

Forschungsbericht

Thema des Forschungsvorhabens: Zum Nachweis der Zugkraftdeckung biegebeanspruchter Stahlbetonbauteile mit nachträglich aufgeklebter Bewehrung

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik
Kolonnenstraße 30L
10829 Berlin

Datum des Berichts: 29. 9. 2004

Der Forschungsbericht umfaßt 21 Textseiten, 3 Abbildungen und 1 Anlage

Inhaltsverzeichnis

1	Vorbemerkungen	3
2	Der Zugkraftdeckungsnachweis biegebelasteter Stahlbetonbauteile mit nachträglich aufgeklebter Bewehrung	4
2.1	Bisherige Vorgehensweisen für den Nachweis der Zugkraftdeckung	4
2.2	Neue Ansätze für den Nachweis der Zugkraftdeckung	6
2.2.1	Ermitteln der maximal aufnehmbaren Beanspruchungen	6
2.2.2	Ermitteln der vorhandenen Beanspruchungen	8
2.2.3	Ermitteln des Biegerissabstands	9
2.2.4	Vergleich der aufnehmbaren mit den vorhandenen Beanspruchungen zum Nachweis der Zugkraftdeckung	10
2.3	Vergleich von Berechnungs- und Versuchsergebnissen	13
2.4	Vergleich der Abminderungsbeiwerte im Endverankerungsbereich	15
2.5	Vorschlag für die Größe der benötigten Berechnungs- und Sicherheitsbeiwerte am Beispiel von CFk-Lamellen	17
3	Diskussion und Zusammenfassung	19

1 Vorbemerkungen

Das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) beauftragte eine Untersuchung mit dem Ziel die Verfahren zum Nachweis der Zugkraftdeckung von Stahlbetonbauteilen mit nachträglich aufgeklebter Bewehrung zu überprüfen.

Bereits seit 35 Jahren werden Stahlbetonbauteile mit oberflächlich aufgeklebten Bewehrungen verstärkt. Die Bemessung derartiger Klebeverstärkung erfolgt nach den gültigen Zulassungen durch einen empirischen Nachweis des Zugkraftaufbaus. In welchen Fällen nun dieser empirische Nachweis zu auf der sicheren Seite liegenden Lösungen kommt, ist bisher nicht bekannt. Zwei kürzlich erschienene Dissertationen geben erstmals Lösungen für den rechnerischen Nachweis des Zugkraftaufbaus für aufgeklebte Bewehrungen an. Im Rahmen des Vorhabens wird an Hand in der Literatur dokumentierter Versuche die Genauigkeit der neu entwickelten Berechnungsverfahren überprüft und ein Vorschlag für die praxisgerechte Anwendung unterbreitet.

2 Der Zugkraftdeckungsnachweis biegebelasteter Stahlbetonbauteile mit nachträglich aufgeklebter Bewehrung

2.1 Bisherige Vorgehensweisen für den Nachweis der Zugkraftdeckung

Die Beschreibung des Last-Verformungsverhaltens eingelegter und auch aufgeklebter Bewehrungen kann durch die Differenzialgleichung des verschieblichen Verbunds gemäß Gleichung 1 erfolgen.

$$s_L'' - \frac{1}{E_L \cdot t_L} \cdot \tau_L(s_L) = 0 \quad (1)$$

s_L = Relativverschiebung zwischen Bewehrung und Beton

E_L = Elastizitätsmodul der aufgeklebten Bewehrung

t_L = Dicke der aufgeklebten Bewehrung

τ_L = Verbundschubspannung

Unterschiedliche Lösungen ergeben sich in Abhängigkeit des unterstellten Verbundverhaltens ($\tau - s_L$ -Beziehung) und den zu berücksichtigenden Randbedingungen.

Anfänglich erfolgte die Bemessung von klebeverstärkten Biegebauteilen nach dem Modell von Ranisch [1]. Ranisch stellte in zentrischen Zugversuchen fest, dass die Bruchverschiebung s_{L0} aufgeklebter Stahllaschen mit steigender Verbundlänge l linear zunimmt. Die zugehörige Lösung der Differenzialgleichung 1 ergibt die unter diesen Annahmen am Laschenende eintragbare Endverankerungskraft T_{max} gemäß Gleichung 2.

$$T_{max} = b_L \cdot \sqrt{s_{L0} \cdot \tau_{L1} \cdot E_L \cdot (1 + n_L \cdot \mu_L)} \quad (2)$$

b_L = Laschenbreite

s_{L0} = Relativverschiebung zwischen Lasche und Untergrund
bei vollständiger Entkopplung

$$\begin{aligned}\tau_{L1} &= \text{maximal erreichbare Verbundschubspannung} \\ E_L &= \text{Verformungsmodul des Laschenwerkstoffs} \\ n_L \cdot \mu_L &= \text{Dehnsteifigkeitsverhältnis}\end{aligned}$$

Wurde unter Berücksichtigung der vorhandenen „Altbewehrung“ gezeigt, dass im Endverankerungsbereich der Nachweis der Zugkraftdeckung erbracht werden kann, wurde in Analogie zu den bekannten Ansätzen im Stahlbetonbau angenommen, dass beginnend am Ort des Endverankerungsnachweises die volle Laschenkraft entsprechend der zulässigen Maximaldehnung in den Beton eingeleitet werden kann und für die Zugkraftdeckung zur Verfügung steht. Da die Gefahr einer Entkopplung der geklebten Bewehrung im Zuge des erforderlichen über die Endverankerungskraft hinausgehenden Zugkraftaufbaus bekannt war, aber dafür keine geeigneten Berechnungswerkzeuge zur Verfügung standen, wurde durch eine empirische Begrenzung der Maximaldehnung des Verstärkungselements (z.B. gleich $\epsilon_{L,U,grenz} = \epsilon_{L,U}/2$) ein „Quasi“-Entkopplungsnachweis bzw. der Nachweis des Zugkraftaufbaus geführt.

Die von Ranisch abgeleitete Beziehung ohne Festlegen einer oberen Grenze der eintragbaren Endverankerungskraft führt bei großen Verbund- bzw. Verankerungslängen zu einer Überschätzung der tatsächlich erreichbaren Verbundbruchkraft. Wie später durchgeführte Versuche gezeigt haben, wird die maximale Verbundbruchkraft bei Verbundlängen von 300 mm bis 500 mm erreicht. Ein weiteres Erhöhen der Verbundlänge führt zu keiner weiteren Steigerung der Verbundbruchkraft.

Diese Zusammenhänge wurden in der Dissertation von Holzenkämpfer ausführlich erörtert [2]. Über bruchmechanische Betrachtung und einer zum bilinearen Ansatz energetisch gleichwertigen Beschreibung der Schubspannungs-Verformungsbeziehung leitet Holzenkämpfer die folgenden Gleichungen 3 - 5 zur Berechnung der Endverankerungskraft T und der zugehörigen Verbundlängen l_t ab. Holzenkämpfer unterstellt dabei, dass τ_{L1} über eine lineare Abhängigkeit von der Oberflächenabreißfestigkeit des Untergrunds gemäß $\tau_{L1} = 1.8 \cdot f_{ctm}$ beschrieben werden kann.

Diese Gleichungen 3-5 stellen heute die Grundlage der gültigen bauaufsichtlichen Zulassungen dar. Der Nachweis eines über die Endverankerungskraft hinausgehenden Zugkraftaufbaus in der geklebten Bewehrung wurde, und wird nach wie vor, über eine Dehnungsbegrenzung ($\epsilon_{L,U,grenz} = \epsilon_{L,U}/2$) für die geklebte Bewehrung geführt.

$$T_{max} = b_L \cdot \sqrt{s_{L0} \cdot \tau_{L1} \cdot E_L \cdot t_L} \quad (3)$$

$$l_{t,max} = 2 \cdot \sqrt{\frac{s_{L0} \cdot E_L \cdot t_L}{\tau_{L1}}} \quad (4)$$

wenn $l_t \leq l_{t,max}$

$$T = T_{max} \cdot \frac{l_t}{l_{t,max}} \cdot \left(2 - \frac{l_t}{l_{t,max}}\right) \quad (5)$$

2.2 Neue Ansätze für den Nachweis der Zugkraftdeckung

2.2.1 Ermitteln der maximal aufnehmbaren Beanspruchungen

Zwei nahezu zeitgleich erstellte Dissertationen [3], [4] stellen erstmals Berechnungswerkzeuge für den erforderlichen Nachweis eines kontinuierlich wachsenden Aufbaus der Spannung in der aufgeklebten Bewehrung zur Verfügung. Beide Arbeiten schlagen auf der Grundlage nahezu identischer Annahmen unterschiedliche Nachweisführungen für die Berechnung des maximal möglichen Spannungsaufbaus vor. Neubauer [3] schlägt eine Nachweisführung an diskreten, ausgewählten Orten vor. Niedermeier [4] wählt die Form einer geschlossenen Lösung über die gesamte Trägerlänge. Für die im Rahmen der vom DIBt-Sachverständigenausschuss zu behandelnden Zulassungsverfahren wurde nun beschlossen, dass die Form einer geschlossenen Nachweisführung bevorzugt wird.

Die zugehörigen Bestimmungsgleichungen für den Nachweis des Spannungsaufbaus und der daraus zu berechnenden, am Rissort i maximal aufnehmbaren Spannung $\sigma_{L,max,i}$ sind in den Gleichungen 6-8 wiedergegeben. Damit können sowohl die am letzten Riss eintragbaren Beanspruchungen ($\Delta\sigma_L$ mit $\sigma_L = 0$) (Endverankerungsnachweis), sowie die zwischen zwei Rissen aufbaubare Beanspruchung ($\Delta\sigma_L$ mit $\sigma_L \geq 0$) berechnet werden. Voraussetzung dafür ist die Kenntnis bzw. die Annahme zutreffender Rissabstände Δa_R . Weiterhin ist als Besonderheit des Berechnungsverfahrens zu beachten, dass die maximale

Beanspruchbarkeit der Verklebung zwischen zwei Rissen von der am geringer belasteten Riss tatsächlich vorhandenen Beanspruchung $\sigma_{L,vorh,i-1}$ nach Gleichung 11 abhängt.

$$\sigma_{L,max,i} = \sigma_{L,vorh,i-1} + \Delta\sigma_{L,i} \quad (6)$$

wenn $\sigma_{L,i-1} \leq \sigma_{grenz}$

$$\Delta\sigma_{L,i} = E_L \cdot s_{L0} \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot \Delta a_R) + [\cos(\omega \cdot \Delta a_R) - 1] \cdot \sigma_{L,vorh,i-1} \quad (7)$$

wenn $\sigma_{L,i-1} > \sigma_{grenz}$

$$\Delta\sigma_{L,i} = \sqrt{\frac{s_{L0} \cdot \tau_{L1} \cdot E_L}{t_L} + \sigma_{L,vorh,i-1}^2} - \sigma_{L,vorh,i-1} \quad (8)$$

$$\Delta\sigma_{L,i} \leq \sigma_U - \sigma_{L,vorh,i-1}$$

zu beachtende Nebenbedingung $\sigma_U \leq \epsilon_{L,U,grenz} \cdot E_L / \gamma_{ML}$

σ_U = Bruchspannung der aufgeklebten Bewehrung

γ_{ML} = Teilsicherheitsbeiwert für Laschenversagen

$$\text{mit } \sigma_{grenz} = \frac{s_{L0} \cdot E_L}{\Delta a_R} - \tau_{L1} \cdot \frac{\Delta a_R}{4 \cdot t_L}$$

$$\text{und } \Delta a_R \leq l_{t,max} = 2 \cdot \sqrt{\frac{s_{L0} \cdot E_L \cdot t_L}{\tau_{L1}}}$$

Δa_R = Verbundlänge zwischen zwei Rissen

$$\omega = \sqrt{\frac{\tau_{L1}}{s_{L0}} \cdot \frac{1}{E_L \cdot t_L}}$$

$$\tau_{L1} = g_{Tau} \cdot \underbrace{g_{ct} \cdot g_{Dauer} \cdot g_{feucht} \cdot g_{warm} \cdot g_{schwing} \cdot f_{ctm}}_{f_{ctK}} / \gamma_{Mc}$$

g_{Tau} = Materialspezifischer Umrechnungsfaktor

g_{ct} = Beiwert zur Berücksichtigung der Streuung von f_{ctm}

g_{Dauer} = Abminderungsbeiwert für dauerhaft einwirkende Beanspruchungen

g_{feucht} = Abminderungsbeiwert für den Einsatz in feuchter Umgebung

g_{warm} = Abminderungsbeiwert für den Einsatz bei erhöhten Temperaturen

$g_{schwing}$ = Abminderungsbeiwert für den Einsatz unter nicht vorwiegend ruhender Beanspruchung

γ_{Mc} = Teilsicherheitsbeiwert für Zugversagen des Betons

$$f_{ctm} = \text{mittlere Abreißfestigkeit des Betons} \approx 0.24 \cdot \beta_D^{2/3}$$

$$f_{ctK} = \text{Rechenwert der Abreißfestigkeit des Betons}$$

2.2.2 Ermitteln der vorhandenen Beanspruchungen

Die in den einzelnen Bewehrungslagen vorhandenen Beanspruchungen an den Rissen mit der Ortskoordinate x_i kann unter Berücksichtigung des Versatzmaßes v über die Gleichungen 9 - 11 bestimmt werden. Durch Vergleich von $\sigma_{L,vorh,i}$ (Gl. 11) mit $\sigma_{L,max,i}$ (Gl. 6) kann beurteilt werden, ob die für eine ausreichende Zugkraftdeckung aufzunehmende Spannung in der geklebten Bewehrung nachgewiesen werden kann.

$$M_{ges} = M(x_i + v)[\gamma_g \cdot g + \gamma_p \cdot p_{ges}]$$

$$\gamma_g = \text{Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen}$$

$$\gamma_p = \text{Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Einwirkungen}$$

$$M_{unverstaerkt} = M(x_i + v)[g + g_{Teillast} \cdot p_{ges}]$$

$$g_{Teillast} = \text{Beiwert zum Erfassen des zum Zeitpunkt der}$$

Verstärkungsmaßnahme wirksamen Verkehrslastanteils

$$Z_{s,unverstaerkt} = \frac{M_{unverstaerkt}}{0.83 \cdot h_s} \leq Z_{fliess} = \epsilon_{fliess} \cdot E_s \cdot A_s$$

$$Z_{s,unverstaerkt} = \text{Zugkraft im „Altstahl“ zum Zeitpunkt der Verstärkungsmaßnahme}$$

$$Z_{ges} = \frac{M_{ges}}{z_m}$$

$$Z_s = Z_{unverstaerkt} + \frac{\Delta M}{z_m} \cdot \frac{A_s \cdot E_s}{A_s \cdot E_s + A_L \cdot E_L} \leq Z_{fliess} \quad (9)$$

$$Z_s = \text{In der „Altbewehrung“ vorhandene Zugkraft}$$

$$\Delta M = M_{ges} - M_{unverstaerkt}$$

$$Z_L = Z_{ges} - Z_s / \gamma_{MS} \leq Z_{L,U} = \frac{\epsilon_{L,U}}{2} \cdot E_L \cdot A_L \quad (10)$$

$$Z_L = \text{In der aufgeklebten Bewehrung vorhandene Zugkraft}$$

$$\gamma_{MS} = \text{Teilsicherheitsbeiwert für Stahlversagen}$$

$$\sigma_{L,vorh,i} = Z_L / A_L \quad (11)$$

$$\sigma_{L,vorh,i} = \text{In der aufgeklebten Bewehrung am Rissort } i \text{ aufzunehmende Spannung}$$

$$v = \text{Versatzmaß, hier } \approx 1 \cdot h$$

2.2.3 Ermitteln des Biegerissabstands

Erforderlich für die explizite Berechnung dieser Gleichungen ist die Größe und der Verlauf der äußeren Beanspruchung und die Kenntnis der Lage und Abstände der Biegerisse. Eine zutreffende Erfassung der Lage und der Abstände der Risse kann und sollte durch eine Bauteiluntersuchung erhalten werden. Sollte dies in Ausnahmefällen nicht möglich sein oder sollte das zu verstärkende Bauteil im unverstärkten Zustand noch keine Biegerisse aufweisen, können durch die Gleichungen 12 und folgende die Lage und die Abstände der Risse abgeschätzt werden.

$$\Delta a_R = g_{Abstand} \cdot \frac{M_{Riss}}{\nu_i} \quad (12)$$

$g_{Abstand}$ = Beiwert zur Berechnung des Rissabstands

$$M_{Riss} = g_{Biegezug} \cdot f_{ctK} \cdot W$$

$g_{Biegezug}$ = Beiwert zur Übertragung der Abreißfestigkeit
auf die Biegezugfestigkeit

W = Widerstandsmoment des Querschnitts

$$\nu_i = z_m \cdot (n_L \cdot b_L \cdot \tau_L + n_s \cdot d_s \cdot \pi \cdot \tau_s)$$

$$\tau_L = 3.2 \cdot \sigma_{LR} \cdot \sqrt{t_L \cdot f_{ct,K} / E_L}$$

$$\sigma_{LR} = \frac{M_{Riss}}{z_m} \cdot z_L$$

$$\tau_s = g_{Rippe} \cdot 0.2 \cdot \sqrt{\beta_D \cdot \sqrt{\sigma_{SR}}}$$

g_{Rippe} = Beiwert für die Verbundeigenschaften der Altbewehrung

$$\sigma_{SR} = \frac{M_{Riss}}{z_m} \cdot z_s$$

$$z_m = 0.83 \cdot \frac{h_L \cdot E_L \cdot A_L + h_s \cdot E_s \cdot A_s}{E_L \cdot A_L + E_s \cdot A_s}$$

$$z_L = \frac{h_L \cdot E_L}{h_L \cdot E_L \cdot A_L + h_s \cdot E_s \cdot A_s}$$

$$z_s = \frac{h_s \cdot E_s}{h_L \cdot E_L \cdot A_L + h_s \cdot E_s \cdot A_s}$$

A_s = Querschnittsfläche der „Altbewehrung“

A_L = Querschnittsfläche der aufgeklebten Bewehrung

Die Lage x_0 des letzten Biegerisses ergibt sich rechnerisch aus folgenden Zusammenhängen.

$$M(x)[\gamma_g \cdot g + \gamma_p \cdot p_{ges}] = M_{Riss} \rightarrow x_{Riss}$$

$$x_0 = x_{Riss} + g_{letzt} \cdot \frac{M_{Riss}}{V_i}$$

$$g_{letzt} = \text{Beiwert für die Lage des letzten Biegeriss} \approx 1.2$$

Die nachfolgenden Rissorte berechnen sich dann gemäß:

$$x_i = x_{i-1} + \Delta a_R$$

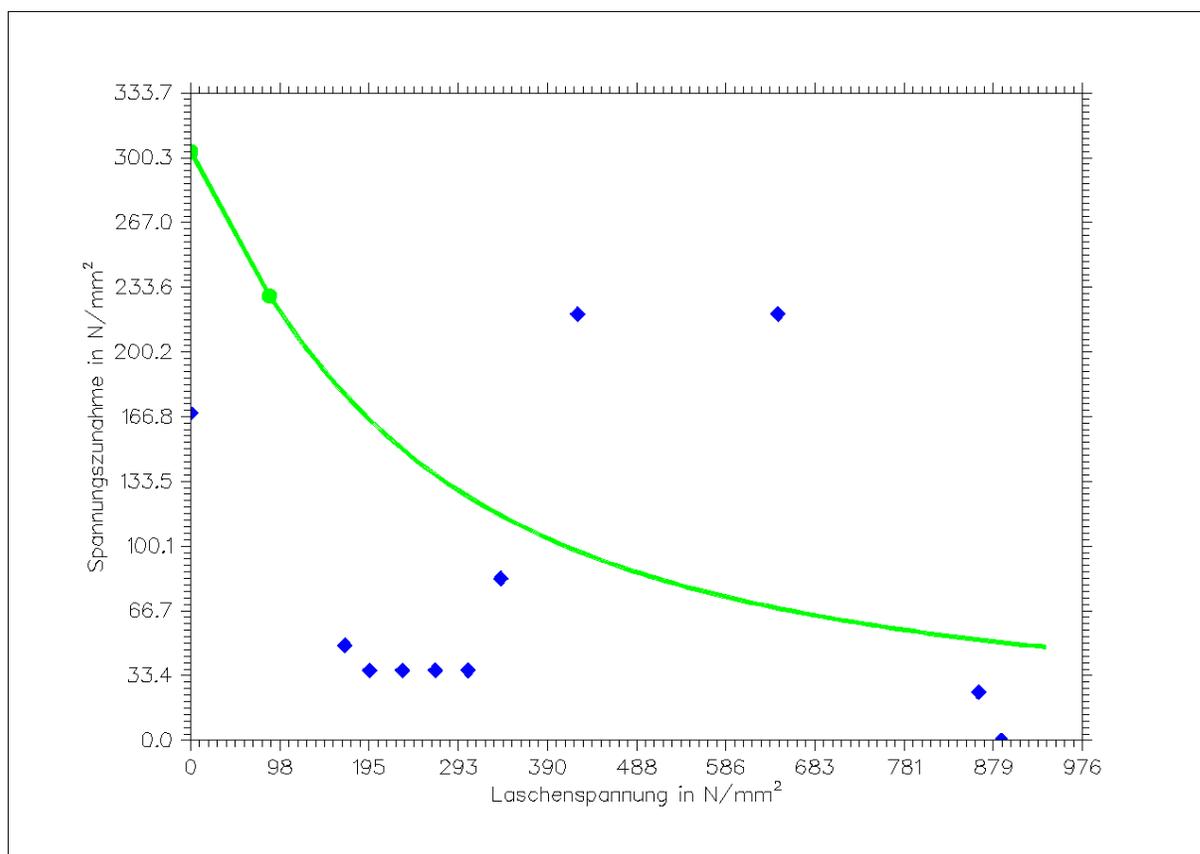
2.2.4 Vergleich der aufnehmbaren mit den vorhandenen Beanspruchungen zum Nachweis der Zugkraftdeckung

Der Vergleich der aufnehmbaren Beanspruchung $\sigma_{L,max,i}$ bzw. $\Delta\sigma_{L,i}$ mit den tatsächlich vorhandenen Beanspruchungen $\sigma_{L,vorh,i}$ kann nach [4] durch eine unmittelbare Gegenüberstellung dieser beiden Größen gemäß Abbildung 1 erfolgen. Die folgenden Grafiken zeigen das Beispiel eines im Abstand von ca. 1,8 m vom linken Auflager mit einer Einzellast beanspruchten klebeverstärkten Biegeträgers.

In Abbildung 1 sind Bereiche an denen die Tragsicherheit erschöpft bzw. die Deckung der Zugkraft nicht mit ausreichender Sicherheit erfolgen können sofort erkennbar. Die grüne, durchgezogene Linie stellt die aufnehmbare Beanspruchung dar. Die blauen Punkte kennzeichnen die an den Rissen tatsächlich auftretenden Beanspruchungen. Da in der gezeigten Abbildung an zwei Stellen (Rissen) die auftretenden Beanspruchungen größer sind als die aufnehmbaren, ist keine ausreichende Sicherheit gegeben. Nicht entnehmbar ist aus diesem Diagramm der zu den jeweiligen Bemessungspunkten zugehörige Tragwerksbereich. Die Information an welcher Stelle, die Tragfähigkeit erschöpft ist, ist aus derartigen Diagramme nicht entnehmbar.

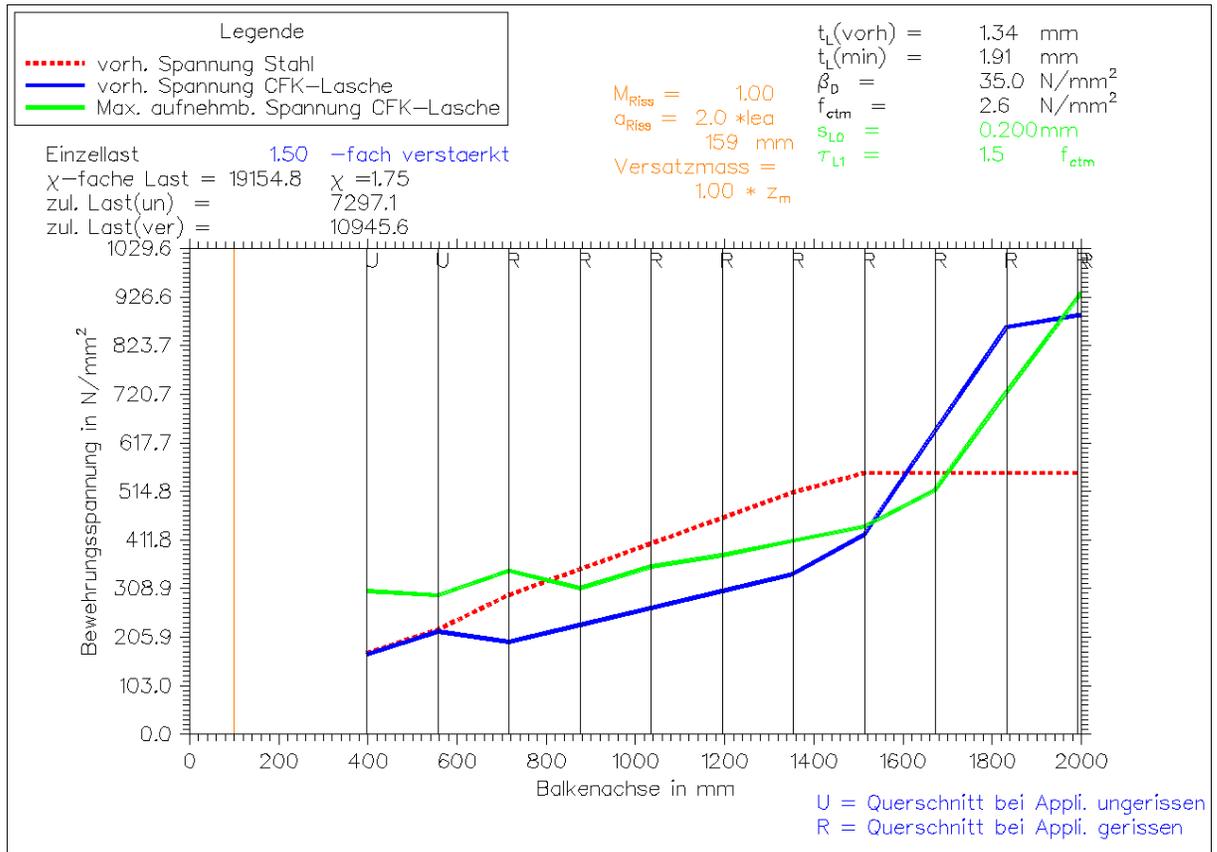
Diese Lageinformation wird in der für den Bauingenieur üblichen Form der Darstellung der Zugkraftdeckung mitgeliefert. Es wird darum vorgeschlagen in Anlehnung an die Nachweisverfahren bei biegebeanspruchten Stahlbetonbauteilen, auch bei klebeverstärkten Bauteilen einen ortsbezogenen Vergleich der aufnehmbaren und vorhandenen Beanspruchungen, z.B. wie in Abbildung 2 gezeigt, durchzuführen. Dargestellt ist in Abbildung

Abbildung 1: Grafischer Vergleich der aufnehmbaren und vorhandenen Beanspruchungen gemäß dem Vorschlag in [4]



2 bis zur Einleitungsstelle der Einzellast als grüne Linie die aufnehmbare und als blaue Linie die vorhandene Beanspruchung. Die rote Linie charakterisiert die in der „Altbewehrung“ vorhandene Beanspruchung. Neben der Aussage, ob eine ausreichende Zugkraft- bzw. Zugspannungsdeckung gegeben ist, kann dieser Darstellung zusätzlich entnommen werden, dass sowohl im Endverankerungsbereich als auch an der Stelle des Momentenmaximums eine ausreichende Tragfähigkeit nachgewiesen werden kann. Die vorhandene Beanspruchung übersteigt die aufnehmbare Beanspruchung an der Stelle, an der die „Altbewehrung“ zu fließen beginnt.

Abbildung 2: Grafischer Vergleich der aufnehmbaren und vorhandenen Beanspruchungen gemäß der im Stahlbetonbau gewohnten Darstellungsform



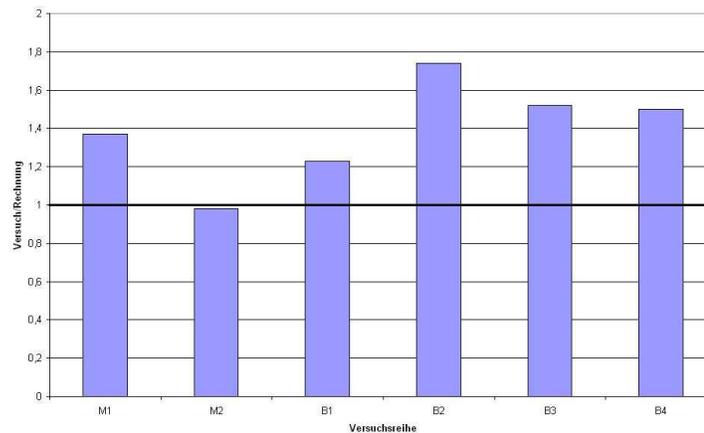
2.3 Vergleich von Berechnungs- und Versuchsergebnissen

In der Literatur sind Versuche zum Tragverhalten klebeverstärkter Biegeträger dokumentiert. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden die in [5] und [3] beschriebenen Versuche nachgerechnet. Es wurden sowohl CFK- als auch stahllaschenverstärkte Träger nachgerechnet. Die weiteren wesentlichen Versuchsparameter sind in Anlage 1 zusammengestellt. Der Vergleich von Versuchs- und Berechnungsergebnissen mittels der vorgestellten Zusammenhänge ist aus Abbildung 3 entnehmbar. Die Abbildung zeigt, dass die Berechnungen in der Regel auf der sicheren Seite liegen. Das Verhältnis der Versuchsergebnisse zu Berechnungsergebnis beträgt im Mittel 1.40. Der Kleinstwert beträgt 0.97. Die größte Abweichung zwischen Versuch und Berechnung wird durch den Verhältniswert 1.74 beschrieben.

Bei den CFK-verstärkten Biegeträgern war in allen Nachrechnungen die „Fließstelle“ der inneren Bewehrung die maßgebende Nachweisstelle.

Bei den stahllaschenverstärkten Trägern wurde im Versagenszustand ein Fließen der aufgeklebten Stahllasche und damit ein volles Ausnutzen der aufgeklebten Bewehrung berechnet.

Abbildung 3: Vergleich von Versuchsergebnissen mit Berechnungsergebnissen (Mittelwerte)



Anlage 1 ermöglicht auch einen Vergleich der rechnerischen und tatsächlich am Bauteil ermittelten Rißabstände. Es ist festzustellen, dass mit den für die Berechnungen ange-

nommenen Beiwerten von $g_{Abstand} = 2.0$, $g_{Biegezug} = 1.0$ und $g_{letzt} = 1.2$ eine gute Übereinstimmung zwischen rechnerischer Vorhersage und tatsächlicher Risslage erzielt wird.

2.4 Vergleich der Abminderungsbeiwerte im Endverankerungsbereich

Die gültigen Zulassung beschränken sich auf den Nachweis einer Endverankerungskraft an der Stelle $l_{t,max} + 50$ mm. Die zugehörigen Formeln sind in den Gleichung 13 und 14 wiedergegeben.

$$\sigma_{L,max} = 0.5 \cdot \sqrt{\frac{E_L \cdot f_{ctm}}{t_L}} \quad (13)$$

$$l_{t,max} = 0.7 \cdot \sqrt{\frac{E_L \cdot t_L}{f_{ctm}}} \quad (14)$$

Der Vergleich mit den „neuen“ Ansätzen wird für diesen Endverankerungsbereich durchgeführt. Die aufnehmbare Beanspruchung ergibt sich aus Gleichung 7 mit $\Delta a_R = \infty \rightarrow \sin(\omega \cdot \Delta a_R) = \sin(2)$ gemäß Gleichung 15. Werden die bisher berücksichtigten Beiwerte g_{Tau}, g_{ct} und s_{L0} in der bisher üblichen Größenordnung eingesetzt, ergeben sich nach dem „neuen“ Verfahren die gleichen Zusammenhänge wie bisher. (siehe Gl. 15).

Festzustellen ist allerdings, dass ein Abminderungsbeiwert g_{Dauer} für dauerhaft einwirkende Beanspruchungen dabei bisher nicht berücksichtigt wird.

Da ein Einsatz in feuchter Umgebung, ein Einsatz bei erhöhten Temperaturen und ein Einsatz unter nicht vorwiegend ruhenden Beanspruchungen bisher nicht zulässig ist, sind die zugehörigen Abminderungsbeiwerte g_{feucht}, g_{warm} und $g_{schwing}$ richtigerweise nicht in Ansatz zu bringen.

$$\begin{aligned} \sigma_{L,max} &= E_L \cdot s_{L0} \cdot \omega \cdot \sin(2) \\ &= E_L \cdot s_{L0} \cdot \sqrt{\tau_{L1}/(s_{L0} \cdot E_L \cdot t_L)} \cdot 0.9 \\ &= \underbrace{0.9 \cdot \sqrt{g_{Tau} \cdot g_{ct} \cdot s_{L0}}}_{0.9 \cdot \sqrt{1.8 \cdot 0.8 \cdot 0.2} \approx 0.5} \cdot \sqrt{\frac{E_L \cdot f_{ctm}}{t_L}} \\ l_{t,max} &= 2 \cdot \sqrt{\frac{s_{L0} \cdot E_L \cdot t_L}{\tau_{L1}}} \\ &= 2 \cdot \underbrace{\sqrt{\frac{0.2}{1.8}}}_{\approx 0.7} \cdot \sqrt{\frac{E_L \cdot t_L}{f_{ctm}}} \end{aligned} \quad (15)$$

Der Nachweis der aufnehmbaren Endverankerungsbeanspruchung ist nach den neuen Vorschlägen nicht mehr in einem Abstand von $l_{t,max} + 50$ vom Auflager, sondern am letzten Biegeriss zu führen. Dadurch kann der Vergleich der maximal aufnehmbaren Endverankerungsbeanspruchung an einer Stelle erhöhter Momentenbeanspruchung erfolgen, woraus eine erhöhte vorhandene Beanspruchung gegenüber dem bisherigen Nachweisverfahren resultieren kann.

2.5 Vorschlag für die Größe der benötigten Berechnungs- und Sicherheitsbeiwerte am Beispiel von CFk-Lamellen

In Tabelle 1 sind die für eine Nachrechnung bzw. Nachweisführung benötigten Kennwerte nochmals zusammengestellt. Weiterhin enthält Tabelle 1 einen Vorschlag zur Größe bzw. Berechnung der für beim Nachweis der Tragfähigkeit anzusetzenden Werte. Die dafür vorgeschlagenen Teilsicherheitsbeiwerte wurden aus der Leitlinie für die europäisch technische Zulassung für Metallechrauben zur Verankerung in Beton abgeleitet. Der Teilsicherheitsbeiwert γ_{Mc} für Beton auf Druck beträgt nach der Leitlinie 1.50. Für die Streuung der Zugfestigkeit von Baustellenbeton berücksichtigt die Leitlinie einen zusätzlichen Faktor von 1.20, so dass sich dann ein Wert für γ_{Mc} von 1.80 ergeben würde.

Für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit sind, ebenso wie in der Leitlinie vorgeschlagen, die Teilsicherheitsbeiwerte γ_G , γ_p und γ_M mit 1.0 anzusetzen.

Nahezu identische Beiwerte werden auch in dem Bemessungsprogramm FRP Lamella angesetzt [6]. Dieses Nachweisprogramm beschränkt sich allerdings nach wie vor auf den Endverankerungsnachweis mit empirisch begründeter Dehnungsbeschränkung.

Für die Ermittlung des Rißabstandes wurde bereits vorgeschlagen diesen im Regelfalle unmittelbar am Bauteil zu ermitteln. Für die Nachweisführung wird dann der tatsächliche, ohne Sicherheitsbeiwerte ermittelte Rißabstand angesetzt. Diese Vorgehensweise sollte auch bei der im Ausnahmefall zulässigen rechnerischen Ermittlung der Rißabstände beibehalten werden. Die hier vorgeschlagenen Werte für die Berechnung des Rißabstands verzichten daher auf den Ansatz von zusätzlichen Teilsicherheitsbeiwerten.

Tabelle 1: Zusammenstellung der für den Nachweis des Spannungsaufbaus in CFK-Lamellen benötigten Kennwerte

Kennwert	Beschreibung	Vorschlag für die Größe
Materialkennwerte		
f_{ctm}	Mittelwert der Betonabreißfestigkeit	$0.24 \cdot \beta_D^{2/3}$
s_{L0}	Mittelwert der Bruchverschiebung	0.200 mm
E_L	Elastizitätsmodul der aufgeklebten Bewehrung	
t_L	Dicke der aufgeklebten Bewehrung	
b_L	Breite der aufgeklebten Bewehrung	
n_L	Anzahl der aufgeklebten Verstärkungselemente	
Teilsicherheitsbeiwerte		
γ_{Mc}	für Beton auf Zug	1.50-1.80
γ_{MS}	für Bewehrungsstahlversagen	1.15
γ_{ML}	Für Laschenversagen	1.40
γ_G	für ständige einwirkende Lasten	1.35
γ_p	für veränderliche Einwirkungen	1.50
Beiwerte für die Berechnung von $\Delta\sigma_L$		
g_{ct}	Umrechnung von f_{ctm} auf Fraktilwert	0.8
g_{τ}	Umrechnung von f_{ctm} auf τ	1.5-1.8
g_{Dauer}	Abminderung von f_{ctm} aufgrund dauerhaft einwirkender Lasten	0.85
g_{Feucht}	Abminderung von f_{ctm} bei Einsatz in „nasser“ Umgebung	bisher nicht zugelassen
$g_{Schwing}$	Abminderung von f_{ctm} durch nicht vorwiegend ruhende Lasten	bisher nicht zugelassen
Zusätzliche Beiwerte für die Abschätzung des Rißabstands Δa_R		
$g_{Abstand}$	für die Umrechnung der Eintragungslänge	2.0
$g_{Biegezug}$	für die Umrechnung der Abreißfestigkeit auf die Biegezugfestigkeit	1.0 - 1.2
g_{Rippe}	für die Berücksichtigung der Verbundeigenschaften der Altbewehrung	0.5 für glatten Stahl 1.0 für gerippten Stahl
g_{tetz}	für die Lage des letzten Biegerisses	1.2
$g_{Teillast}$	für die Abschätzung des zum Zeitpunkt der Verstärkungsmaßnahme wirksamen Verkehrslastanteils	0.1

3 Diskussion und Zusammenfassung

Das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) beauftragte eine Untersuchung mit dem Ziel die im Rahmen von Dissertationen neu entwickelten Verfahren zum Nachweis der Zugkraftdeckung von Stahlbetonbauteilen mit nachträglich aufgeklebter Bewehrung zu überprüfen. Während in den bisherigen Verfahren ein Nachweis der Endverankerung und eine empirisch begründete Beschränkung auf die „halbe“ Bruchdehnung der Lamelle ausreichend ist, überprüfen die „neuen“ Verfahren den Zugkraftaufbau über die gesamte Biege­länge.

Die für die Nachweise maßgebenden formalen Zusammenhänge wurden nochmals vorge­stellt. Für den Vergleich der aufnehmbaren mit den vorhandenen Beanspruchungen wurde eine Darstellungsform in Anlehnung an die im Stahlbetonbau übliche Form der Zugkraft­deckungs­linie vorgeschlagen.

Die durchgeführten Nachrechnung von Versuchen ergaben in allen Fällen eine auf der si­cheren Seite liegendes Berechnungsergebnis. Die Abweichung zwischen Berechnungs- und Versuchsergebnis betragen dabei im Mittel etwa 40%. Weiterhin wurde festgestellt, dass insbesondere bei Biegeträgern mit aufgeklebten CFK-Laschen der für einen Tragsicher­heitsnachweis maßgebende Ort, die „Fließstelle“ der inneren Bewehrung ist. Da für eine wirtschaftliche Bemessung aufgeklebter Bewehrungen ein Fließen der inneren Bewehrung vorausgesetzt wird, liegen **die bisherigen Nachweisverfahren** nicht in allen Fällen auf der sicheren Seite. Insbesondere in Trägerbereichen, bei denen die vorhandene Zug­kraft­linie der inneren Bewehrung eine Veränderung der Steigung erfährt (z.B. Fließen der inneren Bewehrung, Einleiten hoher Einzellasten, Querschnittsveränderungen, Endveran­kerungsbereiche usw.) können nach den neuen Nachweisverfahren größere Verstärkungs­querschnitte, im Vergleich zum bisherigen Verfahren, notwendig werden.

Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass im Endverankerungsbereich das „alte“ und das „neue“ Verfahren auf identischen Annahmen beruhen. Der durchgeführte Vergleich der Endverankerungsnachweise zeigte, dass das derzeitige Nachweisverfahren auf die im

Stahlbetonbau übliche Abminderung (g_{Dauer}) bedingt durch dauerhaft einwirkende Lasten (Dauerstandfestigkeit) verzichtet.

Für das „neue“ Verfahren wurden Zahlenwerte für die zu berücksichtigenden Abminderungs- und Teilsicherheitsbeiwerte auf der Grundlage der Leitlinie für die europäisch technische Zulassung für Metalldübel zur Verankerung in Beton vorgeschlagen. So wäre demnach ein Teilsicherheitsbeiwert γ_{Mc} für ein mögliches Zugversagen des Betons in Höhe von 1.8 maßgebend. Praxisübliche Bemessungsprogramm auf der Grundlage von Teilsicherheitskonzepten (siehe z.B. [6]) unterstellen zur Zeit für den Endverankerungsnachweis ein γ_{Mc} von 1.50.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das neue Verfahren eine genauere Beurteilung des tatsächlichen Tragverhaltens von klebeverstärkten biegebeanspruchten Stahlbetonbauteilen ermöglicht. Da das derzeitige Verfahren auf einen Endverankerungsnachweis mit zusätzlicher empirischer Dehnungsbegrenzung beschränkt ist und nicht in allen Fällen die für den Tragfähigkeitsnachweis maßgebende Querschnittslage erfasst und damit nicht in allen Fällen auf der sicheren Seite liegt, sollte zukünftig das „neue“ Verfahren eingeführt werden. Auf die bisher übliche Begrenzung der Bruchdehnung und der sich daraus ergebenden beschränkten Ausnutzung der aufgeklebten Bewehrung sollte dann konsequenterweise verzichtet werden.

Hamburg, den 29. September 2004

(Prof. Dr.-Ing. Lutz Franke)

Literatur

- [1] RANISCH, E.-H.: *Zur Tragfähigkeit von Verklebungen zwischen Baustahl und Beton - Geklebte Bewehrung*. Doktorarbeit, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, 1982. Heft 54.
- [2] HOLZENKÄMPFER, PETER: *Ingenieurmodelle des Verbunds geklebter Bewehrung für Betonbauteile*. Doktorarbeit, TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, 1994.
- [3] NEUBAUER, UWE: *Verbundtragverhalten geklebter Lamellen aus Kohlenfaser-Verbundwerkstoff zur Verstärkung von Betonbauteilen*. Doktorarbeit, TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, 2000.
- [4] NIEDERMEIER, ROLAND: *Zugkraftdeckung bei klebarmierten Bauteilen*. Doktorarbeit, Lehrstuhl für Massivbau, TU München, 2001.
- [5] ZILCH K., ZEHETMAIER G., NIEDERMEIER R.: *Zusammenwirken von einbetonierter Bewehrung mit Klebarmierung bei verstärkten Betonbauteilen*. Technischer Bericht, Lehrstuhl für Massivbau, TU München, 2002. Forschungsbericht zum DFG Vorhaben ZI 134/9-1.
- [6] ONKEN P., VOM BERG W., MATZDORFF D.: *FRP Lamella Handbuch zum Bemessungsprogramm Version 3*. bow Ingenieure Braunschweig, 2004.

	aufgeklebte Bewehrung		eingelegte Bewehrung	Betongüte	Versuchsergebnis V	Berechnung R	V/R
München l=4,8 m h/d=150/300 mm	CFK	1 · 50/1.34 mm E=160000 N/mm ² f _Y =2700 N/mm ² ε _U =17 ‰	2 · Ø12 G E=205000 N/mm ² f _Y =555 N/mm ² ε _Y =2.7 ‰	β _D =41 - 54 N/mm ² f _{ctm} =2.8-3.8 N/mm ²	F _U = 21.8 kN - 25.1 kN Δa _R = 50 - 150 mm	17.2 kN 267 mm	1.27 - 1.46
	St 37	1 · 80.1/5.2 mm E= 205000 N/mm ² f _Y =246 -329 N/mm ² ε _Y =1.2 - 1.6 ‰	2 · Ø12 G E=205000 N/mm ² f _Y =555 N/mm ² ε _Y =2.7 ‰	β _D =49 - 51 N/mm ² f _{ctm} =1.8-3.7 N/mm ²	F _U = 17.2 kN - 24.0 kN Δa _R ≤ 150 mm	17.8 - 23.7 kN 158 mm	0.97 - 1.01
Braunschweig h/d=150/500 mm l=3 m l=4.5 m	CFK	2 · 50/1.43 mm E=150600 N/mm ² f _Y =2000 N/mm ² ε _U =13 ‰	7 · Ø8 R E=200800 N/mm ² f _Y =619 N/mm ² ε _Y =3.1 ‰	β _D =36 N/mm ² f _{ctm} =2.5 N/mm ²	F _U = 44.6 kN · 2 Δa _R = 89 mm	75.1 kN 112 mm	1.23
	CFK	2 · 50/1.43 mm E=205500 N/mm ² f _Y =2665 N/mm ² ε _U =13 ‰	7 · Ø8 R E=200800 N/mm ² f _Y =619 N/mm ² ε _Y =3.1 ‰	β _D =36 N/mm ² f _{ctm} =2.5 N/mm ²	F _U = 51.4 kN · 2 Δa _R = 91 mm	69.1 kN 116 mm	1.74
	CFK	1 · 50/1.22 mm E=175000 N/mm ² f _Y =2275 N/mm ² ε _U =13 ‰	6 · Ø6 R E=200000 N/mm ² f _Y =564 N/mm ² ε _Y =2.8 ‰	β _D =26 N/mm ² f _{ctm} =2.1 N/mm ²	F _U = 13 kN · 2 Δa _R = 131 mm	21.3 kN 145 mm	1.52
	CFK	1 · 50/2.44 mm E=175000 N/mm ² f _Y =2275 N/mm ² ε _U =13 ‰	4 · Ø10 R E=200000 N/mm ² f _Y =519 N/mm ² ε _Y =2.6 ‰	β _D =41 N/mm ² f _{ctm} =2.8 N/mm ²	F _U = 23 kN · 2 Δa _R = 126 mm	36.8 kN 151 mm	1.54

Verwendete Berechnungsparameter:

$$s_{L0} = 0.2 \text{ mm}, \tau_{L1} = 1.5 \cdot f_{ctm}$$

$$f(W_{Riss}) = 1, \Delta a_R = 2.0 \cdot l_{e0}, a_{letzterRiss} = 1.2 \cdot l_{e0}$$

Träger nicht vorbelastet, Einzellast,

$$\text{Versatzmaß} = 1.0 \cdot h_{ges}$$

$$\text{Verbundparameter } v_{\tau}(\text{gerippt})=1, v_{\tau}(\text{glatt})=0.5$$