

# Lamellenverstärkte Stahlbetonträger: experimentelle Erfahrung, Analyse, Bemessung

Tomaž Ulaga

**Die Verwendung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststofflamellen (CFK-Lamellen) für die Verstärkung von Betontragwerken gilt heute als Stand der Technik. Das Verhalten solcher Strukturen im Bruchzustand und insbesondere die diesbezügliche adäquate Berücksichtigung bei der Bemessung sind allerdings noch nicht vollständig geklärt.**

**Anhand experimenteller Untersuchungen wird erläutert, welche Erfahrungen heute vorliegen. Mit einer einfachen Querschnittsanalyse ist es möglich, Erklärungen für diese Erfahrungen zu finden. Das Bemessungskonzept der bald in Kraft tretenden Vornorm SIA 166 «Klebebewehrung» beruht auf derart gewonnenen Erkenntnissen.**

## Experimentelle Erfahrung

Für die Untersuchung des Verhaltens von lamellenverstärkten Stahlbetonträgern wurden in den vergangenen Jahren sehr viele Biegeversuche durchgeführt. Dabei konnte erkannt werden, dass verschiedene Versagensarten möglich sind: Festigkeitsversagen in der Druck- oder Zugzone einerseits sowie das frühzeitige Abschälen der Lamelle andererseits. Bei Verwendung marktüblicher Lamellen und bei deren gängiger Anordnung wird im Allgemeinen die letzte dieser Versagensvarianten massgebend.

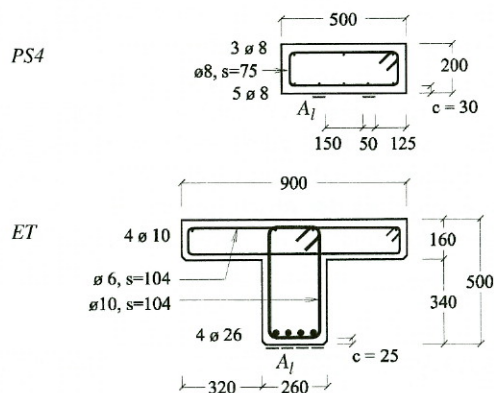
Der Abschälvorgang zeichnet sich dadurch aus, dass er meist nur mit geringer Vorankündigung eintritt. Es folgt ein äusserst schnelles Ablösen der Lamelle, so dass der genaue Ablauf kaum zu erfassen ist. Bezüglich Abschälursprung und -ursache können daher oft nur Vermutungen angestellt werden: Einige Autoren vermuten eine Spannungskonzentration im Verankerungsbereich als Ursache, andere einen Rissuferversatz im Querkraftbereich oder einen Verträglichkeitskonflikt im Biegerissbereich, [1, 2, 4, 11].

Um genauere Kenntnisse über das Abschälen zu erhalten, wurden die an der EMPA Dübendorf untersuchten Träger PS4 und ET, Bild 1, mit einer besonderen Messvorrichtung versehen, [7, 8]: Mit stromleitfähiger Silberfarbe («Silver-

paint») wurden acht Streifen (S1...S8) quer über die Lamellen auf der Trägerunterseite gemalt. Die Leitfähigkeit der einzelnen Streifen konnte mit Hilfe eines Oszilloskops mit einer Abtastrate von  $10^5$  Hz überwacht werden. Wenn nun eine Rissebene die Lamelle vom Untergrund trennt, wird der Stromfluss in den einzelnen Streifen entsprechend dem Ablauf der Rissfortpflanzung unterbrochen.

Das Kraft-Verformungsverhalten der Träger PS4 und ET ist in Bild 2 dargestellt. Wie erwartet kam es zum Versagen durch Abschälen der Lamellen. Die Versagensebene lag vollständig im oberflächennahen Beton. Mit der Silverpaintmethode konnte festgestellt werden, dass im Fall des Trägers PS4 die Streifen in der Reihenfolge S8-S7-S6-S3-S4 versagten (der Streifen S5 versagte aus ungeklärten Gründen früher

## Lamellenverstärkte Stahlbetonträger



### Spannweiten

PS4  $l = 2.1$  m

ET  $l = 6.0$  m

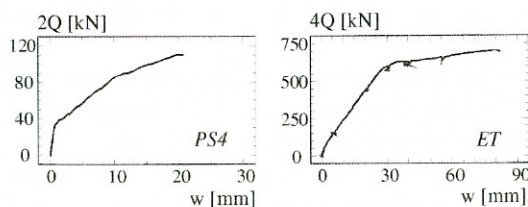
### Werkstoffkennwerte (für PS4 und ET)

Beton  $f_c = 26$  MPa,  $f_{ct} = 2.2$  MPa,  $E_c = 35$  GPa

Stahl  $f_y = 500$  MPa,  $E_s = 200$  MPa

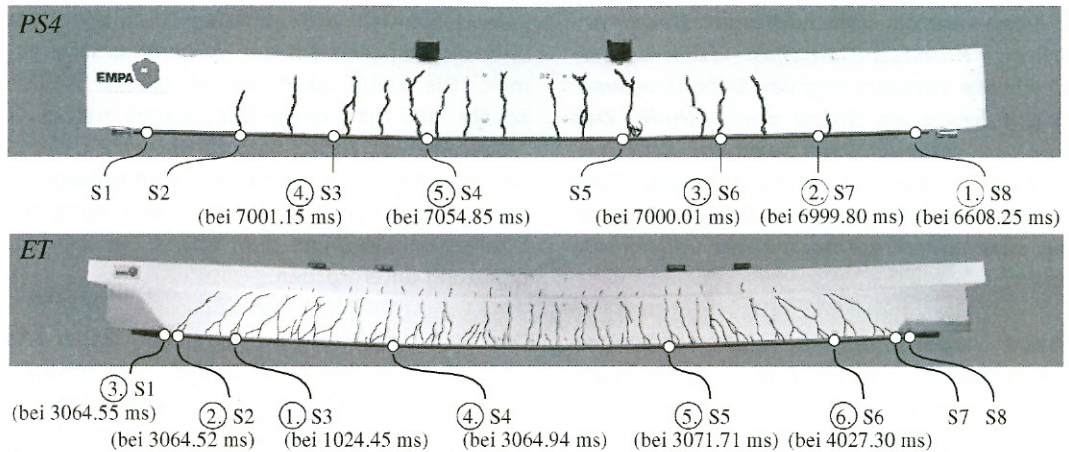
CFK  $t_l = 1.2$  mm,  $b_l = 50$  mm (pro Lamelle),  $E_l = 130$  GPa

**Bild 1:** Querschnitte (Masse in [mm]) und Werkstoffkennwerte der Träger PS4 und ET



**Bild 2:** Kraft-Verformungsdiagramme der Träger PS4 und ET

**Lamellenverstärkte Stahlbetonträger**



**Bild 3:** Versagensreihenfolge der Silverpaintstreifen S1...S8 in den Versuchen an PS4 und ET

und wird daher nicht berücksichtigt), Bild 3. Demnach begann die Lamellenablösung beim Auflager «rechts» und wanderte von dort aus nach «links». Beim Versuch ET konnte die Versagensreihenfolge S3-S2-S1-S4-S5-S6 beobachtet werden. Hier begann der Vorgang im Bereich der Krafteinleitung «links», die Rissfront wanderte zuerst zum näheren Auflager «links» und schliesslich zum entfernteren Auflager «rechts». Grundsätzlich kann also festgestellt werden, dass der Abschälursprung bei den Trägern PS4 und ET an unterschiedlichen Stellen lag.

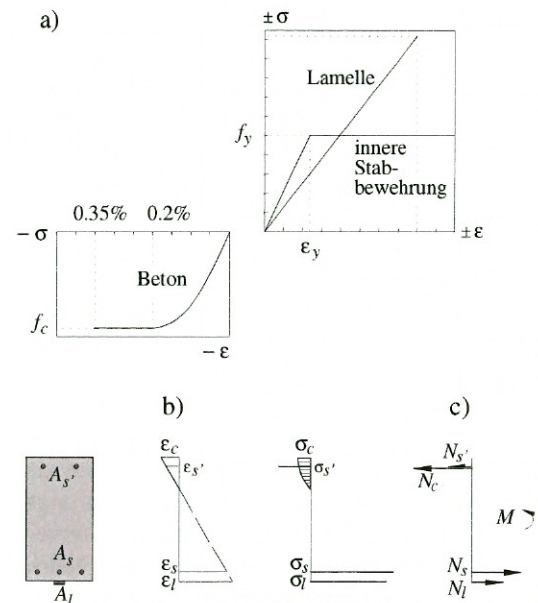
**Analyse**

Nachdem auf experimentelle Weise der Abschälvorgang und damit insbesondere auch der Abschälursprung eruiert wurden, soll mit einer Querschnittsanalyse eine Erklärung für die festgestellten Beobachtungen gefunden werden.

Zu diesem Zweck werden ausschliesslich solche Hilfsmittel und Annahmen verwendet, wie sie für die Behandlung von Stabtragwerken üblich sind:

- Das Verhalten der Werkstoffe wird mit Hilfe von idealisierten Stoffgesetzen beschrieben, Bild 4(a).
- Die Verträglichkeit im Querschnitt lässt sich mit der Annahme über das Ebenbleiben der Querschnitte beschreiben, Bild 4(b).
- Die inneren und äusseren Kräfte stehen im Gleichgewicht zueinander, Bild 4(c).

Mit diesen Grundlagen können die inneren Dehnungen, Spannungen und Kräfte berechnet werden, wenn ein äusseres Biegemoment,  $M$ , gegeben ist (im Rahmen der gegenwärtigen Betrachtung wird die Querkraft vernachlässigt). Das Biegemoment lässt sich auf triviale Weise bestimmen, da es sich bei den betrachteten Systemen um statisch bestimmte Strukturen handelt.



**Bild 4:** Grundlagen der Querschnittsanalyse: (a) Stoffgesetze; (b) Ebenbleiben der Querschnitte; (c) Gleichgewicht

**Lamellenverstärkte Stahlbetonträger**

Bild 5(a) zeigt die halben Träger *PS4* und *ET* unter Einwirkung von Eigenlast und der Kraft, bei der im Versuch das Abschälen der Lamellen eintrat. Das Diagramm in Bild 5(b) zeigt den Verlauf der mittleren Lamellenzugkraft,  $F_l$  (eine umfassendere Darstellung von Zustandsdiagrammen ist in [7] enthalten). «Mittlere» heisst, dass die im Bereich der Risse auftretenden höheren Werte nicht berücksichtigt werden. Diese lassen sich mit Hilfe des Verbundbeiwertes,  $\kappa_l$ , entsprechend (1) abschätzen.  $\kappa_l$  kann Werte im Bereich von 0 bis 1 annehmen, wobei Beträge um 0 einen sehr guten Verbund bedeuten, Beträge um 1 einen schwachen bzw. stark geschädigten.

$$\kappa_l = \frac{F_l}{F_l''} \quad (1)$$

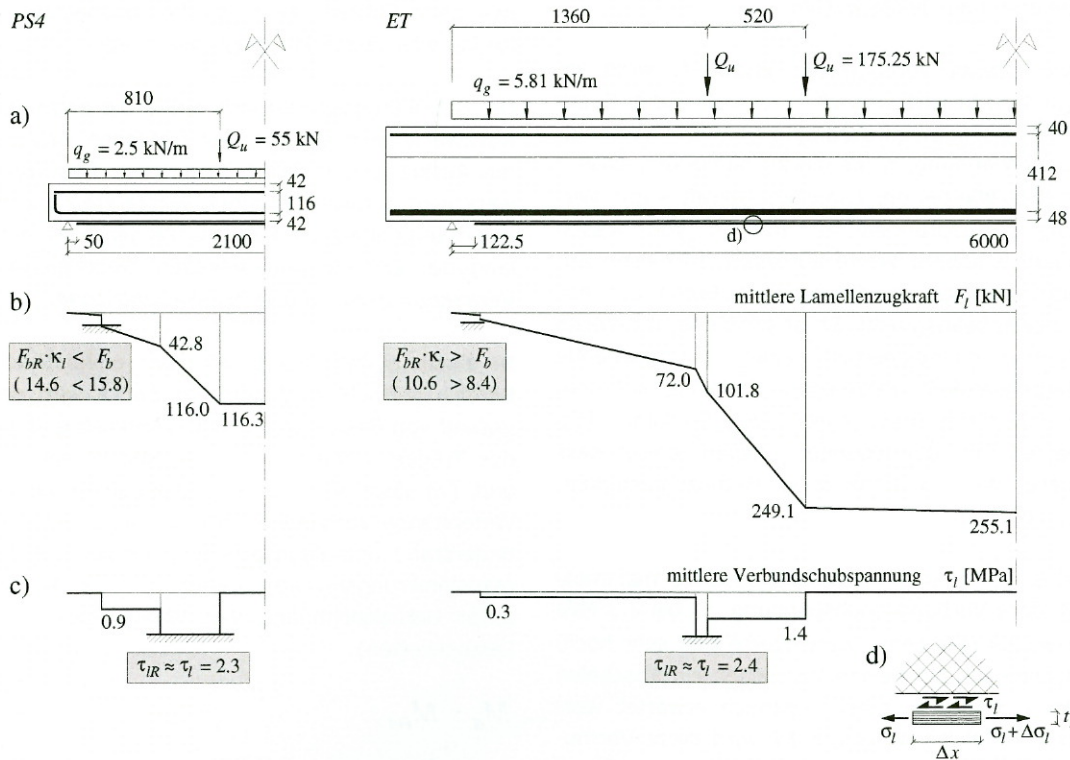
Aus dem Schnittkörperdiagramm in Bild 5(d) folgt, dass in den Zonen ändernder Lamellenzugkraft eine Verbundschubspannung,  $\tau_l$ , ent-

sprechend (2) herrscht. Auf diese Weise kann deren Verlauf in Bild 5(c) ermittelt werden.

$$\tau_l = \frac{\Delta F_l}{\Delta x} \cdot \frac{t_l}{A_l} \quad (2)$$

**Widerstände**

Für die Bestimmung des Verankerungswiderstands,  $F_{bR}$ , eignet sich die Beziehung (3), die in der Dissertation von Holzenkämpfer, [3], hergeleitet wird. Mit dieser Formel lässt sich die Kraft berechnen, die im ungerissenen Trägerbereich, d.h. jenseits des äussersten Risses, verankert werden kann. Um den derart ermittelten Widerstand mit dem mittleren Kraftverlauf in Bild 5(b) vergleichen zu können, muss er um den Verbundkoeffizienten,  $\kappa_l$ , abgemindert werden, (4) bzw. 5). Mit dem Wert  $\kappa_l = 0.4$  wird



**Bild 5:** Zustand der Träger *PS4* und *ET* zum Zeitpunkt des Versagens: (a) Geometrie und Kräfte; (b) Verlauf der mittleren Lamellenzugkraft; (c) Verlauf der mittleren Verbundschubspannung; (d) Schnittkörperdiagramm mit Verbundschubspannung

## Lamellenverstärkte Stahlbetonträger

angenommen, dass im Trägerrandbereich gute Verbundverhältnisse herrschen. Die Werte der Verbundparameter  $G_b$  und  $\tau_{11}$  entsprechen experimentell abgesicherten Schätzungen und werden an dieser Stelle nicht genauer erläutert.

$$F_{bR} = b_l \cdot \sqrt{2 \cdot G_b \cdot E_l \cdot t_l} \cdot \tanh \sqrt{\frac{\tau_{11}^2 \cdot l_b^2}{2 \cdot G_b \cdot E_l \cdot t_l}} \quad (3)$$

$$PS4: \quad F_{bR \cdot \kappa_l} = 36.6 \text{ kN} \cdot 0.4 = 14.6 \text{ kN} \quad (4)$$

$$(G_b = 0.5 \text{ N/mm}; \quad \tau_{11} = 5 \text{ MPa}; \quad l_b = 132 \text{ mm}; \\ b_l = 100 \text{ mm}; \quad t_l = 1.2 \text{ mm}; \quad E_l = 130 \text{ GPa})$$

$$ET: \quad F_{bR \cdot \kappa_l} = 26.4 \text{ kN} \cdot 0.4 = 10.6 \text{ kN} \quad (5)$$

$$(G_b = 0.5 \text{ N/mm}; \quad \tau_{11} = 5 \text{ MPa}; \quad l_b = 27.5 \text{ mm}; \\ b_l = 200 \text{ mm}; \quad t_l = 1.2 \text{ mm}; \quad E_l = 130 \text{ GPa})$$

Die in Bild 5(b) dargestellte Gegenüberstellung von Beanspruchung und Widerstand zeigt, dass bei Träger *PS4* der Verankerungswiderstand entsprechend (4) überschritten ist. Dies bestätigt die experimentelle Erkenntnis, wonach in diesem Fall das Abschälen im Bereich der Verankerung ausgelöst wurde.

Wie bereits vorangehend erläutert, wirkt im Querkraftbereich zwischen Lamelle und Beton eine gleichgewichtsbedingte mittlere Verbundschubspannung,  $\tau_l$ . Es gilt zu bemerken, dass – ähnlich wie bei der Lamellenzugkraft – aus Verträglichkeitsgründen im Bereich von Rissen deutlich höhere Werte auftreten. In diesen Zonen wird der oberflächennahe Beton auf Abscheren beansprucht. Es ist schwierig, für diesen Beanspruchungsmodus eine entsprechende Betonfestigkeit festzulegen. Einfache, auf dem modifizierten Bruchgesetz nach Coulomb, [5], basierende Überlegungen zeigen aber, dass dieser Wert im Bereich der Betonzugfestigkeit,  $f_{ct}$ , liegt, [9].

In Bild 5(c) ist festgehalten, dass die maximale mittlere Verbundschubspannung,  $\tau_l$ , bei 2.3 MPa bzw. 2.4 MPa liegt. Diese Werte sind sehr hoch, daher kann bei beiden Versuchen ein Abschälen der Lamellen in diesem Bereich erwartet werden. Im Fall von Träger *ET* wird diese Vermutung durch die experimentell gewonnene Erkenntnis bestätigt: Der Abschälursprung lag an jener Stelle, an der die grösste Verbundschubspannung herrschte.

## Bemessung

Schon in den 1970er-Jahren wurden Stahlbetontragwerke durch auf Oberflächen aufgeklebte Stahllamellen verstärkt. Das Verfahren fand viele Anwendungen und erlebte einen neuen Aufschwung, als in den 80er- und 90er-Jahren die Grundlagen für den Einsatz von CFK-Lamellen geschaffen wurden. Massgebend für die gesamte Entwicklung waren Forschungsarbeiten, die in der Schweiz realisiert wurden. Hier ist auch eine Vielzahl von Anwendungen zu finden, was insofern erstaunlich ist, als dass bis heute kein Normdokument existiert, das diesen Ingenieurbereich abdeckt. Um dieses Manko zu beheben, wurde 1999 die Arbeitsgruppe SIA 162-8 gegründet. Sie erhielt die Aufgabe, eine technische Norm zum Thema Klebebewehrung zu verfassen. Das Dokument tritt voraussichtlich 2003 in Kraft und trägt die Bezeichnung «Vornorm SIA 166, Klebebewehrung», [10].

Im Folgenden wird ein Ausschnitt aus dem 2. Gesamtentwurf dieser Vornorm vorgestellt, [6]. Es handelt sich um den Teil, der das Vorgehen beim Führen der Tragsicherheitsnachweise für lamellenverstärkte Biegeträger regelt.

Die Betrachtungssystematik sowie die einzelnen Nachweise sind anhand des einfachen Balkens mit Auskragung in Bild 6 dargestellt. Das Tragwerk wird unterteilt in einen *verstärkten* und in einen *unverstärkten* Bereich. Ferner wird entlang der Lamelle unterschieden zwischen den *Verankerungszonen* und der *Wirkungszone*.

In einem ersten Schritt wird der unverstärkte Bereich betrachtet. Zu diesem Zweck wird der Verlauf von *Biegemoment* und *Querkraft* entlang des Trägers ermittelt. Mit den Nachweisen (6) und (7) lässt sich zeigen, dass ausreichende Widerstände vorhanden sind (der Vergleich von Widerstand und Beanspruchung erfolgt auf Dimensionierungsniveau, Index *d*, das heisst, unter Berücksichtigung von Widerstands- und Lastbeiwerten).

$$M_d \leq M_{Rd} \quad (6)$$

$$V_d \leq V_{Rd} \quad (7)$$

**Lamellenverstärkte Stahlbetonträger**

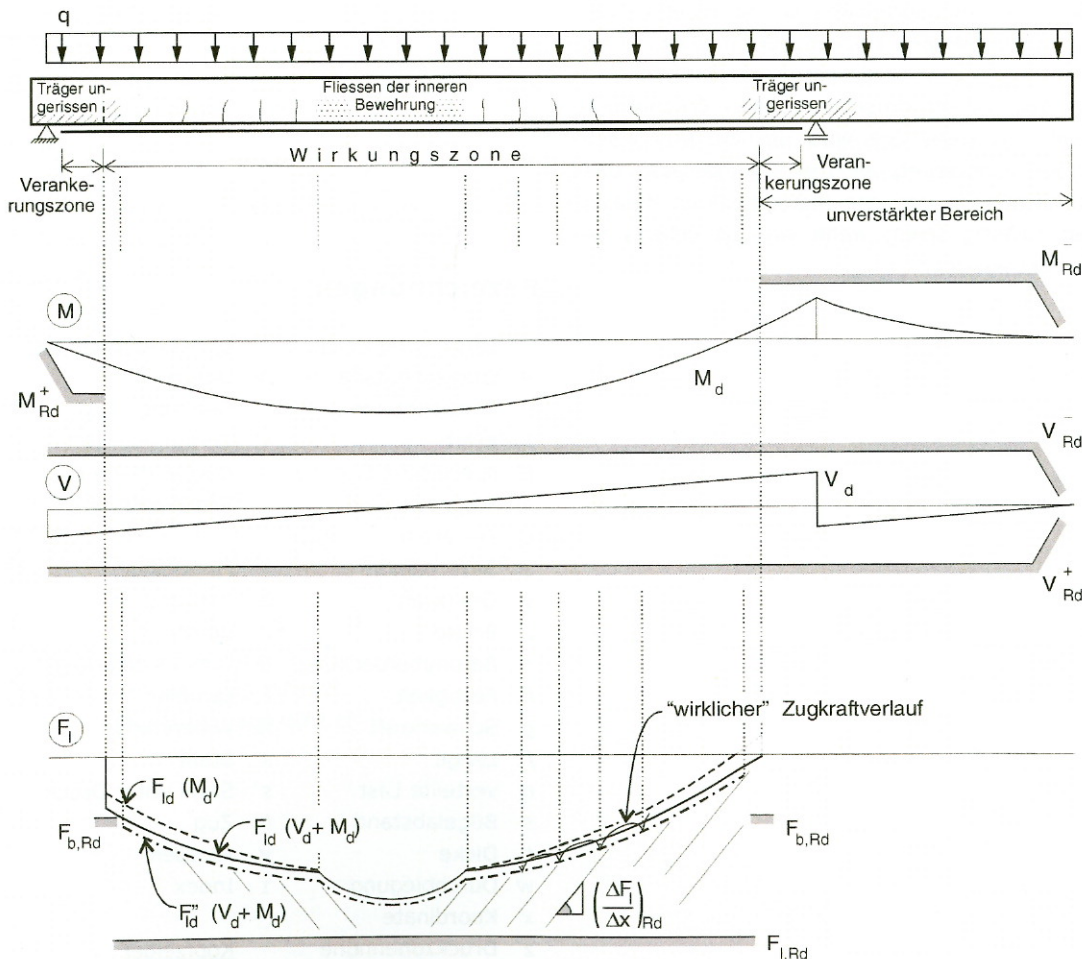
Als Nächstes wird der verstärkte Bereich der Struktur untersucht. Die hierbei empfohlenen Nachweise stehen in direktem Zusammenhang mit den zuvor geschilderten Erkenntnissen bezüglich Abschälen der Lamellen. Das Konzept verlangt, dass zuerst der Zugkraftverlauf in der Lamelle entlang der Trägerachse ermittelt wird.

Die an den Enden der Wirkungszone herrschende Kraft muss von den angrenzenden Verankerungszonen aufgenommen werden. Die Berechnung des *Verankerungswiderstands* beruht auf Formel (3) bzw. auf analogen Beziehungen. Wiederum erfolgt die Gegenüberstellung von Widerstand und Beanspruchung auf Dimensionierungsniveau mit Nachweis (8).

$$F_{b,d} \leq F_{b,Rd} \tag{8}$$

Am Ort der grössten Lamellenzugkraft sind zwei Tragsicherheitsaspekte zu kontrollieren. Einerseits kann an dieser Stelle die Festigkeit der Klebebewehrung massgebend werden, andererseits besteht die Gefahr, dass in einem Rissbereich ein Konflikt der Verformungsverträglichkeit entsteht, der zum Abschälen der Lamellen führt. Beide Kriterien können durch eine Dehnungsbeschränkung erfasst werden, das strengere der beiden diktiert den Betrag des zugehörigen Widerstands,  $F_{l,Rd}$ . Auf diese Weise folgt Nachweis (9).

$$F''_{l,d} \leq F_{l,Rd} \tag{9}$$



**Bild 6:** Tragsicherheitsnachweise nach [6]

### Lamellenverstärkte Stahlbetonträger

Mit dem Nachweis der *Zugkraftänderung* wird schliesslich sichergestellt, dass kein Abschälen infolge Überschreitung der aufnehmbaren Verbundschubspannungen auftritt. Letztere werden nicht explizit berechnet (wie in Bild 5(c) dargestellt), stattdessen erfolgt eine Kontrolle der Steigung des Zugkraftverlaufs gemäss Nachweis (10).

$$\left( \frac{\Delta F_{I,d}}{\Delta x} \right) \leq \left( \frac{\Delta F_I}{\Delta x} \right)_{Rd} \quad (10)$$

Entsprechend den vorangehenden Ausführungen ist die Tragsicherheit eines lamellenverstärkten Biegeträgers erwiesen, wenn die Nachweise (6)...(10) erbracht worden sind.

Die Möglichkeiten von faserverstärkten Kunststoffen für die Verstärkung von Ingenieurtragwerken sind zurzeit weltweit Gegenstand unzähliger Forschungsprojekte. Es ist zu erwarten, dass neues Wissen entsteht und möglicherweise auch bisheriges verdrängt wird. Die Vornorm SIA 166 soll die Umsetzung neuer Erkenntnisse nicht behindern. Sie wird deshalb von einem Artikel eingeleitet, der explizit besagt, dass Abweichungen von den festgehaltenen Weisungen zulässig seien, wenn sie ausreichend begründet werden.

### Bezeichnungen

<u>Lateinische Zeichen</u>		<u>Griechische Zeichen</u>	
A	Querschnittsfläche	$\Delta$	Differenz
E	Elastizitätsmodul	$\varepsilon$	Dehnung
F	Kraft	$\kappa$	Verbundbeiwert
G	spezifische Energie	$\sigma$	Normalspannung
M	Biegemoment	$\tau$	Schubspannung
Q	Einzellast		
S	Silverpaintstreifen		<u>Fusszeiger</u>
V	Querkraft	b	Verbund
b	Breite	c	Beton
c	Betonüberdeckung	d	Dimensionierung
f	Festigkeit	l	Lamelle
g	Schwerkraft	R	Widerstand
l	Länge	s	Stahl
q	verteilte Last	s'	Stahl unter Druck
s	Bügelabstand	t	Zug
t	Dicke	y	Fliessen
w	Durchbiegung	1	Index
x	Koordinate		
z	Druckzonenhöhe		<u>Kopfzeiger</u>
		"	im Riss