ihre Bruchdehnung.
- Versagen der CFK-Lamelle [Bild 8]

In Hinblick auf die Lamelle ist eine weitere Unterteilung hinsichtlich ihrer Versagensarten vorzunehmen [Bild 9]:

- Zugbruch der Lamelle ($\sigma_L > \sigma_{Lu}$)
- Ablösen der Betondeckung mit der Lamelle. Infolge eines vertikalen Versatzes an der Trägerunterseite entsteht eine Lamellenumlenkung. Die dadurch entstehenden Umlenkkräfte lösen im Beton große Zugspannungen senkrecht zur Lamelle aus.
- Schubversagen am Lamellenende
- Versagen der Lamellenverankerung

Im Zuge der Bemessung ist natürlich ein entsprechender Sicherheitsabstand gegenüber diesen Versagensformen zu gewährleisten.

4.2 Sicherheitskonzept

Die Erhöhung der Tragfähigkeit (Verstärkung) sollte durch die Forderung beschränkt werden, dass bei Ausfall der CFK-Lamellen durch Brand, Vandalismus, Unfall usw. noch eine Restsicherheit von

$$\gamma_F \geq 1$$

verbleibt. Dies bedeutet, dass die Gebrauchslast bei Vernachlässigung der Verstärkungsmaßnahmen noch vom unverstärkten Bauteil aufgenommen werden kann.

Daraus leitet sich auch die Forderung ab, dass durch die Verstärkungsmaßnahmen der Tragwiderstand nicht mehr als um das Doppelte des unverstärkten Bauteils angehoben werden soll.

$$\eta_{B,EC} = \frac{M_{Sdf}}{M_{Rd0}} \leq 2$$

$\eta_{B,EC}$... Verstärkungsgrad

M_{Sdf} ... einwirkendes Biegemoment im verstärkten Zustand (Belastungsseite)

M_{Rd0} ... aufnehmbares Biegemoment des unverstärkten Querschnittes (Widerstandsseite)

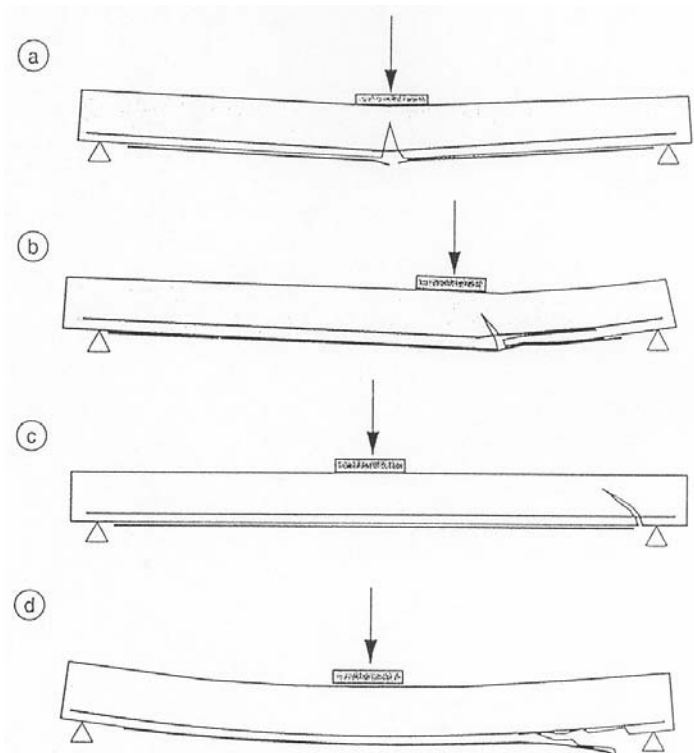


Bild 9 Arten des Lamellenbruches

4.3 Bemessung einer Biegeverstärkung [3]

4.3.1 Schlaff aufgeklebte Lamellen

Ausgehend von dem initialen Dehnungszustand vor bzw. während des Anbringens der Lamellen (unverstärkter Zustand) sind alle Nachweise nach den Önormen B4700 und B4750 für den verstärkten Zustand zu erbringen. Dies betrifft nicht nur die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit (SLS ≡ Spannungs-, Rissbreiten- und Verformungsnachweise), sondern auch die Grenzzustände der Tragsicherheit (ULS). Das Biegeversagen kann entweder im Biegedruckgurt (Druckbruch im Beton) oder im Biegezuggurt (Zugbruch der Lamelle oder der ursprünglichen Bewehrungseinlagen) eintreten [siehe Kap. 4.1].

Darstellung der Dehnungszustände vor und nach der Verstärkung [Bild 10]:

- a) Dehnungszustand vor der Verstärkung = „Vordehnungszustand“
- b) Dehnungszustand nach der Verstärkung (Gebrauchslast)
- c) Dehnungszustand nach der Verstärkung (Traglast)

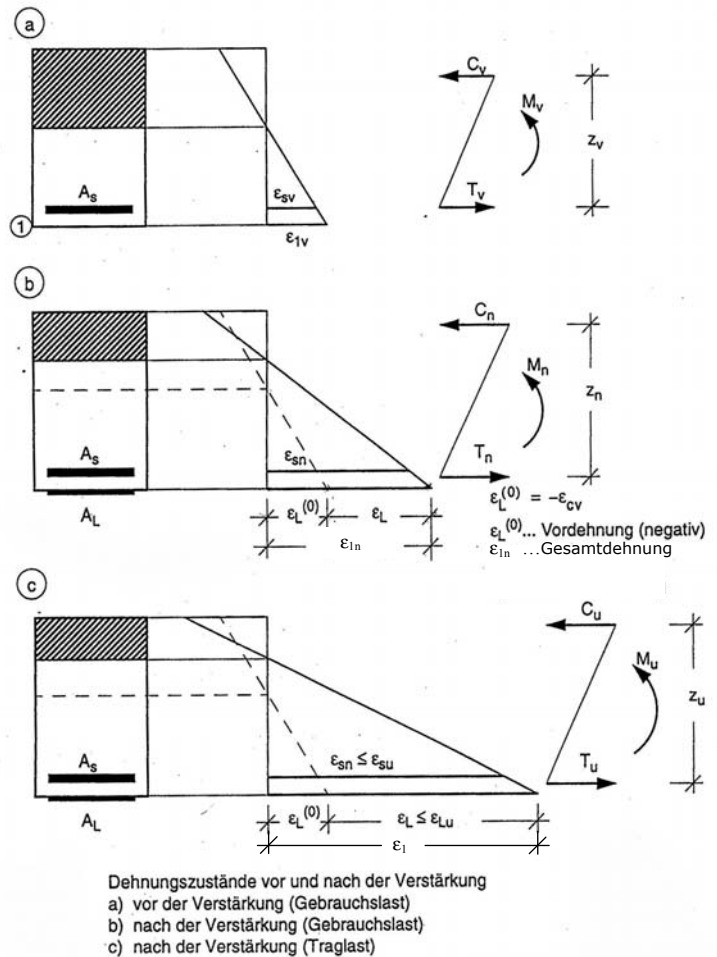


Bild 10 Dehnungszustände vor und nach der Verstärkung

Das Bild 10a zeigt die Einwirkung M_v und den zugehörigen Dehnungszustand im maßgebenden Querschnitt beim Aufkleben der Lamelle (Index: v ... vorher).

Das Bild 10b zeigt den Dehnungszustand nach dem Aufbringen der Lamellenverstärkung unter der nunmehr erhöhten Gebrauchslast M_n (Index: n ... nachher).

Die reaktiven Biegemomente ergeben sich aus:

Vorher:
$$M_v = T_v \cdot z_v$$

Nachher:
$$M_n = T_n \cdot z_n$$

Die Kräfte im Zuggurt lassen sich als Funktion des jeweiligen Dehnungszustandes wie folgt darstellen:

Vorher:
$$T_v = E_S \cdot A_S \cdot \epsilon_{sv}$$

Nachher:
$$T_n = A_S \cdot \sigma_{sn}(\epsilon_{sn}) + A_L \cdot \sigma_L(\epsilon_L)$$

$$\sigma_L = E_L \cdot \epsilon_L = E_L \cdot (\epsilon_1 - |\epsilon_L^{(0)}|)$$

Hierin bedeutet:

- E_S Elastizitätsmodul der Stahlbewehrung
- A_S Querschnittsfläche der Stahlbewehrung
- ϵ_{sv} Stahldehnung des unverstärkten Querschnittes

ε_{Sn}	.....	Stahldehnung des verstärkten Querschnittes
E_L	.....	Elastizitätsmodul der Lamellenbewehrung
ε_L	.....	Spannungserzeugende Dehnung in der Lamelle
σ_L	.....	Spannung in der CFK-Lamelle
$\varepsilon_L^{(0)}$	.....	„initiale Dehnung“ der Lamelle (negativ)
ε_1	.....	Gesamtdehnung in jener Randfaser 1, wo die Lamelle aufgeklebt ist.

Die „initiale Dehnung“ – auch „Vordehnung“ genannt – entspricht jener Dehnung ε_{1V} an der Biegezugfaser die beim Aufkleben der Lamelle vorhanden ist – allerdings mit negativem Vorzeichen.

Die Ermittlung der Vordehnung $\varepsilon_L^{(0)}$ ist das eigentliche Problem der Berechnung. Da die Betonkonstruktion vor der Verstärkungsmaßnahme meist Langzeitwirkungen (Kriechen und Schwinden) ausgesetzt ist, müsste für das Auffinden eines wirklichkeitsnahen Dehnungszustandes streng genommen die Belastungsgeschichte bekannt sein. Außerdem hat man es bei Stahlbetonkonstruktionen meist mit Kriechen im (gerissenen) Zustand II zu tun. Nur wenn die kriecherzeugenden Spannungen unter $0,4 f_{ck}$ bleiben, kann von einem linearen Kriechen ausgegangen werden.

Um insbesondere bei komplexen Strukturen wirklichkeitsnahe Ergebnisse zu erhalten, müssen nichtlineare FE-Methoden Anwendung finden, bei denen die Rissbildung und andere nichtlineare Effekte erfasst werden [Bild 11, Bild 12]. Solche Berechnungen wurden bereits an der TU-Graz mit einem dort entwickelten FE-Programm [9] erfolgreich durchgeführt ([8],[12]). Derartige Methoden werden in absehbarer Zukunft Eingang in die Praxis finden.

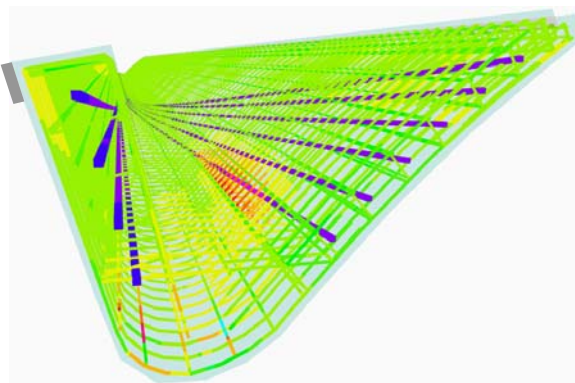


Bild 11 Modell eines Sheddachträgers

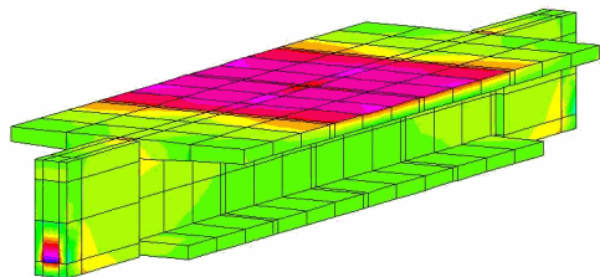


Bild 12 Ergebnis einer FE-Analyse an einem Segmentträger

Für alle Nachweise ist demnach die (spannungserzeugende) Dehnung $\varepsilon_L^{(1)}$ in der Lamelle um die Vordehnung $\varepsilon_L^{(0)}$ kleiner als die Gesamtdehnung ε_{1n} .

Ein wesentliches Kriterium für die Bemessung ist, dass im Grenzzustand der Tragfähigkeit die Stahlbewehrung ins Fließen kommen soll. Andernfalls sind geeignete Maßnahmen zur Verstärkung der Biegedruckzone durchzuführen wie z.B. die Anbringung eines Aufbetones oder Aufkleben von Drucklamellen (meist eine gut verdübelte Stahllamellen). Für den Grenzzustand der Tragfähigkeit in der Biegezugzone ist normalerweise die Bruchdehnung ε_{Lu} oder in Ausnahmefällen die Bruchdehnung der Stahlbewehrung ε_{su} maßgebend. Durch die Duktilität des Bewehrungsstahles, ist normalerweise der Rechenwert der Bruchdehnung der Lamelle ausnützlich. Dies bedeutet andererseits, dass es zu einem gewissen Verlust an Duktilität kommt, weil die Lamelle infolge des linearen Stoffgesetzes eine relativ geringe Bruchdehnung aufweist.

4.3.2 Vorgespannte Lamellen

Schlaff aufgeklebte Lamellen kommen erst durch Einwirkungen unter Spannung, die nach dem Anbringen der Lamellen hinzukommen.

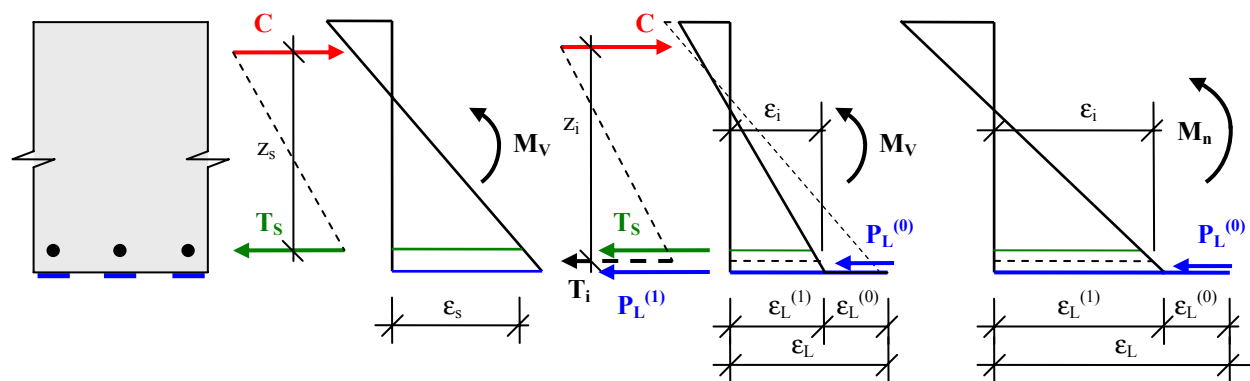
Infolge dessen können zu große Durchbiegungen oder auch zu große Rissbreiten durch nachträgliches Aufkleben von Lamellen nicht mehr rückgängig gemacht werden. Mit schlaff aufgeklebten Lamellen lässt sich in erster Linie die Tragfähigkeit anheben.

Vorgespannte Lamellen dagegen sind in der Lage Durchbiegungen und Rissbreiten zu verringern. Während schlaff aufgeklebte Lamellen relativ zur Gesamtdehnungsebene eine Vordehnung $\epsilon_L^{(0)}$ aufweisen, wird durch das Vorspannen eine positive Vordehnung überlagert – wie dies auch der klassischen Spannbetonbauweise der Fall ist.

Wenn beispielsweise die durch das Vorspannen aufgebrachte Vordehnung betragsmäßig der Dehnung ϵ_{1v} [Bild 10a] entspricht, verhält sich die Lamelle gleich, wie wenn sie bereits auf das unverformte (spannungsfreie) Tragwerk aufgeklebt worden wäre. Das heißt sie wirkt dann wie eine am Biegezugrand einbetonierte schlaffe Bewehrung aus Betonstahl.

Um eine im Vergleich zu einem äquivalent bewehrten schlaff bewehrtem Tragelement reduzierte Verformung (und Rissbreite) zu erreichen, muss man eine entsprechend hohe Vordehnung $\epsilon_L^{(0)}$ aufbringen [Bild 13].

Die größtmögliche Vordehnung ist durch den Grenzzustand der Tragfähigkeit limitiert, wo der Rechenwert für die Bruchdehnung einzuhalten ist.



a) Vor dem Anspannen

$$T_s = E_s \cdot A_s \cdot \epsilon_s$$

$$M_v = T_s \cdot z_s$$

b) Vorspannvorgang

$$P_L = P_L^{(0)} + P_L^{(1)}$$

$$P_L = E_L \cdot A_L \cdot (\epsilon_L^{(0)} + \epsilon_L^{(1)})$$

$$T_i = E_s \cdot \left(A_s + \frac{E_L}{E_s} \cdot A_L \right) \cdot \epsilon_i$$

$$M_v = T_i \cdot z_i$$

c) nach der Lasterhöhung

$$M_n > M_v$$

Bild 13 Lamellenvorspannung (schematisch)

T_s	.....	Stahlzugkraft vor dem Anspannen
E_s	.....	Elastizitätsmodul der Stahlbewehrung
A_s	.....	Fläche der Stahlbewehrung
z_s	.....	Innerer Hebelsarm vor dem Vorspannen
ϵ_s	.....	Stahldehnung des unverstärkten, nicht vorgespannten Querschnittes
$P_L^{(0)}$	.....	Vorspannkraft der Lamelle

$P_L^{(1)}$	.....	Kraft in der Lamelle zufolge der Lastdehnung
P_L	.....	Gesamtkraft in der Lamelle
$\varepsilon_L^{(0)}$	.....	Vordehnung der CFK-Lamelle
$\varepsilon_L^{(1)}$	.....	Lastdehnung der Lamelle
ε_L	.....	Gesamtdehnung der Lamelle
E_L	.....	Elastizitätsmodul der CFK-Lamelle
A_L	.....	Querschnittsfläche der vorgespannten Lamellen
T_i	.....	Gesamtzugkraft der ideellen Bewehrung nach dem Anspannen der Lamelle
z_i	.....	Innerer Hebelsarm nach dem Vorspannen

4.4 Bemessung einer Querkraftverstärkung [3]

Die Erhöhung der Biegetragfähigkeit einer Tragstruktur erfordert auch eine adäquate Erhöhung der Querkrafttragfähigkeit.

Die CFK-Lamellen bilden einen zusätzlichen Zuggurt, der mit dem Druckgurt kraftschlüssig zu verbinden ist, damit die aus der Querkraft resultierende Änderung der Gurtkräfte übertragen werden kann. Zur Beschreibung des Tragverhaltens kann die Fachwerkanalogie [Bild 14] herangezogen werden

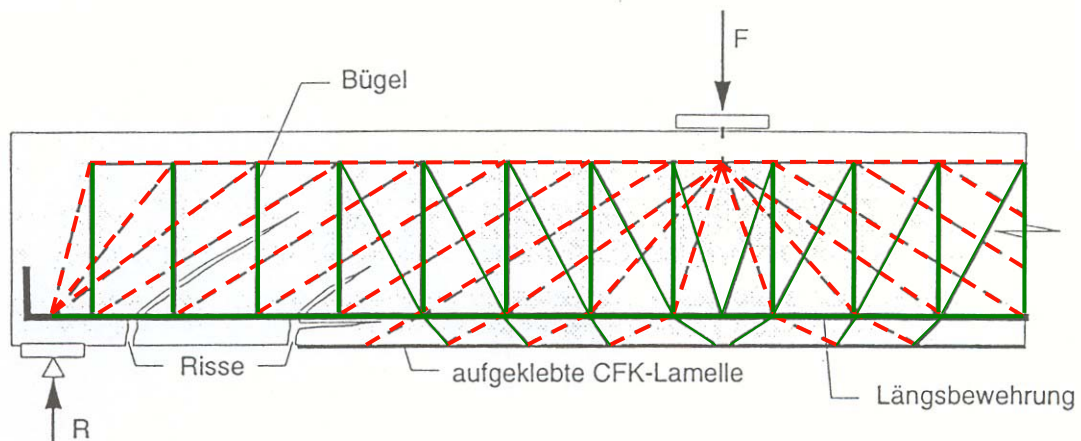


Bild 14 Fachwerkanalogie

Bei der Beurteilung des Schubtragverhaltens von Bauteilen ist vorweg zwischen Bauteilen ohne rechnerisch erforderliche Schubbewehrung (vorwiegend Platten- und Schalenträgerwerke) und Bauteilen mit erforderlicher Schubbewehrung (Stabträgerwerke) zu unterscheiden.

4.4.1 Bauteile ohne Schubbewehrung

- 1) Die größte Bemessungsquerkraft V_{Sd} nach den Verstärkungen ist kleiner oder gleich der ohne Schubbewehrung aufnehmbaren Querkraft V_{Rd1} nach Önorm B4700 oder auch EC2.

$$V_{Sd} \leq V_{Rd1}$$

In diesem Fall kann auf eine Schubbewehrung verzichtet werden.

- 2) Nach der Verstärkung überschreitet die einwirkende Querkraft V_{Sd} die ohne Schubbewehrung aufnehmbare Querkraft



Bild 15 Querkraftverstärkung durch Umschließung des Steges

V_{Rd1} im Bereich zwischen dem Lamellenende und dem Auflager. In diesem Fall ist eine Schubbewehrung zu ergänzen. Weiters ist nachzuweisen, dass die am Auflager vorhandene Zugkraft aus der Fachwerksanalogie durch die Stahllängsbewehrung aufnehmbar und über dem Auflager entsprechend verankert ist.

- 3) Nach der Verstärkung überschreitet die Bemessungsquerkraft V_{Sd} auch im Bereich der Lamellenverstärkung die ohne Schubbewehrung aufnehmbare Querkraft V_{Rd1} .

$$V_{Sd} > V_{Rd1}$$

In diesem Fall ist eine Schubbewehrung erforderlich. Sie ist entsprechend der Önorm B4700 zu bemessen und muss die Lamellenbewehrung umfassen.

4.4.2 Bauteile mit Schubbewehrung

Hier ist zwischen der Schubtragwirkung des bügelbewehrten Steges und der Schubtragwirkung in der Betonüberdeckung zwischen den aufgeklebten Lamellen und dem Bügelkorb zu unterscheiden:

- 1) Die Bügelbewehrung reicht nicht aus, um die erhöhte Bemessungsquerkraft nach der Lamellenverstärkung aufzunehmen. In diesem Falle ist eine zusätzliche Schubbewehrung zwingend erforderlich, die die Lamellenverstärkung umschließt und auch den Biegedruckgurt umfasst [Bild 15]. Diese zusätzliche Bügelbewehrung wird für den Querkraftsanteil ΔV_{Sd} bemessen und vorzugsweise im Form von CFK-Sheets aufgeklebt [Bild 16].

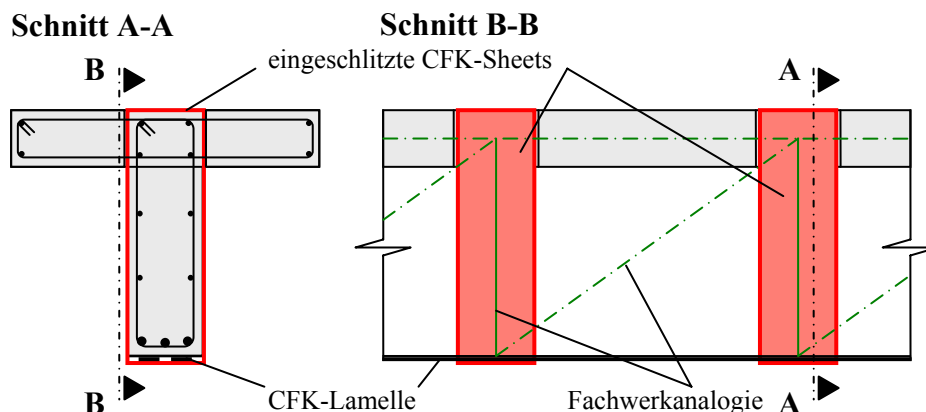


Bild 16 Bügelverstärkung mit CFK-Sheets (schematisch)

- 2) Die Bügelbewehrung reicht aus, um die die Bemessungsquerkraft nach der Verstärkung aufzunehmen. (Eventuell kann man auch durch die Änderung der Druckstrebenneigung gemäß Önorm B4700 oder EC2 noch Tragreserven in den Bügeln aktivieren. Die Erhöhung der Längskraft im Biegezuggurt durch diese Winkeländerung ist in Rechnung zu stellen.)

In diesem Falle ist noch zusätzlich die Querkrafttragfähigkeit der Betondeckung nachzuweisen:

$$\Delta V_{Sd} \leq f_{ct,d} \cdot b_w \cdot z \cdot \tan \beta$$

$$\Delta V_{Sd} = V_{Sd,n} - V_{Sd,v}$$

Hierin bedeuten:

ΔV_{Sd}	.....	Querkraftsanteil, der den CFK-Lamellen zuzuordnen ist
$V_{Sd,v}$	.....	maßgebende Querkraft vor dem Aufbringen der Verstärkung
$V_{Sd,n}$	.....	maßgebende Querkraft nach der Verstärkung des Bauteiles
$f_{ct,d}$	.....	Bemessungswert der Betonzugfestigkeit
b_w	.....	Breite des Steges, der zur Übertragung der Schubspannung zwischen den Lamellen und dem Bügelkorb zur Verfügung steht
z	.....	innere Hebelsarm im Zustand II: Abstand zwischen CFK-Lamellen und Druckmittelpunkt
β	.....	Druckstrebenneigungswinkel nach Önorm B4700 $0,6 \leq \tan \beta \leq 1,6$

Die Oberflächenzugfestigkeit $f_{ct,k}$ des Betons ist vor Ort zu prüfen. Sie muss mindestens $1,5 \text{ N/mm}^2$ betragen.

Für den Rechenwert der Betonzugfestigkeit $f_{ct,d}$ gilt:

$$f_{ct,d} = \frac{f_{ct,k}}{\gamma_c} = \frac{f_{ct,k}}{1,5} \leq 3,0 \text{ N/mm}^2$$

Im Falle, dass ΔV_{Sd} die obige Bedingung nicht erfüllt, ist die Lamelle mit der Betondeckung an den vorhandenen Bügelkorb kraftschlüssig anzuschließen.

Dies wird beispielsweise mit CFK-sheets erreicht, die die Lamellen und den Steg umschließen (einfassen) [Bild 17]. In diesem Fall ist es nicht erforderlich, auch den Biegedruckgurt mit den Sheets zu umfassen.

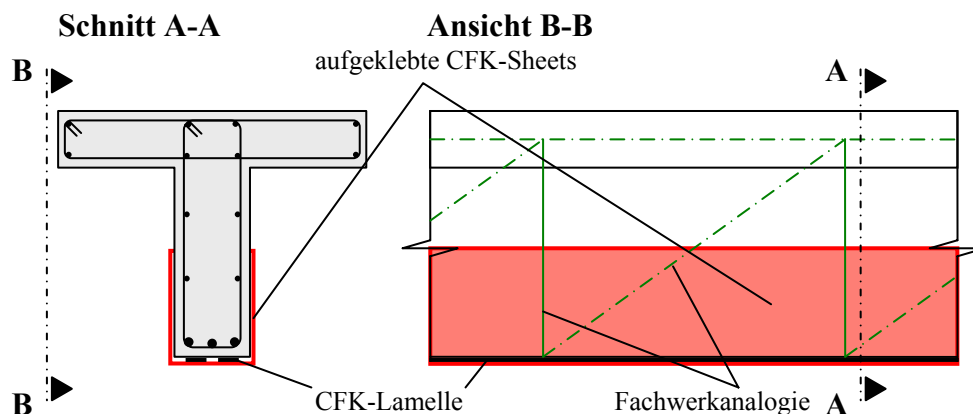


Bild 17 Schubverstärkung im Bereich der Betondeckung (schematisch)

5 Schlussbemerkung

CFK-Lamellen und CFK-sheets bieten eine moderne und leistungsfähige Alternative zu älteren Verstärkungs- und Sanierungsmethoden, die trotz höherer Materialkosten insgesamt durchaus wirtschaftlich einsetzbar sind.

Die Verstärkung durch aufgeklebte, schlaffe CFK-Bewehrungen erhöht in erster Linie die Tragfähigkeit. Man kann weder vorhandene Rissbreiten noch vorhandene Verformungen rückgängig machen.

Die gute Verbundwirkung der Klebeverbindung wirkt aber rissbreitenbeschränkend für die weitere Rissbildung und Rissbreitenentwicklung.

Es hat sich gezeigt, dass Durchbiegungen kaum dadurch rückgängig gemacht werden können, dass

man das Bauteil temporär unterstellt bzw. entsprechend anhebt, bevor man eine schlaffe Lamellenverstärkung anbringt. Die beste Möglichkeit vorhandene Durchbiegungen zu reduzieren, besteht im Vorspannen der Lamellen.

Leistungsfähige Vorspannsysteme für CFK-Lamellen wurden in den letzten Jahren entwickelt. Sie gaben dieser Verstärkungsmethode entscheidende Impulse, weil nunmehr Maßnahmen gegen zu große Verformungen getroffen werden können.

6 Literatur

- [1] *Nürnberger Ulf: Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen, Bauverlag GmbH. Wiesbaden und Berlin 1995*
- [2] *Pichler Robert: Ertüchtigung eines durch Umwelteinflüsse geschädigten Stahlbetongeschoßbaues, Diplomarbeit am Institut für Betonbau / TU Graz, September 2000*
- [3] *Sparowitz Lutz: Gutachterliche Stellungnahme über die Eignung des Sika CarboDur-Systems und des Klebers Sikadur 30 für die Verstärkung von Tragwerken mittels CFK-Lamellen, 1998*
- [4] *Martin Deuring: Bemessung vom mit CFK-Lamellen verstärkten Stahlbetonträgern, Beton- und Stahlbetonbau, 1995*
- [5] *Meier Urs: Instandsetzung von Bauwerken mit kohlenstoffverstärkten Kunststoffen, Beton- und Stahlbetonbau, 1995*
- [6] *Haasis Jürgen: Kunststoffmodifizierte Zementmörtel (SPCC), Beton- und Stahlbetonbau, 1995*
- [7] *Fa. S&P: Bemessungsgrundlagen für S&P FRP Systeme*
- [8] *Handel Christoph: Traglastberechnung für ein schalenförmiges Sheddach, Diplomarbeit am Institut für Betonbau, 2002*
- [9] *Hartl Helmut: "Development of a 3D Finite Element Tool based on Continuum Mechanics for Reinforced Concrete Structures and its Application to Soil Structure Interaction", Dissertation am Institut für Betonbau / TU Graz, 2002*
- [10] *Sparowitz Lutz, Hartl Helmut: "A10 Tauernautobahn – Brückenverstärkung - Numerische Untersuchung des Tragverhaltens nachträglich ergänzter Stahlbetonplatten", Abschlussbericht, 2002*
- [11] *Katzenberger Helmut: „Schubprobleme beim Verbund Fertigteilbeton – Ortbeton“, Dissertation am Institut für Betonbau / TU Graz, 2001*
- [12] *Kolar Kurt: „Numerische Simulation eines Belastungsversuches an einem Brückenträger mit Segmentbauweise“, Diplomarbeit am Institut für Betonbau / TU Graz, 2002*