

Sachstandbericht Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung

von

Konrad Zilch
Roland Niedermeier
Wolfgang Finckh

Herausgeber:

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V.
Budapester Straße 31
10787 Berlin
info@dafstb.de

© 2011 Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V.

Budapester Straße 31
10787 Berlin

Telefon: +49 30 2693-1320
Telefax: +49 30 2693-1319
Internet: www.dafstb.de
Email: info@dafstb.de

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechts ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in elektronischen Systemen.

Die im Werk enthaltenen Inhalte wurden vom Verfasser und Verlag sorgfältig erarbeitet und geprüft. Eine Gewährleistung für die Richtigkeit des Inhalts wird gleichwohl nicht übernommen. Der Verlag haftet nur für Schäden, die auf Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit seitens des Verlages zurückzuführen sind. Im Übrigen ist die Haftung ausgeschlossen.

Druck: schöne drucksachen GmbH, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem, alterungsbeständigem Papier nach DIN EN ISO 9706

ISSN 0171-7197
ISBN 978-3-410-65193-2

Sachstandbericht Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung

von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Konrad Zilch
Dr.-Ing. Roland Niedermeier
Dipl.-Ing. Wolfgang Finckh

1. Auflage 2011

Herausgeber:
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. – DAfStb

Sachstandbericht „Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung“

Kurzfassung

Das nachträgliche Verstärken von bestehenden Bauteilen ist eine häufig auftretende Problemstellung, die durch das Aufkleben von zusätzlicher Bewehrung gelöst werden kann. An der Tragweise der geklebten Bewehrung wird seit den 60er Jahren intensiv geforscht. Die erste bauaufsichtliche Zulassung wurde 1979 vom DIBt erteilt. Seit dieser Zeit hat sich die Bauweise in der Praxis etabliert und immer weitere Anwendungsmöglichkeiten, Materialien und Verfahren wurden entdeckt. An den Forschungsstellen wurden mithilfe von zahlreichen Versuchen immer bessere Modelle für die Tragweise entwickelt.

Das Tragverhalten aufgeklebter Bewehrung wird durch den mäßigen Verbund zwischen der geklebten Bewehrung und dem Beton bestimmt, was besondere Bemessungsansätze nötig macht. Im Rahmen der Erstellung dieses Sachstandberichtes wurden zahlreiche Bauteil- und Verbundversuche mit geklebter Bewehrung in einer Datenbank gesammelt. Die gängigen nationalen und internationalen Modelle sowie Bemessungsvorschriften sind in diesem Sachstandbericht nach Themen geordnet aufgelistet und wurden mit den Versuchswerten aus der Datenbank gegengerechnet und verglichen.

Current knowledge report- adhesive bonded reinforcement

Abstract

The post strengthening of existing structures is a frequent challenge, which can be solved by gluing additional reinforcement on the structure. Intensive research on the structural behavior of adhesive bonded reinforcement has been carried out since the 1960s. The first national technical approval was issued from the DIBt in 1979. Since then the building method was established in practice and more and more application possibilities, materials and methods were found. The research facilities developed better and better models based on numerous experimental results.

The load carrying behavior of the externally bonded reinforcement is affected by the moderate bond between the adhesive bonded reinforcement and the concrete, which makes special design approaches necessary. In preparing this current knowledge report numerous full scale and bond tests on adhesive bonded reinforcement were collected in a database. The current national and international models and design codes are listed in this current knowledge report by topic and were compared to the experimental results from the database.

Inhalt:

0	Bezeichnungen, Abkürzungen und Begriffe	6
1	Hintergrund und Motivation	14
2	Verstärken mit geklebter Bewehrung.....	14
2.1	Material	14
2.1.1	Bewehrungselemente	14
2.1.2	Klebstoff	15
2.2	Verstärkungsarten.....	15
2.2.1	Allgemein	15
2.2.2	Biegeverstärkung	16
2.2.3	Querkraftverstärkung	16
2.2.4	Torsionsverstärkung	17
2.2.5	Stützenumwicklung	17
2.3	Normungssituation	18
2.3.1	Situation in Deutschland	18
2.3.2	Situation im Ausland	18
2.4	Vergleich mit Versuchswerten	18
3	Versagensarten	19
3.1	Versagensarten von biegeverstärkten Bauteilen	19
3.2	Verbundversagen.....	20
3.2.1	Ablösen der aufgeklebten Bewehrung am Biegeträger	20
3.2.2	Brucharten des Verbundbruchs	22
3.3	Versagensmechanismen bei aufgeklebten Bügeln	22
3.4	Versagensmechanismen bei umwickelten Stützen	23
4	Grundlagen zum Verbund geklebter Bewehrung.....	23
4.1	Allgemeines	23
4.2	Verbundansätze aufgeklebter Bewehrung	24
4.2.1	Allgemeines	24
4.2.2	Versuche zur Bestimmung des Verbundverhaltens	25
4.2.3	Verbundmodell nach Holzenkämpfer.....	27
4.2.4	Verbundmodell nach Neubauer	30
4.2.5	Verbundmodell nach Niedermeier	33
4.2.6	Verbundmodell nach Chen und Teng	40
4.2.7	Verbundmodelle von Dai et al.....	41
4.2.8	Verbundmodell nach Ulaga	43
4.2.9	Verbundmodell nach Zehetmaier.....	45
4.2.10	Verbundmodell nach Savoia et al.	46
4.2.11	Verbundmodell nach Schilde	46
4.2.12	Einfluss von Bügelumschließungen auf das Verbundverhalten nach Husemann	48
4.2.13	Entwicklung in den bauaufsichtlichen Zulassungen	50
4.2.14	Internationale Bemessungsvorschriften	52
4.3	Vergleich der Verbundansätze	53
4.3.1	Allgemeines	53
4.3.2	Endverankerungsbereich	54
4.3.3	Zwischenrisselement	55
4.4	Verbundansätze für in Schlitze verklebte Bewehrung	56
4.4.1	Allgemein	56
4.4.2	Verbundansatz von Blaschko	57
4.4.3	Verbundansatz von Borchert	59
4.4.4	Weitere Verbundansätze	60
4.5	Anforderungen	62
4.5.1	Allgemeines	62
4.5.2	Anforderungen an das zu verstärkende Bauteil	62

4.5.3	Anforderungen an den Ausführenden	63
4.5.4	Konformität.....	63
5	Bemessungsmodelle für den Grenzzustand der Tragfähigkeit	63
5.1	Allgemein	63
5.1.1	Vorgehen	63
5.1.2	Besonderheiten bei der Bemessung von Bauteilen mit aufgeklebter Bewehrung	64
5.2	Sicherheitskonzept.....	65
5.2.1	Allgemein	65
5.2.2	CNR-DT 200	66
5.2.3	Untersuchungen von Daus	66
5.3	Schnittgrößenermittlung.....	67
5.3.1	Allgemein	67
5.3.2	Untersuchungen von Vasseur	67
5.4	Zugkraftaufteilung	68
5.4.1	Allgemein	68
5.4.2	Modell von Holzenkämpfer	69
5.4.3	Modell von Ulaga	69
5.4.4	Modell von Zehetmaier	71
5.4.5	Vergleich der verschiedenen Ansätze	72
5.5	Nachweise zur Verbundkraftübertragung	73
5.5.1	Allgemein	73
5.5.2	Nachweis der Verbundkraftübertragung nach Neubauer	73
5.5.3	Nachweis der Verbundkraftübertragung nach Niedermeier	82
5.5.4	Endverankerungsnachweis nach Zehetmaier	86
5.6	Internationale Bemessungskonzepte zur Biegeverstärkung	89
5.6.1	Allgemeines	89
5.6.2	Konzept von Oehlers und Seracino	89
5.6.3	Konzept von Smith und Teng	90
5.6.4	Konzept von Raoof et. al.	93
5.7	Bemessungsvorschriften zur Biegeverstärkung aufgeklebter Bewehrung	94
5.7.1	Allgemein	94
5.7.2	fib bulletin 14.....	94
5.7.3	Zulassungen	99
5.7.4	Nachweise für den Feld und Stützmomentenbereich	99
5.7.5	SIA 166	104
5.7.6	CNR-DT 200	107
5.7.7	ACI	109
5.7.8	CS-TR-55.....	110
5.7.9	Vergleich der Bemessungsvorschriften	112
5.8	Besonderheiten bei der Verstärkung von Spannbetonbauteilen	114
5.9	Querkrafttragfähigkeit	114
5.9.1	Allgemeines	114
5.9.2	Schmidhuber.....	115
5.9.3	Jansze.....	117
5.10	Querkraftverstärkung	118
5.10.1	Allgemein	118
5.10.2	Triantafillou und Antonopoulos	118
5.10.3	CNR-DT-200	119
5.10.4	Chen und Teng	121
5.10.5	ACI 440	124
5.10.6	Vergleich der Ansätze.....	126
5.11	Torsionsverstärkung	126
5.12	Durchstanzen.....	127
5.13	Stützenverstärkung.....	128
5.13.1	Umschnürungswirkung bei Stahlbetondruckgliedern und Verbundstützen	128
5.13.2	Umschnürung mit faserverstärkten Kunststoffen.....	131
5.13.3	Bauteiltragfähigkeit	139

5.13.4	Zeitabhängige Verformungen	140
5.14	Ermüdung	144
5.14.1	Allgemein	144
5.14.2	Untersuchungen von Hankers	144
5.14.3	Weitere Untersuchungen	145
6	Bemessungsmodelle für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.....	146
6.1	Spannungsbegrenzung.....	146
6.2	Rissbreiten	146
6.2.1	Aufgeklebte Bewehrung.....	146
6.2.2	In Schlitze verklebte CFK-Lamellen.....	147
6.3	Nachweis der Bauteilverformungen.....	148
6.4	Vermeidung der lokalen Verbundentkopplung	149
6.5	Kriechverhalten und Einfluss der Temperatur	149
6.5.1	Allgemein	149
6.5.2	Aufgeklebte Bewehrung.....	150
6.5.3	In Schlitze verklebte CFK- Lamellen.....	151
7	Zusammenfassung	152
	Literatur	153
	Anhang A - Rechenannahmen zur Versuchsnachrechnung.....	170
	Anhang B - Versuche zur Biegeverstärkung	171
	Anhang C - Versuche zur Querkraftverstärkung	184
	Anhang D - Versuche zur Torsionsverstärkung	189
	Anhang E - Verbundversuche.....	190

0 Bezeichnungen, Abkürzungen und Begriffe

Bezeichnungen

Große lateinische Buchstaben

A	Beiwert zur Lösung für die DGL des verschieblichen Verbundes; Beiwert zur numerischen Beschreibung
B	Beiwert zur Lösung für die DGL des verschieblichen Verbundes; Beiwert zur numerischen Beschreibung
C	Kalibrierungsfaktor nach Chen und Teng
D	Stützendurchmesser, Rohrdurchmesser
F	Kraft
K	Kalibrierungsfaktor nach Zulassung von 1985
M	Moment
V	Querkraft

Kleine lateinische Buchstaben

d	Statische Nutzhöhe
e	Ausmitte
h	Bauteilhöhe
k	Anpassungsfaktor für die effektive Verbundlänge
m	Verhältnis der Verbundfläche zwischen Verstärkung und Beton
n	Anzahl der Gelegelage
t	Zeitpunkt
x	Druckzonenhöhe
z	Innerer Hebelarm

Hochzeiger

a	Auflagnächster Biegeriss
---	--------------------------

Indizes

b	Verbund
d	Bemessungswert
E	Einwirkung
g	Klebstoff
k	Charakteristischer Wert
L	Geklebte Bewehrung (CFK-Lamelle, Stahllasche, CFK-Gelege)
m	Mittelwert
p	Spannstahl
R	Widerstand
s	Betonstahl
w	Bügel /Querkraftbewehrung

Große lateinische Buchstaben mit Indizes

A_c	Querschnittsfläche des Betons
A_{gt}	Gesamte Dehnung bei Höchstkraft des Stahles
A_L	Querschnitt der Lamelle/ der Verstärkung
A_{Lw}	Querschnitt der Querkraftverstärkung
A_s	Äquivalente Querschnittsfläche des Betonstahl mit Verstärkung
A_s	Querschnitt des Betonstahls

A_{sw}	Querschnitt der internen Querkraftbewehrung
aufn. ΔF_L	Aufnehmbare Lamellenkraftänderung am Zwischenrisselement
C_{b1k}	Verbundkoeffizient
C_{b2}	Verbundkoeffizient
C_{b3}	Verbundkoeffizient
C_{b4}	Verbundkoeffizient
C_{bsk}	Verbundkoeffizient
C_F	Anpassungsfaktor an die Versuchswerte nach Holzenkämpfer
$C_{Rd,ct}$	Beiwert für die Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung nach DIN EN 1992-1-1
E_2	Steigung der Spannungs-Dehnungs-Linie des umschnürten Betons im Bereich des linearen Verlaufs
E_c	E-Modul des Betons
E_{frp}	Auf den Faserquerschnitt bezogener E-Modul des Faserverbundwerkstoffes
EI_c	Biegesteifigkeit des Betons
$EI_{s,comp,g}$	Gesamtbügelsteifigkeit des Umschließungsbügels
E_{LW}	E-Modul der Querkraftverstärkung
E_s	E-Modul des internen Bewehrungsstahles
F_{BL}	Kraft im aufgeklebten Bügel
F_{bsm}	Mittlere Verbundkraft der Bewehrung
F_L	Lamellenkraft
$F_{L,EKB}$	Aufnehmbare Gesamtlamellenkraft am Zwischenrisselement nach Neubauer
$F_{L,ges}$	Aufnehmbare Lamellenkraft des Endverankerungsverbandes und der Bügelumschließung
F_{Lb}	Verbundkraft
$F_{Lb,max}$	Maximale Verbundkraft am auflagnernächsten Biegeriss
$F_{Lb,max,dyn}$	Maximale Verbundkraft am auflagnernächsten Biegeriss unter nicht ruhender Belastung
$F_{Lb,max,stat}$	Maximale Verbundkraft am auflagnernächsten Biegeriss unter statischer Belastung
F_s	Betonstahlzugkraft
$F_{u,i}$	Rissöffnungsbehinderung nach Husemann
G_e	Elastische Verbundbruchenergie
G_F	Verbundbruchenergie
$G_{F,I}$	Verbundbruchenergie im Modus I
$G_{F,II}$	Verbundbruchenergie im Modus II
G_g	Schubmodul des Klebstoffes
K_F	Verhältnis zwischen Lamellenkraft und Lamellenkraftänderung nach Neubauer
L_{eff}	Effektiv verstärkte Zone des Trägers
L_{per}	Umfang der Ausbruchtiefe nach Seracino
M_y	Moment bei Erreichen der Fließspannung des Betonstahls
M_{cr}	Rissmoment des Stahlbetonquerschnittes
M_{Ed}	Bemessungswert des einwirkenden Momentes
M_{EdV}	Moment im verstärkten Zustand
M_{Rd}	Bemessungswert des Widerstandes gegen das einwirkende Moment
M_{Rd0}	Aufnehmbares Moment des unverstärkten Bauteils

N_L	Lamellenkraft unter Berücksichtigung des Mitwirkens des Betons zwischen den Rissen nach Neubauer
R_c	Radius der Echausrundung bei Stützen mit Rechteckquerschnitt bzw. Radius des kreisförmigen Stützenquerschnitts
V_{cc}	Betontraganteil bei Bauteilen mit Querkraftbewehrung
V_{ct}	Querkrafttragfähigkeit für Bauteile ohne Querkraftbewehrung
$V_{ct,LE}$	Querkraft, bei welcher noch kein Versatzbruch ohne Bügelumschließung eintritt
V_{cum}	Querkraft, bei welcher noch kein Versatzbruch ohne Bügelumschließung nach Jansze eintritt
V_L	Querkrafttragfähigkeit der Querkraftverstärkung
V_s	Querkrafttragfähigkeit der internen Querkraftbewehrung
$W_{c,0}$	Widerstandsmoment des Betonquerschnittes im ungerissenen Zustand
ΔF_L	Lamellenkraftunterschied am Zwischenrisselement
ΔN_u	Zuwachs der aufnehmbaren Normalkraft infolge der Umschnürungswirkung

Kleine lateinische Buchstaben mit Indizes

a_1	Versatzmaß
a_L	Abstand der Lamelle von der Auflagerachse
a_r	Randabstand der in Schlitze verklebten CFK-Lamellen
a_v	Fiktive Schubspannweite
b_c	Breite des zu verstärkenden Betonbauteils
b_L	Lamellenbreite / Breite der Verstärkung
b_{Lw}	Breite der Querkraftverstärkung
d^a	Statische Nutzhöhe der Betonstahlbewehrung am Auflager
d^a_L	Statische Nutzhöhe der Verstärkung am Auflager
d_L	Statische Nutzhöhe der Verstärkung
d_p	Rechnerischer Durchmesser des Spannstahls
d_{RVE}	Repräsentatives Volumenelement
d_s	Rechnerischer Durchmesser des Betonstahls
d_{si}	Stabdurchmesser
f'_{c0}	Einaxiale Druckfestigkeit des Betons
f'_{cc}	Druckfestigkeit des umschnürten Betons
f'_{cu}	Aufnehmbare Betondruckspannung bei Erreichen der Zugfestigkeit der Umschnürungsbewehrung
f_b	Verbundfestigkeit
f_c	Betondruckfestigkeit (Zylinder)
$f_{c,cube}$	Betonwürfeldruckfestigkeit (150 mm Kantenlänge)
$f_{c,cube,200}$	Betonwürfeldruckfestigkeit (200 mm Kantenlänge)
f_{cb}	Spaltzugfestigkeit nach Oehlers
f_{cb}	Verbundfestigkeit nach Matthys
f_{ck}	Charakteristische Betonwürfeldruckfestigkeit (150 mm Kantenlänge)
f_{cm}	Mittlere Betondruckfestigkeit (Zylinder)
f_{ct}	Betonzugfestigkeit
$f_{ct,BZ}$	Biegezugfestigkeit des Betons
f_{ctk}	Charakteristische Betonzugfestigkeit
f_{ctm}	Mittlere Betonzugfestigkeit
$f_{ctm,surf}$	Mittlere Oberflächenzugfestigkeit des Betons

f_{frp}	Zugfestigkeit des Faserverbundwerkstoffs, ermittelt im Zugversuch am Laminatstreifen
f_{gck}	Druckfestigkeit des Klebstoffes
f_{gtk}	Zugfestigkeit des Klebstoffes
f_L	Festigkeit der Verstärkung
f_l	Querdruckspannung aus Umschnürungswirkung
f_{Lb}	Verbundfestigkeit der Verstärkung
f_{Lu}	Materialfestigkeit der Verstärkung
f_{Lw}	Festigkeit der Querkraftverstärkung
f_y	Fließgrenze des Betonstahls
h_{Lw}	Höhe der Querkraftverstärkung
k_a	Höhenbeiwert der Betondruckspannungsergebenden
k_b	Breiteneinflussfaktor der Lamelle zum Bauteil
k_c	Einflussfaktor für die Lage der Betonierfläche
k_{cr}	Beiwert für den Verbund im Träger nach CNR-DT-200
k_d	Verhältnis zwischen der Dehnsteifigkeit der Verstärkung und der Bewehrung
k_R	Abminderungsfaktor auf Grund des Ausrundungsradius
k_{sys}	Systembeiwert für in Schlitze verklebte CFK-Lamellen
k_T	Einflussfaktor der Umgebungsbedingung nach Zulassung von 1997
k_{vb}	Beiwert zur Berücksichtigung der Verbundbedingungen des Betonstahls
k_z	Verhältnis der inneren Hebelarme der Verstärkung und des Betons
l_0	Spannweite des Trägers
$l_{bL,lim}$	Zum Endverankerungsnachweis nach Zehetmaier zugehörige Verbundlänge
$l_{e,0}$	Eintragungslänge der Bewehrung
l_L	Lamellenlänge
l_{Lb}	Verbundlänge der geklebten Bewehrung
$l_{Lb,max}$	Effektive Verbundlänge
l_{sb}	Verbundlänge des Betonstahls
l_u	Überlappungslänge
n_s	Anzahl der Betonstähle
r_c	Ausrundungsradius
s_{Lr}^a	Schlupf der Lamelle
s_L	Schlupf der Verstärkung
$s_{L,max}$	Zur maximalen Verbundspannung τ_{Lmax} gehörender Schlupf in nichtlinearen Verbundspannungsschlupfbeziehungen
s_{L0}	Maximaler Schlupf nach dem bilinearen Verbundansatz
s_{L1}	Elastischer Schlupf des bilinearen Verbundansatzes
s_{Lw}	Achsabstand der Querkraftverstärkung
s_r	Abstand der Biegerisse
$s_{r,max}$	Maximaler wirksamer Abstand der Biegerisse nach Neubauer; Maximal Auftretender Rissabstand nach Zulassung
t_0	Anfangszeit
t_0	Zeitpunkt des Belastungsbeginns
t_{frp}	Rechnerische Dicke des Faserquerschnitts einer Gelegelage
t_g	Klebstoffdicke
t_L	Lamellendicke /Dicke des Verstärkungsmaterials
t_{Lw}	Dicke der Querkraftverstärkung

$u_{s,äq}$	Äquivalente Verbundfläche der Bewehrung mit Verstärkung
w_r	Rissbreite
z_L	Innerer Hebelarm der Lamelle / Verstärkung
z_m	Mittlerer innerer Hebelarm
z_s	Innerer Hebelarm des Betonstahls
Δx	Längendifferenz

Kleine griechische Buchstaben mit Indizes

$\bar{\lambda}$	bezogene Schlankheit des Druckgliedes
$aufn.\Delta\sigma_L$	Aufnehmbare Lamellendifferenzspannung am Zwischenrisselement
$aufn.\Delta\sigma_{L,G}$	Aufnehmbare Lamellendifferenzspannung am Zwischenrisselement aufgrund des bilinearen Ansatzes
$aufn.\sigma_L^a$	Aufnehmbare Lamellenspannung am äußersten Biegeriss
$\varphi(\infty, t_0)$	Endkriechzahl für den Belastungsbeginn zum Zeitpunkt t_0
$\varphi_k(\infty, t_0)$	modifizierte Endkriechzahl zur Berücksichtigung des nichtlinearen Kriechens für den Belastungsbeginn zum Zeitpunkt t_0
$\Delta\sigma_L$	Lamellendifferenzspannung am Zwischenrisselement
α	Beiwert der Verbundspannungsschlupfbeziehung nach Dai; Steigungsbeiwert der Verbundspannungsschlupfbeziehung nach diversen Ansätzen
α_b	Verhältniswert zwischen der Breite des Bauteils zur Breite der aufgeklebten Lamelle
α_R	Völligkeitsbeiwert der Betondruckspannungsverteilung
α_s	Verhältniswert des E-Moduls des Betonstahls zum E-Modul des Betons
β	Beiwert der Verbundspannungsschlupfbeziehung nach Dai
β	Verhältnis zwischen Vordehnung und Dehnung des Betonstahls bei Erreichen der Fließgrenze
β_L	Längeneinflussfaktor nach Chen und Teng
β_p	Breiteneinflussfaktor nach Chen und Teng
δ_L	Verhältnis der tatsächlichen Dehnungen zwischen der Verstärkung und dem Betonstahl
$\varepsilon_{L,grenz}$	Festgelegte Grenzdehnung der Lamelle
$\varepsilon_{L,max}$	Maximale Dehnung der Verstärkung aufgrund der jeweiligen Festlegung (meist des Verbundes wegen)
ε_{LRk}^a	Dehnungswert der Verstärkung für Endverankerungsnachweis
$\varepsilon_{LRk,lim}^a$	Dehnungswert der Verstärkung für Endverankerungsnachweis
ε_{sRk}^a	Dehnungswert des Betonstahls für Endverankerungsnachweis
ε_{c0}	Längsdehnung des einaxial druckbeanspruchten Betons beim Erreichen der Druckfestigkeit
ε_{c2u}	rechnerische Bruchdehnung des einaxial beanspruchten Betons
$\varepsilon_{cc}(t, t_0)$	Kriechverformung zum Zeitpunkt t nach Belastungsbeginn zum Zeitpunkt t_0
ε_{cc}	Längsdehnung des umschnürten Betons bei Erreichen der Druckfestigkeit f'_{cc}
ε_{cu}	Längsdehnung des umschnürten Betons bei Erreichen der Zugfestigkeit der Umschnürungsbewehrung
ε_{fipu}	Bruchdehnung der Umschnürungsbewehrung im Zugversuch
ε^{II}	Dehnung der Bewehrung/ Verstärkung nach der Dehnungsebeneheit
ε_{jua}	Bruchdehnung der Umschnürungsbewehrung am Bauteil

ϵ_{Lm}	Mittlere Lamellendehnung
ϵ_{Lu}	Bruchdehnung der Querkraftverstärkung
ϵ_{LW}	Dehnung der Querkraftverstärkung
ϵ_L	Dehnung der Lamelle / Verstärkung
ϵ_m	Mittlere Dehnung
ϵ_s	Dehnung des Betonstahls
ϵ_{sm}	Mittlere Betonstahldehnung
ϵ_{sr}	Tatsächliche Dehnung des Betonstahls im Riss
ϵ_t	Dehnung des umschnürten Betons beim Übergang der Spannungs- Dehnungs-Linie vom parabolischen zum linearen Verlauf
ϵ_y	Dehnung des Betonstahls bei Erreichen der Streckgrenze
ϕ	Kriechfunktion
γ_{BA}	Sicherheitsbeiwert Verbund aufgeklebt
γ_{BE}	Sicherheitsbeiwert Verbund in Schlitze verklebt
γ_c	Sicherheitsbeiwert für den Beton
γ_{LG}	Sicherheitsbeiwert CFK-Gelege
γ_{LL}	Sicherheitsbeiwert CFK-Lamellen
γ_m	Sicherheitsbeiwert für das Material
γ_{Rd}	Sicherheitsbeiwert aufgrund der Modellunsicherheiten
η	Abminderungsfaktor aufgrund der Umgebungsbedingungen nach CNR-DT-200
η_{ar}	Einflussfaktor für die Lage der in Schlitze verklebten CFK-Lamelle
η_B	Verstärkungsgrad
η_L	Verhältnis der tatsächlichen Dehnungen der Lamelle zu den rechneri- schen Dehnungen nach Dehnungsebenheit
η_s	Verhältnis der tatsächlichen Dehnungen des Betonstahls zu den rechne- rischen Dehnungen nach Dehnungsebenheit
φ	Querschnittsbeiwert nach Neubauer
φ	Verbundflächenkoeffizient nach Seracino
κ_L	Verhältnis der mittleren Dehnung der Lamelle zu den tatsächlichen mittlere- ren Dehnung der Lamelle
κ_s	Verhältnis der mittleren Dehnung des Betonstahls zu den tatsächlichen mittleren Dehnung des Betonstahls
λ	Beiwert der Verbundspannungsschlupfbeziehung nach Dai
λ	Beiwert zur Lösung der DGL des verschieblichen Verbundes
λ	Schlankheit des Druckgliedes
ρ_L	Bewehrungsgrad der Verstärkungszugbewehrung
ρ_{LW}	Bewehrungsgrad der Querkraftverstärkung
ρ_{s1}	Bewehrungsgrad der Betonstahl Zugbewehrung
σ_{cp}	Drucknormalspannung aus der Vorspannung
σ_L	Lamellenspannung
σ_{LW}	Spannung in der Querkraftverstärkung
σ_{s1R}	Stahlspannung unter Auftreten des Rissmomentes
τ_0	Einwirkende Schubspannung
τ_b	Verbundspannung
τ_c	Schubspannung des Betons
τ_f	Reibverbundspannung

$\tau_{g,k}$	Charakteristischer Wert der Verbundspannung des Klebstoffes bei in Schlitze verklebten Lamellen
τ_K	Klebeverbundspannung nach Zulassung von 1985
τ_L	Verbundspannung der Lamelle
$\tau_{L,lim}$	Grenzwert der konstanten Verbundspannung nach SIA 166
$\tau_{L,max}$	Maximale Verbundspannung nichtlinearer Ansätze für die Verbundspannungsschlupfbeziehung
τ_{L1}	Maximale Verbundspannung des bilinearen Ansatzes
τ_{Lm}	Mittlere Verbundspannungen der Verstärkung
τ_{LR}	Reibverbundspannung
τ_m	Mittlere Verbundspannung der Bewehrungsstränge
τ_{sm}	Mittlere Verbundspannungen der Betonstahlbewehrung
ω	Beiwert zur Lösung der DGL des verschieblichen Verbundes
ω	Knickzahl
ξ_1	Verhältnis der tatsächlichen Dehnungen zwischen dem Spannstahl und dem Betonstahl

Abkürzungen:

CF	Kohlenstofffaser
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DGL	Differentialgleichung
ZRE	Zwischenrisselement
END	Endverankerung

Begriffe:

Klebstoff

Nichtmetallischer Stoff, der Werkstoffe durch Oberflächenhaftung (Adhäsion) so verbinden kann, dass die Verbindung eine ausreichende innere Festigkeit (Kohäsion) besitzt.

Gelege

Spezielle textile Flächenstruktur, die zur Verstärkung in Faserverbundwerkstoffen eingesetzt wird. Ein Gelege besteht aus mehreren Lagen parallel angeordneter Faserbündel. Die einzelnen Lagen unterscheiden sich in der Faserorientierung, deren Ausrichtung mit einem Winkel zur Produktionsrichtung angegeben wird.

Geklebte Bewehrung

Zugfeste Materialien, welche mit dem Beton durch einen Klebstoff verbunden sind.

In Schlitzen verklebte Lamellen

Hierbei werden die Lamellen mit einem Klebstoff in Schlitze, welche vorher in den Beton eingeschnitten wurden, verklebt.

Lamelle

Unidirektionale Faserverbundwerkstoffe, welche bereits im Herstellwerk vorproduziert und thermisch ausgehärtet wurden.

Geklebte Bügel

Schubfest aufgeklebte Stahllaschen oder Faserverbundmaterial, welche in geschlossener oder halbgeschlossener Form das Bauteil umfassen.

Versatzbruch

Spezielle Bruchart, die bei der geklebten Bewehrung auftreten kann, bei welcher sich aufgrund eines Versatzes in der Zugkraft die Betondeckung samt der geklebten Bewehrung ablösen kann.

Lasche

Flachprofil meist aus Stahl, welches als aufgeklebte Bewehrung genutzt werden kann.

Zwischenrisselement

Element zwischen zwei Biegerissen, welches zur Verbundkraftübertragung benötigt wird.

Faserverbundwerkstoff

Ein Faserverbundwerkstoff ist ein im Allgemeinen aus einer bettenden Matrix sowie verstärkenden Fasern bestehender Mischwerkstoff.

Kohlenstofffaser

Kohlenstofffasern sind industriell hergestellte Fasern aus kohlenstoffhaltigen Ausgangsmaterialien, die durch Pyrolyse in graphitartig angeordneten Kohlenstoff umgewandelt werden.

Glasfaser

Eine Glasfaser ist eine lange, dünne Faser, die aus Glas besteht. Zur Herstellung von Glasfasern zieht man geschmolzenes Glas zu dünnen Fäden.

Aufgeklebte Bewehrung

Bewehrung in Form von Stahllaschen oder Faserverbundwerkstoffen, welche schubfest auf die Oberfläche des Betons verklebt wird.

Endverankerung

Bereich am Ende der geklebten Bewehrung, in welcher die Restkräfte übertragen werden müssen.

Verbundentkopplung

Zeitpunkt des bereichsweisen Versagens des Verbundes der aufgeklebten Bewehrung.

Glasübergangstemperatur

Temperatur, bei welchem im Kunststoff die amorphe Phase aufgelöst wird. Nach dieser Temperatur sind die mechanischen Eigenschaften stark verändert und der Kunststoff weist eine deutlich geringere Festigkeit und Steifigkeit auf.

Verbundversagen

Versagen der Verbindung zwischen zwei Materialien. In diesem Sachstandbericht ist im Regelfall das Versagen der Verbindung zwischen der geklebten Bewehrung und des Betons mit diesem Begriff verbunden.

1 Hintergrund und Motivation

Eine wesentliche Aufgabe der Baubranche in den kommenden Jahren wird es sein, unsere Bausubstanz zu erhalten und diese an unsere sich ständig ändernden Anforderungen anzupassen /50/. Dazu müssen Bestandsbauwerke instandgesetzt und verstärkt werden. Im Gegensatz zu Instandsetzungen sind Verstärkungsmaßnahmen stets in ihrer Wirkung quantitativ beschreibbar und somit immer auf ihre Tragfähigkeit hin statisch nachzuweisen. Zur nachträglichen Verstärkung stehen verschiedenste Verfahren zur Verfügung, ein Überblick wird in DAfStb Heft 467 /279/ gegeben. Beim Bauen im Bestand muss häufig die Nutzung oder eine Teilnutzung während der Baumaßnahmen aufrechterhalten werden.

Hier bietet die geklebte Bewehrung durch ihre kurzen Ausführungszeiten und wegen der geringen Baustelleneinrichtung einige Vorteile. An der Verstärkung von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung wird seit langem intensiv geforscht und das Verfahren hat sich in der Praxis etabliert. Die ersten Forschungen wurden Mitte der 60er Jahre in Frankreich zum Verbundverhalten von aufgeklebten Stahllaschen auf Beton durchgeführt /29/. In Deutschland wurde die erste Zulassung zur Verklebung von Stahllaschen 1979 durch das DIBt /67/ erteilt. Seitdem sind zahlreiche Verstärkungsmaßnahmen mit Stahllaschen, seit den 90er Jahren vermehrt mit CFK-Werkstoffen, gerade im Hochbau ausgeführt worden. Aber es gibt auch Pilotanwendungen an Brückenbauten, wie zum Beispiel die Verstärkung der Röslauer Talbrücke /104/.

Die Möglichkeiten und die Verfahren zur Verstärkung sowie die Bemessungsverfahren werden ständig erweitert. Es liegen mittlerweile zahlreiche Bemessungsansätze zu vielen Teilgebieten der aufgeklebten Bewehrung vor. Desweiteren haben viele Länder Bemessungsrichtlinien erstellt. Im Rahmen dieses Sachstandberichtes sind diese Bemessungsansätze und Vorschriften gesammelt worden und werden im Folgenden wiedergegeben. Desweiteren wurden zahlreiche Versuche aus der nationalen und internationalen Literatur entnommen und in eine Versuchsdatenbank aufgenommen, welche sich im Anhang wiederfindet. Anhand dieser Versuche sind die Bemessungsansätze bewertet worden.

In diesem Sachstandbericht werden zuerst in Kapitel 2 die verschiedenen Arten der geklebten Bewehrung kurz erläutert. In Kapitel 3 wird dann auf die verschiedenen Versagensarten von Bauteilen, die mit geklebter Bewehrung verstärkt sind, eingegangen. Diese unterscheiden sich gegenüber denen, die im konventionellen Stahlbetonbau auftreten, teilweise erheblich. Hierbei spielt das Verbundversagen eine zentrale Rolle. Deshalb wird in Kapitel 4 speziell auf das Verbundversagen eingegangen. In Kapitel 5 werden die verschiedenen Bemessungsmodelle für den Grenzzustand der Tragfähigkeit vorgestellt und anhand von Versuchen beurteilt. Hierbei orientiert sich die Reihenfolge der Nachweise an der DIN 1045-1 /82/. Anschließend wird in Kapitel 6 der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit thematisiert. Im Anhang A sind die Rechenannahmen aufgelistet, die teilweise zur Nachrechnung der Versuche benötigt wurden. In den restlichen Anhängen befindet sich die Versuchsdatenbank, welche nach den verschiedenen Versuchsarten bzw. Applizierungstypen geordnet ist. Anhand des dokumentierten Wissens werden dann in der Zusammenfassung in Kapitel 7 noch vorhandene Wissenslücken aufgezeigt.

Dieser Sachstandbericht bietet jedoch nur einen Überblick über gängige Modelle sowie Problemstellungen und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Dies ist aufgrund der Flut an Veröffentlichungen und Untersuchungen, gerade im Ausland, auch nicht möglich.

Desweiteren bezieht sich der Sachstandbericht auf das Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung. Das Verstärken von Holz, Stahl, Mauerwerk und anderer Materialien ist international eine gängige Praxis, für die auch zahlreiche Untersuchungen existieren, wird aber in diesem Sachstandbericht nicht behandelt.

2 Verstärken mit geklebter Bewehrung

2.1 Material

2.1.1 Bewehrungselemente

Bei geklebter Bewehrung kommen vor allem zwei Materialien - Stahl und Faserverbundwerkstoff – zur Anwendung. Vor über 30 Jahren wurden die ersten praktischen Erfahrungen mit der Verwendung von Zugelementen aus Stahl zur nachträglichen Bauteilverstärkung von Stahlbetonbauteilen gemacht. In den heute in Deutschland gültigen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für das nachträgliche Verstärken mit geklebten Stahllaschen ist in der Regel ein Stahl der Güte S 235 zu verwenden. Vor ca. 20 Jahren wurden von Kaiser /149/ Forschungen angestellt, um die bis dahin eingesetzten Stahllaschen durch alternative Werkstoff-

fe zu ersetzen. Aufgrund ihrer Materialeigenschaften und der erleichterten Anwendung werden bis heute Faserverbundwerkstoffe bevorzugt. Ein Faserverbundwerkstoff besteht aus der Matrix und den in ihr eingebetteten Fasern. Der Matrix, meist ein Epoxidharz, kommen dabei die Aufgaben der Formgebung, der Lastweiter- und überleitung zu den Fasern sowie deren Schutz zu. Als Fasermaterial werden im Bauwesen zur Bauteilverstärkung aufgrund ihrer im Vergleich zu Glas- oder Aramidfasern überlegenen mechanischen Eigenschaften fast ausschließlich Kohlefasern zur Herstellung von kohlenstofffaserverstärkten Lamellen (CFK-Lamellen) oder Gelegen verwendet. Die Eigenschaften des Faserverbundwerkstoffes CFK hängen in Richtung parallel zur Faser im Wesentlichen von den Eigenschaften der Faser ab, während quer zur Faser die Eigenschaften der Matrix dominieren. Die Faserverbundwerkstoffe besitzen folglich ein ausgesprochen anisotropes Materialverhalten mit hoher mechanischer Belastbarkeit in Faserlängsrichtung und vergleichsweise geringen Festigkeiten sowie großer Empfindlichkeit in Querrichtung. Unidirektionale CFK-Lamellen mit einem Faseranteil von ca. 70 % besitzen die 4 bis 6-fache Festigkeit des Betonstahls und einen den Anforderungen anpassbaren Elastizitätsmodul; allgemein bauaufsichtlich zugelassen sind CFK-Lamellen mit einem Elastizitätsmodul zwischen ca. 160 und 215 GPa. Als wesentliche Vorteile sind für die Ausführung ihr geringes Eigengewicht, die leichte Handhab- und Verarbeitbarkeit sowie die große Flexibilität der möglichen Lieferformen - Abmessungen und Lieferlängen- anzusehen. Im Vergleich zu Stahllaschen kann z. B. im Montagezustand auf zusätzliche temporäre Unterstützungen verzichtet werden.

Hinsichtlich des Tragverhaltens und der Dauerhaftigkeit von Verstärkungsmaßnahmen sind die nicht gegebene Gefahr von Korrosion, das ausgezeichnete Ermüdungsverhalten, eine Dauerfestigkeit größer 80 % der Kurzzeitfestigkeit und die praktisch nicht vorhandene Kriech- oder Relaxationsneigung hervorzuheben. Kohlenstofffaserverstärkte Verbundwerkstoffe weisen ein bis zum Bruch weitgehend linear elastisches Materialverhalten auf; das ausgeprägte Fließplateau von Stahllaschen fehlt. Die folgenden Verbund und Bemessungsmodelle sind im Regelfall für diese Bewehrungselemente entwickelt worden und sind auch nur für diese anwendbar. Eine Extrapolation auf andere Bewehrungselemente, welche erheblich andere Steifigkeitsverhältnisse aufweisen, ist ohne weitere gezielte Untersuchungen nicht möglich.

2.1.2 Klebstoff

Als Klebstoff für die Bewehrung kommt im Regelfall ein Klebstoff auf Epoxidharzbasis zum Einsatz. In den heute in Deutschland gültigen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für aufgeklebte CFK-Lamellen und Stahllaschen wird ein niedrigviskoser, spachtelbarer und kalterhärtender Epoxidharzkleber verwendet, auf welchen sich die meisten Versuche und Modelle im Folgenden beziehen. Diese Klebstoffe besitzen circa eine Zugfestigkeit von 15 - 30 N/mm² und eine Druckfestigkeit von 60 - 120 N/mm². Bei der Anwendung von Kohlefasergelegen wird jedoch meist ein höher viskoser Epoxidharzklebstoff verwendet, um eine bessere Zusammenwirkung von Klebstoff und Faser zu erhalten. Die Epoxidharzklebstoffe können jedoch aufgrund des Festigkeitsverlustes bei hohen Temperaturen nicht eingesetzt werden. Für den Brandfall kann entweder die geklebte Bewehrung nicht angesetzt werden oder die geklebte Bewehrung muss durch geeignete Maßnahmen vor den hohen Temperaturen im Brandfall geschützt werden. Untersuchungen zu den Klebstoffen im Bauwesen wurden von Rehm und Franke /244/ durchgeführt.

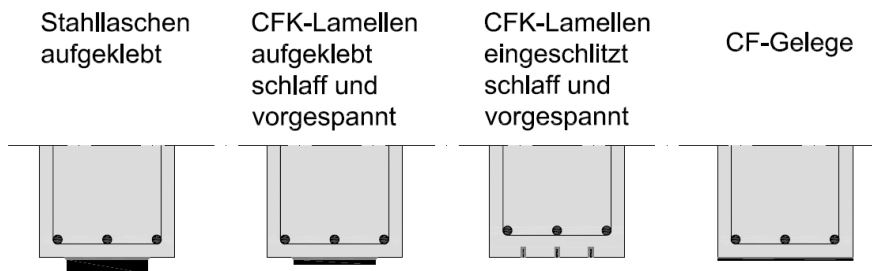
Tausky /312/ erläutert die Anforderungen an Epoxidharzkleber zur nachträglichen Verstärkung mit Stahllaschen. Ranisch /237/ untersucht verschiedene Epoxidharzkleber im Hinblick auf ihre Viskosität. Von Bochart /25/ werden zahlreiche Untersuchungen an den bauaufsichtlich zugelassenen Klebstoffen, speziell im Bezug auf das Temperatur- und Kriechverhalten der Epoxidharzklebstoffe, durchgeführt. Durch die europäische Norm DIN EN 1504-4 /90/ wird versucht, einen europäischen Standard für Klebstoffe, welche für Klebungen von Betontragwerken bestimmt sind, zu schaffen.

2.2 Verstärkungsarten

2.2.1 Allgemein

Durch die Anwendung der geklebten Bewehrung kann neben der Biegetragfähigkeit die Querkrafttragfähigkeit, die Torsionstragfähigkeit sowie die Tragfähigkeit von Stützen erhöht werden. Aber auch das Ertüchtigen und Wiederherstellen von erdbebengefährdeten bzw. erdbebengeschädigten Beton- und Mauerwerkskonstruktionen bildet international ein großes Anwendungsgebiet. Ein Überblick über die verschiedenen Verstärkungsvarianten wird in Bild 2.1 gegeben.

Biegeverstärkung



Querkraftverstärkung

Stützenverstärkung

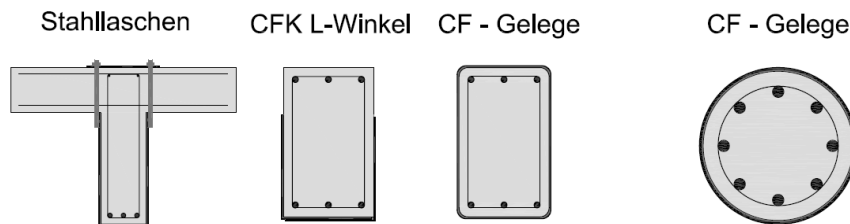


Bild 2.1: Die verschiedenen Möglichkeiten zur Verstärkung von Stahlbetonbauteilen mit geklebter Bewehrung

Fig. 2.1: The different possibilities for strengthening reinforced concrete elements with adhesive bonded reinforcement

2.2.2 Biegeverstärkung

Bei der Biegeverstärkung können sowohl Stahllaschen als auch CFK-Lamellen auf den Beton geklebt werden. Sind Betondeckung und Betonfestigkeit ausreichend, so können die CFK-Lamellen auch in Schlitze verklebt werden. CFK-Lamellen sind unidirektionale Bänder, bei welchen die Fasern bereits im Werk in einer Epoxidharzmatrix getränkt, geformt, thermisch ausgehärtet und als Composite auf die Baustelle geliefert werden. Diese werden dann, wie auch die Stahllaschen, mit einem spachtelbaren Klebemörtel auf Epoxidharzbasis mit dem Beton verklebt. Im Gegensatz dazu werden die CF-Gelege mit dem Epoxidharz direkt nass an den Beton geklebt, was eine höhere Flexibilität bietet, jedoch eine höhere Anforderung an die Ausführenden stellt. Die CFK-Lamellen besitzen in der Regel eine Stärke von 1-2 mm, die Gelege sind wesentlich dünner und besitzen eine Stärke von 0,1 - 0,2 mm. Sowohl die Gelege als auch die CFK-Lamellen können in mehreren Lagen aufeinander verklebt werden. In Deutschland sind bei CFK-Lamellen maximal zwei Lagen zulässig. Bei der Biegeverstärkung beruhen die Bemessungsansätze darauf, dass die geklebte Bewehrung nie normal zur Klebefuge belastet wird. Bei zweiachsiger Momentenbelastung, wie sie bei Platten auftritt, kann die Bewehrung auch kreuzweise aufgeklebt werden.

2.2.3 Querkraftverstärkung

Zur Erhöhung der Querkrafttragfähigkeit müssen die Querkraftrisse im Balken überbrückt und die so auftretenden Zugkräfte in der Druckzone verankert werden. Aber auch nur die Überbrückung der Risse kann aufgrund einer Veränderung des Spannungszustandes bzw. der Plastizitätstheorie zu einer erhöhten Querkrafttragfähigkeit führen. Die aufgeklebt applizierte Bewehrung kann als geschlossener Bügel, als U-Winkel oder nur seitlich aufgebracht werden, dabei können sowohl Gelege, Lamellen oder auch Stahllaschen verwendet werden. Es gibt auch Querkraftversuche zu seitlich in Schlitze verklebten CFK-Lamellen /59/.

In Bild 2.2 sind verschiedene Möglichkeiten zur Querkraftverstärkung dargestellt. In Kapitel 5.10 werden die Modelle zur Querkraftverstärkung erläutert und in Anhang C werden einige Versuche zur Querkraftverstärkung aufgelistet.

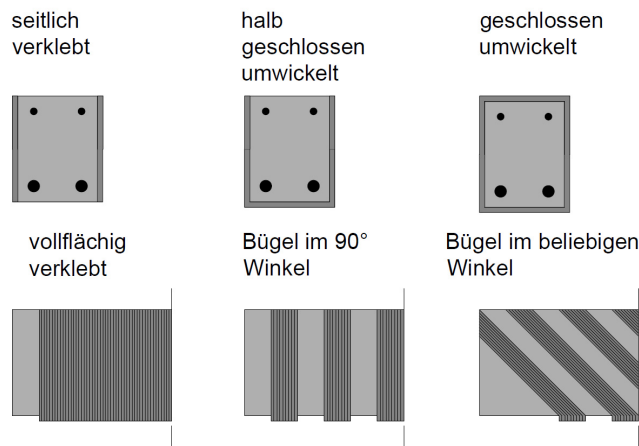


Bild 2.2: Die verschiedenen Anordnungsmöglichkeiten der geklebten Bewehrung zur Querkraftverstärkung

Fig. 2.2: The different layout possibilities for shear strengthening with adhesive bonded reinforcement

2.2.4 Torsionsverstärkung

Zur Erhöhung der Torsionsverstärkung stehen prinzipiell die gleichen Möglichkeiten zur Verfügung wie bei der Querkraftverstärkung. Eine Umschließung wird hier aber aufgrund des Schubflussverlaufes besonders effektiv sein. Ein Überblick über die Bemessungsverfahren findet sich in Kapitel 5.10.6. Im Anhang D sind einige Versuche zur Torsionsverstärkung aufgelistet.

2.2.5 Stützenumwicklung

Eine Erhöhung der Tragwirkung von Stützen kann durch Umwicklung dieser mit Kohlefasergelegen, die aufgrund der hohen Steifigkeit bestens dafür geeignet sind, erreicht werden. Durch die Umwicklung wird die Querdehnung des Betons verhindert und es kann sich ein mehrdimensionaler Spannungszustand im Beton ausbilden. Es ist möglich, sowohl runde als auch rechteckige Stützen zu verstärken, wobei bei den rechteckigen Stützen die Kanten ausgerundet werden müssen, um eine Spannungsspitze im Gelege zu verhindern. Je näher die Stütze an der Kreisform ist, desto höhere Wirkungsgrade können erzielt werden. Die Stützen können vollflächig oder nur in Streifen umwickelt werden, wie Bild 2.3 zeigt.

Die Kräfte in der Umschnürungsbewehrung können entweder durch einen Übergreifungsstoß der Gelege ein Gleichgewicht erlangen oder wie es bei der wendelförmigen Umschnürung der Fall ist ein Gleichgewicht über den Beton erreichen. Letzteres ist jedoch aufgrund der schlechteren Verbundwirkung zwischen Beton und Gelege gegen über der direkten Verklebungen mit einer geringeren Tragfähigkeit verbunden.

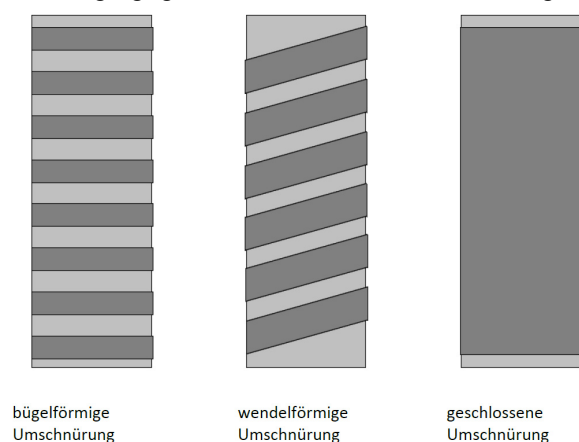


Bild 2.3: Verschiedene Anordnungsmöglichkeiten von Kohlefasergelegen zur Stützenumwicklung, entnommen aus /208/

Fig. 2.3: Different layout possibilities for column wrapping with carbon fiber sheets, token from /208/

2.3 Normungssituation

2.3.1 Situation in Deutschland

In Deutschland werden derzeit die Bemessung, die Ausführung und die zu verwendenden Materialien durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen geregelt. In der Vergangenheit sind Zulassungen für aufgeklebte Stahllaschen zur Biege- und Schubverstärkung, Zulassungen für aufgeklebte und in Schlitze verklebte CFK-Lamellen zur Biegeverstärkung sowie eine Zulassung für aufgeklebte Kohlenstofffaserfolien zur Biege- und Schubverstärkung erteilt worden.

2.3.2 Situation im Ausland

Im Ausland gibt es derzeit zahlreiche Richtlinien und Regelwerke, herausgegeben von Forschungseinrichtungen, Interessenverbänden oder Normengremien. Je nach Herausgeber und Land unterscheiden sich diese Vorschriften teilweise erheblich. Die Interessensverbände versuchen meistens, ein wirtschaftliches Verstärken zu propagieren, welches im Interesse ihrer Mitglieder liegt. Die Forschungseinrichtungen versuchen, ihre Erkenntnisse, welche teilweise nur bestimmte Bereiche abdecken, einer breiteren Masse zur Verfügung zu stellen. Die Normengremien arbeiten je nach Zusammensetzung immer einen Kompromiss zwischen den verschiedenen Beteiligten aus. Es ist zu beobachten, dass im Ausland die Vorschriften meist deutlich wirtschaftlicher und größtenteils relativ einfach gehalten sind, ob die Regelungen der Vorschriften für alle Fälle auf der sicheren Seite liegen, wurde wohl in den wenigsten Fällen überprüft. Desweiteren haben die meisten Vorschriften einen stark empirischen Charakter und wurden auf Grundlage von Bauteilversuchen aufgestellt und überprüft. Da die Bauteilversuche jedoch fast alle an Einfeldträgern mit einer oder zwei Einzellasten durchgeführt worden sind, decken diese die in der Praxis vorkommenden Systeme nur teilweise ab. Aus diesem Grund sind viele der aufgestellten empirischen Festlegungen entweder unsicher oder stark konservativ.

Bei der Betrachtung der internationalen Vorschriften muss jedoch auch beachtet werden, dass das geforderte Sicherheitsniveau der einzelnen Länder teilweise stark unterschiedlich ist und die Aufgabenstellung der Verstärkung meist eine andere ist, da in vielen Ländern die Verstärkung für Ausnahmefälle wie Erdbeben durchgeführt wird, was in Deutschland eher eine untergeordnete Rolle spielt.

2.4 Vergleich mit Versuchswerten

Die im Folgenden gezeigten Vergleiche zwischen den Versuchswerten und den verschiedenen Modellen sind nicht absolut zu bewerten, sondern stellen vielmehr einen Trend da.

Ein absoluter Vergleich ist nicht möglich, da es sich bei den wenigsten Versuchen um Versuche handelt, die im eigenen Labor durchgeführt worden sind, sondern um welche, die aus der Literatur entnommen sind. Auf die Bewertung der Versuchsergebnisse können folgende Gründe bzw. Größen einen Einfluss haben:

- verschiedene Versuchsaufbauten (z. B. unterschiedliche Auflagerbreiten, unterschiedliche Lasteinleitung, Schiefstellungen, Steifigkeit der Prüfkonstruktion)
- gerade bei Verbundproblemen kann die Prüfgeschwindigkeit einen erheblichen Einfluss haben (vgl. z. B. Rilem RC 6 /250/ und Zilch und Niedermeier /351/) , welche bei den wenigsten Versuchen dokumentiert ist, aber höchstwahrscheinlich fast überall unterschiedlich war
- Art der Versuchsdurchführung (Kraftsteuerung, Wegsteuerung oder Aufbringen der Last in Stufen)
- die Betonzusammensetzung (Größtkorn, Zuschlagsfestigkeiten) kann teilweise erhebliche Einflüsse auf die Verbundfestigkeiten, sowie auf die Verhältnisse zwischen den verschiedenen Betonkenngrößen haben
- durch die verschiedenen Messapparaturen können Streuungen auftreten (z. B. Induktive /Optische Wegmessung, unterschiedlich gute Kalibrierung, unterschiedliche Messraten, Messgenauigkeit)
- mangelhafte Dokumentation, teilweise fehlende Werte mussten durch Annahmen ergänzt werden (z. B. E-Modul der Betonstahlbewehrung, Verbundbedingungen der Betonstahlbewehrung)
- handelt es sich bei den angegebenen Baustoffkenngrößen um Mittelwerte, Fraktile oder nur einzelne Stichproben
- Art der Ermittlung der Baustoffkenngrößen wurde nicht immer dokumentiert (Betonfestigkeit am Würfel oder Zylinder, Probekörpergröße, Art der Prüfung, Prüfnorm)
- klimatische Streuung (Unterschiedliche Luftfeuchte und Temperatur in den Laboren)
- unterschiedliche Rippungen der Stäbe auf dem internationalen Markt und eine damit verbundene abweichende Verbundenergie
- Angabe des Bewehrungsstabes in Nenndurchmesser oder echtem Durchmesser
- unterschiedliche Klebstoffdicken

- verschieden viskose Klebstoffe
- teilweise stark unterschiedliche Verstärkungsmaterialien, gerade bei den Faserverbundwerkstoffen
- unterschiedliche Ausführungsqualität
- eventuelle Manipulation der Versuchswerte

Aus diesen Gründen kommt es bei den Vergleichen zwischen den Versuchen teilweise zu erheblichen Streuungen.

3 Versagensarten

3.1 Versagensarten von biegeverstärkten Bauteilen

Eine sichere Bemessung einer Verstärkung muss so gestaltet sein, dass die möglichen Versagensformen vermieden werden. Dazu müssen die verschiedenen Versagensformen wie deren kritische Last bekannt sein, um das Bauteil so bemessen zu können, dass ein dem Sicherheitsniveau entsprechender ausreichender Abstand zu der kritischen Last der jeweiligen maßgebenden Versagensform vorhanden ist. Ein Überblick über die auftretenden Versagensformen ist in Bild 3.1 dargestellt.

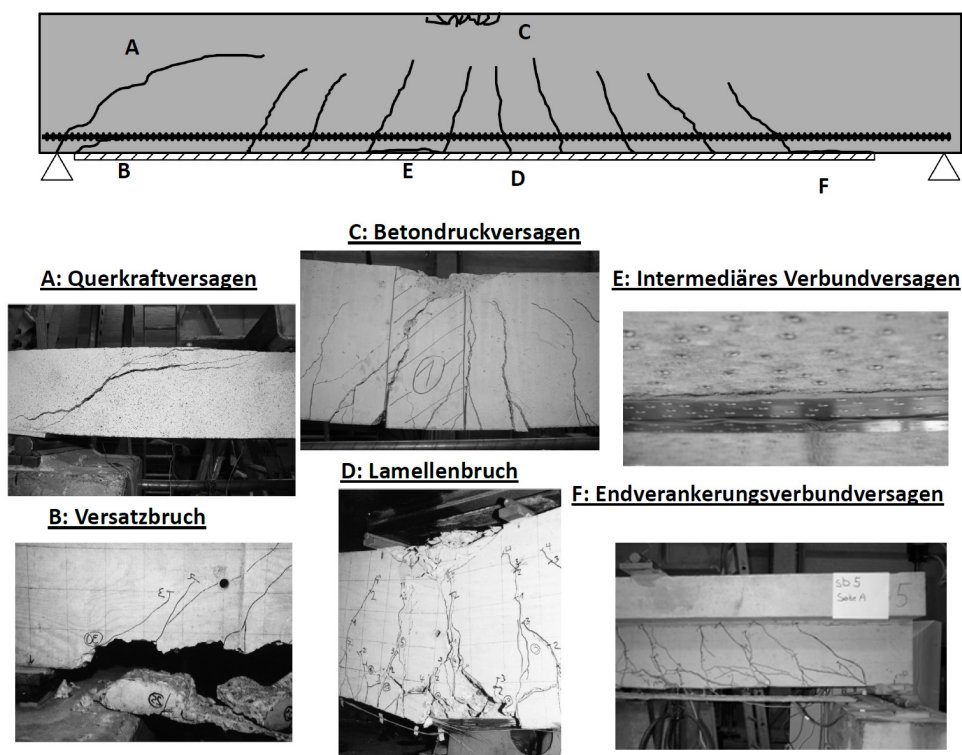


Bild 3.1: Exemplarische Darstellung der auftretenden Versagensarten eines durch geklebte Bewehrung biegeverstärkten Stahlbetonträgers

Fig. 3.1: Exemplary illustration of the occurring failure modes of a reinforced concrete beam strengthened with adhesive bonded reinforcement

Zunächst können die aus dem konventionellen Stahlbetonbau bekannten Versagensarten um die Wirkungsweise der CFK-Lamelle erweitert werden.

- Betonversagen in der Druckzone
- Fließen der inneren Bewehrung gefolgt vom Betonbruch
- Fließen der inneren Bewehrung gefolgt vom Lamellenbruch
- Querkraftversagen
- Fließen der aufgeklebten Stahllasche

Jedoch treten neben diesen aus dem konventionellen Stahlbetonbau gut bekannten und relativ gut beschreibbaren Versagensformen noch weitere besondere Versagensformen auf.

Hier ist zunächst der Versatzbruch zu nennen, bei welchem sich am Lamellenende die Betondeckung ablöst; dies tritt aufgrund des zusätzlichen vertikalen Versatzes zwischen Bügelbewehrung und Lamelle auf, da die Zugspannungen aus der Lamelle nicht bis in die Druckzone des Balkens hochgehängt werden können.

Bei der Verwendung von aufgeklebter Bewehrung werden jedoch im Regelfall nicht die Versagensarten des konventionellen Stahlbetonbaus auftreten, sondern der Verbund zwischen Klebstoff und Beton wird versagen. Bei diesem Versagen brechen im Regelfall die oberflächennahen Betonschichten aus, wenn an dem betrachteten Punkt die Zugfestigkeit des Betons überschritten wurde. Die in den letzten Jahren zahlreich durchgeführten Bauteilversuche haben gezeigt, dass dieses Versagen im Regelfall maßgebend ist. Aus diesem Grund wird im nachfolgenden Kapitel auf diese spezielle Versagensform eingegangen.

3.2 Verbundversagen

3.2.1 Ablösen der aufgeklebten Bewehrung am Biegeträger

Bei der Verwendung von aufgeklebter Bewehrung kann das Ablösen der geklebten Bewehrung in verschiedenen Bereichen eines verstärkten Trägers auftreten und ist auf verschiedene Ursachen zurückzuführen. Bild 3.2 zeigt die verschiedenen Bereiche und Brucharten.

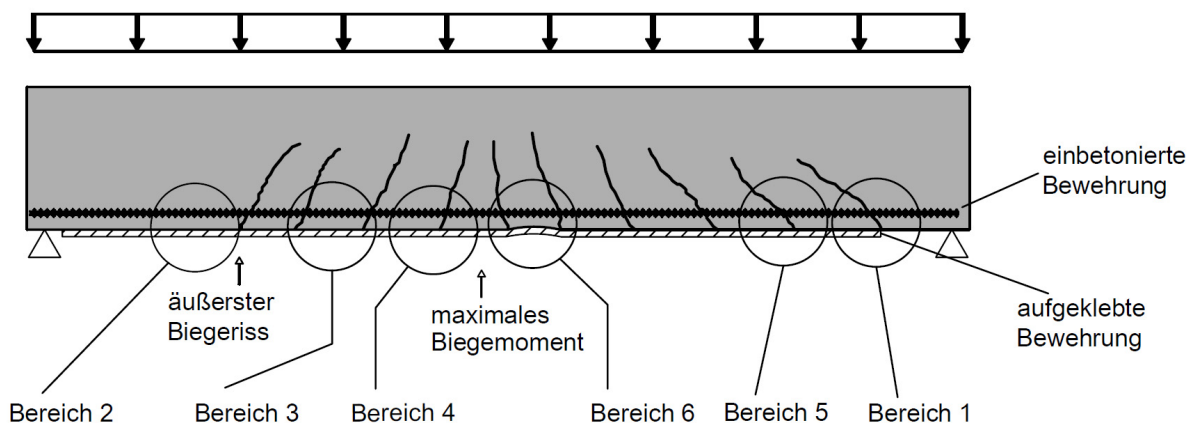


Bild 3.2: Die verschiedenen Bereiche eines biegeverstärkten Trägers, in welchen eine Ablösung der aufgeklebten Bewehrung stattfinden kann. (In Anlehnung an Niedermeier /209/)

Fig. 3.2: The different area of flexural strengthened beam, were a debonding of the externally bonded reinforcement can occur. (By imitation on Niedermeier /209/)

In Anlehnung an Niedermeier /209/ kann das Ablösen der geklebten Bewehrung in den einzelnen Bereichen auf folgende Ursachen zurückgeführt werden.

Bereich 1: Laschenende: Bedingt durch den Steifigkeitssprung tritt insbesondere bei Verstärkungen mit Stahllaschen am Laschenende ein kombinierter Biegeschubriss auf, der sich, wenn keine geklebten Schubdügel angeordnet wurden, parallel zur Klebefuge entweder oberflächennah oder auf Höhe der einbetonierten Bewehrung im Beton fortsetzt und zum Ausfall der geklebten Bewehrung im Endbereich führt. Beobachtet wurde diese Art der Ablösung vor allem bei großen Abständen des Laschenendes vom Auflager.

Bereich 2: äußerster Biegeriss: Die geklebte Bewehrung kann in den meisten Anwendungsfällen nicht über das Endauflager geführt werden. Die Laschen enden dann im Feldbereich. Insbesondere bei einer Beanspruchung durch Gleichlasten, von der für beinahe alle Anwendungen auszugehen ist, müssen am äußersten Biegeriss große Zugkräfte von der geklebten Bewehrung aufgenommen werden, da die versetzte Zugkraftlinie parabolisch verläuft und in diesem Bereich eine große Steigung aufweist. Bei aufgeklebten Stahllaschen ist der auf die geklebte Bewehrung entfallende Zugkraftanteil besonders hoch. Wegen der niedrigen Streckgrenze müssen am Ort der maximalen Momentenbeanspruchung große Laschenquerschnitte angeordnet werden, die zu den Auflagern hin nicht abgestuft werden können. Bei der einbetonierten Bewehrung hingegen sind Querschnittsabstufungen die Regel, so dass in vielen Fällen nur ein Drittel der Feldbewehrung über das Auflager geführt wird. Die größere statische Nutzhöhe der an der Oberfläche verklebten Stahllaschen und der Umstand, dass sich das Bauteil im Querschnitt des äußersten Biegerisses zum Zeitpunkt des Verklebens im ungerissenen Zustand 1 befindet, führen darüber hinaus zu

einem hohen auf die geklebte Bewehrung entfallenden Zugkraftanteil. Zu einer Ablösung kommt es, wenn innerhalb der vorhandenen Verbundlänge vom Laschenende bis zum äußersten Biegeriss der auf die geklebte Bewehrung entfallende Zugkraftanteil vom Klebeverbund nicht aufgenommen werden kann. Solange eine Zugkraftumlagerung unter Einhaltung geometrischer Verträglichkeitsbedingungen auf die einbetonierte Bewehrung möglich ist, wird nur eine lokale Ablösung am Rissufer auftreten. Zur vollständigen Ablösung in diesem Bereich kommt es, wenn die Zugkraftdeckung am äußersten Biegeriss unter Einhaltung der Verträglichkeitsbedingungen nicht mehr möglich ist.

Bereich 3: querkraftbeanspruchter Bereich: Ausgehend vom äußersten Biegeriss wird die Zugkraft zwischen den folgenden Biegerissen sukzessiv bis zum Ort der maximalen Momentenbeanspruchung aufgebaut. Kann der auf die geklebte Bewehrung entfallende Zugkraftzuwachs zwischen zwei Biegerissen nicht über Verbundspannungen aufgebaut werden, so kommt es zu Ablösungen. Wie am äußersten Biegeriss gilt auch in diesem Bereich, dass zunächst lokale Ablösungen auftreten, wenn dadurch eine Zugkraftumlagerung auf die einbetonierte Bewehrung möglich wird.

Bereich 4: maximale Momentenbeanspruchung: Am Ort der maximalen Momentenbeanspruchung ist in den meisten Anwendungsfällen (Ausnahmen: Stützmomente sowie lokale hohe Einzellasten) von einem nahezu konstanten Biegemoment und somit einem geringen Zugkraftzuwachs in den Bewehrungssträngen auszugehen. Infolge der großen Dehnungsunterschiede zwischen Beton und geklebter Bewehrung können jedoch auch hier große Verbundspannungen aktiviert werden. Bei großen Abständen der Biegerisse können unter Umständen an den Rissufern lokale Ablösungen der geklebten Bewehrung infolge des spröden Verbundverhaltens auftreten. Kommt es zum Überschreiten der Fließgrenze der inneren Bewehrung, was zuerst an der Stelle des maximalen Momentes eintreten wird, ist ebenfalls mit einem Anstieg der Lamellenkraft zu rechnen. Dies tritt vor allem bei der Verwendung von Faserverbundwerkstoffen ein, da hier die Bruchdehnung deutlich höher ist als die Dehnung, bei welcher der Stahl zu fließen anfängt. Durch Vorhandensein einer Vordehnung aufgrund des Eigengewichtes des zu verstärkenden Bauteils wird die Fließgrenze schneller erreicht.

Bereich 5: vertikale Rissuferversätze: Für die Aktivierung der Tragwirkung einer Schubbewehrung ist die Verschiebung der Ufer schräg zur Bauteilachse verlaufender Schubrisse erforderlich. Gleiches gilt für die Aktivierung der Querkrafttragfähigkeit durch Rissuferverzahnung bzw. Dübelwirkung der einbetonierten Bewehrung. Die für die Querkraftabtragung notwendige Verschiebung der Rissufer gegeneinander führt zu vertikalen Versätzen an der Bauteiloberfläche. Durch die Biegesteifigkeit der geklebten Bewehrung entstehen an den Rissflanken Zug- und Druckspannungen senkrecht zur Klebefuge. Auftretende Zugspannungen können die Ablösung der geklebten Bewehrung begünstigen.

Bereich 6: lokale Unebenheiten: Infolge eines nicht geradlinigen Verlaufes der Laschenachse treten Umlenkkräfte auf, die Zug- oder Druckspannungen senkrecht zur Klebefuge bewirken. Auch hier können Zugspannungen die Ablösung der geklebten Bewehrung begünstigen. Ein nicht gerader Verlauf der Achse der geklebten Bewehrung kann aus lokalen Unebenheiten der Betonoberfläche herrühren. Insbesondere bei der Applikation sogenannter Kohlefasergelege, die eine Dicke von nur 0,2 bis 0,3 mm aufweisen, ist die Ebenheit der Betonoberfläche von großer Bedeutung, da sich die Kohlefasergelege wegen ihrer geringen Steifigkeit beinahe jeder Oberflächenform anpassen. Man versucht dieser Problematik durch die Angabe von zulässigen Grenzwerten für die Oberflächenunebenheit zu begegnen. Begrenzt wird die maximale Abweichung von einer Geraden innerhalb einer bestimmten Bezugslänge. Bei Stahlflaschen und CFK-Lamellen geht man davon aus, dass die geklebte Bewehrung aufgrund ihrer Biegesteifigkeit auch im Bereich kleiner lokaler Unebenheiten der Betonoberfläche geradlinig verläuft. Durch den relativ steifen verfüllten Epoxidharzkleber werden kleinere Unebenheiten der Betonoberfläche ausgeglichen. Im Bereich größerer Unebenheiten muss vor der Applikation der geklebten Bewehrung eine Reprofilierung mit zugelassenen Reparaturmörteln erfolgen.

Insbesondere bei den nur etwa 1 mm dicken CFK-Lamellen stellt sich aber oft ausführungsbedingt ein nicht geradliniger Verlauf der Lamellenachse ein. Die CFK-Lamellen werden von Hand mit einer Rolle angedrückt. Unterschiede im Anpressdruck und in der aufgetragenen Klebschichtdicke führen zu einem nicht geradlinigen Verlauf. In der den entsprechenden Zulassungsbescheiden beigelegten Richtlinie werden deshalb Anforderungen an die Ebenheit der applizierten CFK-Lamellen gestellt. Begrenzt wird auch hier die Abweichung von einer Geraden innerhalb einer bestimmten Bezugslänge. Auch bei Stahlflaschen ist ein nicht geradliniger Verlauf vorstellbar. Durch die Forderung der einschlägigen Zulassungsbescheide, dass die Laschendicke mindestens 5 mm betragen muss, ist aber aufgrund der deutlich höheren Steifigkeit mit geringeren Abweichungen vom geradlinigen Verlauf zu rechnen als bei den Faserverbundwerkstoffen. In jedem