

**Verifizierung eines Nachweiskonzepts  
zur Verbundtragfähigkeit klebarmierter  
Bauteile durch die Nachrechnung von  
Versuchen**

**T 3069**

**T 3069**

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2005, ISBN 3-8167-6733-8

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.IRBbuch.de](http://www.IRBbuch.de)

# Forschungsvorhaben

Verifizierung eines Nachweiskonzepts zur Verbundtragfähigkeit klebarmierter Bauteile durch die Nachrechnung von Versuchen

- ABSCHLUSSBERICHT -

Forschende Stelle:

Technische Universität Darmstadt  
Institut für Massivbau  
Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner  
Petersenstr. 12  
64287 Darmstadt

Darmstadt, im Oktober 2004

## Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung .....	3
2	Verbundnachweis klebebewehrter Betonbauteile.....	4
2.1	Verbundnachweis nach den aktuell gültigen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen ...	4
2.2	Verbundnachweis nach Niedermeier .....	4
2.2.1	Grundlagen .....	4
2.2.2	Nachweisführung .....	5
2.2.3	Offene Fragen .....	7
3	Versuchsnachrechnungen .....	8
3.1	Nachgerechnete Versuche .....	8
3.1.1	Versuche an der TU Braunschweig .....	8
3.1.2	Versuche an der TU München .....	8
3.2	Berechnungsumfang und variierte Parameter .....	9
3.3	Ergebnisse .....	10
3.3.1	Verbundtragfähigkeit.....	10
3.3.2	Rissbild .....	13
3.4	Bewertung der Ergebnisse.....	14
4	Empfehlung für die Nachweisführung .....	15
4.1	Verbundkennwerte .....	15
4.2	Rissabstände.....	15
4.3	Sicherheitsbeiwerte .....	15
5	Zusammenfassung .....	16
6	Literatur .....	17

# 1 Veranlassung

Die Tragfähigkeit von mit Stahllaschen oder CFK-Lamellen klebarmierten Betonbauteilen hängt entscheidend von der Tragfähigkeit des Klebeverbundes ab. Dieser verhält sich - anders als der Verbund zwischen Betonstahl und Beton - ausgesprochen spröde, weshalb die übertragbare Verbundkraft mit wachsender Verankerungslänge nicht beliebig gesteigert werden kann. Für die Übertragung größerer Kräfte ist es daher erforderlich, dass bei Laststeigerung entlang der Klebefläche im Beton Risse auftreten. Der Zugkraftaufbau in der Klebebewehrung erfolgt dann sukzessive über die einzelnen, zwischen den Rissen liegenden Abschnitte (Zwischenrisselemente) des Bauteils. Der Nachweis der Verbundtragfähigkeit muss daher im gesamten auf Querkraft beanspruchten Bereich eines Bauteils erfolgen.

In den bisher gültigen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für derartige Verstärkungsmaßnahmen wurde der Klebeverbund lediglich durch einen "Endverankerungsnachweis" analog zu dem der innen liegenden Bewehrung nachgewiesen, sowie durch eine pauschale Begrenzung der Lamellen- bzw. Laschendehnungen. Diese Vorgehensweise kann sowohl unsicher als auch unwirtschaftlich sein, weshalb eine Überarbeitung der aktuellen Zulassungen hinsichtlich des Verbundnachweises erforderlich ist.

Hierfür stehen zwei Verfahren zur Verfügung, die von Dr. Neubauer an der TU Braunschweig und von Dr. Niedermeier an der TU München nahezu zeitgleich entwickelt wurden. Beide Verfahren ermöglichen einen Nachweis des Klebeverbunds entlang der gesamten Klebelänge eines Bauteils und tragen somit dem tatsächlichen Verbundtragverhalten wesentlich besser Rechnung. In der für die Überarbeitung der Zulassungen zuständigen PG "Verstärken von Betonbauteilen" des DIBt wurde entschieden, in künftige Zulassungen das von Dr. Niedermeier entwickelte Nachweiskonzept einfließen zu lassen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll dieses Bemessungskonzept für eine Anwendung in der Praxis aufbereitet und durch die Nachrechnung von bereits durchgeführten Versuchen hinsichtlich des erreichten Sicherheitsniveaus überprüft werden.

## 2 Verbundnachweis klebebewehrter Betonbauteile

### 2.1 Verbundnachweis nach den aktuell gültigen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen

Der in den aktuellen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen geforderte Nachweis der Tragfähigkeit des Klebeverbundes besteht aus einem Verbundnachweis am Lamellenende (analog zum Verankerungsnachweis im Stahlbetonbau) und einer pauschalen Begrenzung der maximalen Lamellendehnung auf einen empirisch festgelegten Wert. Dieser entspricht bei CFK-Lamellen etwa der halben Bruchdehnung, bei Stahllaschen beträgt er 3,0 ‰.

Der Endverankerungsnachweis basiert auf der Arbeit von Holzenkämpfer [2]. Holzenkämpfer passte die Differenzialgleichung des verschieblichen Verbundes (1), durch die das Tragverhalten geklebter Bewehrung allgemein beschrieben werden kann, an die Randbedingungen am Lamellen-/Laschenende an.

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

mit:

- $s_L$  Reaktivverschiebung zwischen Beton und Klebebewehrung
- $\tau_L$  Verbundspannung zwischen Beton und Klebebewehrung
- $E_L$  Elastizitätsmodul der Klebebewehrung
- $t_L$  Dicke der Klebebewehrung

Die Beziehung  $\tau_L(s_L)$  beschreibt er dabei durch einen bilinearen Ansatz, den er für die analytische Lösung der Differenzialgleichung durch einen fiktiven linearen Ansatz ersetzt. Damit erhält er die Gleichungen zur Bestimmung der maximal am Lamellenende verankerbaren Kraft  $T$  sowie der dazu gehörenden erforderlichen Verankerungslänge  $l_t$ . Diese Größen sind abhängig von den Lamellenabmessungen (Breite  $b_L$  und Dicke  $t_L$ ), dem Elastizitätsmodul des Lamellenwerkstoffs  $E_L$ , der vorhandenen Verbund- bzw. Klebelänge  $l_{t,vorh.}$  und der Oberflächenzugfestigkeit des Betons  $\beta_{OZ}$  bzw.  $f_{ctm}$ .

Ein echter Entkoppelungsnachweis zwischen Lamelle und Beton wird bei dieser Vorgehensweise somit nur am Lamellenende erbracht.

## 2.2 Verbundnachweis nach Niedermeier

### 2.2.1 Grundlagen

Sowohl Neubauer [3] als auch Niedermeier [4] entwickelten Bemessungskonzepte, die einen Verbundnachweis in allen Bereichen klebebewehrter Bauteile erlauben. Das Verfahren von Niedermeier, das als Grundlage der neuen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen dienen soll, wird in diesem Kapitel näher beschrieben.

Niedermeier löste die Differenzialgleichung des verschieblichen Verbundes (1) für den Fall des allgemeinen Zwischenrisselements (ZRE). Anders als am Lamellenende wirken bei diesem an beiden

Enden des Verbundbereichs Zugspannungen in der Lamelle. Damit erhält er Gleichungen zur Bestimmung des maximal an einem Zwischenrisselement  $i$  übertragbaren Spannungszuwachses *aufn.*  $\Delta\sigma_L^i(\sigma_L^i)$ . Mit diesen Gleichungen kann der Nachweis der Zugkraftdeckung (d. h. der Verbundnachweis) an jeder Stelle des Bauteiles bzw. an jedem Zwischenrisselement geführt werden.

Der übertragbaren Spannungszuwachses *aufn.*  $\Delta\sigma_L^i(\sigma_L^i)$  ist abhängig von der Lamellenspannung  $\sigma_L^i$  im geringer beanspruchten Riss sowie von den gleichen Einflussfaktoren, die sich auch auf die Verbundbruchkraft am Lamellenende auswirken. Dabei wird jedoch die vorhandene Klebelänge  $l_{t,vorh.}$  durch den Rissabstand  $a_r$  ersetzt. Der Rissabstand  $a_r$  kann sowohl direkt am vorhandenen Bauteil als auch rechnerisch bestimmt werden. Für die rechnerische Ermittlung von  $a_r$  entwickelte Niedermeier ebenfalls Bestimmungsgleichungen.

Das Verfahren kann für den Nachweis des Klebeverbundes von Stahllaschen, CFK-Lamellen und CFK-Gelegen genutzt werden.

### 2.2.2 Nachweisführung

Im Folgenden wird die Vorgehensweise beim Nachweis der Verbundtragfähigkeit nach Niedermeier kurz erläutert. Eine ausführliche Beschreibung des Ablaufs des Verbundnachweises ist in Anlage 1 (in Worten) und Anlage 2 (als Flussdiagramm) enthalten. Eine Übersicht über die verwendeten Formelzeichen, die aus [4] entnommen wurden, enthält Anlage 3.

Der in den Anlagen beschriebene Nachweis entspricht nicht exakt dem Nachweis aus [4], da dieser in einigen Punkten auf der Grundlage von Änderungsvorschlägen aus den Sitzungen der PG „Verstärken von Betonbauteilen“ des DIBt modifiziert oder ergänzt wurde.

#### Bestimmung des Rissbildes

Zunächst ist das Rissbild des zu verstärkenden Bauteils zu bestimmen. Dies sollte nach Möglichkeit durch die Untersuchung des vorhandenen Bauteils geschehen. Alternativ dazu kann das Rissbild auch rechnerisch ermittelt werden. Dabei werden zunächst die Lage des äußersten Biegerisses und der mittlere Rissabstand bestimmt. Ausgehend vom äußersten Biegeriss werden dann alle weiteren Risse festgelegt.

Da sich das tatsächliche Rissbild nicht exakt bestimmen lässt und da nicht a priori feststeht, welches Rissbild zur geringsten Verbundtragfähigkeit bzw. zur größten Verbundbeanspruchung führt, sind bei der rechnerischen Festlegung des Rissbildes die beiden Extremfälle zu betrachten, die sich aus dem Ansatz der maximalen und der minimalen Biegezugfestigkeit des Betons ergeben.

#### Bestimmung der Verbundbeanspruchung

Die Verbundbeanspruchung eines Zwischenrisselements entspricht der Spannungsdifferenz der Klebebewehrung in den beiden Rissen:

$$\Delta\sigma_L^i = \sigma_L^{i+1} - \sigma_L^i \quad (2)$$

mit:

- $\Delta\sigma_L^i$  Differenz der Lamellenspannung für das ZRE  $i$
- $\sigma_L^{i+1}$  Lamellenspannung im höher beanspruchten Riss des ZRE  $i$
- $\sigma_L^i$  Lamellenspannung im geringer beanspruchten Riss des ZRE  $i$

Somit muss in jedem der zuvor ermittelten Risse die Kraft in der Klebebewehrung ermittelt werden. Dies kann durch eine Iteration der Dehnungsebene des Querschnitts oder auch vereinfacht durch eine Abschätzung des Hebelarms der inneren Kräfte erfolgen. Dabei sind das Versatzmaß und die aus dem Vordehnungszustand während des Verstärkens vorhandene Beanspruchung (Vordehnung bzw. -spannung der Klebebewehrung) zu berücksichtigen.

### Bestimmung des Verbundwiderstands

Als Verbundwiderstand wird der in einem Zwischenrisselement aufnehmbare Spannungszuwachs in der Klebebewehrung bezeichnet. Dieser wird sowohl von der tatsächlichen Verbundtragfähigkeit als auch von der zulässigen Spannung in der Klebebewehrung begrenzt. Er kann unter Verwendung der charakteristischen oder der mittleren Verbundkennwerte bestimmt werden.

### Nachweis durch Vergleich von Verbundbeanspruchung und –widerstand

Der Nachweis der Verbundtragfähigkeit erfolgt durch den Vergleich der Kurven des Verbundwiderstands *aufn.*  $\Delta\sigma_L^i(\sigma_L^i)$  mit denen der tatsächlichen Spannungsdifferenzen *vorh.*  $\Delta\sigma_L^i(\sigma_L^i)$ . Bild 1 zeigt diese Kurven für ein mit CFK-Lamellen verstärktes Bauteil.

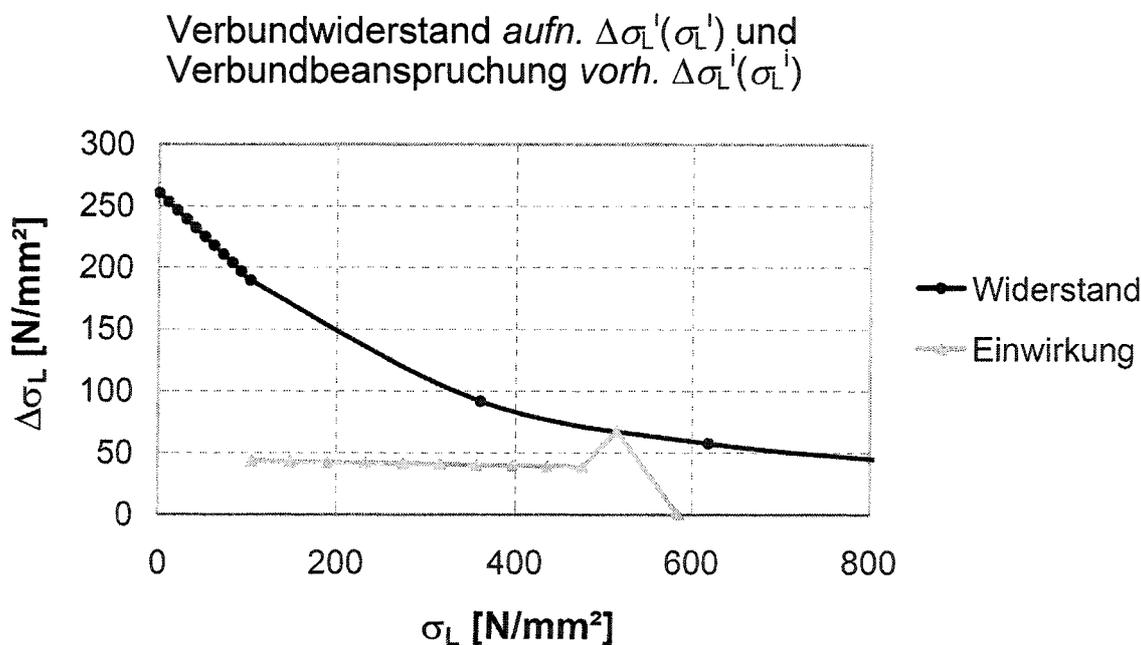


Bild 1: Verbundwiderstand und Beanspruchung für ein mit CFK-Lamellen verstärktes Bauteil

### 2.2.3 Offene Fragen

Ziel der durchgeführten Untersuchung ist es, eine Einarbeitung des Bemessungskonzept aus [4] in eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung zu ermöglichen. Dazu waren vor allem die folgenden Fragestellungen zu klären.

#### Rissabstände

Das überarbeitete Nachweiskonzept von Niedermeier sieht vor, den Rissabstand direkt aus der Eintragungslänge unter Wirkung des Rissmoments zu ermitteln. Nach Gleichung (3) ist die Eintragungslänge dabei mit einem für das gesamte Bauteil konstanten Faktor zu multiplizieren. Dieser Faktor beinhaltet die Größe  $X$ , für die ein Wert von  $X = 1,5$  oder  $X = 2,0$  anzunehmen ist. Im Rahmen der Versuchsnachrechnungen sollte geklärt werden, welcher Wert von  $X$  die beste Übereinstimmung zwischen dem rechnerisch bestimmten und dem tatsächlichem Rissbild liefert.

$$a_r = \left( X + 0,5 \cdot \frac{A_q}{A} \right) \cdot l_{e,0} \quad (3)$$

mit:

- $a_r$  Rissabstand
- $X$   $X = 1,5$  oder  $X = 2,0$
- $A$  Auflagerkraft
- $A_q$  Auflagerkraft aus Streckenlasten
- $l_{e,0}$  Eintragungslänge unter Wirkung des Rissmoments  
 (Erfolgt die Verstärkung im Zustand I, so ist eine mittlere Eintragungslänge für Betonstahl- und Klebebewehrung zu ermitteln.)

#### Verbundkennwerte

Die in [4] angegebenen Gleichungen erlauben es, den Verbundwiderstand sowohl unter Ansatz charakteristischer als auch mittlerer Verbundkennwerte zu berechnen. Im Rahmen der Versuchsnachrechnungen war zu klären, wie genau sich der Verbundwiderstand mit den jeweiligen Verbundkennwerten bestimmen lässt.

#### Sicherheitsniveau und Teilsicherheitsbeiwerte

Mit dem von Dr. Niedermeier entwickelten Nachweisverfahren soll die Verbundtragfähigkeit klebebewehrter Betonbauteile möglichst genau berechnet werden können. Bei einem Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit soll jedoch ein hinreichend großer Sicherheitsabstand zwischen rechnerischer und tatsächlicher Versagenslast verbleiben. Durch den Vergleich von Versuchs- und Rechenergebnissen soll zunächst untersucht werden, ob das Nachweisverfahren sichere oder auch unwirtschaftliche Bemessungsergebnisse liefert. Weiterhin ist die Frage zu klären, in welchem Maße die rechnerische Verbundtragfähigkeit durch einen Teilsicherheitsbeiwert abgemindert werden sollte, um den gewünschten Sicherheitsabstand zu erreichen.

## 3 Versuchsnachrechnungen

### 3.1 Nachgerechnete Versuche

Für die Nachrechnung standen die in [3] und [5] dokumentierten Versuche zur Verfügung. Sie werden im Folgenden kurz beschrieben. Eine Übersicht über die nachgerechneten Versuche enthält Anlage 4.

#### 3.1.1 Versuche an der TU Braunschweig

An der TU Braunschweig wurden Versuche an mit CFK-Lamellen verstärkten Betonbauteilen durchgeführt, die u. a. in [3] dokumentiert sind. Dabei handelt es sich um vier Stahlbetonplatten (P1 ÷ P4), eine Spannbetonplatte (P5) und zwei Stahlbetonbalken (B1 und B2). Beim Balken B1 waren im gesamten querkraftbeanspruchten Bereich geklebte Stahllaschenbügel angeordnet, beim Balken B2 wurde die Lamelle jeweils an ihren Enden mit zwei Gewindestangen und einer Stahlplatte an die Stegunterseite gepresst. Eine unbehinderte Lamellenentkopplung war somit bei beiden Balken nicht möglich. Da der zu erwartende positive Einfluss dieser Maßnahmen auf die Verbundtragfähigkeit nicht durch das untersuchte Rechenmodell erfasst werden kann, wurden keine Nachrechnungen der Balkenversuche vorgenommen. Die Spannbetonplatte wurde ebenfalls nicht nachgerechnet.

Bei den betrachteten Versuchen an den Stahlbetonplatten handelt es sich um Vierpunktversuche mit Lastangriff etwa in den Drittelpunkten. Jeweils am Lamellenende, ca. 35 ÷ 40 cm davon entfernt, sowie in der Plattenmitte waren einzelne Rissbleche angeordnet.

Die Platten P1 und P2 hatten Abmessungen von  $b / d / l = 50 / 15 / 260$  cm und waren mit jeweils zwei CFK-Lamellen verstärkt. Bei den anderen beiden Versuchen (P3 und P4) wurden Platten mit  $b / d / l = 50 / 15 / 400$  cm und jeweils einer CFK-Lamelle untersucht.

#### 3.1.2 Versuche an der TU München

Im Rahmen der in [5] dokumentierten Versuchsreihe an der TU München wurden u. a. insgesamt zwölf klebeverstärkte Plattenstreifen (Versuchskörper B1-01-B2C bis B1-03-B2C, B1-04-B2S bis B1-06-B2S, B2-01-B2C bis B2-03-B2C und B2-04-B2S bis B2-06-B2S) untersucht. Die Hälfte der Versuchskörper wurde mit je einer CFK-Lamelle verstärkt. In den anderen Fällen erfolgte die Verstärkung mit je einer Stahllasche. Alle Plattenstreifen hatten Abmessungen von  $b / d / l = 30 / 15 / 450$  cm. Auf der gesamten Trägerlänge waren Rissbleche eingebaut. Die Abstände zwischen den Rissblechen betragen bei jeweils drei Platten einer Versuchsreihe 15 cm und bei den übrigen Versuchskörpern 30 cm.

Die Platten wurden durch zwei Einzellasten (Vierpunktversuch), die nahezu in Balkenmitte angeordnet waren, bis zum Bruch bzw. bis zum Erreichen der Höchstlast belastet.

Bei den mit CFK-Lamellen verstärkten Bauteilen wurde das Versagen durch die Entkopplung der Klebebewehrung eingeleitet. Hingegen traten an den mit Stahllaschen verstärkten Versuchskörpern keine nennenswerten Entkopplungen auf. Hier wurde die Höchstlast mit dem Fließbeginn im Betonstahl und der Klebebewehrung erreicht.

### 3.2 Berechnungsumfang und variierte Parameter

Um die in Kapitel 2.2.3 angesprochenen Fragestellungen zu klären wurde jeder Versuch mehrfach nachgerechnet. Die Rechenergebnisse wurden dann mit den Versuchsergebnissen sowie auch untereinander verglichen.

Die an der TU Braunschweig durchgeführten Versuchen wurden sowohl auf Grundlage des tatsächlichen als auch des rechnerischen ermittelten Rissbildes nachgerechnet. Dabei ist jedoch zu beachten, dass im Bereich des Lamellenendes Rissbleche vorgegeben waren, so dass sich dort das Rissbild nicht frei einstellen konnte. Bei allen Versuchskörpern der TU München waren über die gesamte Trägerlänge Rissbleche eingebaut. Daher war das Rissbild soweit vorgegeben, dass es sich nicht sinnvoll mit einem berechneten Rissbild vergleichen lässt. Diese Versuche wurden deshalb ausschließlich unter Ansatz des tatsächlichen Rissbildes nachgerechnet.

Für alle Versuchskörper wurde die Versagenslast sowohl unter Ansatz mittlerer als auch charakteristischer Verbundkennwerte berechnet.

Bei den Nachrechnungen auf Grundlage eines berechneten Rissbildes wurde der Parameter  $X$  aus Gleichung (3) einmal zu  $X = 1,5$  und einmal zu  $X = 2,0$  angenommen. Sofern nicht bekannt war, ob die Versuchskörper im gerissenen oder im ungerissenen Zustand verstärkt wurden, wurde die Berechnung jeweils für beide Fälle durchgeführt. Eine Übersicht über die variierten Parameter enthält Tabelle 1.

Tabelle 1: Variierte Parameter bei den Versuchsnachrechnungen

Bestimmung des Rissbildes	Variierter Parameter		
	Verbundkennwerte (mittlere oder charakteristische)	Parameter $X$ aus Gleichung (3) ( $X = 1,5$ oder $X = 2,0$ )	Verstärkung im Zustand I oder Zustand II
Rechnerisch	+	+	+
Am Versuchskörper	+	-	-

Bei den Nachrechnungen unter Ansatz eines rechnerisch bestimmten Rissbildes wurden darüber hinaus stets der obere und der untere Wert der Biegezugfestigkeit des Betons  $\beta_{BZ}$  berücksichtigt, wobei die geringere der beiden berechneten Traglasten maßgebend war. Die beiden Festigkeiten wurden mit Hilfe der in [4] vorgeschlagenen Beziehungen (Gleichungen (4) und (5)) aus der Oberflächenzugfestigkeit des Betons  $\beta_{OZ}$  berechnet.

Zum Vergleich wurden darüber hinaus Nachrechnungen vorgenommen, bei denen lediglich eine Biegezugfestigkeit angesetzt wurde, die der Oberflächenzugfestigkeit entsprach (Gleichung (6)).

$$\beta_{BZ,\min} = 0,80 \cdot \beta_{OZ} \tag{4}$$

$$\beta_{BZ,\max} = 2,36 \cdot \beta_{OZ} \tag{5}$$

$$\beta_{BZ} = \beta_{OZ} \tag{6}$$

mit:

$\beta_{BZ}$  Biegezugfestigkeit des Betons

$\beta_{OZ}$  Oberflächenzugfestigkeit des Betons

### 3.3 Ergebnisse

#### 3.3.1 Verbundtragfähigkeit

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Nachrechnungen erläutert. Dabei wird der Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Versuchsergebnissen über den Verhältniswert  $\gamma_i$  nach Gleichung (7) vorgenommen.

$$\gamma_i = \frac{E_{\text{exp}}}{E_{\text{calc},i}} \quad (7)$$

mit:

$E_{\text{exp}}$  Versagenslast im Versuch

$E_{\text{calc},i}$  Rechnerisch aufnehmbare Last

#### Nachrechnungen auf Grundlage des tatsächlichen Rissbildes

Die Verhältniswerte  $\gamma_i$  für die Nachrechnungen auf Grundlage des tatsächlichen Rissbildes sind in Tabelle 2 wiedergegeben.

Für die mit CFK-Lamellen verstärkten Bauteile liefern die Nachrechnungen bei Ansatz der charakteristischen Verbundkennwerte Bruchlasten von ca. 65 % ( $\gamma_i \approx 1,5$ ). Die Verwendung der mittleren Verbundkennwerte führt zu etwas höhere Bruchlasten. Maßgebend für das Versagen war in fast allen Fällen die Stelle im Bauteil, an der die Betonstahlbewehrung zu fließen begann. In wenigen Fällen ging das Verbundversagen vom Lamellenende aus. Dies führte jedoch nur zu geringfügig kleineren Traglasten (Abminderungen < 10 %). Die Nachrechnungen führten in allen Fällen zu sicheren Ergebnissen.

Bei den mit Stahllaschen verstärkten Versuchskörpern sind die berechneten Versagenslasten - von einer Ausnahme abgesehen - nahezu identisch mit den Versuchslasten ( $\gamma_i \approx 1,0$ ). Dabei ist zu beachten, dass diese Bauteile nicht durch Verbundentkoppelung versagten, sondern ihre Höchstlast erreichten, sobald im Betonstahl und den Stahllaschen die Fließspannung auftrat. Diese Versagensform war auch in der Nachrechnung erkennbar.

Tabelle 2: Verhältniswerte  $\gamma_i$  (inkl. Endverankerungsnachweis) bei Nachrechnung der Versuche aus Braunschweig und München mit dem tatsächlich aufgetretenen Rissbild

Versuchsreihe	mittleres Verbundgesetz			charakteristisches Verbundgesetz		
	$\gamma_{\text{mittel}}$	$\gamma_{\text{min}}$	$\gamma_{\text{max}}$	$\gamma_{\text{mittel}}$	$\gamma_{\text{min}}$	$\gamma_{\text{max}}$
TU Braunschweig	<b>1,32</b>	1,22	1,38	<b>1,51</b>	1,30	1,63
TU München						
CFK	<b>1,51</b>	1,37	1,57	<b>1,54</b>	1,39	1,60
Stahl	<b>1,07</b>	0,99	1,30	<b>1,07</b>	0,99	1,30

<sup>1)</sup> Die Versuchsreihe weist einen Ausreißer mit  $\gamma = 1,30$  auf. Alle anderen Werte liegen bei  $\gamma = 1,0$

### Nachrechnungen auf Grundlage des für $\beta_{\text{BZ,min}}$ und $\beta_{\text{BZ,max}}$ berechneten Rissbildes

Für die Nachrechnungen auf Grundlage des berechneten Rissbildes unter Ansatz von  $\beta_{\text{BZ,min}}$  und  $\beta_{\text{BZ,max}}$  werden die Ergebnisse für den Verbundnachweis am Lamellen- bzw. Laschenende sowie für den Nachweis in den übrigen Bereichen getrennt ausgewertet.

In Tabelle 3 und Tabelle 4 sind die jeweiligen Verhältniswerte  $\gamma_i$  dargestellt. Da der Verbundnachweis für das Lamellenende und für den übrigen Bereich der Klebefuge getrennt geführt wird, sind die sich aus den beiden Nachweisen ergebenden Verhältniswerte jeweils in einer eigenen Tabelle aufgeführt. Sie sind ausnahmslos höher als die Verhältniswerte für die Nachrechnungen mit dem tatsächlichen Rissbild. Der Endverankerungsnachweis war bei fast allen Nachrechnungen maßgebend und führt in einigen Fällen zu deutlich geringeren Versagenslasten. In allen Fällen führte der unter Annahme des oberen Wertes der Biegezugfestigkeit  $\beta_{\text{BZ,max}}$  (s. Gleichung (5)) ermittelte maximale Biegerissabstand zur geringsten Verbundtragfähigkeit.

Tabelle 3: Verhältniswerte  $\gamma_i$  ohne Endverankerungsnachweis bei Nachrechnung der Versuche aus Braunschweig mit rechnerisch bestimmtem Rissbild

Verbundgesetz	Parameter $X$ zur Bestimmung von $a_r$	Zustand beim Verstärken	$\gamma_{\text{mittel}}$	$\gamma_{\text{min}}$	$\gamma_{\text{max}}$
Mittel	1,5	I	<b>1,48</b>	1,32	1,55
	1,5	II	<b>1,61</b>	1,45	1,78
	2,0	I	<b>1,66</b>	1,52	1,83
	2,0	II	<b>1,77</b>	1,50	2,10
charakteristisch	1,5	I	<b>1,77</b>	1,60	1,93
	1,5	II	<b>1,84</b>	1,59	2,17
	2,0	I	<b>1,86</b>	1,63	2,15
	2,0	II	<b>1,95</b>	1,59	2,35

Tabelle 4: Verhältniswerte  $\gamma_i$  aus dem Endverankerungsnachweis bei Nachrechnung der Versuche aus Braunschweig mit rechnerisch bestimmtem Rissbild

Verbundgesetz	Parameter $X$ zur Bestimmung von $a_r$	Zustand beim Verstärken	$\gamma_{mittel}$	$\gamma_{min}$	$\gamma_{max}$
Mittel	1,5	I	<b>1,89</b>	1,37	2,32
	1,5	II	<b>2,10</b>	1,55	2,53
	2,0	I	<b>2,05</b>	1,50	2,50
	2,0	II	<b>2,21</b>	1,70	2,55
charakteristisch	1,5	I	<b>2,65</b>	1,91	3,22
	1,5	II	<b>2,82</b>	2,12	3,28
	2,0	I	<b>2,73</b>	2,00	3,25
	2,0	II	<b>2,98</b>	2,57	3,31

**Nachrechnungen auf Grundlage des für  $\beta_{BZ} = \beta_{OZ}$  berechneten Rissbildes**

Abschließend werden noch die Versagenslasten betrachtet, die sich ergeben, wenn der Rissabstand unter Ansatz einer Biegezugfestigkeit nach Gleichung (6) ermittelt wird. Die so berechneten Verhältniswerte enthält Tabelle 5. Eine gesonderte Betrachtung für das Lamellenende und für den übrigen Bereich der Klebefuge wird hier nicht vorgenommen. Es zeigt sich, dass diese Traglasten etwa jenen entsprechen, die unter Ansatz des tatsächlichen Rissbildes berechnet wurden. Dabei erhält man etwas bessere Ergebnisse, wenn der Parameter  $X$  aus Gleichung (3) zu  $X = 2,0$  angenommen wird. Bei fast allen Nachrechnungen ging die Entkoppelung von der Stelle aus, an der die Betonstahlbewehrung zu fließen begann.

Durch den Ansatz von charakteristischen Verbundkennwerten ergeben sich gegenüber Nachrechnungen auf Grundlage mittlerer Verbundkennwerte ca. 10 ÷ 15 % geringere Traglasten.

Tabelle 5: Verhältniswerte  $\gamma_i$  bei Nachrechnung der Versuche aus Braunschweig mit rechnerisch bestimmtem Rissbild und  $\beta_{BZ} = \beta_{OZ}$

Verbundgesetz	Parameter $X$ zur Bestimmung von $a_r$	Zustand beim Verstärken	$\gamma_{mittel}$	$\gamma_{min}$	$\gamma_{max}$
mittel	1,5	I	<b>1,30</b>	1,23	1,36
	1,5	II	<b>1,33</b>	1,22	1,39
	2,0	I	<b>1,35</b>	1,24	1,40
	2,0	II	<b>1,42</b>	1,25	1,54
charakteristisch	1,5	I	<b>1,44</b>	1,27	1,63
	1,5	II	<b>1,50</b>	1,35	1,65
	2,0	I	<b>1,56</b>	1,39	1,67
	2,0	II	<b>1,63</b>	1,40	1,80

### 3.3.2 Rissbild

Da der Nachweis der Verbundtragfähigkeit maßgeblich vom Rissbild beeinflusst wird, und da dieses nicht in allen Fällen am Bauteil ermittelt werden kann, werden im Folgenden die rechnerisch ermittelten Rissbilder mit den im Versuch aufgetretenen verglichen.

#### Rissabstände

In Tabelle 6 sind die Wertebereiche und die Mittelwerte für das Verhältnis von berechnetem zu tatsächlichem Rissabstand  $a_{r,calc.} / a_{r,vorh.}$  angegeben. Während beim Ansatz von  $\beta_{BZ,min}$  überwiegend zu geringe Rissabstände berechnet werden, ergeben sich für  $\beta_{BZ,max}$  rechnerische Rissabstände, die deutlich größer sind als die tatsächlichen. Für  $\beta_{BZ} = \beta_{OZ}$  erhält man die besten Ergebnisse. Setzt man dabei  $X = 2,0$  an, sind die berechneten Rissabstände nie kleiner als die tatsächlichen. Da sich bei allen Nachrechnungen für größere Rissabstände geringere Verbundtragfähigkeiten ergaben, liegt der Ansatz der so ermittelten Rissabstände stets auf der sicheren Seite. Dadurch werden auch die Ergebnisse aus Tabelle 5 bestätigt, nach denen in diesem Fall die berechneten Versagenslasten am nächsten an den unter Annahme des tatsächlichen Rissbildes ermittelten Versagenslasten liegen.

Tabelle 6: Wertebereiche der berechneten Rissabstände in Abhängigkeit von  $\beta_{BZ} / \beta_{OZ}$

$\beta_{BZ} / \beta_{OZ}$	Parameter $X$ zur Bestimmung von $a_r$	$a_{r,calc.} / a_{r,vorh.}$		
		Von	bis	mittel
0,80	1,5	0,65	0,91	0,77
	2,0	0,87	1,21	1,03
1,00	1,5	0,75	1,08	0,90
	2,0	1,00	1,43	1,20
2,36	1,5	1,43	2,04	1,67
	2,0	1,90	2,73	2,23

#### Lage des äußersten Biegerisses

Für den Verbundnachweis am Lamellenende ist die Lage des äußersten Biegerisses entscheidend. In Tabelle 7 sind für die Versuche der TU-Braunschweig die tatsächlichen und die berechneten Abstände des äußersten Biegerisses angegeben. Bei den rechnerischen Abständen handelt es sich jeweils um Mittelwerte aus den acht Nachrechnungen für jeden Versuch. Dabei wurde der Maximalwert der Biegezugfestigkeit des Betons angesetzt.

Tabelle 7: Lage des äußersten Biegerisses bei den Versuchen der TU Braunschweig

Versuch	Entfernung des äußersten Biegerisses zum Auflager [m]		Differenz [m]
	im Versuch	rechnerisch	
P1	0,35	0,52	0,17
P2	0,35	0,55	0,20
P3	0,40	1,16	0,76
P4	0,40	1,11	0,71

Es treten mitunter deutliche Unterschiede zwischen Berechnung und Versuch auf. Zwar lassen sich aus dem Vergleich dieser Werte wegen der im Bereich des Lamellenendes vorgegebenen Rissbleche keine Rückschlüsse über die Genauigkeit des Berechnungsverfahrens ziehen. Allerdings ist erkennbar, dass der Nachweis der Lamellenendeverankerung unter Annahme des tatsächlichen Rissbildes zu höheren Traglasten führen sollte als der Nachweis unter Annahme des mit  $\beta_{BZ,max}$  rechnerisch ermittelten Rissbildes. Es kann nicht beurteilt werden, ob ohne die Anordnung der Rissbleche geringere Versagenslasten in den Versuchen erreicht worden wären.

### 3.4 Bewertung der Ergebnisse

Bei allen Nachrechnungen war die berechnete Verbundtragfähigkeit kleiner als die Versuchslast ( $\gamma \geq 1,0$ ). Somit führte das Nachweisverfahren stets zu sicheren Bemessungsergebnissen. Wurde der Nachweis unter Annahme eines rechnerisch ermittelten Rissbildes geführt, so ergaben sich unter Ansatz eines oberen Wertes für die Biegezugfestigkeit des Betons  $\beta_{BZ,max}$  nach Gleichung (4) allerdings deutlich geringere Traglasten als in den Versuchen, wobei fast ausschließlich der Endverankerungsnachweis maßgebend war. Diese Art des Nachweises führt somit zu unwirtschaftlichen Bemessungsergebnissen. Wesentlich wirtschaftlichere Bemessungsergebnisse lieferten hingegen Nachweise unter Annahme des tatsächlichen Rissbildes und Nachweise unter Annahme eines rechnerisch ermittelten Rissbildes mit  $\beta_{BZ} = \beta_{OZ}$ .

Die Versagensart (Verbundversagen, Fließen der Laschen) wurde im Rahmen der Nachrechnungen richtig ermittelt.

## 4 Empfehlung für die Nachweisführung

### 4.1 Verbundkennwerte

Alle hier betrachteten Nachweis werden im Grenzzustand der Tragfähigkeit geführt. Da die Verbundkennwerte direkt der Bestimmung des Bauteilwiderstandes dienen, sollten sie mit ihren charakteristischen Werten angesetzt werden. Wie aus Tabelle 5 hervorgeht, führt dies nur zu einer geringfügig kleineren Traglast.

### 4.2 Rissabstände

Die Rissabstände sollten nach Möglichkeit am Bauteil bestimmt werden. Sofern dies nicht möglich ist, kann sie rechnerisch bestimmt werden. Dabei erhält man gute Ergebnisse wenn für die Biegezugfestigkeit des Betons  $\beta_{BZ} = \beta_{OZ}$  angenommen wird, und der Parameter  $X$  in Gleichung (3) zu  $X = 2,0$  gesetzt wird.

### 4.3 Sicherheitsbeiwerte

Das Nachweisformat der überarbeiteten Zulassungen soll wie auch das der DIN 1045-1 [1] auf Teilsicherheitsbeiwerten beruhen. Somit ist für den Verbundwiderstand ein geeigneter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_b$  zu definieren.

Der aufnehmbare Spannungszuwachs an einem Zwischenrisselement wird sowohl durch die Verbundtragfähigkeit als auch durch die zulässige Spannung der Klebebewehrung begrenzt. Damit wird den möglichen Versagensarten Entkopplung oder Lamellenbruch bzw. Laschenfließen Rechnung getragen. Für die unterschiedlichen Versagensarten sind jeweils eigene Teilsicherheitsbeiwerte anzusetzen.

Der Verbundbruch wird bei ordentlich ausgeführter Klebfuge durch das Abreißen des oberflächennahen Betons eingeleitet. Er ist somit auf das Überschreiten der Betonzugfestigkeit zurückzuführen. Daher sollte für diese Versagensart gemäß DIN 1045-1 ein Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma_b = 1,80$  angewendet werden. Allerdings betragen für die Versuche, in denen Verbundversagen auftrat, die unter Berücksichtigung der obigen Empfehlungen berechneten Traglasten zwischen 55 ÷ 75 % der Versuchslasten. Somit stellt sich die Frage, ob auch bei einem geringfügig kleineren Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_b$  noch eine ausreichende Zuverlässigkeit erreicht wird.

Beim einem Versagen des Bauteils durch das Fließen der Stahllaschen kann der Nachweis z. B. mit  $\gamma_{b,Stahl} = 1,15$  wie für Betonstahl geführt werden.

Die genaue Größe des Teilsicherheitsbeiwertes für CFK-Lamellen wird hier offen gelassen. Bei den nachgerechneten Versuchen war jedoch nie rechnerisches Lamellenversagen zu beobachten. Maßgebend waren stets das tatsächliche Verbundversagen. Sofern der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{b,CFK}$  nicht größer als  $\gamma_b = 1,80$  gewählt wird, wird sich dies nicht ändern. Da nicht davon auszugehen ist, dass ein Wert von  $\gamma_{b,CFK,3} \geq 1,80$  angesetzt werden muss, um die Streuung der Zugfestigkeit des Lamellenwerkstoffs auszugleichen, kann man annehmen, dass diese Versagensart auch beim Ansatz von Bemessungswerten des Verbundwiderstands nicht maßgebend ist.

## 5 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein neu entwickeltes Nachweisverfahren für die Verbundtragfähigkeit klebarmierter Bauteile für die Anwendung in der Praxis aufbereitet und untersucht.

Es wurde ein Flussdiagramm erstellt, welches eine einfache Handhabung des Nachweisverfahrens ermöglicht. Zum besseren Verständnis wird die Nachweisführung zusätzlich in Worten beschrieben.

Durch die Nachrechnung von in der Literatur dokumentierten Versuchen konnte gezeigt werden, dass das Verfahren sichere Bemessungsergebnisse liefert und die Versagensart richtig bestimmt wird. Es ließ sich weiterhin feststellen, welche Ansätze bei der Berechnung zu den sinnvollsten bzw. qualitativ besten Ergebnissen führt.

Weiterhin zeigte sich bei den Nachrechnungen, dass in vielen Fällen das Versagen des Klebeverbundes nicht vom Endverankerungsbereich ausgeht sondern von der Stelle, an der die innere Bewehrung zu fließen beginnt. Nachweisverfahren, bei denen so wie in den aktuellen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen, der Verbundnachweis lediglich durch einen Endverankerungsnachweis und eine pauschale Begrenzung der Lamellendehnung zu führen ist, werden daher dem tatsächlichen Tragverhalten des Klebeverbundes nicht gerecht. Eine Einarbeitung des hier untersuchten Nachweisverfahrens in künftige allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen erscheint daher geboten.

Darmstadt, 21. Oktober 2004



(Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner)



(Dipl.-Ing. S. Daus)

## 6 Literatur

- [1] DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 1: Bemessung und Konstruktion. Juli 2001
- [2] Holzenkämpfer, P.: Ingenieurmodelle des Verbundes geklebter Bewehrung für Betonbauteile. Dissertation Technische Universität Braunschweig, 1994
- [3] Neubauer, U.: Verbundtragverhalten geklebter Lamellen aus Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoff zur Verstärkung von Betonbauteilen. Dissertation Technische Universität Braunschweig, 2000
- [4] Niedermeier, R.: Zugkraftdeckung bei klebarmierten Biegeträgern. Dissertation, Technische Universität München, 2001
- [5] Zilch, K.; Zehetmaier, G.; Niedermeier, R.: Zusammenwirken von einbetonierter Bewehrung mit Klebarmierung bei verstärkten Betonbauteilen. Technische Universität München, 2002

## Anlage 1: Modifizierter Verbundnachweis nach Niedermeier

### Allgemeine Festlegungen

- Wahl des Verstärkungsmaterials (Stahl, CFK-Lamellen, CFK-Lamine)
- Eingabe der Lamellenabmessungen und Berechnung des Lamellenquerschnitts
- Eingabe der mechanischen Kennwerte des Verstärkungsmaterials (E-Modul, Zugfestigkeit bzw. Streckgrenze)
- Eingabe der Druckfestigkeit und der Oberflächenzugfestigkeit des Betons

Druckfestigkeit  $\beta_W$  bzw.  $f_{cm,cube}$   
Oberflächenzugfestigkeit  $\beta_{OZ}$  bzw.  $f_{ctm}$

Bei Eingabe von nur einem Wert Berechnung des anderen Werts mit der Beziehung  
 $\beta_{OZ} = 0,24 \cdot \beta_W^{2/3}$

Berechnung der minimalen und maximalen Biegezugfestigkeit:

$$\beta_{BZ,max} = 2,36 \cdot \beta_{OZ} \quad \text{und} \quad \beta_{BZ,min} = 0,80 \cdot \beta_{OZ}$$

- Eingabe und Berechnung der Betonquerschnittswerte
- Eingabe und Berechnung der Kennwerte des Betonstahls
- Eingabe der Systemabmessungen und der Lasten nach Größe und Angriffspunkt

### Bestimmung des Rissbilds

- Wahl des Vorfaktors  $X$  in der Formel zur Berechnung des Rissabstands

$$a_r = \left( X + 0,5 \cdot \frac{A_q}{A} \right) \cdot l_{e,0} \quad 1,5 \leq X \leq 2,0$$

- Berechnung der Auflagerkräfte getrennt nach den einzelnen Lastanteilen  $q, P$
- Berechnung des Verhältnisses  $A_q / A$
- Festlegung ob Bauteil zum Zeitpunkt des Verstärkens bereits gerissen
- Eingabe von

- Art der Staboberfläche,
- Verbundbereich und
- Betongüte

als Grundlage für die Festlegung der Verbundeigenschaften des Betonstahls

- Berechnung des maximalen / minimalen Rissmoments

$$M_{R,max/min} = \beta_{BZ,max/min} \cdot W_b$$

- Berechnung des mittleren inneren Hebelarms  $z_m^0$  von externer und interner Bewehrung

$$z_m^0 = 0,85 \cdot \frac{h_L^0 \cdot E_L \cdot A_L^0 + h_{S1}^0 \cdot E_{S1} \cdot A_{S1}^0}{E_L \cdot A_L^0 + E_{S1} \cdot A_{S1}^0} \quad \text{bei Verstärkung im Zustand I}$$

$$z_m^0 = 0,85 \cdot h_L^0 \quad \text{bei Verstärkung im Zustand II}$$

Der Vorfaktor in Höhe von 0,85 wird an anderer Stelle auch zu 0,83 gesetzt. Dies führt jedoch nur zu geringen Abweichungen. In der Excel-Datei kann der Faktor beliebig gewählt werden.

- Berechnung der Betonstahlspannung  $\sigma_{S1,R}^0$  für den gerissenen Querschnitt unter Einwirkung des Rissmoments

$$\sigma_{S1,R}^0 = \frac{M_R}{z_m^0} \cdot \frac{h_{S1}^0 \cdot E_{S1}}{h_L^0 \cdot E_L \cdot A_L^0 + h_{S1}^0 \cdot E_{S1} \cdot A_{S1}^0} \leq f_{s,y} \quad \text{bei Verstärkung im Zustand I}$$

$$\sigma_{S1,R}^0 = \frac{M_R}{z_m^0 \cdot A_{S1}^0} \leq f_{s,y} \quad \text{bei Verstärkung im Zustand II}$$

- Wenn die Verstärkung am ungerissenen Bauteil durchgeführt wird:  
 Berechnung der Laschen- bzw. Lamellenspannung  $\sigma_{L,R}^0$  für den gerissenen Querschnitt unter Einwirkung des Rissmoments

$$\sigma_{L,R}^0 = \frac{M_R}{z_m^0} \cdot \frac{h_L^0 \cdot E_L}{h_L^0 \cdot E_L \cdot A_L^0 + h_{S1}^0 \cdot E_{S1} \cdot A_{S1}^0} \quad \text{bzw.}$$

$$\sigma_{L,R}^{a*} = \left( \frac{M_R}{z_m^{a*}} - \left( A_{S1}^{a*} \cdot f_{sy} \right) \right) / A_L^{a*} \quad \text{für } \sigma_{S1,R}^0 = f_{sy}$$

- Ermittlung der mittleren Verbundspannungen  $\tau_{S1,m}$  zwischen Betonstahl und Beton in Abhängigkeit von der Oberfläche des Betonstahls, des Verbundbereichs und der Betongüte bzw. der Würfeldruckfestigkeit des Betons und bei geripptem Betonstahl in Abhängigkeit der Stahlspannung  $\sigma_{S1}$ .

Für gerippten Betonstahl:

$$\tau_{S1,m} = 0,20 \cdot \sqrt{\beta_W} \cdot \sqrt{\sigma_{S1}} \quad \text{für Verbundbereich I}$$

$$\tau_{S1,m} = 0,12 \cdot \sqrt{\beta_W} \cdot \sqrt{\sigma_{S1}} \quad \text{für Verbundbereich II}$$

- Für glatten oder profilierten Betonstahl

Oberfläche	VB	B 15	B 25	B 35	B 45	B 55
glatt	I	1,26	1,47	1,68	1,89	2,10
	II	0,63	0,74	0,84	0,95	1,05
profilert	I	1,68	2,10	2,52	2,94	3,36
	II	0,84	1,05	1,26	1,47	1,68

- Ermittlung der mittleren Verbundspannungen  $\tau_{L,m}$  zwischen Lamelle und Beton in Abhängigkeit von der Art des Verstärkungsmaterials, der Oberflächenzugfestigkeit des Betons, der Laschen- bzw. Lamellendicke und der Lamellenspannung  $\sigma_L^a$  im Riss:

$$\tau_{L,m} = 7,0 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_L^a \cdot \sqrt{t_L \cdot \beta_{OZ}} \leq \beta_{OZ} \quad \text{für Stahllaschen / CFK-Lamellen}$$

$$\tau_{L,m} = 8,3 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_L^a \cdot \sqrt[3]{n_L} \leq (2,14 - 0,05 \cdot \beta_{OZ}) \cdot \beta_{OZ} \quad \text{für CFK-Gelege}$$

- Bestimmung von  $T^0$  in abhängig davon, ob die Verstärkung im Zustand I oder II erfolgt:

$$T^0 = \sum_0 b_L \cdot \tau_{L,m} + \sum_0 n_{S1} \cdot d_{S1} \cdot \pi \cdot \tau_{S1,m}^0 \quad \text{Verstärken im Zustand I}$$

$$T^0 = \sum_0 n_{S1} \cdot d_{S1} \cdot \pi \cdot \tau_{S1,m}^0 \quad \text{Verstärken im Zustand II}$$

- $v_0 = z_m^0 \cdot T^0$

- Bestimmung der Eintragungslänge unter Einwirkung des Rissmoments:

$$l_{e,0} = \frac{M_R}{v_0} \quad \text{bzw.} \quad l_{e,0} = \frac{M_R}{z_m^0 \cdot T^0}$$

- Berechnung des mittleren Biegerissabstands für den gesamten Träger

$$a_r = \left( X + 0,5 \cdot \frac{A_q}{A} \right) \cdot l_{e,0} \quad 1,5 \leq X \leq 2,0$$

- Ermittlung der Stellen  $x_{R,max/min}$ , an denen das Moment aus äußeren Lasten dem maximalen bzw. minimalen Rissmoment entspricht:

$$M(x_{R,max/min}) = \beta_{BZ,max/min} \cdot W_b$$

- Bestimmung der Stelle des äußersten Biegerisses (mit maximalem Abstand zum Momentennullpunkt):

$$x^{a'} = x_{R,max} + 1,2 \cdot l_{e,0}$$

- Bestimmung der Stelle des äußersten Biegerisses (mit minimalem Abstand zum Momentennullpunkt):

$$x^{a''} = x_{R,min}$$

- Festlegung der diskreten Risslagen für Betonzugfestigkeit:

$$\text{minimal: } x_{\min,i} = x^a + a_{r,\min} \cdot (i-1)$$

$$\text{maximal: } x_{\max,i} = x^a + a_{r,\max} \cdot (i-1)$$

## Bestimmung der Verbundbeanspruchung

- Bestimmung des Versatzmaß  $v$ :  $v \approx z_m^0$
- Berechnung der Biegemomente an dem um "v" von den Risslagen versetzten Stellen
- Bestimmung der Kräfte und Spannungen von interner und externer Bewehrung in den Rissen unter Berücksichtigung des Versatzmaßes

für den Betonstahl:

$$\sigma_{S1}^{xi} = \frac{M(x_i + v)}{z_m^{xi}} \cdot \frac{h_{S1}^{xi} \cdot E_{S1}}{h_L^{xi} \cdot E_L \cdot A_L^{xi} + h_{S1}^{xi} \cdot E_{S1} \cdot A_{S1}^{xi}} \leq f_{s,y}$$

für die Lasche bzw. Lamelle:

$$\sigma_L^{xi} = \frac{M(x_i + v)}{z_m^{xi}} \cdot \frac{h_L^{xi} \cdot E_L}{h_L^{xi} \cdot E_L \cdot A_L^{xi} + h_{S1}^{xi} \cdot E_{S1} \cdot A_{S1}^{xi}}; \quad \text{bzw.}$$

$$\sigma_L^{xi} = \left( \frac{M(x_i + v)}{z_m^{xi}} - (A_{S1}^{xi} \cdot f_{sy}) \right) / A_L^{xi} \quad \text{für } \sigma_{S1}^{xi} = f_{sy}$$

- Berechnung der Spannungsdifferenz zwischen zwei Rissen

$\sigma_{L,i} =$  Lamellenspannung am geringer beanspruchten  
Riss des ZRE

$\sigma_{L,i+1} =$  Lamellenspannung am höher beanspruchten  
Riss des ZRE

$\Delta\sigma_{L,i} = \sigma_{L,i+1} - \sigma_{L,i}$  Differenz der Lamellenspannung für das ZRE

- Auftragen der Spannungsdifferenzen für ein Zwischenrisselement (ZRE) über der Spannung im geringer beanspruchten Riss des ZRE

## Bestimmung des Verbundwiderstands

Nachfolgend werden die Gleichungen für die Ermittlung der charakteristischen und der mittleren Verbundkennwerte angegeben. Das Excel-Schema erlaubt die Führung der Nachweise mit beiden Werten. Grundsätzlich sollten die Nachweise jedoch auf Grundlage der charakteristischen Materialeigenschaften erfolgen.

- Berechnung der Mittelwerte und der charakteristischen Werte von  $l_t$

Für Stahllaschen und CFK-Lamellen:

$$l_{t,k} = 1,4572 \cdot \sqrt{\frac{E_L \cdot t_L}{\sqrt{\beta_W \cdot \beta_{OZ}}}} \quad \text{und} \quad l_{t,m} = 1,2485 \cdot \sqrt{\frac{E_L \cdot t_L}{\sqrt{\beta_W \cdot \beta_{OZ}}}}$$

- Berechnung der Mittelwerte und der charakteristischen Werte von  $\sigma_{L,max}^a$

Für Stahllaschen und CFK-Lamellen:

$$\sigma_{L,max,k}^a = 0,2248 \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{\beta_W \cdot \beta_{OZ}} \cdot E_L}{t_L}} \quad \text{und} \quad \sigma_{L,max,m}^a = 0,2772 \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{\beta_W \cdot \beta_{OZ}} \cdot E_L}{t_L}}$$

- Berechnung der Mittelwerte und der charakteristischen Werte von  $\tau_{L1,m}$

Für Stahllaschen und CFK-Lamellen:

$$\tau_{L1,k} = 0,273 \cdot \sqrt{\beta_W \cdot \beta_{OZ}} \quad \text{und} \quad \tau_{L1,m} = 0,394 \cdot \sqrt{\beta_W \cdot \beta_{OZ}}$$

- Berechnung der Mittelwerte und der charakteristischen Werte von  $s_{l0,m}$

Für Stahllaschen und CFK-Lamellen:

$$s_{l0,k} = 0,185 \text{ mm} \quad \text{und} \quad s_{l0,m} = 0,195 \text{ mm}$$

- Berechnung von  $G_F$

$$G_{F,k} = \frac{1}{2} \cdot s_{l0,k} \cdot \tau_{L1,k} \quad \text{und} \quad G_{F,m} = \frac{1}{2} \cdot s_{l0,m} \cdot \tau_{L1,m}$$

- Berechnung von *aufn.*  $\sigma_L^a$

$$\textit{aufn. } \sigma_L^a = \sigma_{L,\max}^a \quad \text{für } a_r > l_t$$

$$\textit{aufn. } \sigma_L^a = \sigma_{L,\max}^a \cdot \left( \frac{a_r}{l_t} \right) \cdot \left( 2 - \left( \frac{a_r}{l_t} \right) \right) \quad \text{für } a_r \leq l_t$$

- Bestimmung der von  $\sigma_L^i$  und *aufn.*  $\Delta\sigma_L^i$  für den Punkt D (s. Bild 1)

für  $a_r < l_t$  gilt:

Spannung  $\sigma_L$  am Punkt D:

$$\sigma_L^D = \frac{s_{L0} \cdot E_L}{a_r} - \tau_{L1} \frac{a_r}{4 \cdot t_L}$$

aufnehmbarer Spannungszuwachs am Punkt D:

$$\textit{aufn.} \Delta\sigma_L^D = \sqrt{\frac{2 \cdot G_F \cdot E_L}{t_L} + (\sigma_L^D)^2} - \sigma_L^D$$

für  $a_r \geq l_t$  gilt:

Die Kurve 1 muss nicht ermittelt werden. Es gelten nur die Kurven 2 & 3 (im gesamten Bereich).  
 In diesem Fall ist eine Ermittlung des Punktes D nicht erforderlich.

- Bestimmung der von  $\sigma_L^i$  und *aufn.*  $\Delta\sigma_L^i$  für den Punkt G (s. Bild 1)

Spannung  $\sigma_L$  am Punkt G:

$$\sigma_L^G = 0$$

aufnehmbarer Spannungszuwachs am Punkt G:

$$\textit{aufn. } \sigma_L^G = \sigma_{L,\max}^a \cdot \left( \frac{a_r}{l_t} \right) \cdot \left( 2 - \left( \frac{a_r}{l_t} \right) \right)$$

- Festlegung des maßgebenden Rissabstands  
 Wahl zwischen maximalem und minimalem rechnerischem Abstand oder frei wählbarem Rissabstand
- Bestimmung der Kurve 1 (s. Bild 1)

$$\textit{aufn.} \Delta\sigma_L = \textit{aufn.} \Delta\sigma_L^G - \frac{\textit{aufn.} \Delta\sigma_L^G - \textit{aufn.} \Delta\sigma_L^D}{\sigma_L^D} \cdot \sigma_L$$

- Bestimmung der Kurve 2 (s. Bild 1)

$$\text{aufn.} \Delta \sigma_L^{i+1} = \sqrt{\frac{2 \cdot G_F \cdot E_L}{t_L} + \sigma_L^2} - \sigma_L$$

- Bestimmung der Kurve 3 (s. Bild 1)

$$\begin{aligned} \text{aufn.} \Delta \sigma_L (\sigma_L) &= \beta_{S,L} - \sigma_L && \text{bzw.} \\ \text{aufn.} \Delta \sigma_L (\sigma_L) &= \beta_{Z,L} - \sigma_L \end{aligned}$$

- Bestimmung der gesamten Widerstandskurve  $\text{aufn.} \Delta \sigma_L (\sigma_L)$ :  
 Die Kurve setzt sich aus den Kurven 1, 2 und 3 zusammen. Der Punkt D ist Schnittpunkt der Kurven 1 und 2, der Punkt H Schnittpunkt der Kurven 2 und 3. Am Punkt G schneidet die Kurve 1 die Ordinate. Wenn der Rissabstand kleiner ist als die Verankerungslänge  $a_r \leq l_t$ , muss die Kurve 1 - und damit auch die Punkte D und G - nicht ermittelt werden.

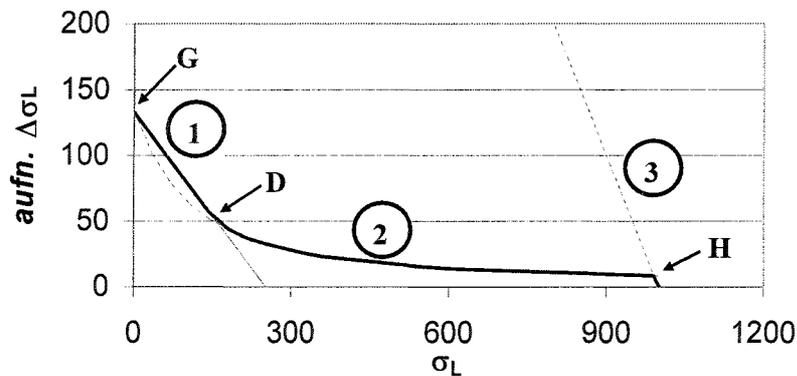
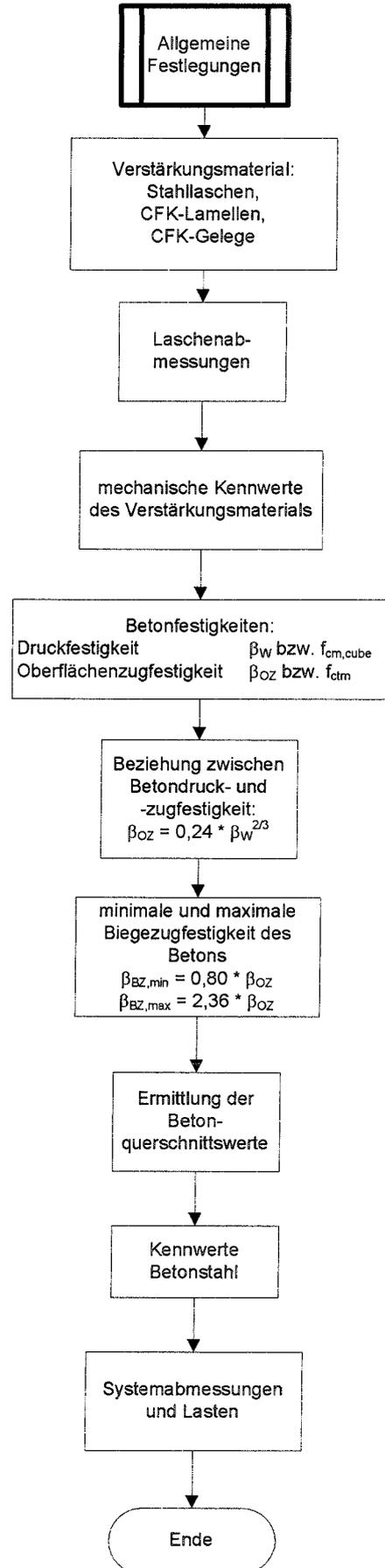
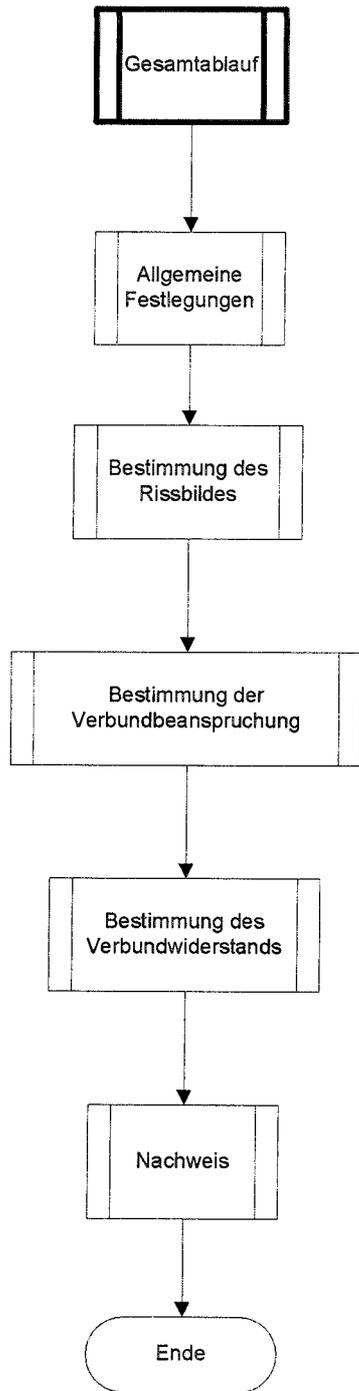
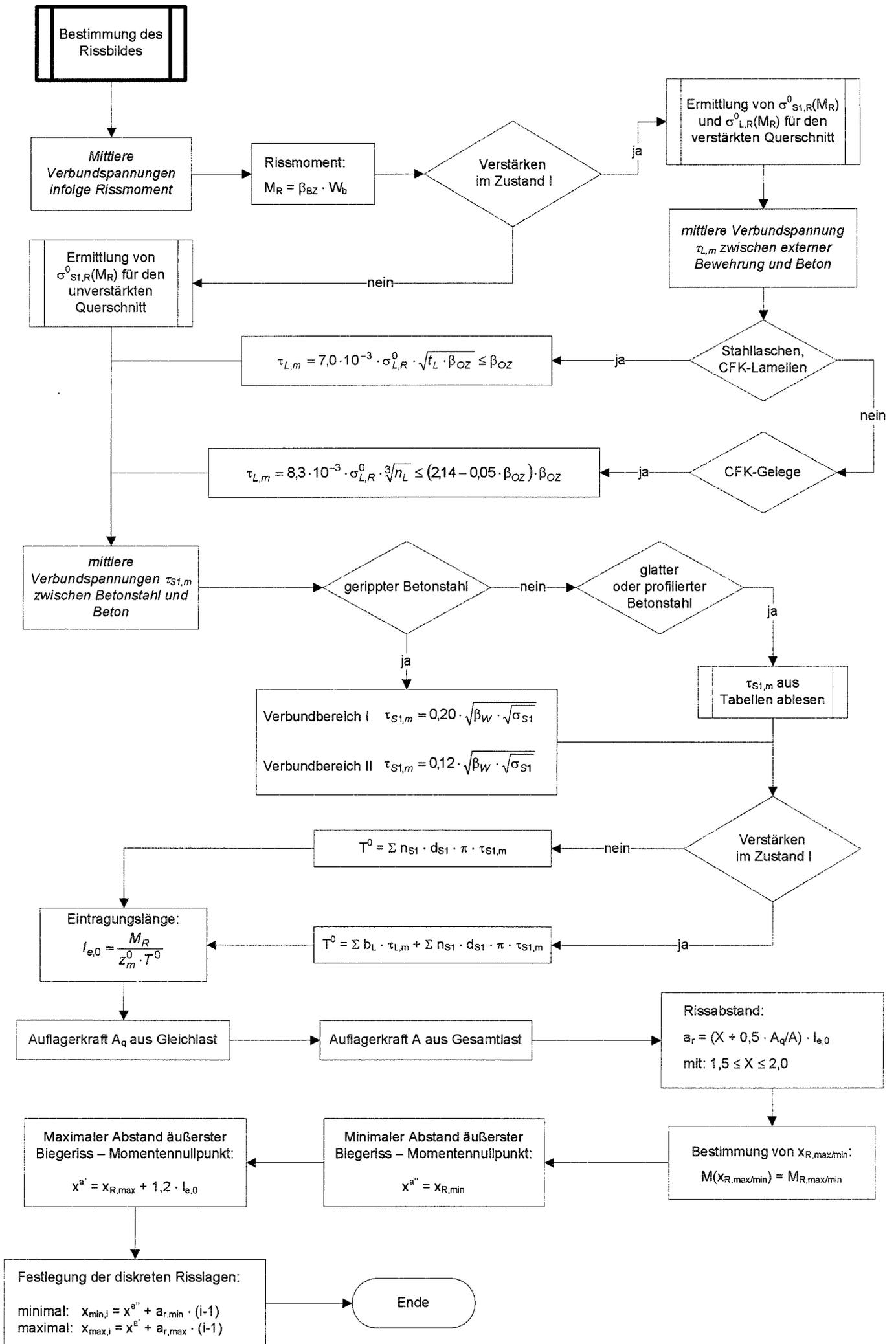
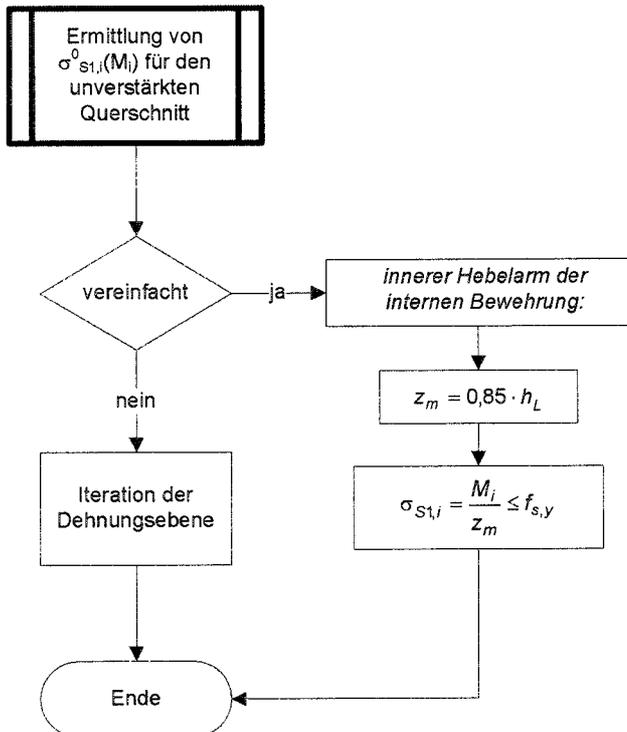
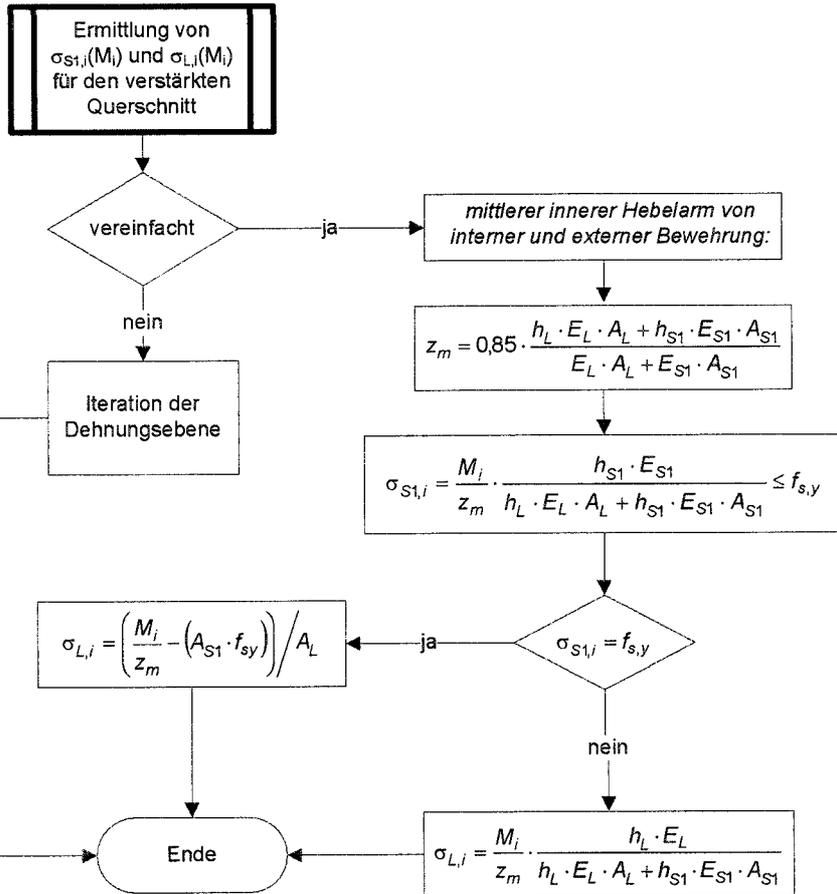


Bild 1: Aufnehmbare Spannungsdifferenzen am Zwischenrisselement

## **Anlage 2: Flussdiagramm des Verbundnachweis**



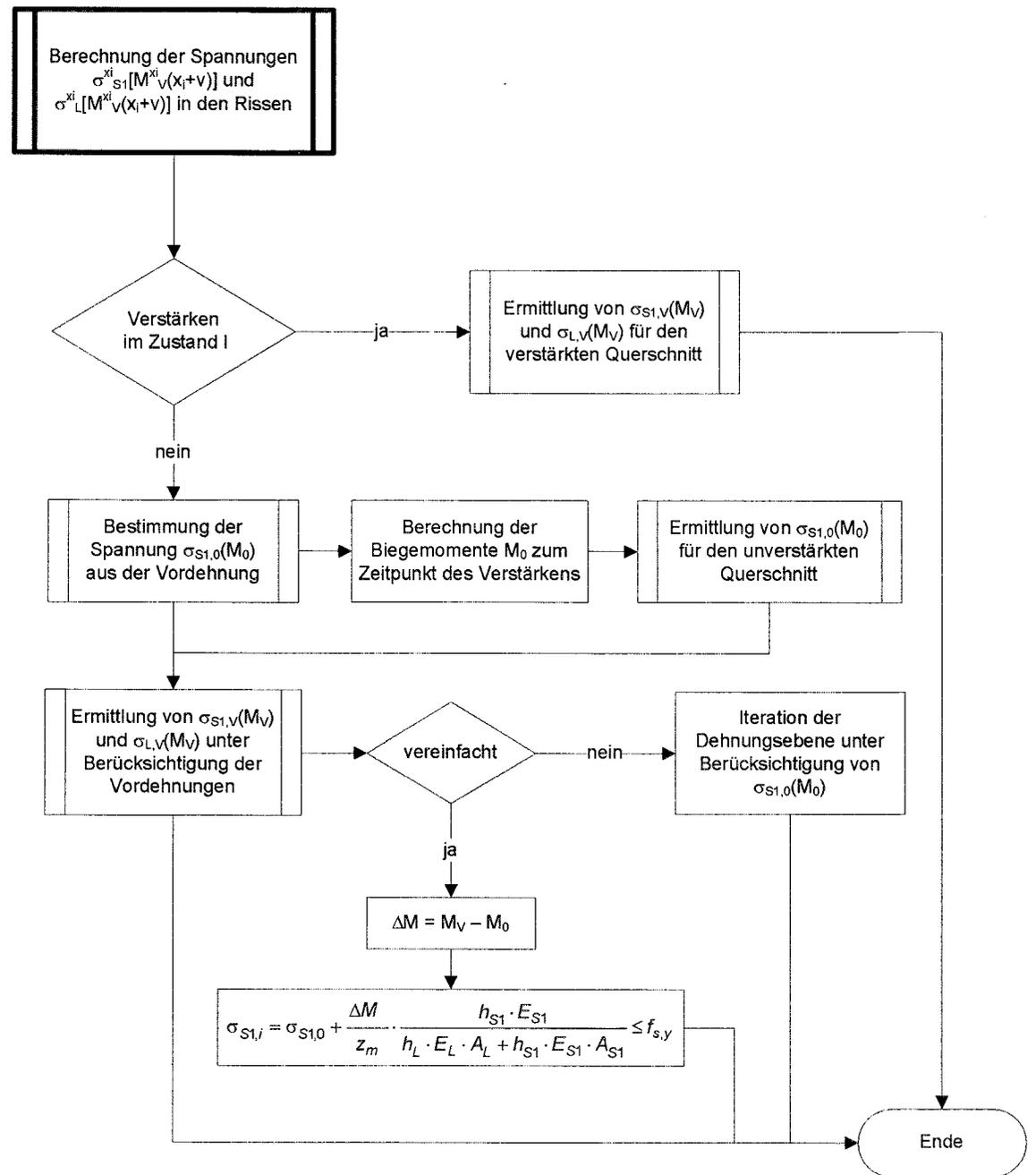
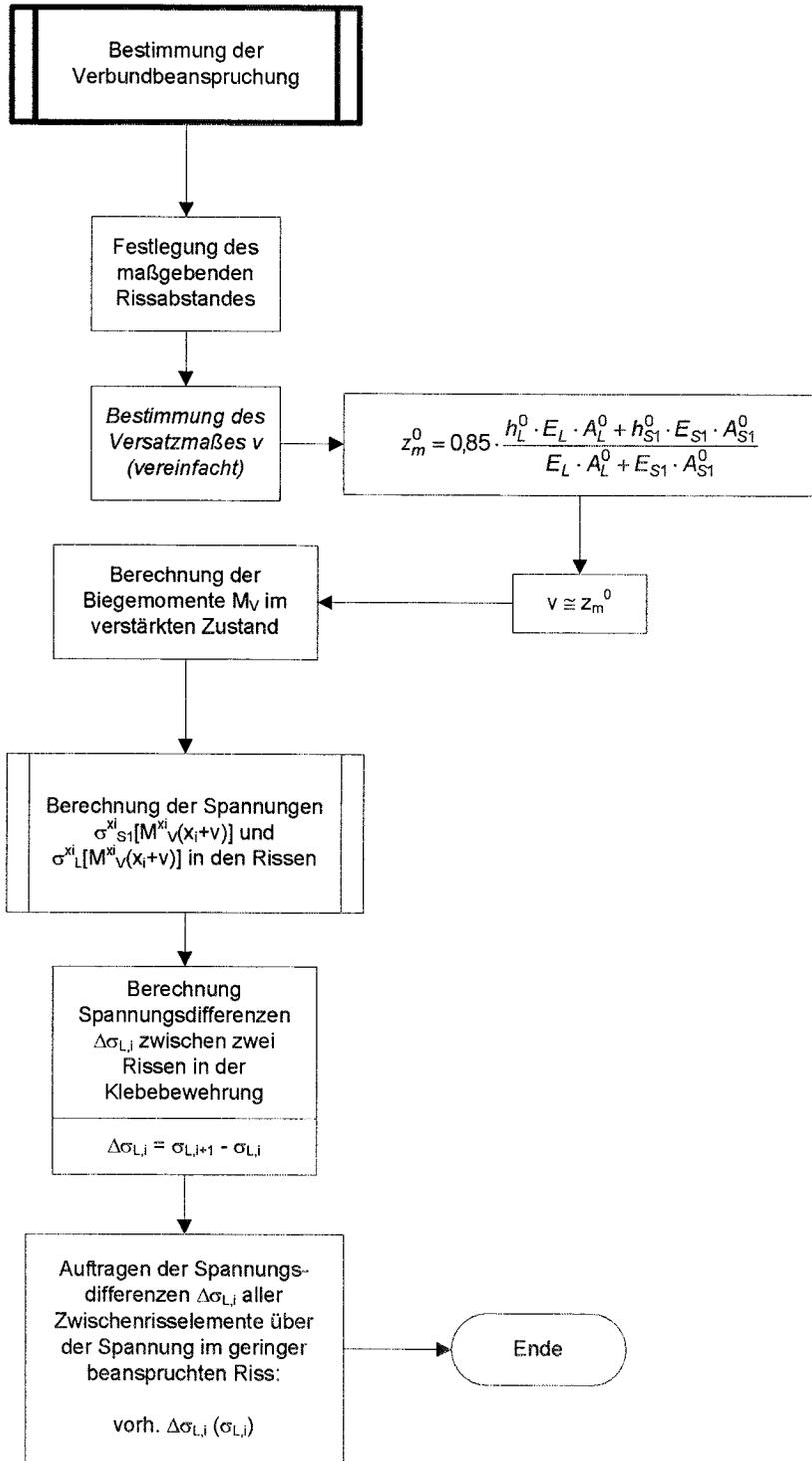


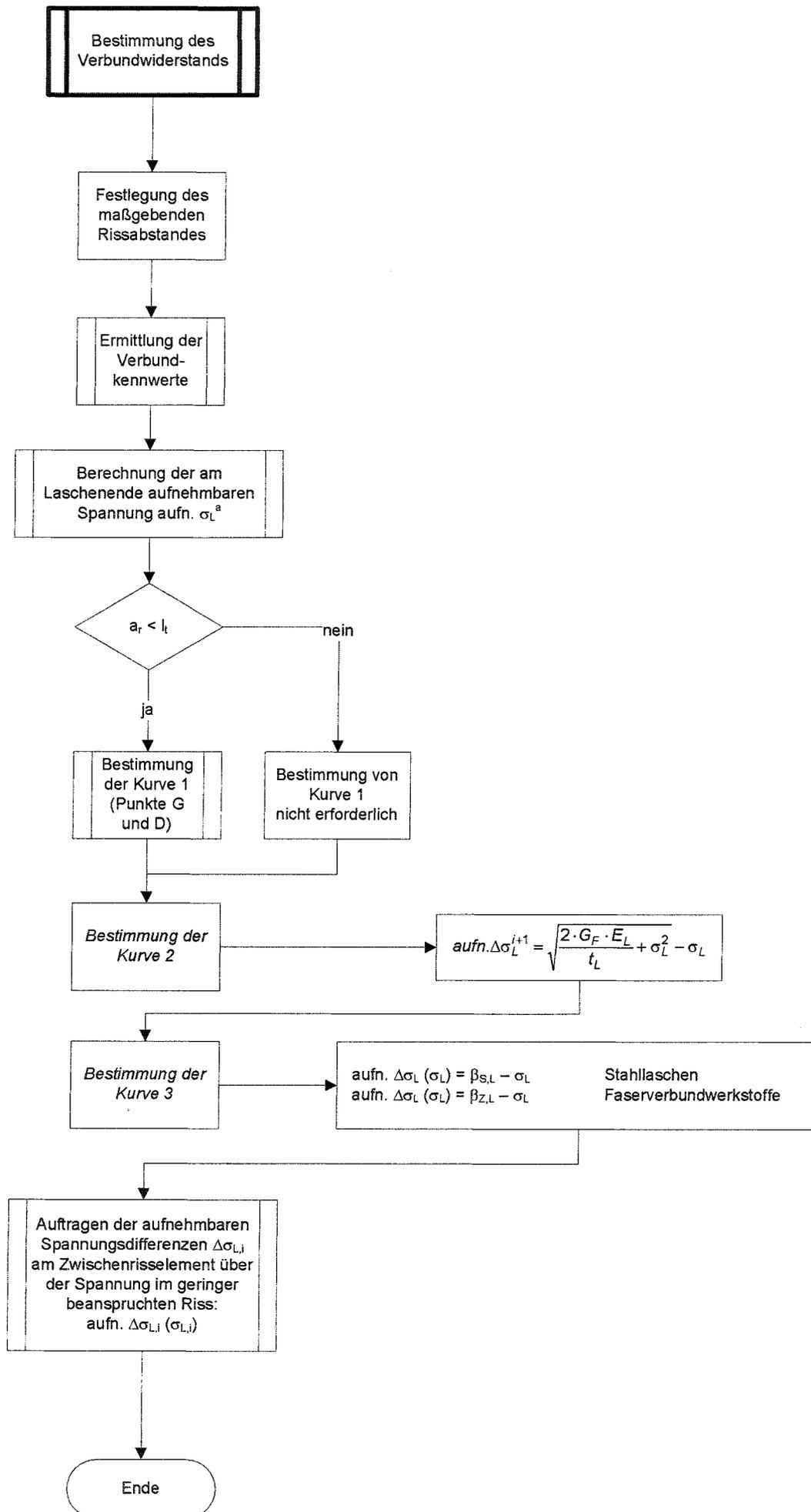


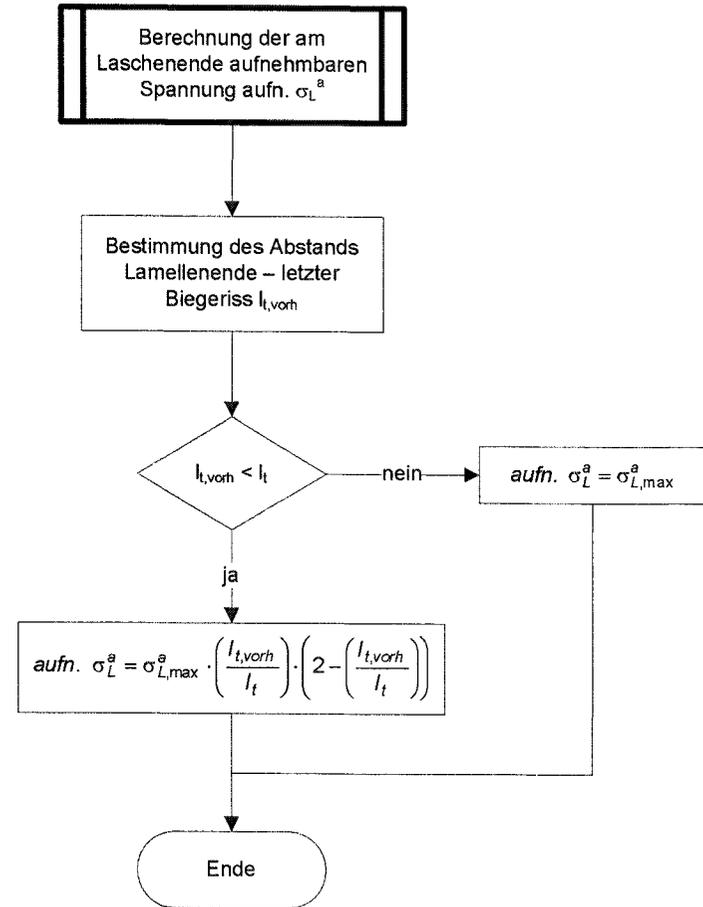
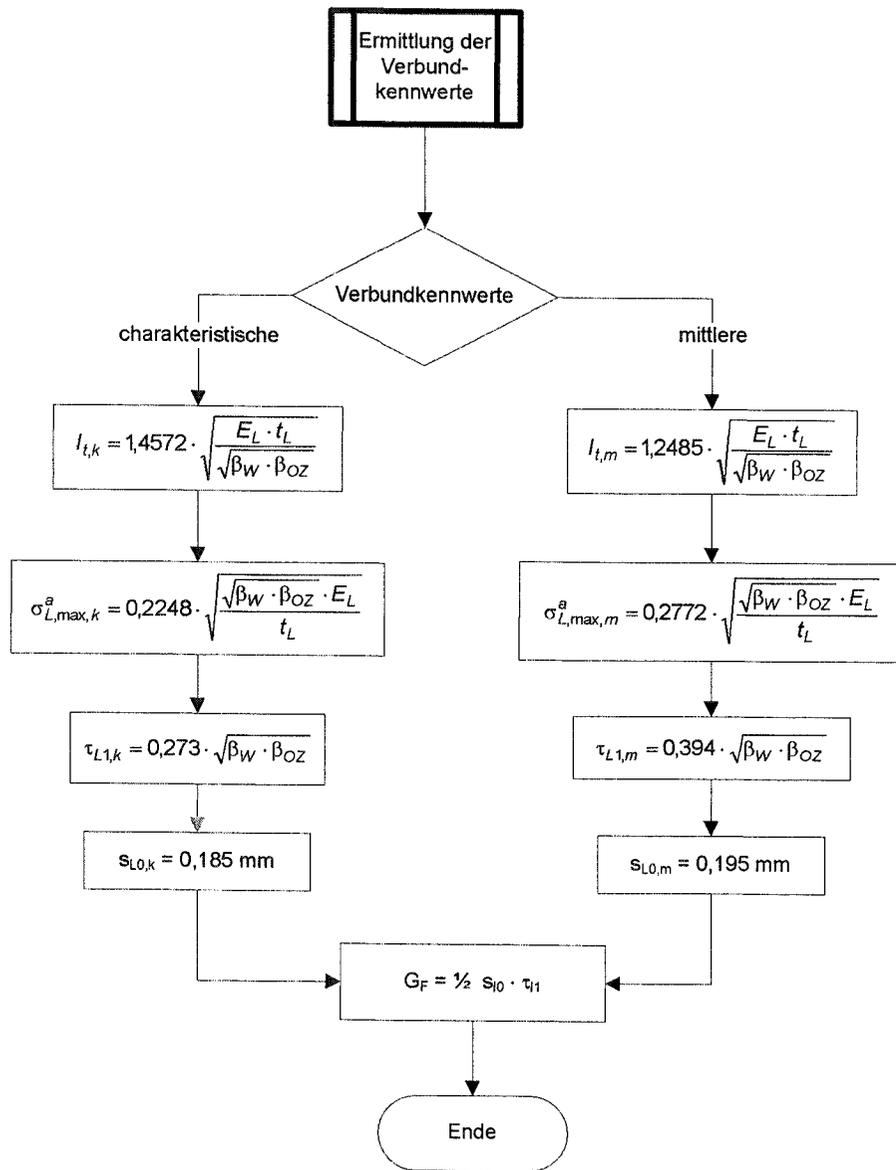
**$\tau_{S1,m}$  aus Tabellen ablesen**

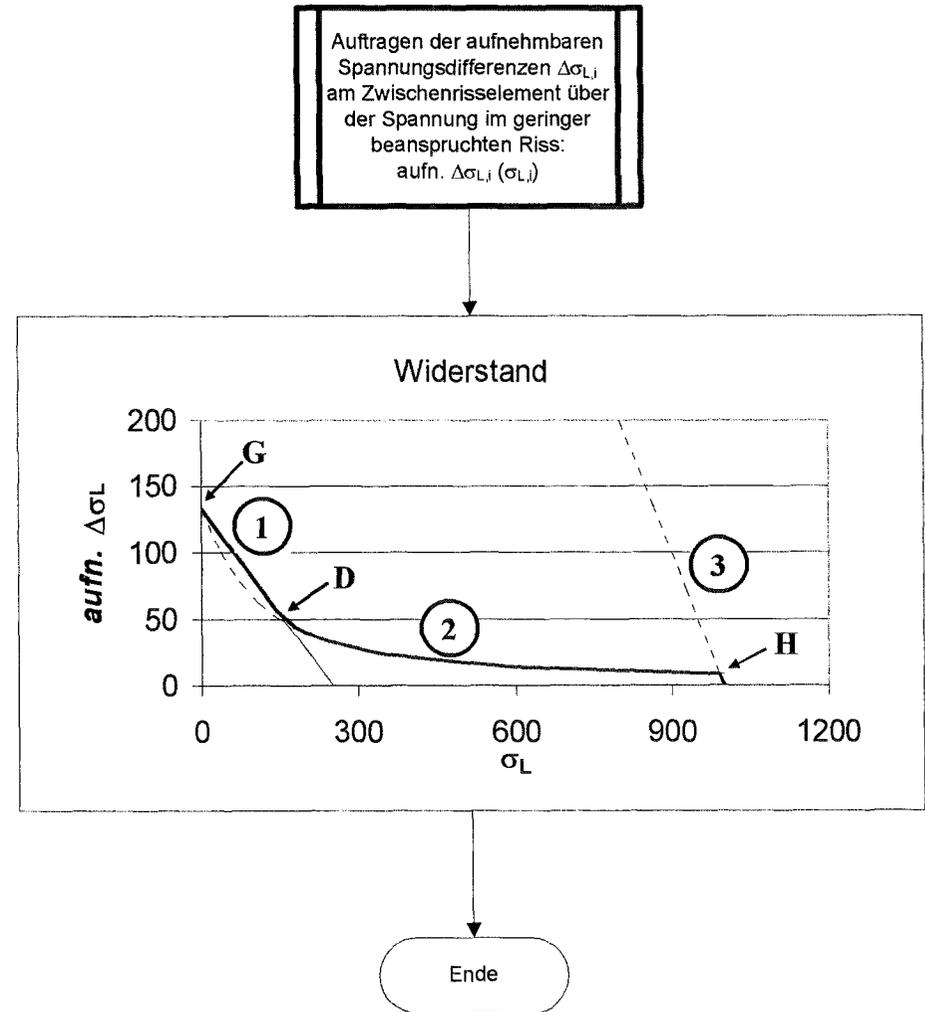
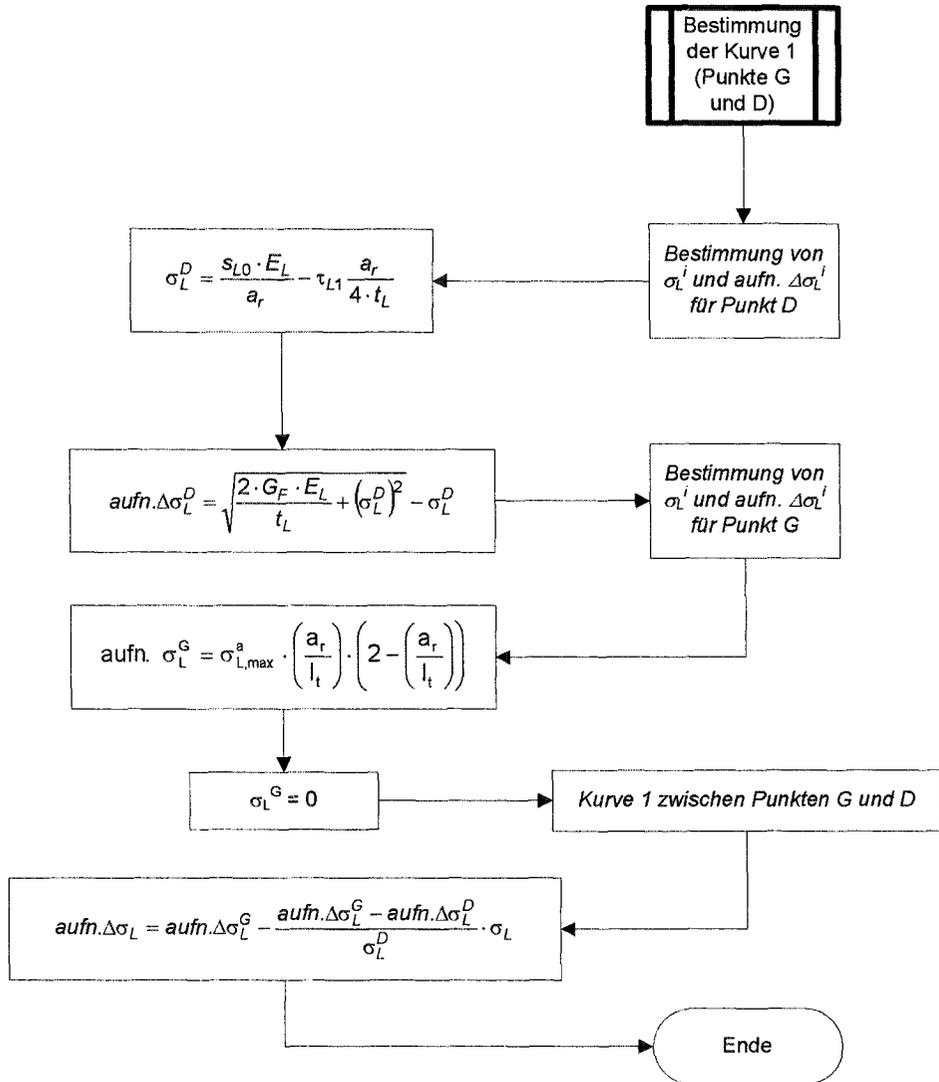
Oberfläche	VB	B 15	B 25	B 35	B 45	B 55
glatt	I	1,26	1,47	1,68	1,89	2,10
	II	0,63	0,74	0,84	0,95	1,05
profilierter	I	1,68	2,10	2,52	2,94	3,36
	II	0,84	1,05	1,26	1,47	1,68

Ende



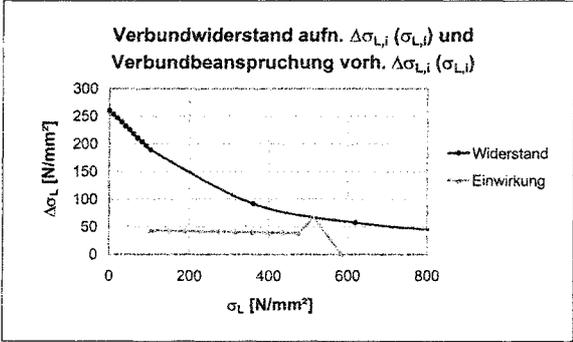






Nachweis

Vergleich der vorhandenen  
Spannungsdifferenzen  
vorh.  $\Delta\sigma_{L,i}(\sigma_{L,i})$   
mit den aufnehmbaren  
Spannungsdifferenzen  
aufn.  $\Delta\sigma_{L,i}(\sigma_{L,i})$



Ende

## Anlage 3: Formelzeichen

### Materialkennwerte

#### Beton

$\beta_W$	- Würfeldruckfestigkeit
$f_{cm,cube}$	- "-
$\beta_{OZ}$	- Oberflächenzugfestigkeit
$f_{ctm}$	- "-
$\beta_{BZ,min}$	- Biegezugfestigkeit (unterer Wert)
$\beta_{BZ,max}$	- Biegezugfestigkeit (oberer Wert)

#### Betonstahlbewehrung

$f_{s,y}$	- Fließgrenze
$E_{S1}$	- E-Modul
$d_{S1}$	- Durchmesser der Bewehrungsstäbe
$n_{S1}$	- Anzahl der Bewehrungsstäbe

#### Klebebewehrung

$\beta_{Z,L}$	- Zugfestigkeit der CFK-Lamellen / -Gelege
$\beta_{S,L}$	- Fließgrenze der Stahllaschen
$E_L$	- E-Modul
$t_L$	- Laschen- / Lamellendicke
$b_L$	- Laschen- / Lamellenbreite
$n_L$	- Anzahl der auflaminierten CFK-Gelege

#### Verbundkennwerte

$\tau_{L1}$	- maximale lokale Verbundspannung
$s_{L0}$	- Schlupf bei lokaler Entkoppelung
$G_f$	- Verbundbruchenergie
$\sigma_{L,max}^a$	- maximal übertragbare Laschen-/Lamellenspannung am äußersten Biegeriss
$l_t$	- erforderliche Verbundlänge zur Übertragung von $\sigma_{L,max}^a$

#### Geometrische Größen

##### Querschnittswerte

$z_m$	- mittlerer innerer Hebelarm von Betonstahl und Klebebewehrung
$h_L$	- Nutzhöhe der Klebebewehrung
$A_L$	- Fläche der Klebebewehrung
$h_{S1}$	- Nutzhöhe des Betonstahls
$A_{S1}$	- Fläche des Betonstahls

$W_b$  - Widerstandsmoment des Betonquerschnitts

## Systemkenngrößen

$A$	- Auflagerkraft
$A_q$	- Auflagerkraft aus Streckenlasten
$M_V$	- Biegemoment im verstärkten Zustand
$M_0$	- Biegemoment während des Verstärkens
$M_R$	- Rissmoment
$l_{e,0}$	- Eintragungslänge unter Wirkung des Rissmoments
$a_r$	- Rissabstand
$x_{R,min/max}$	- Abstand der Stelle, an der bei minimaler/maximaler Betonzugfestigkeit die Risschnittgröße erreicht wird, zum Momentennullpunkt
$x^a$	- Maximaler Abstand zwischen äußerstem Biegeriss und Momentennullpunkt
$x^a$	- Minimaler Abstand zwischen äußerstem Biegeriss und Momentennullpunkt

## Beanspruchungen

$\sigma_{S1,R}^0$	- Betonstahlspannung unter Wirkung des Rissmoments
$\sigma_{L,R}^0$	- Laschen-/Lamellenspannung unter Wirkung des Rissmoments
$\sigma_{S1}^{x_i}$	- Betonstahlspannung an der Stelle $x_i$
$\sigma_L^{x_i}$	- Laschen-/Lamellenspannung an der Stelle $x_i$
$\sigma_{L,i}$	- Laschen-/Lamellenspannung im Riss $i$
$\Delta\sigma_{L,i}$	- Differenz Laschen-/Lamellenspannungen in den Rissen $i$ und $i+1$
$\sigma_{S1,0}$	- Betonstahlspannung während des Verstärkens
$\tau_{S1,m}$	- mittlere Verbundspannung zwischen Betonstahl und Beton
$\tau_{L,m}$	- mittlere Verbundspannung zwischen Klebewehrung und Beton

## Anlage 4: Nachgerechnete Versuche

Versuch	Lamelle / Lasche				E-Modul	Festigkeit	Beton	
	Art	Breite	Dicke	Nutzhöhe			Würfel	Oberfl.-Zug.
	[-]	[mm]	[mm]	[cm]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]
P-1	CFK	100	1,43	15,07	150.615	2.000	36,0	2,50
P-2	CFK	100	1,43	15,07	205.517	2.665	36,0	2,50
P-3	CFK	50	1,22	15,06	175.000	2.275	26,0	2,10
P-4	CFK	50	2,44	15,12	175.000	2.275	41,0	2,80
B1-01-B2C	CFK	50	1,34	15,06	159.530	2.700	56,8	<sup>1)</sup> 2,76
B1-02-B2C	CFK	50	1,34	15,06	159.530	2.700	56,8	<sup>1)</sup> 2,71
B1-03-B2C	CFK	50	1,34	15,06	159.530	2.700	48,1	<sup>1)</sup> 3,83
B1-04-B2S	St 37	80	5,00	15,25	203.405	378	57,9	<sup>1)</sup> 3,63
B1-05-B2S	St 37	80	5,00	15,25	203.405	378	56,3	<sup>1)</sup> 3,71
B1-06-B2S	St 37	80	5,00	15,25	206.788	301	59,1	<sup>1)</sup> 3,35
B2-01-B2C	CFK	50	1,34	15,06	159.530	2.700	62,5	<sup>1)</sup> 3,19
B2-02-B2C	CFK	50	1,34	15,06	159.530	2.700	63,4	<sup>1)</sup> 3,38
B2-03-B2C	CFK	50	1,34	15,06	159.530	2.700	63,4	<sup>1)</sup> 2,85
B2-04-B2S	St 37	80	5,00	15,25	206.788	301	60,5	<sup>1)</sup> 3,08
B2-05-B2S	St 37	80	5,00	15,25	206.788	301	58,4	<sup>1)</sup> 3,01
B2-06-B2S	St 37	80	5,00	15,25	206.788	301	60,0	<sup>1)</sup> 1,79

<sup>1)</sup> Die Würfeldruckfestigkeit wurde aus den gemessenen Zylinder-druckfestigkeiten mit der Beziehung  $\beta_{w200} = 1,18 * \beta_{cyl}$  berechnet.

Versuch	Oberfläche	Durchm.	Betonstahl			System					
			Stabanzahl	E-Modul	Streckgr.	Länge	Breite	Dicke	Gleichlast	4-P-Last <sup>2)</sup>	Abst.-4PL <sup>3)</sup>
	[-]	[mm]	[-]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[m]	[m]	[m]	[kN/m]	[kN]	[m]
P-1	gerippt	8	7	200.821	619	2,60	0,50	0,15	-	45,96	0,90
P-2	gerippt	8	7	200.821	619	2,60	0,50	0,15	-	52,36	0,90
P-3	gerippt	6	6	204.763	564	4,00	0,50	0,15	-	14,82	1,40
P-4	gerippt	10	4	197.973	519	4,00	0,50	0,15	-	24,82	1,40
B1-01-B2C	glatt	12	2	204.733	555	4,50	0,30	0,15	1,125	12,63	2,00
B1-02-B2C	glatt	12	2	204.733	555	4,50	0,30	0,15	1,125	12,00	2,00
B1-03-B2C	glatt	12	2	204.733	555	4,50	0,30	0,15	1,125	12,53	2,00
B1-04-B2S	glatt	12	2	204.733	555	4,50	0,30	0,15	1,125	11,45	2,00
B1-05-B2S	glatt	12	2	204.733	555	4,50	0,30	0,15	1,125	11,05	2,00
B1-06-B2S	glatt	12	2	204.733	555	4,50	0,30	0,15	1,125	8,60	2,00
B2-01-B2C	glatt	12	2	204.733	555	4,50	0,30	0,15	1,125	12,37	2,00
B2-02-B2C	glatt	12	2	204.733	555	4,50	0,30	0,15	1,125	10,90	2,00
B2-03-B2C	glatt	12	2	204.733	555	4,50	0,30	0,15	1,125	12,53	2,00
B2-04-B2S	glatt	12	2	204.733	555	4,50	0,30	0,15	1,125	12,00	2,00
B2-05-B2S	glatt	12	2	204.733	555	4,50	0,30	0,15	1,125	9,00	2,00
B2-06-B2S	glatt	12	2	204.733	555	4,50	0,30	0,15	1,125	9,05	2,00

<sup>2)</sup> Die 4-Punkt-Last entspricht der halben Gesamtlast beim Versagen

<sup>3)</sup> Abstand der Einzellast zum Auflager