

Verankerung von aufgeklebten Stahllaschen im Bereich von Biegemomenten mit wechselnden Vorzeichen

T 3285

T 3285

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

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.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2012

ISBN 978-3-8167-8821-8

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

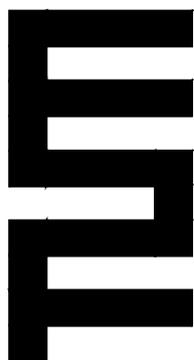
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
INSTITUT FÜR BAUSTOFFE UND KONSTRUKTION
LEHRSTUHL FÜR MASSIVBAU

**"Verankerung von aufgeklebten
Stahllaschen im Bereich von Bie-
gemomenten mit wechselnden Vor-
zeichen"**

**Konrad Zilch
Roland Niedermeier
Wolfgang Finckh**

**Forschungsbericht
März 2012**

gefördert durch das
Deutsche Institut für Bautechnik
(P 52-5-19.70-1394/11)

Technische Universität München
Institut für Baustoffe und Konstruktion
Lehrstuhl für Massivbau
em. Univ.- Prof. Dr.- Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. K. Zilch
PD Dr.- Ing. habil. Roland Niedermeier
Dipl.-Ing. Wolfgang Finckh

Briefanschrift:
80290 München

Hausanschrift:
Gebäude N6
Theresienstraße 90
80333 München

Tel.: +49 / 89 / 289 – 23039
Fax.: +49 / 89 / 289 – 23046
e-mail: massivbau@mb.bv.tum.de

Verankerung von aufgeklebten Stahllaschen im Bereich von Biegemomenten mit wechselnden Vorzeichen

Kurzfassung:

Bei durchlaufenden verstärkten Stahlbetonkonstruktionen kann es aufgrund der ungünstigen Anordnung der Verkehrslasten im Bereich der Verankerung der aufgeklebten Bewehrung zu einem Vorzeichenwechsel des Momentes bei unterschiedlichen Lastfällen kommen. Dies führt dazu, dass die aufgeklebte Verstärkung in einem bestimmten Bereich sowohl Zug- wie auch Druckkräften ausgesetzt ist. Das Verhalten der aufgeklebten Biegebewehrung in diesem wechselnden Bereich, insbesondere die Verbundkraftübertragung aufgeklebten Biegebewehrung unter Druckbeanspruchung, ist jedoch bisher nicht untersucht worden. Gerade die aufgeklebten Stahllaschen, welche mit einer Stärke von bis zum 15 mm eingesetzt werden, können hierbei aufgrund ihrer hohen Dehnsteifigkeit hohe Kräfte erhalten, welche über Verbund in den Betonquerschnitt eingeleitet werden müssen.

Im Rahmen dieses Forschungsberichtes werden zunächst bisherige Untersuchungen, welche diese Problemstellung tangieren betrachtet. Darauf aufbauend werden Verbunddruckversuche mit unterschiedlich dicken Stahllaschen durchgeführt, um das Verhalten des Verbundes unter Druckbeanspruchung zu untersuchen. Zur Verifizierung der Versuchsergebnisse sowie zur Erfassung weiterer bauteilspezifischer Effekte werden zwei Versuche an einem Durchlaufträger durchgeführt in welchem die Stahllaschen bis weit in den Druckbereich verankert waren.

Aufgrund der durchgeführten experimentellen Untersuchungen werden abschließend Empfehlungen für den Umgang mit dieser Problemstellung in der Bemessung gegeben.

Anchorage of externally bonded steel plates in the area of bending moments with changing sign

Synopsis:

On continuous strengthened reinforced concrete beams due to the unfavorable arrangement of the life load a change in the sign of the bending moment can occur in the anchorage region of the externally bonded reinforcement. This means that the externally bonded reinforcement gets tensile as well compression force. The behavior of the externally bonded reinforcement in this changing area, especially the bond force transfer of the externally bonded longitudinal reinforcement under compression, has not been investigated so far. Especially the externally bonded steel plates, which are used with a thickness of up to 15 mm can get due to their high axial stiffness high forces in this area, which must be transferred by in the concrete section.

This research report first considers previous investigations, which are in touch with this problem. Based on this, bond compression tests with different thick steel plates are carried out, in order to investigate the behavior of the bond under compression. To verify the test results and for acquiring additional member specific effects two tests on a continuous beam, on which steel plates were anchored far into the compression area were carried out.

Based on the performed experimental studies recommendations for dealing with this problem in the design are given finally.

Ancrage d'éclisses en acier pour une application dans le domaine des moments de flexion avec alternance de signe

Résumé :

Pour les constructions en béton armé continues, le signe du moment peut changer dans des cas de charges différents en raison d'un arrangement défavorable des charges de passage au niveau de l'ancrage de l'armature scellée. Cela induit que, dans une zone particulière, le renfort scellé est exposé à la fois à des efforts de traction et de compression. Le comportement de l'armature de flexion scellée dans cette zone sujette à des changements, en particulier la reprise des forces de l'ouvrage mixte acier-béton de l'armature de flexion scellée en situation de compression n'a jusqu'ici fait l'objet d'aucune étude. Les éclisses en acier scellées utilisées avec une épaisseur allant jusqu'à 15 mm peuvent elles-mêmes résister à des efforts élevés en raison de leur grande résistance à l'allongement, ces derniers devant être transmis via l'ouvrage mixte acier-béton dans l'ensemble de la dalle en béton.

Les études précédentes qui concernent ce problème ont été consultées dans le cadre de ce rapport de recherche. Des tests de pression associée sont réalisés avec des éclisses en acier d'épaisseurs différentes pour étudier le comportement de l'ouvrage mixte acier-béton en situation de compression. Pour vérifier les résultats de test et pour la prise en compte d'effets supplémentaires spécifiques aux éléments de construction, deux expériences ont été menées sur une poutre continue dans laquelle les éclisses en acier étaient ancrées profondément dans la zone de pression.

En conclusion, sur la base des études expérimentales effectuées et d'une évaluation d'autres tests disponibles dans la littérature concernant les poutres continues renforcées par des armatures scellées, des recommandations de dimensionnement seront données en ce qui concerne la gestion de ce problème.

Inhalt:

1	Einleitung	7
2	Grundlagen und Stand des Wissens	7
2.1	Allgemeines	7
2.2	Verbundkraftübertragung aufgeklebter Bewehrung.....	8
2.2.1	Allgemeines	8
2.2.2	Hintergrund der im weiteren verwendeten Modellbildung	9
2.3	Ausgangsbasis zum Verhalten der geklebten Bewehrung im Druckbereich.....	12
2.3.1	Einfluss der negativen Krümmung im Bereich der Druckzone	12
2.3.2	Einfluss der Betondruckdehnung auf die Zugverankerung der geklebten Bewehrung	13
2.3.3	Wirkungsweise der geklebten Bewehrung als Druckbewehrung	14
2.3.4	Fazit	15
3	Experimentelle Untersuchungen	15
3.1	Versuchsprogramm	15
3.2	Materialien und Verarbeitung.....	15
3.2.1	Beton.....	15
3.2.2	Betonstahl.....	17
3.2.3	Stahlaschen	17
3.2.4	CFK-Lamellen	17
3.2.5	Epoxidharzklebstoff.....	18
3.2.6	Verarbeitung	18
3.3	Verbunddruckversuche.....	18
3.3.1	Versuchsdurchführung und Abmessungen	18
3.3.2	Ergebnis	20
3.4	Versuche am Zweifeldträger.....	21
3.4.1	Versuchsdurchführung und Abmessungen	21
3.4.2	Versuch 1	21
3.4.3	Versuch 2.....	23
4	Auswertung der experimentellen Untersuchungen	25
4.1	Verbunddruckversuche	25
4.2	Versuche an Zweifeldträgern.....	28
5	Bemessungsempfehlung	30
6	Zusammenfassung	30
	Literatur	31
	Anhang A - Versuchsergebnisse	33

1 Einleitung

Eine Verstärkung von Betonbauteilen mit aufgeklebten Stahllaschen ist seit dem Jahre 1979 bauaufsichtlich zugelassen. Aufgrund dieser Zulassungen wurden zahlreiche Verstärkungsmaßnahmen mit aufgeklebten Stahllaschen durchgeführt. Derzeit dürfen zur Verstärkung von Betonbauteilen im Stützmomentenbereich sowohl CFK-Lamellen [3] als auch Stahllaschen [4] verwendet werden. Aufgrund des Nachweises am Zwischenrisselement im Stützmomentenbereich ist eine Verstärkung mit CFK-Lamellen derzeit relativ unwirtschaftlich und rechenintensiv. Somit wurde des Öfteren eine Verstärkung mit Stahllaschen im Stützmomentenbereich durchgeführt. Eine aufwendige Bemessung an dem Zwischenrisselement kann hierbei bei der Anwendung des Abschnittes der lokalen Verstärkung nach Zulassung umgangen werden. Im Regelfall werden die Stahllaschen dabei bis in den Druckbereich verankert und sind aufgrund der wechselnden Momente möglicherweise der maximalen Druckdehnung des Betons ausgesetzt. Zu dem Verhalten der relativ steifen Stahllaschen im Bereich von hohen Druckstauchungen sind jedoch keine experimentellen oder theoretischen Untersuchungen bekannt. In einer Veröffentlichung aus der Schweiz [10] wird ohne konkrete quantitative Analyse behauptet, dass druckbeanspruchte Stahllaschen im Gegensatz zu CFK-Lamellen schon bei geringer Druckdehnung abplatzen. Da die Stahllaschen aufgrund ihrer größeren Dicken, von bis zu 15 mm eine deutlich höhere Steifigkeit als die verhältnismäßig dünnen CFK-Lamellen besitzen, werden diese auch erheblich größere Kräfte anziehen. In den derzeitigen Regelungen der Zulassung [3][4] bzw. in den zukünftigen Regelungen der DAfStb-Richtlinie „Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung“ [1] sind derzeit keine Einschränkungen bezüglich der Verankerung der Laschen im Druckbereich enthalten. Allerdings wird in allen Regelungen festgelegt, dass im Gegensatz zur einbetonierten Bewehrung, der geklebten Bewehrung planmäßig nur Zugkräfte zugewiesen werden dürfen. Im Rahmen dieses Berichtes wird die Fragestellung, ob sich die Stahllaschen im Druckbereich ablösen, bzw. ab wann sich die Stahllaschen im Druckbereich ablösen näher untersucht. Dazu wird in Abschnitt 2 zunächst auf den derzeitigen Stand des Wissens über die Verbundkraftübertragung im Druckbereich eingegangen. In Abschnitt 3 werden die hier durchgeführten experimentellen Untersuchungen beschrieben. Diese Untersuchungen werden in Abschnitt 4 ausgewertet. Auf Grundlage dieser Auswertung wird dann in Abschnitt 5 eine Empfehlung gegeben, wie mit Stahllaschen unter Druckbeanspruchungen umzugehen ist.

2 Grundlagen und Stand des Wissens

2.1 Allgemeines

Direkte Untersuchungen zum Verhalten der Stahllaschen im Druckzonenbereich von Biegeträgern oder in anderen druckbeanspruchten Bauteilen sind den Autoren nicht bekannt. Im Gegensatz dazu stehen zu dem Verhalten von zugbeanspruchter aufgeklebter Bewehrung zahlreiche Untersuchungen zur Verfügung, welche zum Beispiel in Zilch et al. [19] zusammengefasst sind. Das Tragverhalten der aufgeklebten Bewehrung wird im Wesentlichen von dem Verbund zwischen der geklebten Bewehrung und dem Beton bestimmt. Bei zugbeanspruchter geklebten Bewehrung ist die Beschreibung des Verbundes und deren Mechanismen weitestgehend bekannt und es kann durch geeignet Modelle beschrieben werden. Die derzeitigen Modelle, welche auch den Hintergrund des Gelbdrucks der DAfStb-Richtlinie „Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung“ [1] bilden, sind in Abschnitt 2.2 kurz beschrieben. In welcher Größenordnung der Verbund die Tragmechanismen der geklebten Bewehrung unter Druckbeanspruchung beeinflusst, ist weitestgehend unbekannt. Es gibt nur wenige Untersuchungen, die eine Vermutung auf den Einfluss der Druckbeanspruchung auf den Verbund der aufgeklebten Bewehrung bzw. auf das Verhalten der geklebten Bewehrung unter Druckbeanspruchung zulassen. Die Effekte die bei der Verankerung von Stahllaschen im Bereich von Biegemomenten mit wechselnden Vorzeichen auftreten können in drei Effekte bzw. Fragestellungen aufgeteilt werden:

- Einfluss der negativen Krümmung im Bereich der Druckzone
- Wirkungsweise der geklebten Bewehrung als Druckbewehrung
- Einfluss der Betondruckdehnung auf die Zugverankerung der geklebten Bewehrung

Diese Effekte sind in Bild 2.1 verdeutlicht. Die bekannten Untersuchungen zu den einzelnen Effekten sind in Abschnitt 2.3 zusammengefasst.

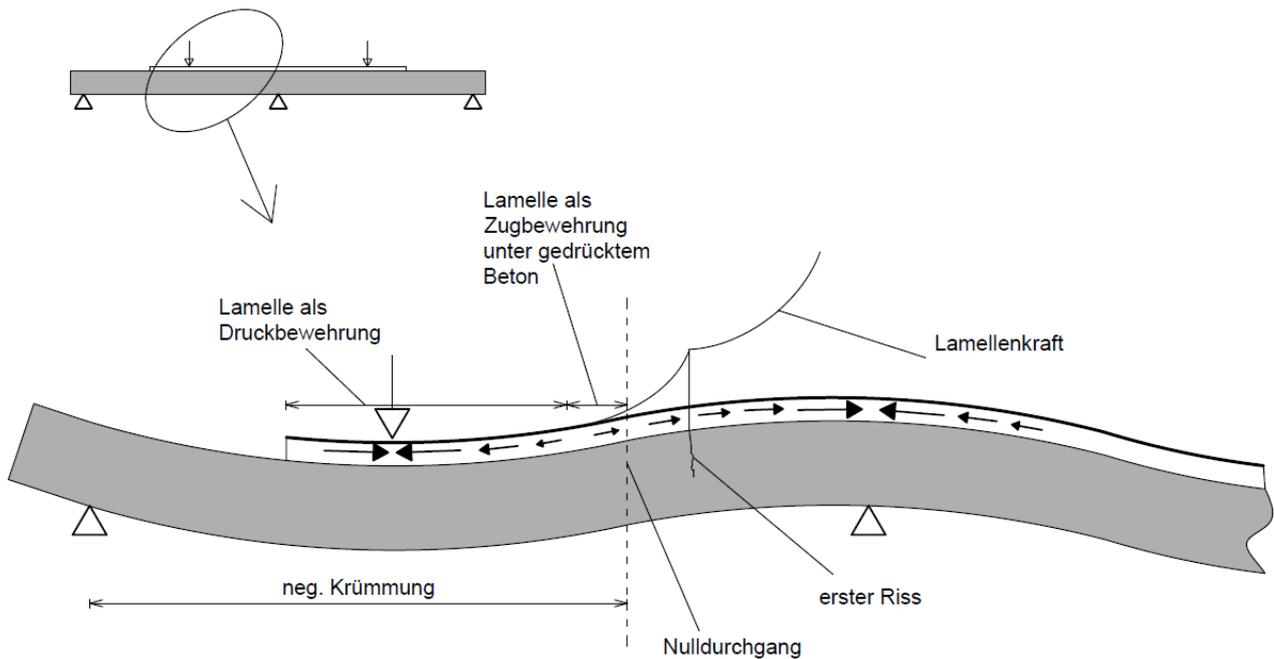


Bild 2.1: Die verschiedenen Effekte, welche bei der Verankerung von Stahl-Lamellen im Bereich von Biegemomenten mit wechselnden Vorzeichen auftreten können

2.2 Verbundkraftübertragung aufgeklebter Bewehrung

2.2.1 Allgemeines

Bei der Verwendung von aufgeklebter Bewehrung werden im Regelfall nicht die Versagensarten des konventionellen Stahlbetonbaus auftreten, sondern der Verbund zwischen Klebstoff und Beton versagt. Bei diesem Versagen brechen 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.

Im konventionellen Stahlbetonbau wird zum Nachweis des Verbundes üblicherweise ein Endverankerungsnachweis durchgeführt, welcher auf Verbundwerten aus Ausziehversuchen basiert. Führt man einen solchen Nachweis in ähnlicher Form, so können bei Bauteilen mit aufgeklebter Bewehrung nicht die vollen Zugkräfte verankert werden, da ab einer bestimmten Verankerungslänge die Verbundkraft nicht mehr gesteigert werden kann. (Siehe auch Bild 2.2). Aus den Bauteilversuchen geht jedoch hervor, dass deutlich höhere Lamellenkräfte an der Stelle des Momentenmaximums erreicht werden, als es allein durch den Endverankerungsnachweis möglich wäre. Gerade bei CFK-Lamellen, die eine sehr hohe Zugspannung aufnehmen können, wäre somit die alleinige Betrachtung des Endverankerungsnachweises stark unwirtschaftlich. Die Verbundkraftübertragung muss wie in Bild 2.2 vielmehr an der Stelle stattfinden, an welcher die Kräfte auftreten. Aus diesem Grund werden für eine Nachweisführung zwei Bereiche unterschieden, der Endverankerungsbereich und der restliche Bereich des Bauteils. Am Endverankerungspunkt müssen die Lamellenkräfte verankert werden, welche sich am auflagnächsten Biegeriss einstellen. Die aufnehmbaren Verbundkräfte am Endverankerungsbereich werden durch sogenannte idealisierte Endverankerungsversuche bestimmt, bei welchen die aufgeklebte Bewehrung in Längsrichtung abgezogen wird.

Im restlichen Bereich des Bauteils kann die Verbundkraft an Elementen, welche durch Biegerisse getrennt werden, den sogenannten Zwischenrisselementen, übertragen werden. An einem solchen Zwischenrisselement herrschen immer eine Grundlamellenkraft am niedrig beanspruchten Rissufer und diese Grundlamellenkraft mit einer zusätzlichen Kraft am höher beanspruchten Rissufer. Diese zusätzliche Lamellenkraft muss über Verbund ins Bauteil übertragen werden.

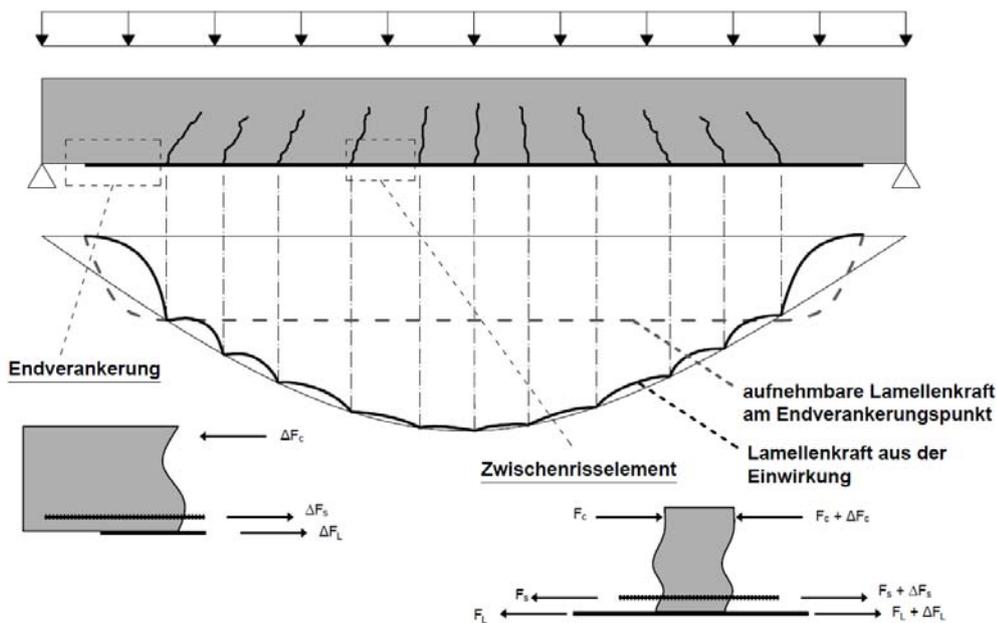


Bild 2.2: Prinzip der Verbundkraftübertragung bei aufgeklebten CFK-Lamellen

Im Weiteren wird kurz das Modell vorgestellt, welches in dem Abschnitt 4 zur Modellierung des Verbundes benützt wird. Dieses Modell liegt auch dem derzeitigen Gelbdruck der DAfStb-Richtlinie „Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung“ [1] zu Grunde. Eine detaillierter Beschreibung des verwendeten Modells findet sich in Zilch et al. [17]. Eine genauere Beschreibung der Formulierungen der Richtlinie sowie dessen Bezug auf das Modell von Zilch et al. [17] finden sich in Zilch et al. [15]. Weitere Modelle zur Verbundkraftübertragung können zum Beispiel dem Sachstandsbericht [19] entnommen werden.

2.2.2 Hintergrund der im weiteren verwendeten Modellbildung

2.2.2.1 Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes

Der Verbund aufgeklebter Bewehrung wird unter Vernachlässigung der Betonverformungen mit der Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes, wie sie in Gleichung (2.1) dargestellt ist, über den Lamellenschlupf s_L , die Verbundspannungsschlupfbeziehung $\tau(s_L)$, die Lamellendicke t_L und den Elastizitätsmodul E_L der Lamelle beschrieben.

$$s_L'' - \frac{1}{E_L \cdot t_L} \cdot \tau(s_L) = 0 \quad (2.1)$$

2.2.2.2 Verbundspannungsschlupfbeziehung

Nach Zilch et al. [17] wird die Verbundspannungsschlupfbeziehung in den Bilinearen-, den Reibverbund- und den Krümmungsanteil unterteilt wie es das Bild 2.3 zeigt.

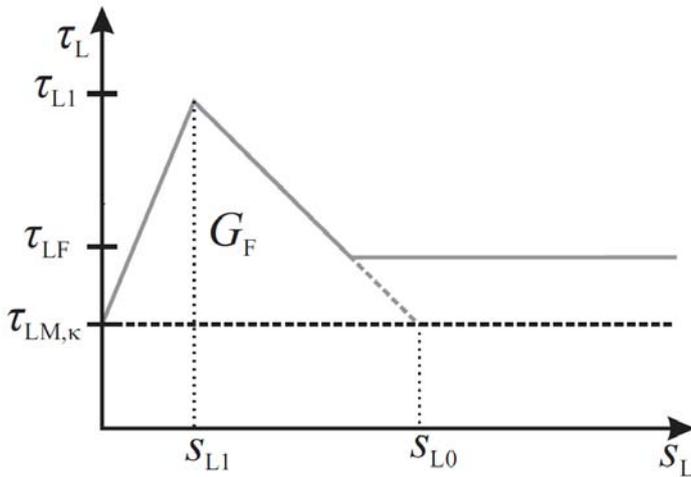


Bild 2.3: Verbundspannungsschlupfbeziehung von Zilch et al. [17] für aufgeklebte Bewehrung

Die einzelnen Anteile des Bild 2.3 ergeben sich aus:

- Dem bilinearen Verbundansatz nach Niedermeier [12] bzw. Zehetmaier [13], welcher auf Endverankerungsversuchen basiert.
- Der Reibverbundspannung, welche aufgrund der Versuche am idealisierten Zwischenrisselement bestimmt von Zilch et al. [17] bestimmt wurde.
- Aus der Bauteilkrümmung, welche aufgrund theoretischer Überlegungen und dem Versuchen am Bauteil von Zilch et al. [17] bestimmt wurde.

Die Werte für die Parameter $\bar{\tau}_{L1}$, $\bar{\tau}_{LF}$, $\bar{\tau}_{LM,k}$, s_{L1} und s_{L0} sind für aufgeklebte CFK-Lamellen in der Tabelle 2.1 aufgelistet. In der Tabelle 2.1 ist die maximale Verbundspannung $\bar{\tau}_{L1}$ nach dem bilinearen Ansatz anhängig von der Zylinderdruckfestigkeit f_{cm} und der Oberflächenzugfestigkeit $f_{ctm,surf}$. Die Reibverbundspannung $\bar{\tau}_{LF}$ wird ebenfalls in Abhängigkeit der Zylinderdruckfestigkeit f_c bestimmt und die konstante Verbundspannung infolge der Krümmung $\bar{\tau}_{LM,k}$ wird über einen konstanten Faktor mit der Verkrümmung κ bestimmt. Der Grenzschlupf des elastischen Astes s_{L1} berechnet sich nach Holzenkämpfer [9] mit dem Einsetzen der Werte aus Zilch et al. [17] erhält man die Abhängigkeit von der Betondruckfestigkeit in Tabelle 2.1.

Für aufgeklebte Stahllaschen wird lediglich der bilineare Verbundansatz nach Niedermeier [12] verwendet. Eine Erweiterung nach Zilch et al. [17] steht hier nicht zur Verfügung. Aufgrund der relativ geringen Dehnungen sowie den deutlich längeren Verankerungslängen sind bei aufgeklebten Stahllaschen die Effekte aus Reibung und Krümmung auch deutlich geringer. In Tabelle 2.2 sind die Werte des bilinearen Verbundansatzes für aufgeklebte Stahllaschen nach Niedermeier [12] mit dem geänderten elastischen Ast aufgelistet.

Tabelle 2.1: Randwerte des verwendeten Verbundansatzes für CFK-Lamellen

Größe	$\bar{\tau}_{L1}$	$\bar{\tau}_{LF}$	$\bar{\tau}_{LM,k}$	s_{L1}	s_{L0}
-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm
MW	$0,527 \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm,surf}}$	$17,5 \cdot f_{cm}^{-0,89}$	$37,1 \cdot \kappa$	$0,362 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{f_{cm}}$	$2,12 \cdot 10^{-1}$
Char.	$0,366 \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm,surf}}$	$10,8 \cdot f_{cm}^{-0,89}$	$27,0 \cdot \kappa$	$0,259 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{f_{cm}}$	$2,01 \cdot 10^{-1}$

Tabelle 2.2: Randwerte des verwendeten Verbundansatzes für Stahllaschen

Größe	$\bar{\tau}_{L1}$	s_{L1}	s_{L0}
-	N/mm ²	mm	mm
MW	$0,432 \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm,surf}}$	$0,297 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{f_{cm}}$	$1,95 \cdot 10^{-1}$
Char.	$0,300 \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm,surf}}$	$0,362 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{f_{cm}}$	$1,85 \cdot 10^{-1}$

2.2.2.3 Lösung für das Zwischenrisselement

Die Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes wird in Zilch et al. [17] für die Verbundspannungsschlupfbeziehung in Bild 2.3 nach den verschiedenen Anteilen vereinfacht gelöst. Die aufnehmbare Lamellenspannungsänderung am Zwischenrisselement ergibt sich mit Gleichung (2.2) aus der Summe, der Lösung der bereits genannten Effekte.

$$\Delta\sigma_{LR} = \Delta\sigma_{LR,BL} + \Delta\sigma_{LR,BF} + \Delta\sigma_{LR,KF} \quad (2.2)$$

Die einzelnen Teile ergeben sich aus:

- Dem bilinearen Verbundansatz, welcher auf Endverankerungsversuchen basiert, mit Gleichung (2.3).
- Der Reibverbundspannung, welche aufgrund der Versuche am idealisierten Zwischenrisselement bestimmt wurde mit Gleichung (2.8).
- Aus der Bauteilkrümmung, welche aufgrund theoretischer Überlegungen und dem Versuchen am Bauteil bestimmt wurde mit Gleichung (2.9).

Die drei Anteile sind in Bild 2.4 über Lamellenkraft am niedriger beanspruchten Risssufer des Zwischenrisselements mit den zugehörigen Verbundspannungsschlupfbeziehungen dargestellt. Die Gleichungen zur Beschreibung der einzelnen Anteile sind nachfolgend aufgelistet und kurz erläutert, eine genau Beschreibung sowie deren Herleitung befindet sich in Zilch et al. [17].

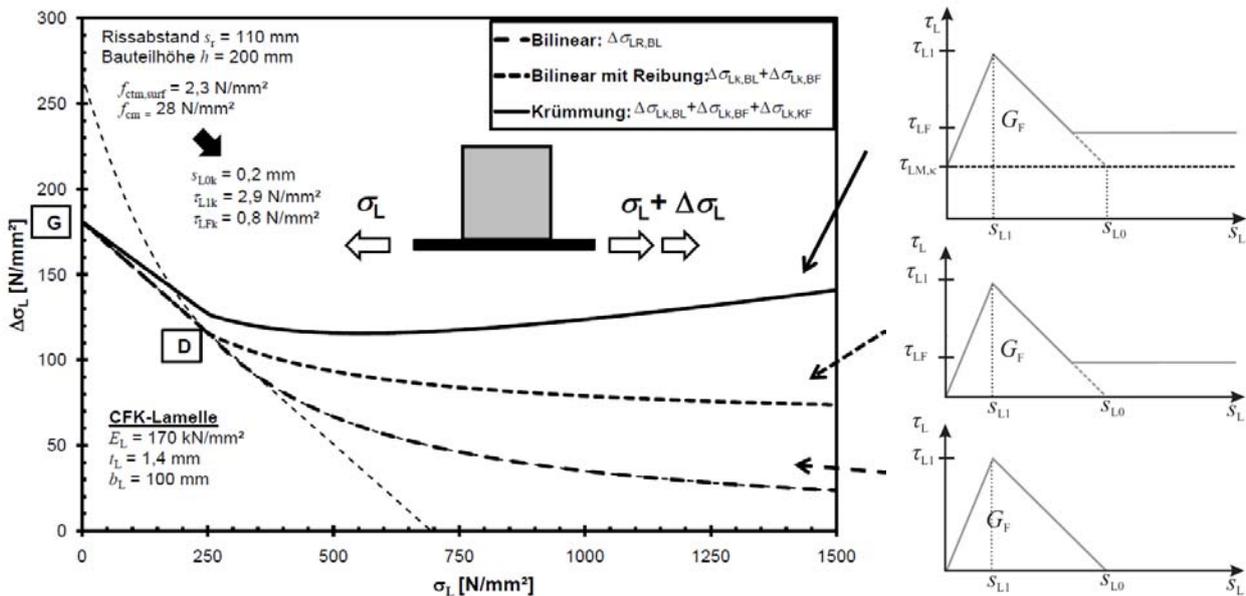


Bild 2.4: Exemplarische Darstellung der aufnehmbaren Verbundkraft nach Gleichung (2.2)

Der erste Anteil aus der Gleichung (2.2), welcher den Verbundkraftwiderstand aus dem bilinearen Verbundansatz am Zwischenrisselement nach Niedermeier [12] beschreibt, ist durch den Punkt D im Bild 5 in zwei Teile geteilt und kann mit Gleichung (2.3) bestimmt werden. Der erste Bereich vom Punkt G bis zum Punkt D, welcher durch eine Gerade zwischen diesen beiden Punkten beschrieben wird, stellt den Bereich dar, in welchem die benötigte Übertragungslänge des bilinearen Ansatzes größer ist als die Risselementlänge s_r .

$$\Delta\sigma_{LR,BL} = \begin{cases} \sqrt{\frac{s_{L0} \cdot \tau_{L1} \cdot E_L}{t_L} + \sigma_L^2} - \sigma_L & \text{für } \sigma_L \geq \sigma_L^D \\ \Delta\sigma_{LR,BL}^G - \frac{\Delta\sigma_{LR,BL}^G - \Delta\sigma_{LR,BL}^D}{\sigma_L^D} \cdot \sigma_L & \text{für } \sigma_L \leq \sigma_L^D \end{cases} \quad (2.3)$$

Die benötigten Kräfte der Punkte G und D berechnen sich mit den Gleichung (2.4) bis (2.6). Die dafür benötigte effektive Verbundlänge $l_{bl,max}$ kann über die Verbundparameter des bilinearen Ansatzes und den empirischen Kalibrierungsbeiwert $\kappa_{lb} = 1,128$ nach Niedermeier mit der Gleichung (2.7) bestimmt werden.

$$\Delta\sigma_{LR,BL}^G = \begin{cases} \sqrt{\frac{E_{Lm} \cdot s_{L0k} \cdot \tau_{L1k}}{t_L} \cdot \frac{s_r}{l_{bL,max}} \left(2 - \frac{s_r}{l_{bL,max}}\right)} & s_r < l_{bL,max} \\ \sqrt{\frac{E_{Lm} \cdot s_{L0k} \cdot \tau_{L1k}}{t_L}} & s_r \geq l_{bL,max} \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\sigma_L^D = \frac{s_{L0} \cdot E_L}{s_r} - \tau_{L1} \cdot \frac{s_r}{4 \cdot t_L} \quad (2.5)$$

$$\Delta\sigma_{LR,BL}^D = \sqrt{\frac{s_{L0} \cdot \tau_{L1} \cdot E_L}{t_L} + \sigma_L^{D^2}} - \sigma_L^D \quad (2.6)$$

$$l_{bL,max} = \frac{2}{\kappa_{Lb}} \cdot \sqrt{\frac{E_{Lm} \cdot t_L \cdot s_{L0k}}{\tau_{L1k}}} \quad (2.7)$$

Der zweite Anteil, aus dem Reibverbund zwischen der Bereits entkoppelten Fläche, welcher nur nach dem Punkt D in Bild 5 auftreten kann, berechnet sich nach Zilch et al. [17] mit Gleichung (2.8) bestimmt werden.

$$\Delta\sigma_{LR,BF} = \frac{\tau_{LF} \cdot \left(s_r - \frac{2 \cdot t_L \cdot E_L}{\tau_{L1}} \cdot \left(\sqrt{\frac{\tau_{L1} \cdot s_{L0}}{t_L \cdot E_L} + \frac{\sigma_L^2}{E_L^2}} - \frac{\sigma_L}{E_L} \right) \right)}{t_L} \quad (2.8)$$

Der dritte Anteil in Gleichung (2.2) stellt den Einfluss der Bauteilkrümmung auf den Verbund der aufgeklebten Bewehrung dar, wie er erstmals von Zilch et al. [15] festgestellt und quantifiziert wurde. Durch eine konvexe Krümmung, wie sie bei der Durchbiegung entsteht, wird eine Umlenkung an jedem Zwischenrisselement verursacht, was somit zu einem selbstinduzierten Anpressdruck führt. Dieser Anpressdruck auf die aufgeklebte Bewehrung bewirkt eine Erhöhung des Verbundkraftwiderstandes. Der Anteil aus der Krümmung kann in Abhängigkeit der Risseelementlänge und dem Verbundspannung aufgrund der Krümmung aus Tabelle 2.1 mit Gleichung (2.9) bestimmt werden.

$$\Delta\sigma_{LR,KF} = \frac{s_r \cdot \tau_{LM,K}}{t_L} \quad (2.9)$$

2.3 Ausgangsbasis zum Verhalten der geklebten Bewehrung im Druckbereich

2.3.1 Einfluss der negativen Krümmung im Bereich der Druckzone

Im Bereich der Druckzone kann es aufgrund der Druckstauchung des Betons, auf welchen die Bewehrung verklebt ist und der Zugdehnungen in der Zugzone zu einer negativen Krümmung der aufgeklebten Bewehrung in der Druckzone kommen. In Hinsicht auf die Krümmung kann man zwei Fälle unterscheiden:

1. In der aufgeklebten Bewehrung sind, aufgrund des Querkraftversatzes und der Verbundwirkung der aufgeklebten Bewehrung, noch Restzugkräfte in der aufgeklebten Bewehrung vorhanden.
2. Die aufgeklebte Bewehrung steht wie die Betondruckzone unter Druckdehnung und wirkt, solange der Verbund intakt ist, als Druckbewehrung mit.

Die Wirkungsweise der Krümmung ist in Bild 2.5 für die beiden Fälle skizziert. Der erste Fall, mit den Zugkräften in der aufgeklebten Bewehrung und den Druckkräften im Beton, ist nur kurz hinter dem Nulldurchgang denkbar. Aus den Messungen der Lamellendehnungen bei den Versuchen QVPA2 und QVPA4 in Zilch et al. [17] [21] ist eine solche Zone, in welcher der Beton bereits unter Druck steht die Lamelle jedoch noch Zug hat erst erkennbar, nachdem es zur ersten Entkopplung an einem Zwischenrisselement in der Zugzone kam. Somit war das Versagen des Verbundes am Zwischenrisselements maßgebend. In diesem Bereich ist die Krümmung aufgrund des meist ungerissenen Betons (Zustand I) meist relativ klein, wirkt jedoch aufgrund der selbstinduzierten Zugspannungen in der Klebefuge ungünstig.

Der zweite Fall, bei welchem die geklebte Bewehrung als Druckbewehrung wirkt, wird im Bereich von Biegemomenten mit wechselnden Vorzeichen meist der größere Bereich sein. In diesem Bereich führt einerseits die Umlenkung der Druckkräfte zu einer selbstinduzierten Anpressung, die Rückstellkraft der Bewehrung jedoch zu einem Abheben der geklebten Bewehrung. Da sich die beiden Effekte teilweise aufheben, wird in diesem Bereich die Krümmung nicht in der gleichen Weise für den Verbund negativ wirken wie diese für den

Verbund in der Zugbewehrung in der Zugzone positiv wirkt. Die Effekte der Krümmung werden demzufolge eine untergeordnete Rolle spielen.

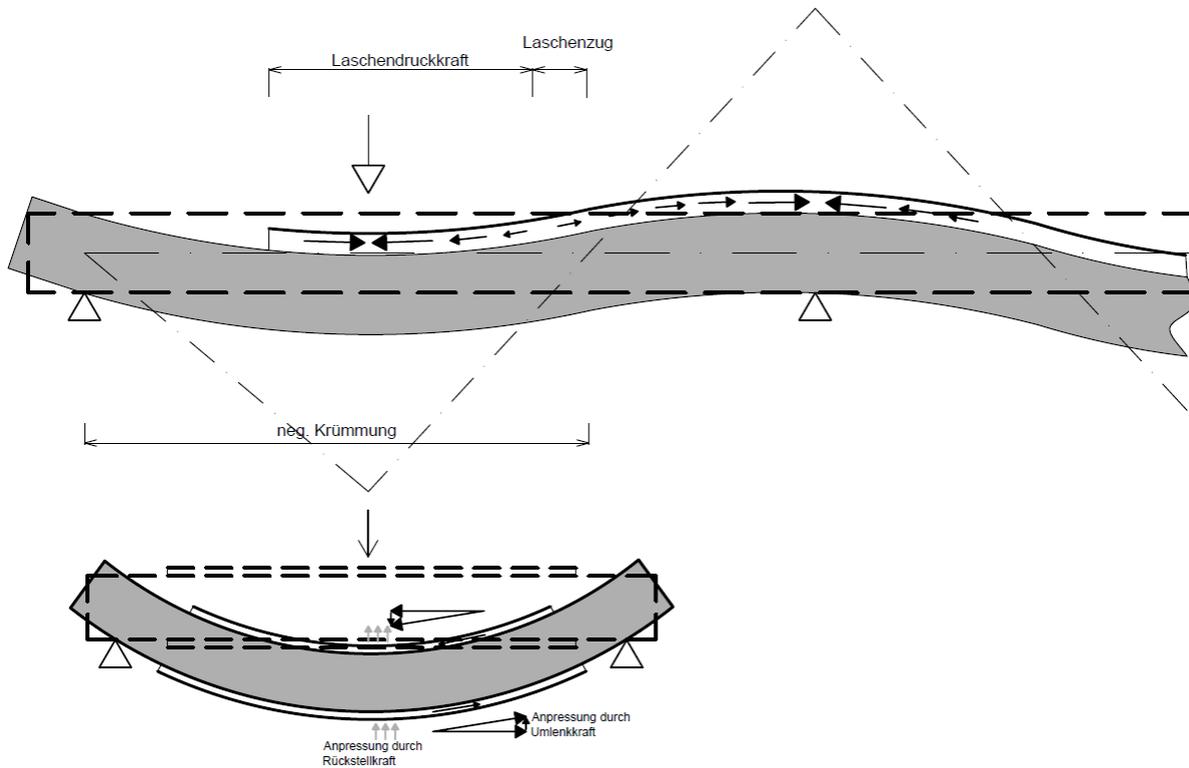


Bild 2.5: Unterschiedliche Wirkungsweise der negativen Krümmungen in verschiedenen Bereich von Druckdehnungen bei Durchlaufträgern

2.3.2 Einfluss der Betondruckdehnung auf die Zugverankerung der geklebten Bewehrung

Im Falle, dass aufgrund des Querkraftversatzes und der Verbundwirkung der aufgeklebten Bewehrung noch Restzugkräfte in der aufgeklebten Bewehrung vorhanden sind, was kurz hinter dem Momenten-nulldurchgang der Fall sein kann, können sich auch die Betondruckdehnung negativ auf die Verbundwirkung der aufgeklebten Bewehrung auswirken.

So stellen Zilch und Niedermeier [16] bei einem Vergleich (Bild 2.6) verschiedener Verbundversuche fest, dass Zug-Druck-Verbundkörper, bei welchem der Beton durch die Versuchsanordnung unter Druck gesetzt wird, im Mittel eine etwas geringere Verbundbruchenergie erreichen als der Zug-Zug-Verbundkörper, bei welchem der gesamte Körper unter Zugspannung steht.

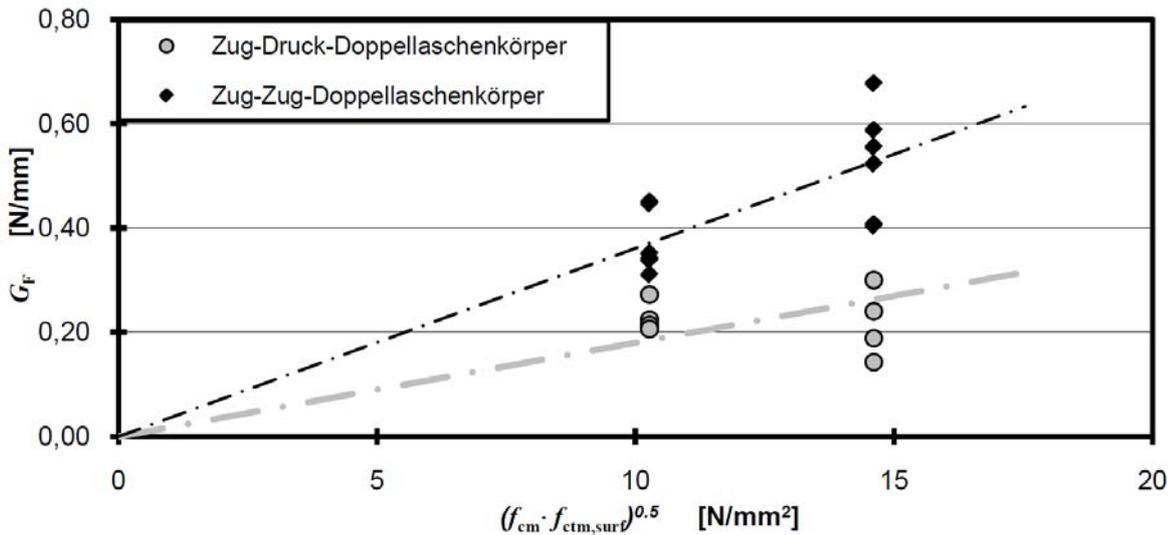


Bild 2.6: Negativer Einfluss von Druckkräften auf die Verbundbruchenergie, entnommen aus [16]

Die geringere Verbundenergie der Zug-Druck-Verbundkörper könnte auf die Verformungsbehinderung durch die steifen Stahlplatten zurückzuführen sein, was zu einem Querzug und somit zu einer geringeren maximalen Verbundspannung führen kann. Desweiteren kann das entgegengesetzte Kriechen der Druck- und Zug-Verformungen zu geringeren Dehnungen in den Stahllaschen führen, welche zu einer Grenzrelativverschiebung führen, welche ein Gesamtkoppeln durch längere maximale Verbundlängen begünstigt. Es kommt somit zu einem „härteren Verbund“.

Allerdings kann der Unterschied auch auf andere Effekte zurückzuführen sein. So führt bei den Zug-Druck-Körpern eine leichte ungewollte Schiefstellung bei einer Krafterhöhung immer zu einer Vergrößerung dieser ungünstig wirkenden Schiefstellung. Im Gegensatz werden die Schiefstellungen bei den Zug-Zug-Körpern aufgrund der steigenden Zugkräfte korrigiert.

2.3.3 Wirkungsweise der geklebten Bewehrung als Druckbewehrung

Deuring berichtet in [2] von einem Versuch an einem mit aufgeklebten CFK-Lamellen als Druckbewehrung verstärkten Einfeldträger. Bei dem Versuche hatte zwar die geklebte Bewehrung als Druckbewehrung wenig Effekt, die Entkopplung dieser trat jedoch erst bei einer Lamellendruckstauchung von circa 3,1 mm/m zusammen mit dem Versagen der Druckzone ein. Das Bruchbild des Versuches sowie die Lastverformungskurve im Vergleich zum unverstärkten Bauteil sind in Bild 2.7 dargestellt.

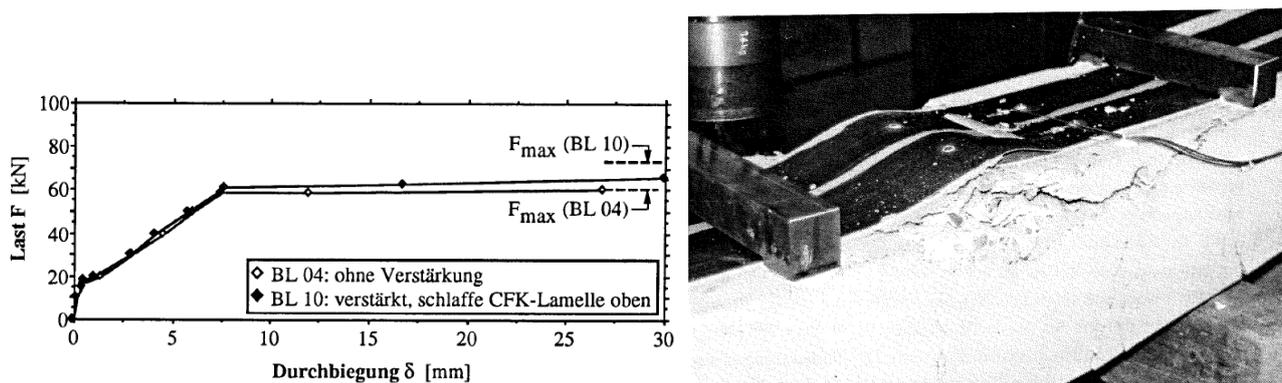


Bild 2.7: Versuch von Deuring an einem Einfeldträger mit aufgeklebten CFK-Lamellen als Druckbewehrung, entnommen aus [2]

Setz man die Betongrößen und die Lamellenkennwerte in die Beziehung für den Verbund der aufgeklebter CFK-Lamellen unter Zugbeanspruchung aus Abschnitt 2.2 ein, so erhält man für den Versuch eine maximale verankerbare Lamellendehnung am Einzelriss von 3,3 mm/m (vgl. Gleichung (2.10)).

$$\varepsilon_{LR,BL} = \sqrt{\frac{s_{L0} \cdot \tau_{L1}}{t_L \cdot E_{Lm}}} = \sqrt{\frac{0,212 \cdot 0,527 \cdot \sqrt{3,1 \cdot 41,8}}{1 \cdot 120000}} = 3,26 \text{ mm/m} \quad (2.10)$$

Dies entspricht auch circa der maximalen Lamellendruckstauchung in diesem Versuch.

2.3.4 Fazit

Von den drei betrachteten Effekten:

- dem Einfluss der negativen Krümmung im Bereich der Druckzone,
- dem Einfluss der Betondruckdehnung auf die Zugverankerung der geklebten Bewehrung,
- der Wirkungsweise der geklebten Bewehrung als Druckbewehrung,

wird die Wirkungsweise der geklebten Bewehrung als Druckbewehrung den Haupteffekt bei einer Verankerung von Stahllaschen im Bereich von Biegemomenten mit wechselnden Vorzeichen bilden. Die beiden anderen Effekte sind vermutlich relativ klein und somit von untergeordneter Bedeutung. Somit lässt sich die Problemstellung im Wesentlichen auf die Fragestellung reduzieren, wie sich der Verbund der aufgeklebten Bewehrung bei Druckbeanspruchung und gleichzeitiger Betondruckstauchung verhält. Ähnlich wie dies auch bei gerippter Bewehrung von Eisenbiegler [11][8] untersucht wurde.

3 Experimentelle Untersuchungen

3.1 Versuchsprogramm

Im Rahmen dieses Projektes wurde einer im Stützmomentenbereich mit Stahllaschen verstärkter Zweifeldträger geprüft. Durch die Anordnung unterschiedlicher Stahllaschen in beiden Felder konnten zwei Ergebnisse mit unterschiedlicher Laschenstärke erzielt werden.

Zusätzlich wurden neun Druckverbundversuche an verstärkten Betonprismen geprüft. Dabei wurden die verstärkten Betonprismen solange auf Druck belastet, bis es zu einem Versagen des Betonkörpers und des Verbundes kam. Durch die Messung der Dehnungen konnten an den Betonkörpern die Verbundschädigung beobachtet werden. Bei den sechs Versuchen wurden zwei verschiedenen dicke Stahllaschen und eine CFK-Lamelle verwendet.

3.2 Materialien und Verarbeitung

3.2.1 Beton

Für die hier durchgeführten Versuche wurde ein Betonrezept mit der Zusammensetzung nach Tabelle 3.1 verwendet. Diese Zusammensetzung wurde bereits in den Versuchen früherer Untersuchungen [21][17] verwendet, so dass die Verbundeigenschaften des Betons mit der aufgeklebten Bewehrung unter Zugbeanspruchung bekannt sind. Angestrebt wurde die Betongüten C20/25. Um zu gewährleisten, dass man durch die Versuche einen unteren Grenzwert der Querkrafttragfähigkeit erhält, wurde ein Zuschlag mit einem 8 mm Größtkorn verwendet, um die Effekte aus Rissverzahnung zu verringern.

Bei allen Zuschlägen handelte es sich um ungebrochenes Material aus niederbayrischen Vorkommen in den Korngruppen 0/4a und 4/8, die nach der in Bild 3.1 dargestellten Sieblinie verwendet wurden. Die wesentlichen Frischbetoneigenschaften sind in Tabelle 3.1 wiedergegeben.

Tabelle 3.1: Betonrezeptur und Frischbetoneigenschaften des verwendeten Betons

Angestrebte Festigkeit	C 20/25
Ausgangsstoffe	
Zement¹	CEM I 32,5 R
Zuschlag	Niederbayerischer Kies
Betonzusatzmittel	Keine
Betonzusatzstoffe	Keine
Betonzusammensetzung [kg/m³]	
Wasser	210,00
Zement	338,71
Zuschlag	1844,80

¹ Nach DIN EN 197-1 [35][35]

Sieblinie	A/B 8
Korngruppen	
0/4	1291,36
4/8	553,44
Eigenschaften	
w/z Wert	0,62
Ausbreitmaß²	480
Rohdichte³	2340

Der Zweifeldträger wurde im Fertigteilerwerk der Firma Laumer Bautechnik GmbH hergestellt und verarbeitet. Die Betondruckkörper wurden in drei Serien im gemeinsamen Laborbetriebe des Instituts für Baustoffe und Konstruktion der Technischen Universität München betoniert. Aus jeder Betonmischung wurden parallel zu den Versuchskörpern in Anlehnung an DIN EN 12390-1 [22] Probekörper in Form von Würfeln der Kantenlänge 150 mm und Zylindern mit Durchmesser/Höhe 150 mm/300 mm sowie Betonprismen der Größe 700mm/150 mm/150 mm hergestellt. Zur Sicherstellung annähernder Konformität zwischen den an Probekörpern ermittelten mechanischen Kennwerten und den Eigenschaften der Versuchskörper wurde auf eine Normenlagerung zugunsten einer Lagerung analog zu den Versuchskörpern verzichtet.

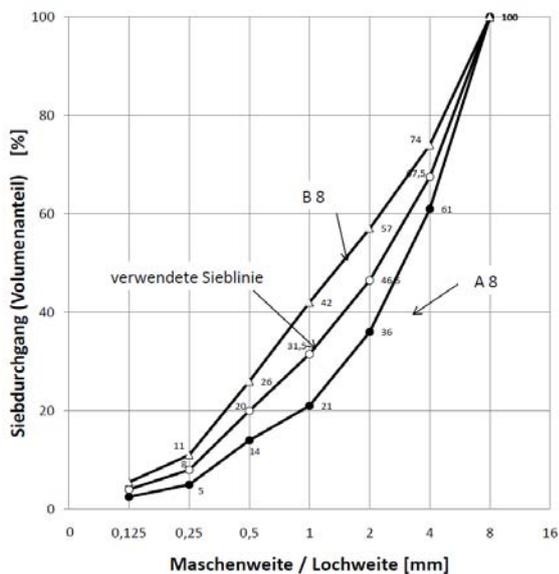


Bild 3.1: Für die Betonmischungen verwendete Sieblinie AB8

Druckfestigkeit

Die zum Zeitpunkt der Prüfung vorliegende Betondruckfestigkeit wurde für alle Versuche zeitgleich als Mittelwert der Ergebnisse an mindestens drei der gesondert hergestellten Würfeln mit Kantenlänge 150 mm oder an Betonzylindern mit Durchmesser/Höhe 150 mm/300 mm in Anlehnung an DIN EN 12390-3 [23] bestimmt.

E-Modul

Je Betonierserie wurde der E-Modul an drei gesondert hergestellten Betonzylindern mit Durchmesser/Höhe 150 mm/300 mm als Sehnenmodul in Anlehnung an DIN 1048-5 [26] nach zehn Lastwechseln mit der Oberlast von 1/3 der vorher an drei Zylinder ermittelten Betondruckfestigkeit bestimmt.

Biegezugfestigkeit

Bei den Versuchen am Zweifeldträger wurde die Biegezugfestigkeit an drei gesondert hergestellten Betonprismen der Größe 700 mm/150 mm/150 mm mit zwei Lasteinleitungspunkten in Anlehnung an DIN EN 12390-5 [24] bestimmt.

² Nach DIN EN 12350-5 [24]

³ Nach DIN EN 12350-6 [25]

Spaltzugfestigkeit

Bei den Versuchen am Zweifeldträger die Spaltzugfestigkeit an drei gesondert hergestellten Würfeln mit Kantenlänge 150 mm Anlehnung an DIN EN 12390-6 [25] bestimmt.

Oberflächenzugfestigkeit

An allen Probekörpern wurde im Bereich neben den Klebflächen nach Abschluss der Versuchsdurchführung die Oberflächenzugfestigkeit nach DIN EN 1542 [33] mit Stahlstempeln des Durchmessers 50 mm an einer durch eine Ringnut begrenzten Prüffläche ermittelt. Die Prüffläche war wie die mit der aufgeklebten Bewehrung versehene Oberfläche vorbereitet worden.

Im Anhang A finden sich zu jedem Versuch die Werte für die Betonprüfungen wieder.

3.2.2 Betonstahl

Für alle Versuche wurde ein gerippter BSt500 nach DIN 488-1 [36] verwendet. Bei dem Zweifeldträger wurde ein Betonstahl mit dem Nenndurchmesser von 12 mm verwendet. In Tabelle 3.2 sind die mechanischen Eigenschaften des in dem Versuch verwendeten Betonstahls als Mittelwerte der Ergebnisse aus den entnommenen Stahlproben zusammengestellt. Die mechanischen Eigenschaften wurden in Zugversuchen nach DIN EN 10002-1 [27] bestimmt.

Tabelle 3.2: Mechanische Eigenschaften der in den Versuchen verwendeten Betonstähle

ϕ_s	A_s	R_{eH}	R_m	E_s	A_{gt}
mm	mm ²	N/mm ²	N/mm ²	kN/mm ²	%
12	113,1	566,0	646,0	206,4	9,8

3.2.3 Stahlaschen

Zur Verstärkung wurden Stahlaschen der Güte S235 JR nach DIN EN 10025-2 [28] bzw. DIN EN 10027-1 [29] verwendet. Bei den Verbunddruckversuchen wurden die Stahlaschen 100 mm x 15 mm oder 100 mm x 10 mm und bei dem Bauteilversuch wurden die Stahlaschen 200 mm x 10 mm oder 150 mm x 15 mm verwendet. In Tabelle 3.3 sind die mechanischen Eigenschaften der verwendeten Stahlaschen zusammengestellt. Der Elastizitätsmodul E_s wurde neben den anderen mechanischen Kenngrößen an Proportionalproben nach DIN EN 10002-1 [27] ermittelt.

Tabelle 3.3: Mechanische Eigenschaften der in den Versuchen verwendeten Stahlaschen

Lasche	b_L	t_L	R_{eH}	R_m	E_s	A_{gt}
-	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	kN/mm ²	%
200x10	150	10	295,0	450,3	209,1	18,5
150x15	100	15	256,3	437,0	206,3	20,3
100x15	100	15	259,8	440,4	208,1	19,7
100x10	100	10	287,5	457,3	205,6	21,2

3.2.4 CFK-Lamellen

Bei den Verbunddruckversuchen kamen neben den Stahlaschen eine nach Z-36.12.-70 [3] allgemein bauaufsichtlich zugelassene Sto S&P CFK-Lamellen 150/2000 mit Nennabmessungen von $b_L/t_L = 100 \text{ mm}/1,4 \text{ mm}$ zum Einsatz. Alle Lamellen wurden einer Rolle entnommen. Die mechanischen Eigenschaften der CFK-Lamellen wurden entsprechend DIN EN 2561 [37] an 20 mm breiten Proben in Zugversuchen ermittelt und sind in Tabelle 3.4 zusammengestellt.

Tabelle 3.4: Mechanische Eigenschaften der in den Versuchen verwendeten CFK-Lamellen

Lamelle	b_L	t_L	$\epsilon_{L10\%}$	$\sigma_{L10\%}$	$\epsilon_{L50\%}$	$\sigma_{L50\%}$	$\epsilon_{LU\%}$	$\sigma_{LU\%}$	E_L
	mm	mm	%	N/mm ²	%	N/mm ²	%	N/mm ²	kN/mm ²
100x1.4	100	1,4	2,0	312,1	9,5	1560,7	18,5 ⁴	3121,4	168,4

⁴ Aus Extrapolation

3.2.5 Epoxidharzklebstoff

Zur Verklebung der aufgeklebten CFK-Lamellen wurde der allgemein bauaufsichtlich zugelassene Zweikomponenten Epoxidharzklebstoff Sikadur 30 DUE nach Zulassung Z-36.12-80 [38] bzw. DIN EN 1504-4 [32] verwendet. Zu jeder Klebstoffmischung wurde an Prismen mit $l/b/h = 160 \text{ mm}/40 \text{ mm}/40 \text{ mm}$ in Anlehnung an DIN EN 196-1 [34] die Biegezug- und Druckfestigkeit bestimmt. Dies ist zusammen mit dem jeweiligen Alter der Verklebung zum Versuchszeitpunkt in Anhang A für jeden Versuch angegeben.

3.2.6 Verarbeitung

Die Herstellung aller Prüfkörper erfolgte durch geschulte Mitarbeiter des gemeinsamen Laborbetriebs des Instituts für Baustoffe und Konstruktion der Technischen Universität München. Bei den zu verklebenden Oberflächen wurde durch Druckluftstrahlen mit trockenem Strahlgut die oberste Zementsteinschicht abgetragen, bis der Grobzuschlag sichtbar wurde. Nach dem Entstauben und Reinigen der Oberflächen wurden die Stahllaschen und CFK-Lamellen innerhalb der zulässigen Verarbeitungszeit des verwendeten Klebstoffes verklebt. Nachdem die Komponenten des Epoxidharzklebstoffes nach Vorgabe der technischen Merkblätter vermischt wurden, wurde auf die Laschen je eine dachförmige, im Profil gleichschenklige Klebstoffschicht mit einer Überhöhung in der Laschenmitte aufgebracht, womit Lufteinschlüsse in der Klebstoffschicht zwischen Betonoberfläche und CFK-Lamelle reduziert werden sollten. Auf die Betonoberfläche wurde eine dünne Klebstoffschicht aufgetragen, um vorhandene Rautiefen und Fehlstellen auszugleichen. Zur Gewährleistung einer konstanten Dicke der Klebstoffschicht wurden Abstandshalter verwendet, woraufhin eine Schichtdicke von 1,4 mm über dem herausstehenden Korn einstellt. Um sicher zu stellen, dass tatsächlich nur die angegebene Verbundfläche aktiviert wird, wurde der Bereich um die vorgegebene Verbundfläche auf der Betonoberfläche mit Klebeband abgeklebt.

Die Klebstoffe wurden in den Räumen des gemeinsamen Laborbetriebs des Instituts für Baustoffe und Konstruktion der Technischen Universität München unter Normalklima von 20°C und 65% Luftfeuchte verarbeitet und ausgehärtet.

3.3 Verbunddruckversuche

3.3.1 Versuchsdurchführung und Abmessungen

Im Rahmen dieses Projektes wurden neun Verbunddruckversuche an den Versuchskörpern nach Bild 3.2 mit den Abmessungen 300 mm x 300 mm x 700 mm durchgeführt. Diese Versuchskörper waren an den vier Seitenflächen mit jeweils einer Lasche bzw. Lamelle, der Breite von 100 mm und der Länge von 400 mm, verstärkt.

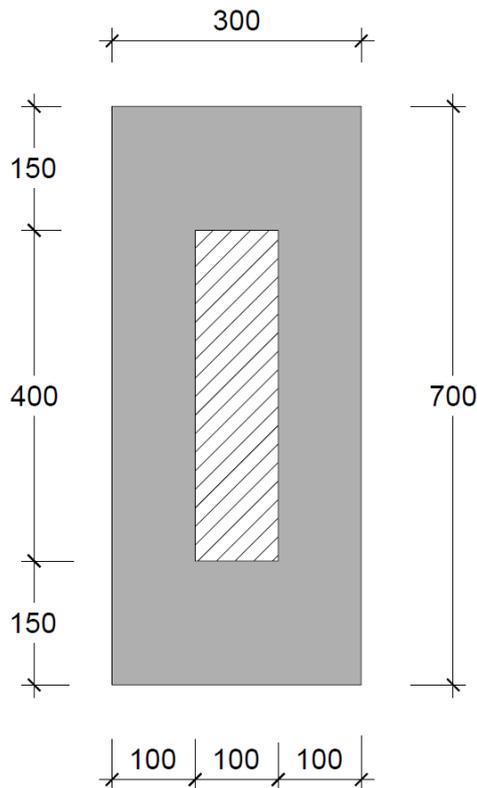


Bild 3.2: Probekörperabmessungen der Verbunddruckversuche

Um ein vollständiges Auseinanderbrechen der Prüfkörper bei der Prüfung zu vermeiden wurden die Prüfkörper mit jeweils einem 8 mm Betonstahl in den Ecken und jeweils vier Bügel mit dem gleichen Durchmesser bewehrt. Ein Überblick über die durchgeführten Versuche zeigt Tabelle 3.5. Alle Ergebnisse der Versuche sowie der Begleitversuche sind in Anhang A aufgelistet.

Tabelle 3.5: Übersicht über die durchgeführten Verbunddruckversuche

Versuch	b_L mm	t_L mm	$f_{c,cube}$ N/mm ²	Betonmischung	Material der Lasche
				-	-
CFK-1	100	1,4	35,5	C20/25	CFK
CFK-2	100	1,4	35,5	C20/25	CFK
CFK-3	100	1,4	35,5	C20/25	CFK
S10-1	100	10	39,4	C20/25	Stahl
S10-2	100	10	39,4	C20/25	Stahl
S10-3	100	10	39,4	C20/25	Stahl
S15-1	100	15	34,5	C20/25	Stahl
S15-2	100	15	34,5	C20/25	Stahl
S15-3	100	15	34,5	C20/25	Stahl

Die Versuchskörper wurden liegend mit der Mischung C20/25 betoniert, so dass im Versuch sowohl die Schalseitenflächen, die Betonieroberseite sowie die Betonierunterseite geprüft wurden.

Zu Probenvorbereitung wurden die Flächen, an welche die Prüfmaschine drückte durch Gips ausgeglichen. Die Versuche wurden stehend in eine 10 MN Druckprüfmaschine der Firma Toni Technik, Ulm weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mm/min geprüft. Dabei wurden die Versuche über die Maximallast hinaus belastet bis der Lastabfall von 1/3 der Maximallast erreicht wurde. Ein Foto der Prüfung ist in Bild 3.3 zu sehen.



Bild 3.3: Foto des Versuchsaufbaus der Verbunddruckversuche

Bei allen Versuchen wurden die Betondehnungen und die Dehnungen der geklebten Bewehrung mit Hilfe von Dehnmessstreifen kontinuierlich mit 50 Hz erfasst. Desweiteren wurde die Kraft und der Weg der Prüfmaschine ebenfalls mit der gleichen Messfrequenz erfasst.

3.3.2 Ergebnis

Bei allen Verbunddruckversuchen trat vor dem Druckversagen des Versuchskörpers eine Entkopplung der aufgeklebten Bewehrung ein. Der Zeitpunkt der Entkopplung war jedoch bei den verschiedenen Seiten des Körpers leicht unterschiedlich. Durch den schlagartigen Abfall der Dehnung in der geklebten Bewehrung kann jedoch der Zeitpunkt sowie die zugehörige Druckkraft im Körper sowie die maximale Stauchung der aufgeklebten Bewehrung bestimmt werden. In der Tabelle 3.6 sind für alle Versuche die Bruchkraft des Betonkörpers, sowie die über die vier Laschen/ Lamellen gemittelte Entkopplungskraft aufgelistet. Desweiteren ist die zugehörige mittleren Laschen-/ Lamellenstauchung sowie die zugehörige Betonstauchung angegeben. Eine genaue Auflistung aller Versuchsergebnisse ist in Anhang A enthalten.

Tabelle 3.6: Übersicht über die Ergebnisse der Verbunddruckversuche

Versuch	Bruchkraft F	Mittlere Entkopplungskraft	Mittlere Dehnung der Lasche bei Entkopplung	Mittlere Dehnung des Betons bei Entkopplung
	MN	MN	mm/m	- mm/m
CFK-1	2,80	2,71	-1,44	-1,33
CFK-2	2,79	2,62	-1,43	-2,01
CFK-3	2,73	2,62	-1,37	-1,47
S10-1	2,85	1,97	-0,46	-0,60
S10-2	3,30	2,08	-0,48	-0,71
S10-3	3,06	1,76	-0,39	-0,61
S15-1	2,61	1,58	-0,34	-0,75
S15-2	2,66	1,75	-0,38	-0,57
S15-3	2,83	1,75	-0,31	-0,66

Aus der Tabelle 3.6 ist zu erkennen, dass die aufgeklebten CFK-Lamellen sich erst kurz vor dem Gesamtversagen entkoppeln. Im Gegensatz dazu entkoppeln sich die Stahllaschen deutlich vor dem Gesamtversagen.

3.4 Versuche am Zweifeldträger

3.4.1 Versuchsdurchführung und Abmessungen

Die Versuche am Zweifeldträger wurden an einem 6,3 m langen Bauteil durchgeführt. Jedes Feld hatte eine Stützweite von 3 m. Bei den Versuchen wurde die Belastung mittig in jedem Feld angeordnet. Die Belastung wurde mit zwei 60 t Hydraulikzylindern druckgeregelt gleichzeitig auf die beiden Felder aufgebracht.

Bei dem Zweifeldträger handelte es sich um eine Platte der Abmessungen 200 mm x 500 mm, welche mit der Betonmischung C20/25 betoniert wurde. Als Längsbewehrung wurden im Feld durchgehend 4Ø12 verwendet und im Stützmomentenbereich wurden 5Ø12 eingelegt. Zusätzlich wurde als Querbewehrung Ø10 alle 200 mm eingelegt. Die Platte wurde im Stützmomentenbereich verstärkt, dazu wurde in dem einen Feld eine Lasche der Abmessung 10 mm x 200 mm verwendet und in dem anderen Feld eine Lasche der Abmessung 15 mm x 150 mm verwendet. Die beiden Laschen waren bis weit in die Druckzone geführt und wurden über der Stütze vor dem Verkleben stumpf durch eine Schweißung gestoßen.

Um ein direktes Anpressen der Lasche in der Druckzone durch die Kraft zu vermeiden wurde eine Lasteinleitungskonstruktion gewählt, bei welche die Lasche ausgespart war und die Kräfte neben der Lasche in die Platte eingeleitet wurden. Eine Ansicht über den Versuchsaufbau ist in Bild 3.4 dargestellt. Der Bewehrungsplan der aufgeklebten und einbetonierten Bewehrung ist in Anhang A enthalten.

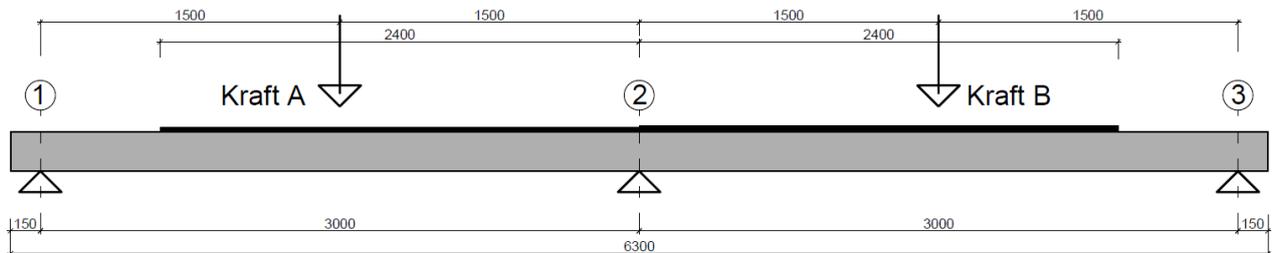


Bild 3.4: Aufbau der Versuche an Zweifeldträgern

Bei den Versuchen wurde neben der Messung der Kräfte der Hydraulikzylinder durch Kraftmessdosen, die Durchbiegung durch Wegaufnehmer in Feldmitte und im Viertelpunkt gemessen. Die Dehnungen der Laschen wurden mit 14 Dehnmessstreifen gemessen und die Dehnung des Betons im Bereich der Lasteinleitung wurde zusätzlich mit jeweils einem Dehnmessstreifen gemessen. Zur Bestimmung bzw. Beobachtung der Entkopplung wurde das Abheben der Lasche mit einer Wegaufnehmer und einer Hochgeschwindigkeitskamera im Bereich der Lasteinleitung beobachtet. Im Bereich des Momentennulldurchgangs wurden die Verschiebungen und Dehnung der Lasche optische mit dem System Pontos von oben gemessen.

3.4.2 Versuch 1

Beim ersten Versuch wurden beide Hydraulikzylinder druckgeregelt gleichzeitig belastet. Da aufgrund der etwas geringeren theoretischen Verbundkraftübertragung damit gerechnet wurde, dass sich die 15 mm starke Lasche zuerst ablöst wurde das Feld mit dieser Lasche optische gemessen sowie die Laschen mit zwei Videokameras gefilmt. Bei einer Pressenkraft von 93,2 kN kam es zu einem Ablösen der 15 mm starken Stahllasche. Danach wurde der Versuch sofort gestoppt um die zweite Seite ebenfalls prüfen zu können. Die Last-Verformungskurve des ersten Versuches ist in Bild 3.5 dargestellt.

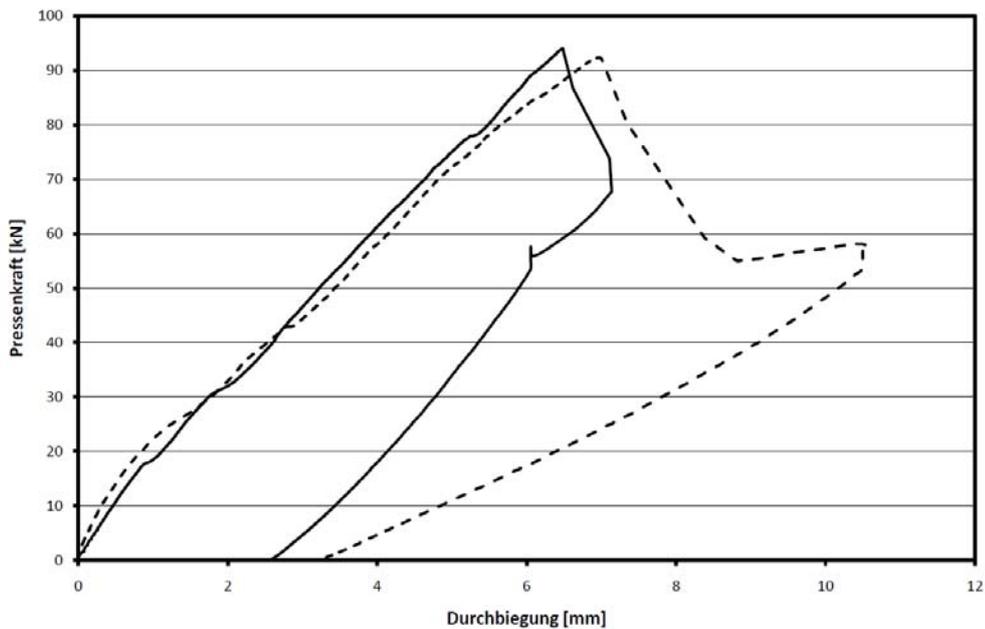


Bild 3.5: Last-Verformungskurve des ersten Versuches am Zweifeldträger

Aus den mitgefilmten Daten kann man erkennen, dass sich die Lamelle im Druckbereich zuerst abgelöst hat und sich dann bis circa zum Nulldurchgang weiter entkoppelt hat. Dies kann man auch am Verbundriss, welcher in Bild 3.6 dargestellt ist erkennen.

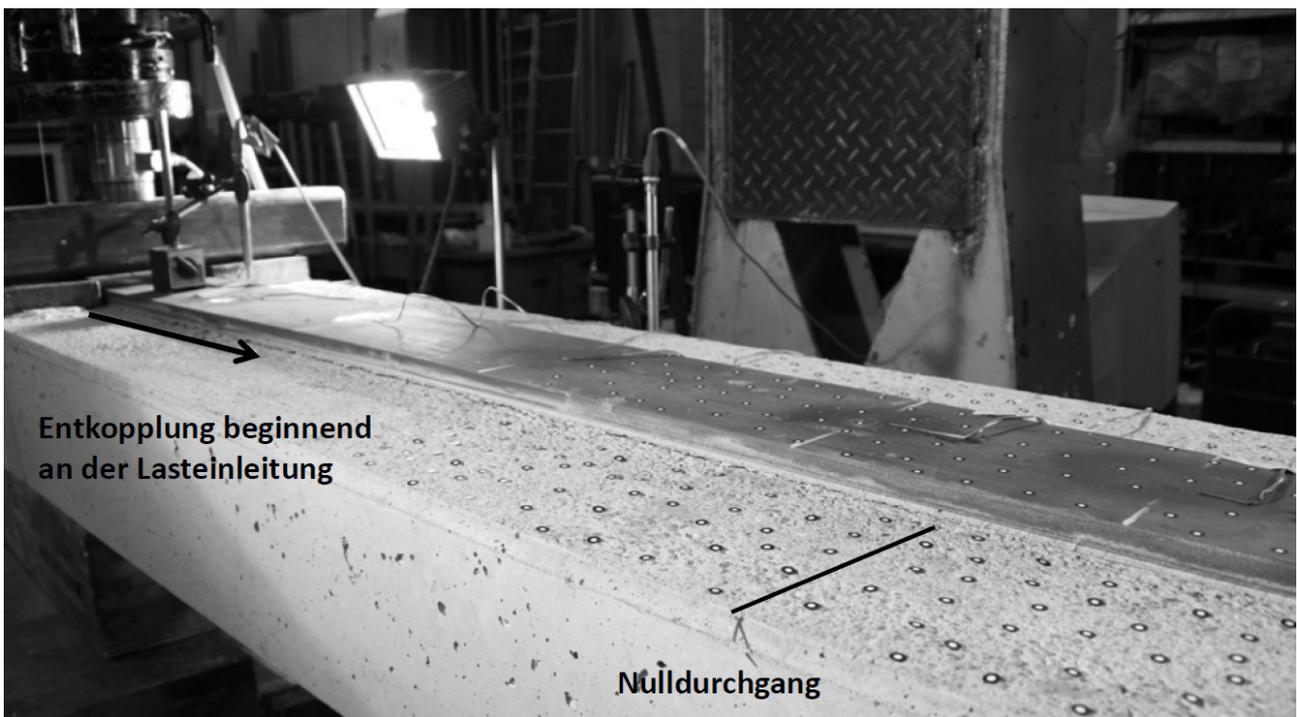


Bild 3.6: Verbundriss nach dem ersten Versuch am Zweifeldträger

Durch die Messung der vertikalen Verschiebungen der Lasche an der Lasteinleitung kann der Zeitpunkt der Entkopplung genau bestimmt werden. Der Zusammenhang zwischen der Laschenstauchung und dem Abheben bzw. der Laschen ist in Bild 3.7 dargestellt. Man erkennt, dass sich Laschen bei einer Stauchung von 0,47 mm/m schlagartig ablöste.

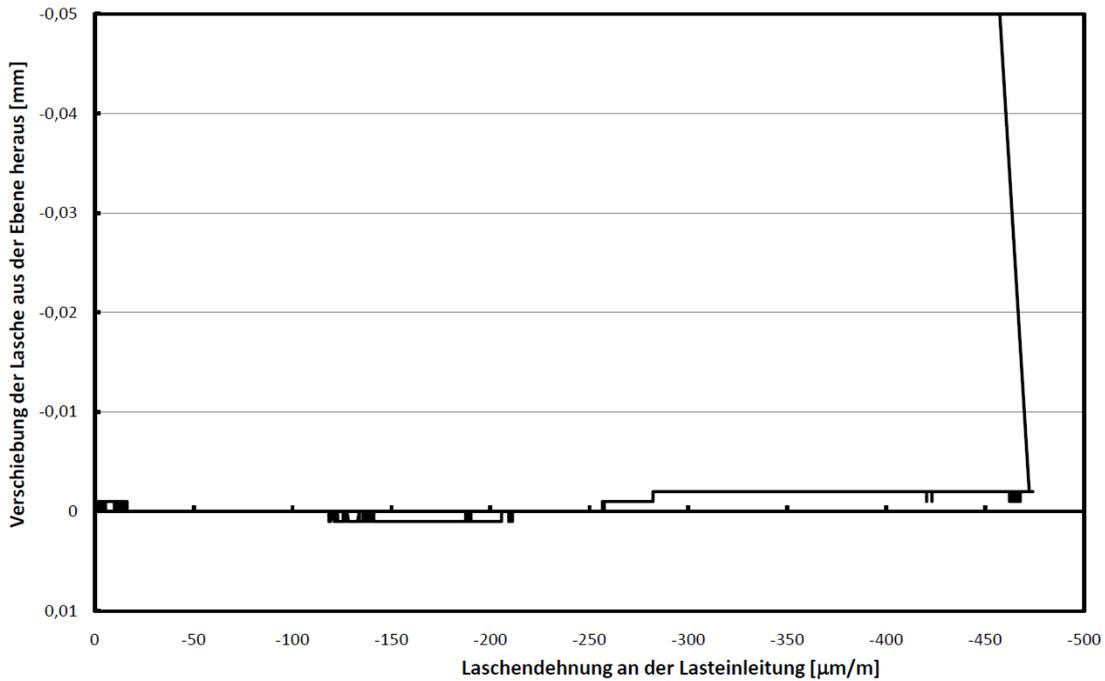


Bild 3.7: Ablösevorgang der Lasche in der Druckzone; Abheben der Lasche in Abhängigkeit der Laschenstauchung

3.4.3 Versuch 2

Nach dem ersten Versuch wurde die entkoppelte Lasche durch Stahlprofile wieder angepresst und der Träger erneut durch beide Hydraulikzylinder gleichzeitig belastet. Da die 15 mm starke Lasche sich bereits abgelöst hatte wurden nun das Feld mit der 10 mm starken Lasche optisch gemessen sowie mit zwei Videokameras gefilmt. Bei einer Pressenkraft von 117,5 kN trat auch eine Ablösung der 10 mm Lasche ein. Die Lastverformungskurve des zweiten Versuches ist in Bild 3.8 dargestellt. Man erkennt, dass das eine Feld mit der 15 mm starken Lasche aufgrund des nicht mehr voll intakten Verbundes deutlich weicher ist als das Feld mit der 10 mm Lasche.

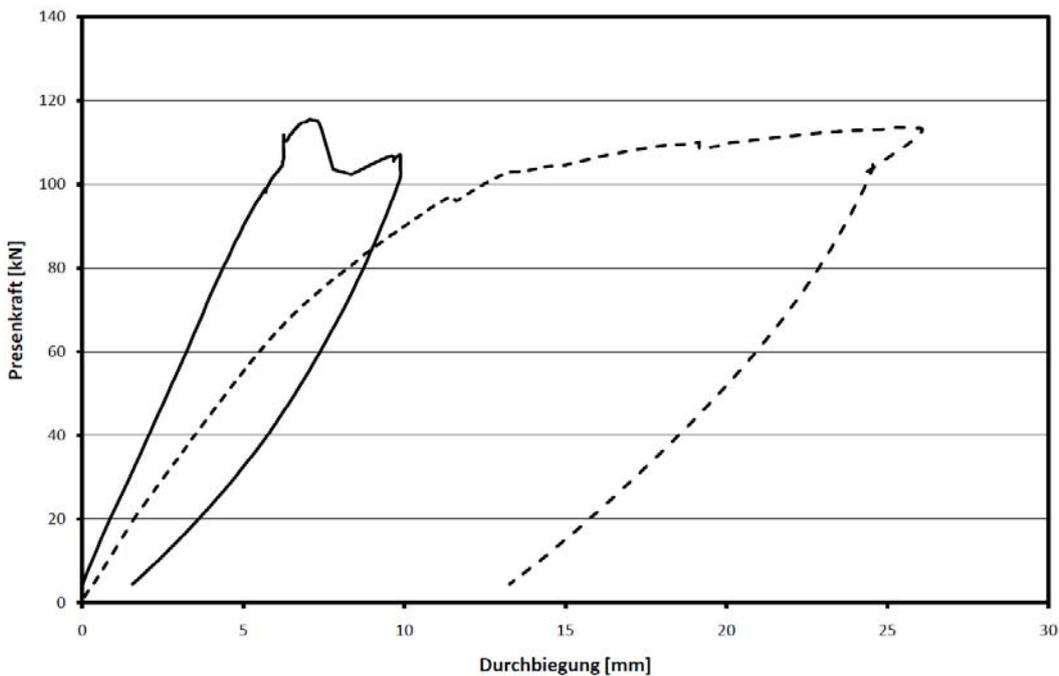


Bild 3.8: Last-Verformungskurve des zweiten Versuches am Zweifeldträger

Aus den mitgefilmten Daten und der optischen Messung ließ sich auch bei diesem Versuch beobachten, dass es zu einer Entkopplung in der Druckzone kam. Der Verbundriss in der Druckzone bei der 10 mm starken Lasche ist in Bild 3.9 dargestellt.

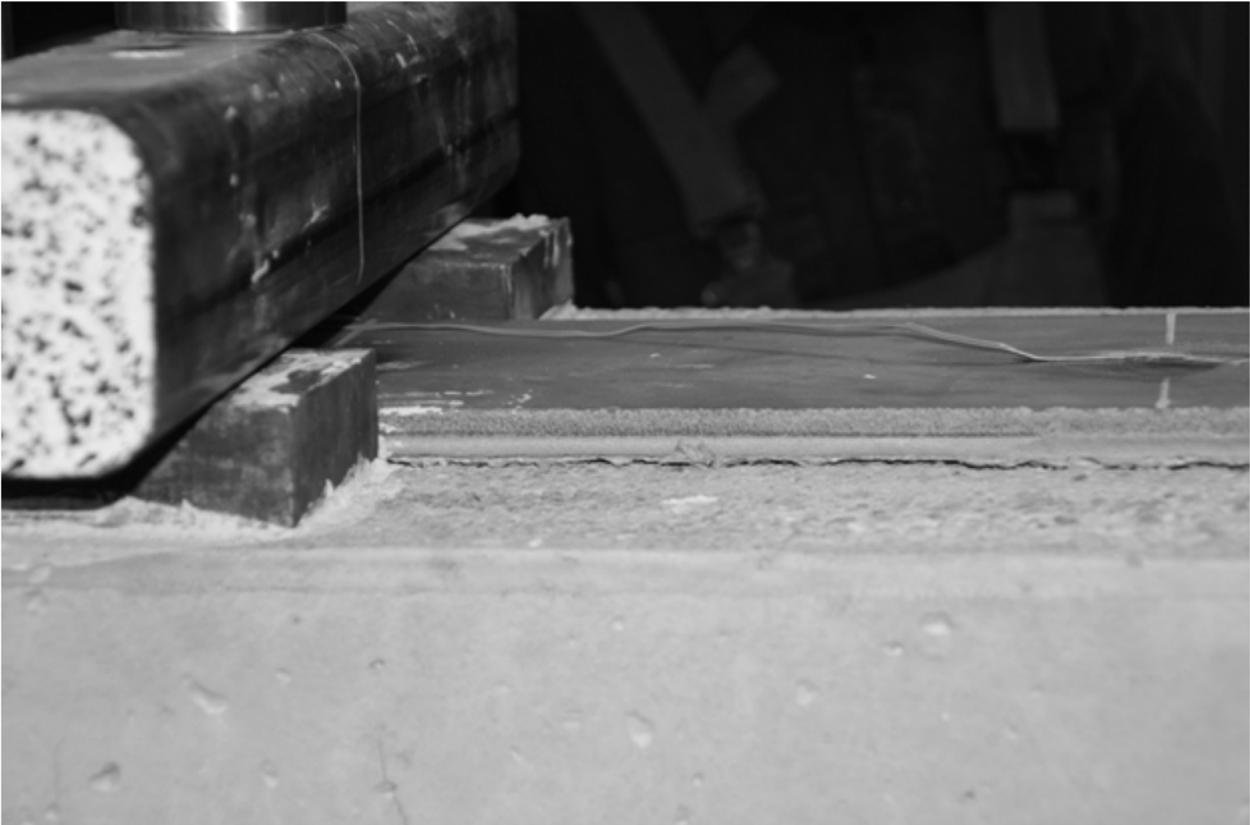


Bild 3.9: Verbundriss der 10 mm Lasche nach dem zweiten Versuch am Zweifeldträger

Durch die Messung der vertikalen Verschiebungen der Lasche an der Lasteinleitung kann der Zeitpunkt der Entkopplung genau bestimmt werden. Der Zusammenhang zwischen der Laschenstauchung und dem Abheben bzw. der Laschen ist in Bild 3.10 dargestellt. Man erkennt, dass sich Laschen bei einer Stauchung von 0,62 mm/m vollständig ablöste. Zusätzlich erkennt man, dass die Lasche sich vor dem Ablösevorgang auch leicht in den Klebstoff eindrückt.

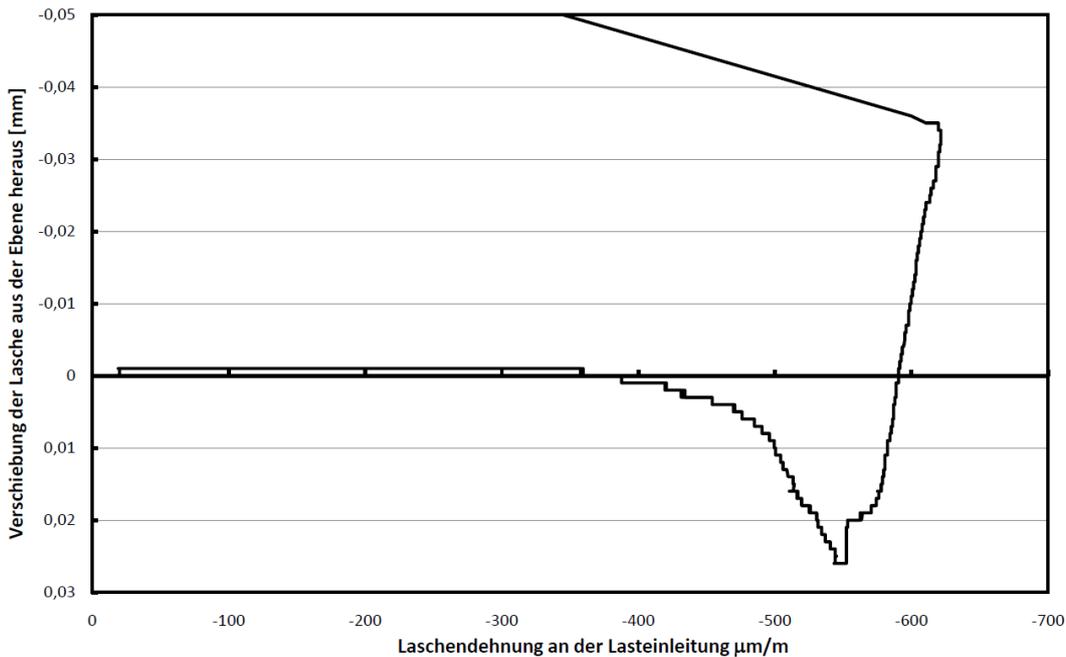


Bild 3.10: Ablösevorgang der Lasche in der Druckzone; Eindrücken bzw. Abheben der Lasche in Abhängigkeit der Laschenstauchung

4 Auswertung der experimentellen Untersuchungen

4.1 Verbunddruckversuche

Allgemeines

Bei den in Abschnitt 3.3 durchgeführten Verbunddruckversuchen wurde festgestellt, dass sich die steifen Stahllaschen deutlich vor Erreichen der Druckfestigkeit des Betons ablösen. Zielsetzung der Versuche ist es eine Grenze für die aufnehmbare Druckbeanspruchung der aufgeklebten Bewehrung zu ermitteln. Hierzu muss jedoch zunächst das Verhalten des Betons unter Druckbeanspruchung beschrieben werden.

Zur Beschreibung des Betons unter Druckbeanspruchung wird zum Beispiel zur Ermittlung der Höhe der Biegedruckzone bzw. zur Ermittlung der Spannungsverteilung in der Biegedruckzone neben der einachsigen Betondruckfestigkeit der Zusammenhang zwischen der Dehnung und der Spannung in Form einer Spannungs-Dehnungs- bzw. Arbeitslinie des Betons benötigt.

Im Rahmen einer Bemessung wird im Regelfall das in der DIN EN 1992-1-1 [6] in Abschnitt 3.1.7 vorgesehene Parabel-Rechteckdiagramm, gemäß Gleichung (4.1) verwendet.

$$\sigma_c = \begin{cases} f_c \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right) & \text{für } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \\ f_c & \text{für } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2} \end{cases} \quad (4.1)$$

Da bei einer Verstärkung im Regelfall nur normalfeste Betone bis C50/60 betrachtet werden, kann hier $n = 2$, $\varepsilon_{c2} = -2,0 \text{ mm/m}$ und $\varepsilon_{cu2} = -3,5 \text{ mm/m}$ gemäß DIN EN 1992-1-1 [6] verwendet werden.

Die Betrachtung der Spannungs-Dehnungs-Linie in Form des Parabel-Rechteckdiagramm stellt jedoch nur ein für die Bemessung gut geeignet Näherung da, welche das wirkliche Verhalten des Betons im Druckversuch nur ungenügend beschreibt. Für eine genauere Betrachtung der Verformungen bzw. der Druckdehnungen ist die nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Linie gemäß DIN EN 1992-1-1 [6] Abschnitt 3.1.6 deutlich besser geeignet:

$$\sigma_c = f_c \cdot \frac{k \cdot \eta - \eta^2}{1 + (k - 2) \cdot \eta} \quad (4.2)$$

Die entsprechenden Größen können gemäß DIN EN 1992-1-1 [6] mit den Gleichungen (4.3) bis (4.5) bestimmt werden.

$$\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_{c1} = 0,7 \cdot f_c^{0,31} \quad (4.4)$$

$$k = \frac{E_{c0} \cdot |\varepsilon_{c1}|}{f_c} \quad (4.5)$$

Einen Vergleich des Parabel-Rechteckdiagramms gemäß DIN EN 1992-1-1 [6] Abschnitt 3.1.7 mit der nicht-linearen Spannungsdehnungslinie gemäß DIN EN 1992-1-1 [6] Abschnitt 3.1.6 zeigt Bild 4.1.

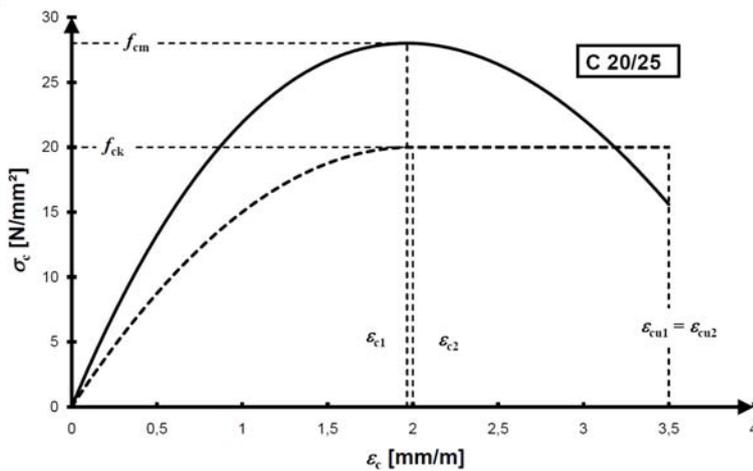


Bild 4.1: Vergleich zwischen dem Parabel-Rechteckdiagramm und der nichtlinearen Spannungsdehnungslinie

Auswertung der Versuche

Da die Dehnungsmessungen in den Versuchen aufgrund des Einflusses der weichen Klebstoffschicht sich von denen des Betons leicht unterscheiden werden die Versuche über die Entkopplungskräfte ausgewertet. Dazu werden zunächst die Größen, welche für die nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Linie gemäß DIN EN 1992-1-1 [6] Abschnitt 3.1.6 benötigt werden gemäß DIN EN 1992-1-1 aus der Druckfestigkeit berechnet. Die mittlere Zylinderfestigkeit wurde dabei auf $0,85 \cdot f_{c,cube}$ angenommen. Die Werte, die sich für die einzelnen Versuchskörperserien ergeben sind in Tabelle 4.1 aufgelistet.

Tabelle 4.1: Für die nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Linie benötigten Größen der Versuchskörper

Versuch	f_{cm} mm	ε_{c1} mm	k N/mm ²	E_{cm} -
CFK-1,4	30,2	-2,01	2,15	30,6
Stahl-10	33,5	-2,08	2,06	31,6
Stahl-15	29,4	-2,00	2,17	30,4

Über die Entkopplungskraft kann mithilfe der Querschnittsfläche des Versuchskörpers die zugehörige Betonspannung zum Entkopplungszeitpunkt berechnet werden. Hierbei wird die Querschnittsfläche der aufgeklebten Bewehrung vernachlässigt, da es nicht vorgesehen ist die geklebte Bewehrung planmäßig als Druckbewehrung zu benutzen. Die sich für die einzelnen Versuchsserien ergebende mittlere Betonentkopplungsspannung $\sigma_{c,entk}$ ist in der Tabelle 4.2 der Betonfestigkeit gegenübergestellt. Aus diesem Vergleich ist zu erkennen, dass die Druckfestigkeit bei den mit CFK-Lamellen verstärkten Prüfkörpern nahezu exakt erreicht wird. Deshalb wird im Weiteren davon ausgegangen, dass hier keine Schädigung bei hohen Druckspannungen bzw. Druckstauchungen eintritt.

Im Gegensatz dazu ist bei den Stahllaschen zu erkennen, dass die Betondruckfestigkeit bei weitem nicht erreicht wird. In der Tabelle 4.2 ist auf Grundlage der Betonentkopplungsspannung $\sigma_{c,entk}$ und der nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Linie die zugehörige Betonstauchung berechnet worden und der rechnerischen Betonstauchung bei Maximalast ε_{c1} gegenübergestellt.

Tabelle 4.2: Betonentkopplungsspannung und sich daraus ergebende Betonstauch zum Zeitpunkt der Entkopplung

Versuch	$\sigma_{c,entk}$ mm	$\sigma_{c,entk} / f_{cm}$ mm	$\epsilon_{c,entk}$ N/mm ²	$\epsilon_{c1} / \epsilon_{c,entk}$ -
CFK-1,4	29,49	0,98	ϵ_{c1}	1,00
Stahl-10	22,51	0,67	-0,87	0,42
Stahl-15	18,82	0,64	-0,76	0,38

Da die nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Linie des Betons im Regelfall nicht für eine Bemessung benutzt wird, wird im Weiteren die in Tabelle 4.2 ermittelte Entkopplungsspannung gemäß Gleichung (4.6) in eine äquivalente Bemessungsentkopplungsspannung $\epsilon_{cL,max}$ umgerechnet.

$$\epsilon_{Lc,max} = \epsilon_{c,entk} \cdot \frac{\epsilon_{cu2}}{\epsilon_{c1}} \quad (4.6)$$

Die sich so ergeben maximalen Stauchungen für eine Bemessung sind in Tabelle 4.3 für die einzelnen Versuchsserien aufgelistet.

Tabelle 4.3: Aus den Versuchen ermittelte maximale Laschenstauchungen für eine Bemessung

Versuch	$E_L \cdot t_L$ N/mm	$\epsilon_{c,entk}$ mm/m	$\epsilon_{cL,max}$ mm/m
CFK-1,4	238000	ϵ_{c1}	-3,50
Stahl-10	2000000	-0,87	-1,47
Stahl-15	3000000	-0,76	-1,34

Um eine Gleichung für eine Bemessung zu erhalten muss nun ein Zusammenhang zwischen der Laschensteifigkeit und der Bemessungsentkopplungsstauchung hergestellt werden. Da es sich bei der Entkopplung aufgrund einer hohen Druckspannung um eine ähnliche Problemstellung wie bei dem Verbund auf Zug handelt wird im Weiteren der gleiche mechanisch über die Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes begründete Zusammenhang zwischen Dehnung und der Laschendicke und des E-Moduls der wie bei der maximalen Dehnung am Einzelriss verwendet. (vgl. auch Abschnitt 2.3.3). Mithilfe einer Best-Fit Analyse und diesem Zusammenhang kann zur Beschreibung der Bemessungsentkopplungsstauchung die Gleichung (4.7) gefunden werden.

$$\epsilon_{Lc,max} = 2002 \text{ mm/m} \cdot \sqrt{\frac{1}{E_L \cdot t_L}} \leq 3,5 \text{ mm/m} \quad (4.7)$$

Diese Gleichung ist in Bild 4.2 mit den Versuchswerten aus Tabelle 4.3 gegenübergestellt. Der Vergleich zeigt, dass die Versuchswerte gut mit diesem Zusammenhang beschrieben werden können. Allerdings wären noch mehr Stützstellen zum Beispiel mit einer 5 mm starken Lasche wünschenswert.

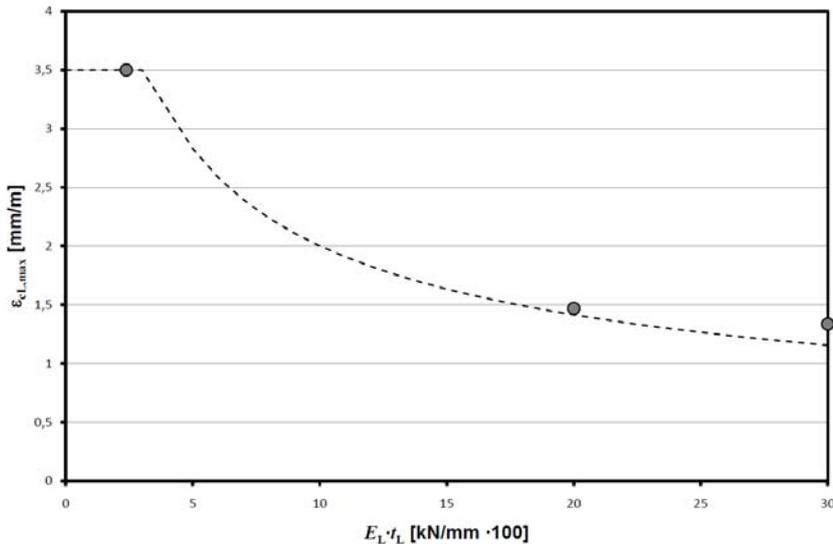


Bild 4.2: Gegenüberstellung der Versuchswerte aus Tabelle 4.3 mit der Gleichung zur Beschreibung der Bemessungsentkopplungsstauchung

4.2 Versuche an Zweifeldträgern

Bei den beiden Versuchen an der Zweifeldplatte hat eine Entkopplung in der Druckzone stattgefunden. Die in dem Versuch zum Zeitpunkt der Entkopplung gemessenen Laschenstauchungen sind in der Tabelle 4.4 den gemessenen Laschenstauchungen der entsprechenden Verbunddruckversuche gegenübergestellt.

Tabelle 4.4: Gegenüberstellung der gemessene Größen aus den Verbunddruckversuchen und den Bauteilversuchen

t_L	Verbunddruckversuch $\epsilon_{L,entk}$	Bauteilversuch $\epsilon_{L,entk}$
mm	mm/m	mm/m
10	-0,44	-0,55
15	-0,34	-0,47

Aus der Tabelle 4.4 lässt sich erkennen, dass die gemessenen Entkopplungsstauchung der Stahllaschen bei den Bauteilversuchen sich ungefähr in der gleichen Größenordnung befinden, wie die gemessenen Entkopplungsstauchung bei den Verbunddruckversuchen. Bei beiden Versuchen ist die gemessene Entkopplungsstauchung der Stahllaschen bei den Bauteilversuchen leicht höher als die in den Verbunddruckversuchen.

Wie auch bei den Verbunddruckversuchen soll die rechnerische Druckstauchung zum Zeitpunkt der Entkopplung bestimmt werden. Hierbei stellt sich jedoch das Problem, dass die Schnittgröße sich in dem statisch unbestimmten System aufgrund der sehr steifen Stahllasche teilweise erheblich vom Feld in den Stützmomentenbereich umlagern. Aus diesem Grund wurden die rechnerischen Betonstauchungen über das Gleichgewicht am Querschnitt unter Annahme des Parabel-Rechteckdiagrammes nach DIN EN 1992-1-1 [6] in Abschnitt 3.1.7 sowohl für die Schnittgrößenverteilung unter Annahme eines linear elastischen Materialverhaltens (DIN EN 1992-1-1 [6] in Abschnitt 5.4) wie auch für die Schnittgrößenverteilung welche sich nach einer nicht linearen Berechnung ergibt (DIN EN 1992-1-1 [6] in Abschnitt 5.4) ermittelt. Dabei wurden bei der nichtlinearen Schnittgrößenermittlung die Schnittgrößen über das Kraftgrößenverfahren mit den Steifigkeiten des gerissenen Querschnittes berechnet.

In Tabelle 4.5 sind die sich so ergebenden rechnerischen Betonstauchungen zum Zeitpunkt der Entkopplung dem Grenzwert für die Laschenstauchung nach Gleichung (4.7) gegenübergestellt.

Tabelle 4.5: Gegenüberstellung der maximale Laschenstauchung nach Gleichung (4.7) mit den rechnerisch ermittelten Laschenstauchung zum Zeitpunkt der Entkopplung

Versuch	Seite t_L	$\epsilon_{cL,max}$ (Gleichung (4.7))	Linear elastisch Calc. $\epsilon_{c,entk}$	Nichtlinear Calc. $\epsilon_{L,entk}$
	mm	mm/m	mm/m	mm/m
Nr.1	15	-1,16	-3,5	-0,86
Nr.2	10	-1,41	-3,5	-3,5

Aus der Tabelle 4.5 erkennt man, dass die aus die rechnerischen Stauchungen teilweise deutlich höher sind als die Laschenstauchung die sich nach dem Grenzwert gemäß Gleichung (4.7) ergeben. Dies liegt im wesentlichen daran, dass die Laschenstauchung nach dem Grenzwert gemäß Gleichung (4.7) aufgrund der Geometrie des Plattenquerschnittes rechnerisch nur in einem sehr kleinen Momentebereich erreicht werden kann, wie dies die Beziehung zwischen Dehnung und Moment in Bild 4.3 zeigt.

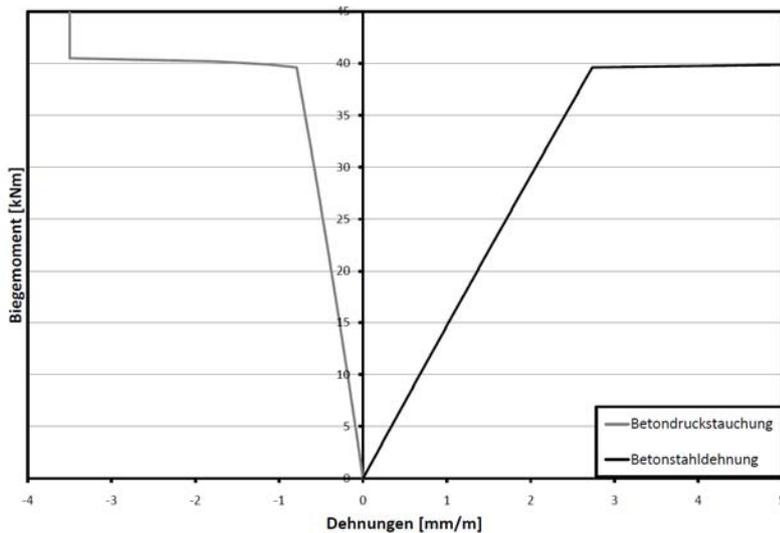


Bild 4.3: Rechnerische Beziehung zwischen Dehnung und Moment des geprüften Plattenquerschnittes im Feldmomentebereich

Für zukünftige Versuche wäre deshalb ein Balkenquerschnitt besser geeignet. Zusammenfassend bestätigen die Versuche an der Platte im Wesentlichen die Ergebnisse aus den Verbunddruckversuchen, wie sich gerade aus der Dehnungsmessung erkennen lässt. Anhand der Plattenversuche lässt sich jedoch auch erkennen, dass bei einer Verstärkung eines statisch unbestimmten Systems die Schnittgrößenumlagerung je nach gewählt Querschnitt erheblich sein kann.

5 Bemessungsempfehlung

Aufgrund der Versuchsergebnisse sollte die maximale Dehnung der Stahllaschen beschränkt werden. Da der Beton unter Druck circa das gleiche Verhältnis von Mittelwert zu charakteristischem Wert wie der Verbund der geklebten Bewehrung besitzt und die Sicherheitsbeiwerte für den Beton auf Druck die gleichen sind, wie für den Verbund der aufgeklebten Bewehrung, kann der aus den Verbunddruckversuchen ermittelte Grenzwert für die maximale Laschenstauchung, in erster Näherung übernommen werden. Im Rahmen einer Verstärkung von Bestandsbauteilen kann aufgrund der vorzunehmenden Eigenlast während des Verstärkens und der bisherigen Standzeit des Bauteils im Regelfall davon ausgegangen werden, dass die Erhöhung der Betondruckstauchungen aufgrund des Kriechens des Betons von untergeordneter Bedeutung sind.

Somit sollten die aufgeklebten Stahllaschen, CFK-Lamellen und CF-Gelege in der Biegedruckzone maximal einer Stauchung von bis zu $\varepsilon_{Lc,max}$ gemäß Gleichung (5.1) ausgesetzt werden. Die Dehnung ist dabei unter Annahme der Spannungs-Dehnung-Linie nach DIN EN 1992-1-1 Abschnitt 3.1.7 zu ermitteln und die Betonstauchung zum Zeitpunkt der Verstärkung dürfen dabei berücksichtigt werden.

$$\varepsilon_{Lc,max} = 2000 \text{ mm/m} \cdot \sqrt{\frac{1}{E_L \cdot t_L}} \leq 3,5 \text{ mm/m} \quad (5.1)$$

Dabei ist:

t_L = Dicke der Stahllaschen, CFK-Lamellen bzw. CF-Gelege in mm

E_L = E-Modul der Stahllaschen, CFK-Lamellen bzw. CF-Gelege in mm

6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Berichtes wurde die Verankerung von aufgeklebten Stahllaschen im Bereich von Biegemomenten mit wechselnden Vorzeichen untersucht. In dem Bereich von Biegemomenten mit wechselnden Vorzeichen, wie er im Regelfall aufgrund der ungünstigen Anordnung der Verkehrslast in nahezu jedem Durchlaufträger vorkommt, ist die aufgeklebte Bewehrung bei bestimmten Lastfällen auch einer Druckbeanspruchung ausgesetzt.

Da es zur aufgeklebten Bewehrung unter Druckbeanspruchung bisher kaum Untersuchungen gab, wurde diese im Rahmen dieses Berichtes näher betrachtet. Dazu wurde zunächst in Abschnitt 2 prinzipielles zum Verhalten der aufgeklebten Bewehrung erläutert und auf die Probleme der Verankerung der aufgeklebten Bewehrung im Druckbereich eingegangen. Hierbei stellt das Verbundverhalten der aufgeklebten Bewehrung unter Druckbeanspruchung eine bislang nicht betrachtete Problemstellung dar.

Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieses Berichtes Verbunddruckversuche an mit aufgeklebter Bewehrung verstärkten Betonprismen durchgeführt. Dabei wurden sowohl Verbundversuche mit zwei unterschiedlich dicken Stahllaschen wie auch an CFK-Lamellen durchgeführt. Bei den Versuchen zeigte sich, dass die Stahllaschen sich, ab einer bestimmten Druckstauchung deutlich vor der maximalen Druckstauchung des Betons ablösen. Im Gegensatz dazu lösten sich die CFK-Lamellen erst bei dem Druckversagen des Gesamtkörpers ab. Um die Ergebnisse an den Verbunddruckversuchen zu überprüfen wurden zwei Versuche an einer Zweifeldplatte durchgeführt. Diese Zweifeldplatte wurde für ein Stützmoment mit Stahllaschen verstärkt, dabei wurden diese bis weit in den Druckbereich verankert. Auch bei diesen Versuchen zeigte sich, dass sich die Stahllaschen im Druckbereich ablösen.

Die experimentellen Ergebnisse wurden dann in Abschnitt 4 ausgewertet. Hierbei zeigt sich, dass sich die aufgeklebte Bewehrung unter einer Druckdehnung ablöst, die etwas höher ist als die aufnehmbaren Zugdehnung am Einzelriss. Da jedoch diese ermittelten Dehnungen nicht den Betondehnung entsprechen, die im Rahmen einer üblichen Bemessung mit dem Parabel-Rechteckdiagramm verwendet wird, wurden diese Dehnung an das Parabel-Rechteckdiagramm angepasst.

Aufbauend auf der Auswertung wurde dann in Abschnitt 5 ein Bemessungsvorschlag zur Beschränkung der Druckstauchungen an den Stellen der aufgeklebten Bewehrung unterbreitet.

Das wesentliche Ergebnis der hier durchgeführten Untersuchungen ist somit, dass sich dicke Stahllaschen im Druckbereich ablösen können und somit die zulässige Druckstauchung dieser zu beschränken ist. Aufgrund dieser Beschränkung wird eine Verstärkung im Stützmomentenbereich mit dicken Stahllaschen deutlich eingeschränkt und in den meisten praktischen Fällen kaum noch möglich sein.

Das Problem der Ablösung der aufgeklebten Bewehrung im Druckbereich scheint bei den deutlich weicheren CFK-Lamellen jedoch kein Problem zu sein.

Literatur

- [1] DAfStb- Richtlinie "Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung", Entwurf März 2011 (Gelbdruck)
- [2] Deuring, M.: Verstärken von Stahlbeton mit gespannten Faserverbundwerkstoffen, EMPA-Bericht Nr. 224, 1993
- [3] DIBt: Z-36.12-70: *Verstärkung von Stahlbetonteilen durch mit dem Baukleber „StoPox SK 41“ schubfest aufgeklebte Kohlefaserlamellen „Sto S&P CFK Lamellen“ nach DIN 1045-1:2008-08*, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, 2008
- [4] DIBt: Z-36.12-71: *Klebesystem "StoGB System 1" für schubfeste Klebeverbindungen zwischen Stahlplatten und Stahlbetonbauteilen nach DIN 1045-1:2008-08*, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, 2008
- [5] DIN EN 1992-1-1/NA: *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*, Deutsches Institut für Normung, 2008
- [6] DIN EN 1992-1-1: *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*, Deutsches Institut für Normung, 2004
- [7] DIN V ENV 1992-1-1: *Eurocode 2: Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1: Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau*, Deutsches Institut für Normung, 1992
- [8] Eisenbiegler, W.: *Das Verbundverhalten druckbeanspruchter Betonrippenstähe im Beton*, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1975
- [9] Holzenkämpfer, P.: *Ingenieurmodelle des Verbunds geklebter Bewehrung für Betonbauteile*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 1994
- [10] Meier, U.: *Warum bleiben wir nicht bei den bewährten Stahlblechen*, In: Nachträgliche Verstärkung von Bauwerken mit CFK-Lamellen, SIA Tagung, Zürich 1995
- [11] Müller, F. P.; Eisenbiegler, W.: *Ermittlung der Verbundspannungen an gedrückten einbetonierten Betonstählen*, in DAfStb Heft 319, Ernst und Sohn, Berlin, 1981
- [12] Niedermeier, R.: *Zugkraftdeckung bei klebarmierten Bauteilen*, Dissertation, Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München, 2001
- [13] Zehetmaier, G.: *Zusammenwirken einbetonierter Bewehrung mit Klebarmierung bei verstärkten Betonbauteilen*, Dissertation, Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München, 2006
- [14] Zilch K., Niedermeier R., Finckh W.: *Bauteilspezifische Effekte auf die Verbundkraftübertragung von mit aufgeklebten CFK-Lamellen verstärkten Betonbauteilen*, In: Bauingenieur 85, S. 97-104, 2010
- [15] Zilch, K.; Finckh, W.; Niedermeier, R.; Wiens, U.: *DAfStb-Richtlinie: Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung - Teil 1: Bemessung und Konstruktion*, In Bauingenieur 86, S. 197-206, 2011
- [16] Zilch, K.; Niedermeier, R.: *Formulierung von Prüfgrundsätzen bei Verbundversuchen mit oberflächlich aufgeklebten Stahlaschen und CFK-Lamellen*, Forschungsbericht, Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München, 2006
- [17] Zilch, K.; Niedermeier, R.; Finckh, W.: *Praxisgerechte Bemessungsansätze für das wirtschaftliche Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung - Verbundtragfähigkeit unter statischer Belastung*, DAfStb Heft 592, Beuth, Berlin, 2011
- [18] Zilch, K.; Niedermeier, R.; Finckh, W.: *Praxisgerechte Bemessungsansätze für das wirtschaftliche Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung - Querkrafttragfähigkeit*, DAfStb Heft 594, Beuth, Berlin, 2011
- [19] Zilch, K.; Niedermeier, R.; Finckh, W.: *Sachstandsbericht „Geklebte Bewehrung“*, DAfStb Heft 591, Beuth, Berlin, 2011
- [20] Zilch, K.; Zehetmaier G.: *Bemessung im konstruktiven Betonbau*, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2010
- [21] Zilch, K.; Niedermeier, R.; Finckh, W.: *Querkrafttragfähigkeit von historisch mit Betonstabstahl bewehrten und mit geklebter Bewehrung biegeverstärkten Betonbauteilen*. Forschungsbericht. Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München, 2011

- [22] DIN EN 12390-1: *Prüfung von Festbeton - Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen*; Deutsches Institut für Normung, 2001
- [23] DIN EN 12390-3: *Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern*; ; Deutsches Institut für Normung, 2009
- [24] DIN EN 12390-5: *Prüfung von Festbeton –Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern* ; Deutsches Institut für Normung, 2009
- [25] DIN EN 12390-6: *Prüfung von Festbeton – Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern*; ; Deutsches Institut für Normung, 2009
- [26] DIN 1048-5: *Prüfverfahren für Beton; Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper*, Deutsches Institut für Normung, 1991
- [27] DIN EN 10002-1: *Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur*, Deutsches Institut für Normung, 2001
- [28] DIN EN 10025-2: *Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen - Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle*, Deutsches Institut für Normung, 2005
- [29] DIN EN 10027-1: *Bezeichnungssysteme für Stähle - Teil 1: Kurznamen*, Deutsches Institut für Normung, 2005
- [30] DIN EN 12350-5: *Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß*, Deutsches Institut für Normung, 2009
- [31] DIN EN 12350-6: *Prüfung von Frischbeton - Teil 6: Frischbetonrohddichte*, Deutsches Institut für Normung, 2009
- [32] DIN EN 1504-4: *Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität - Teil 4: Kleber für Bauzwecke*, Deutsches Institut für Normung, 2005
- [33] DIN EN 1542: *Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Messung der Haftfestigkeit im Abreißversuch*, Deutsches Institut für Normung, 1999
- [34] DIN EN 196-1: *Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit*, Deutsches Institut für Normung, 2005
- [35] DIN EN 197-1: *Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement*, Deutsches Institut für Normung, 2004
- [36] DIN 488-1: *Betonstahl - Teil 1: Stahlsorten, Eigenschaften, Kennzeichnung*, Deutsches Institut für Normung, 2009
- [37] DIN EN 2561: *Luft- und Raumfahrt - Kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe - Unidirektionale Lamine - Zugprüfung parallel zur Faserrichtung*, Deutsches Institut für Normung, 1995
- [38] DIBt: Z-36.12-80: *Verstärken von Stahlbetonbauteilen durch schubfest aufgeklebte Kohlefaserlamellen "Sika CarboDur" nach DIN 1045-1:2008-08*, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, 2010

Anhang A - Versuchsergebnisse

Verbunddruckversuche

Verbunddruckversuche CFK-Lamellen

Klebstoff (Mittelwert über die 4 Seiten)

Alter: 16 d
Rohdichte: 1,85 g/cm³
Druckfestigkeit: 111,5 N/mm²
Biegezugfestigkeit: 63,7 N/mm²

Beton:

Alter: 100 d
E-Modul: 26398 N/mm²
Würfeldruck: 35,5 N/mm²
Zylinderdruck: 31,3 N/mm²
Oberflächenzugfestigkeit Einfüllseite: 1,2 N/mm²
Oberflächenzugfestigkeit Schalseite: 2,0 N/mm²
Oberflächenzugfestigkeit Unterseite: 2,4 N/mm²

Versuch 1:

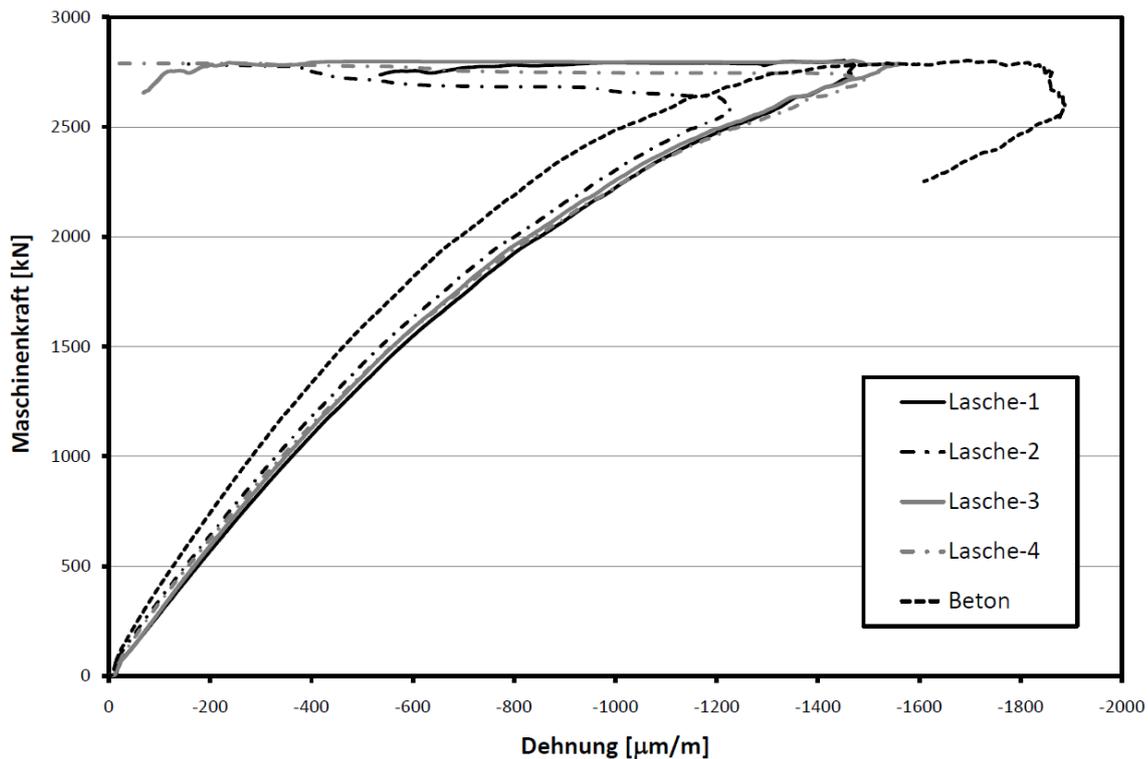


Bild A.1: Dehnung des Versuches CFK-1

Versuch 2:

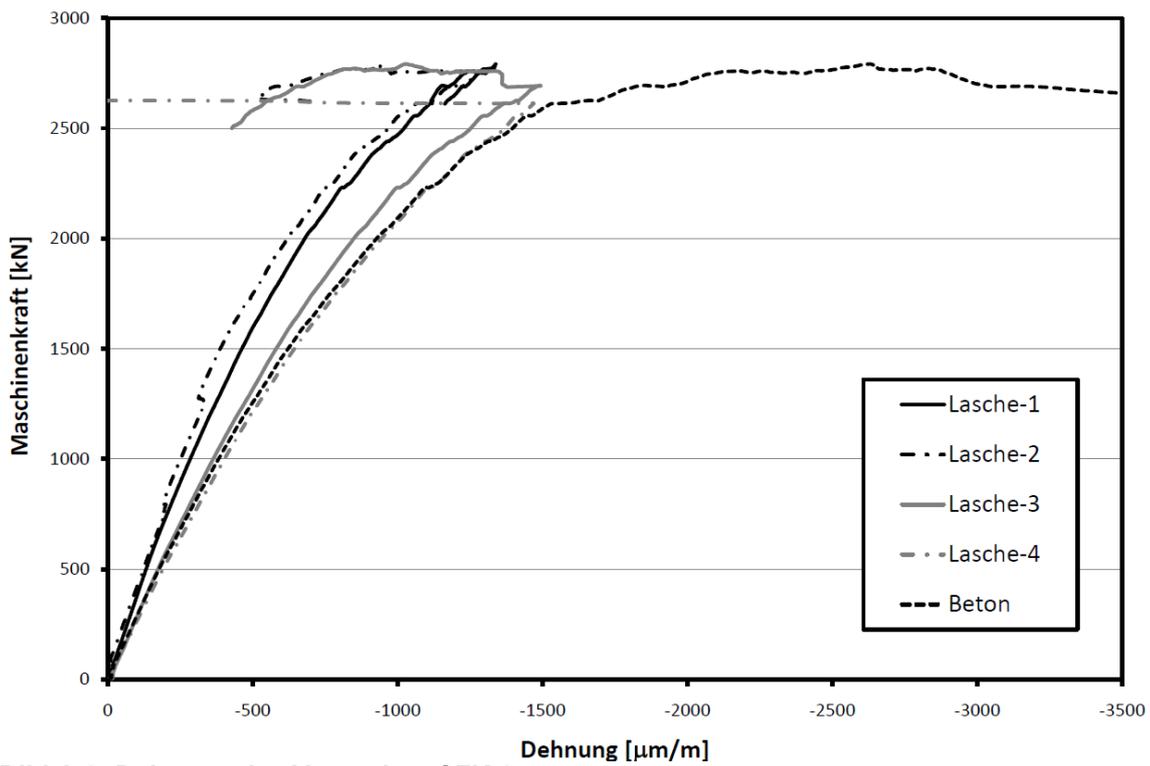


Bild A.2: Dehnung des Versuches CFK-2

Versuch 3:

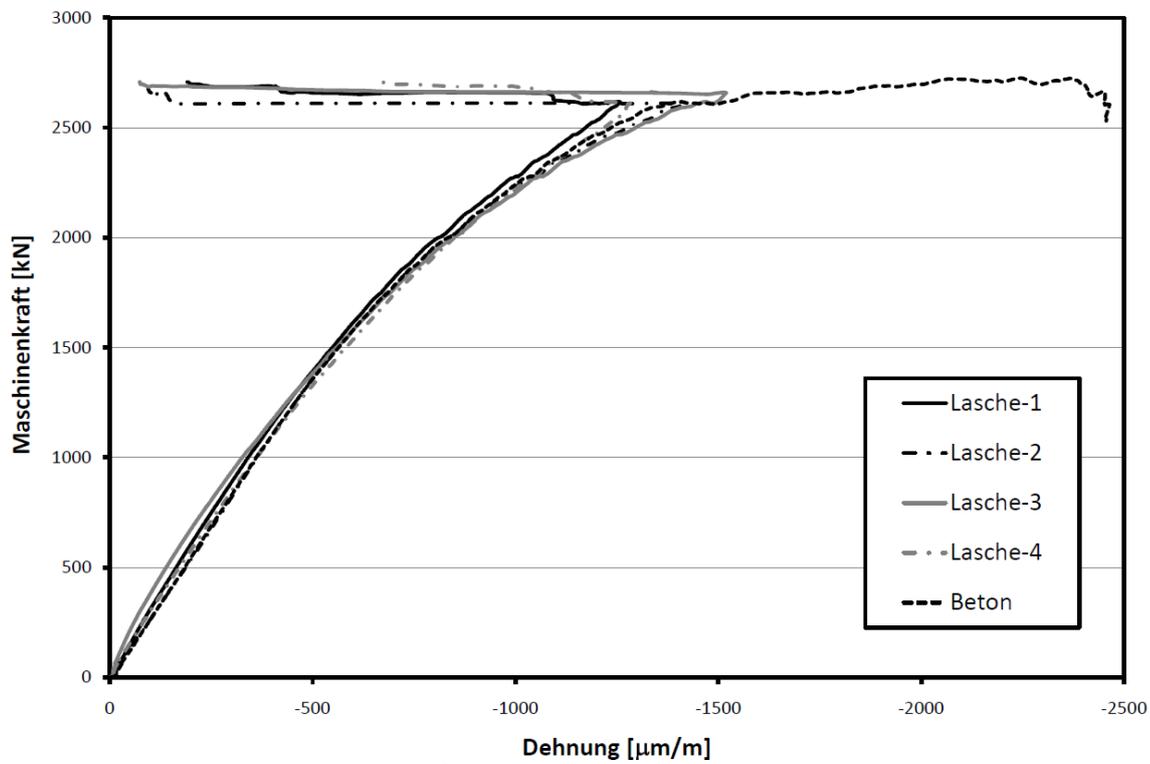


Bild A.3: Dehnung des Versuches CFK-3

Verbunddruckversuche 10 mm Stahllaschen

Klebstoff (Mittelwert über die 4 Seiten)

Alter: 16 d
Rohdichte: 1,85 g/cm³
Druckfestigkeit: 111,5 N/mm²
Biegezugfestigkeit: 63,7 N/mm²

Beton:

Alter: 104 d
E-Modul: 28977 N/mm²
Würfeldruck: 39,4 N/mm²
Zylinderdruck: 37,5 N/mm²
Oberflächenzugfestigkeit Einfüllseite: 2,0 N/mm²
Oberflächenzugfestigkeit Schalseite: 2,5 N/mm²
Oberflächenzugfestigkeit Unterseite: 3,4 N/mm²

Versuch 1:

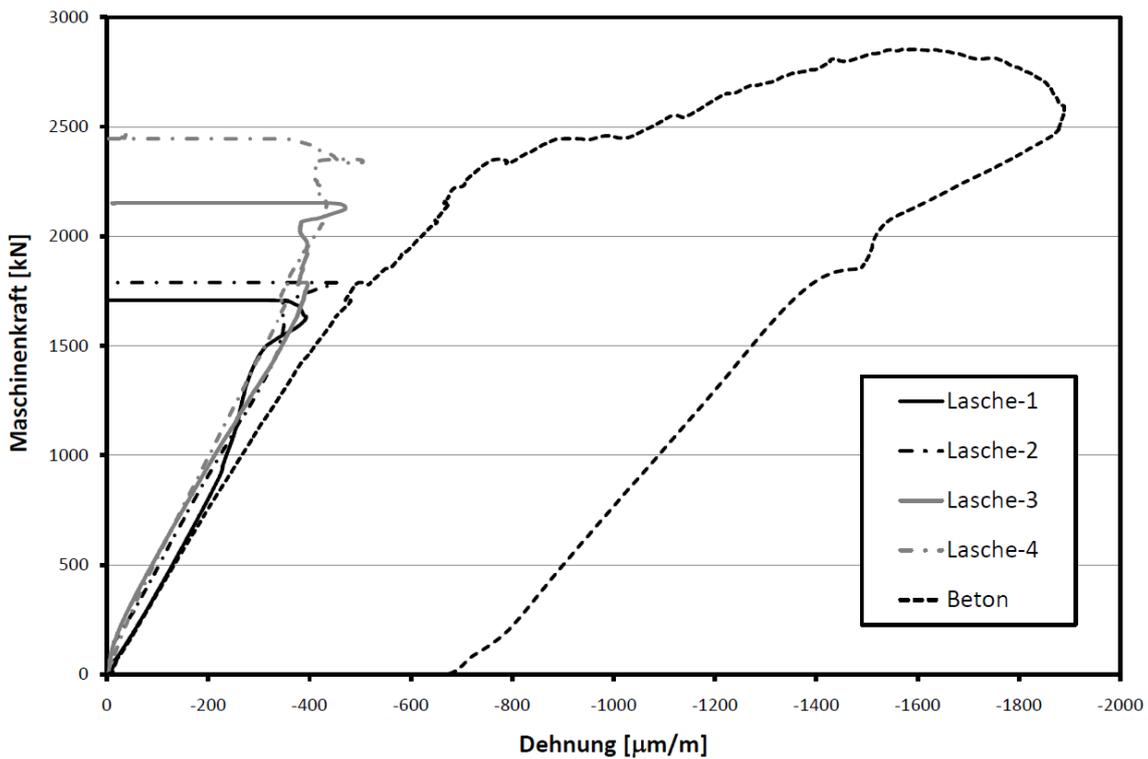


Bild A.4: Dehnung des Versuches S-10-1

Versuch 2:

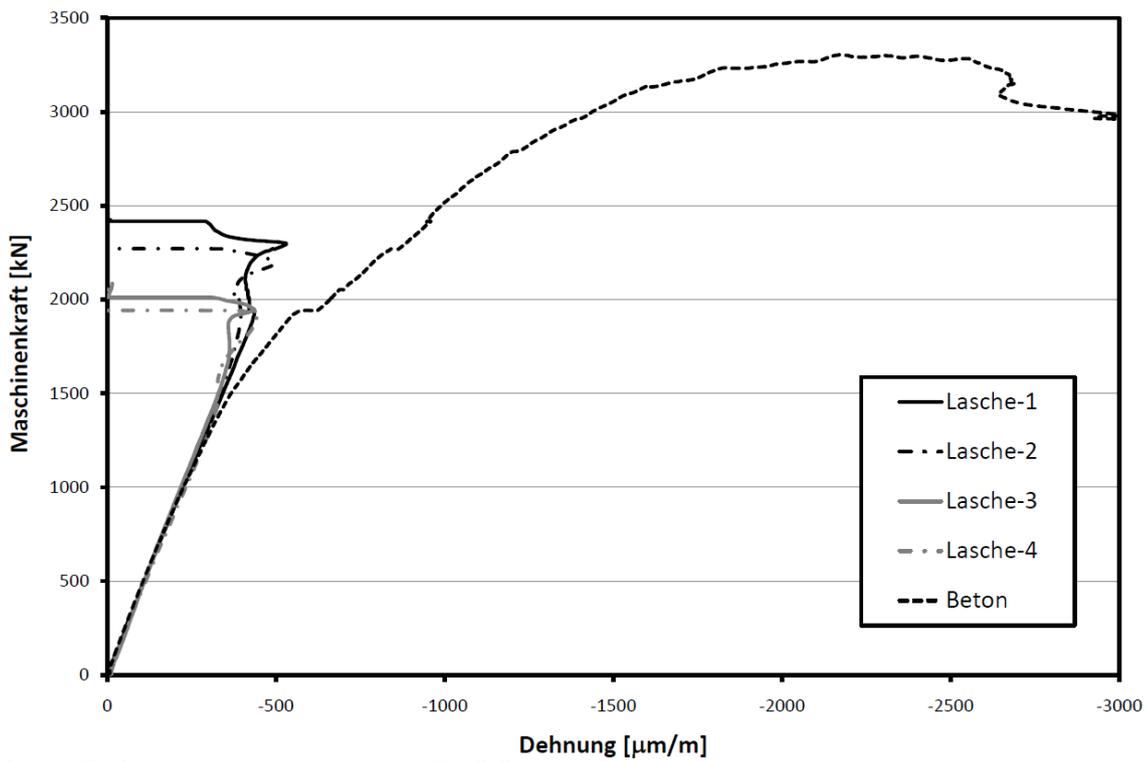


Bild A.5: Dehnung des Versuches S-10-2

Versuch 3:

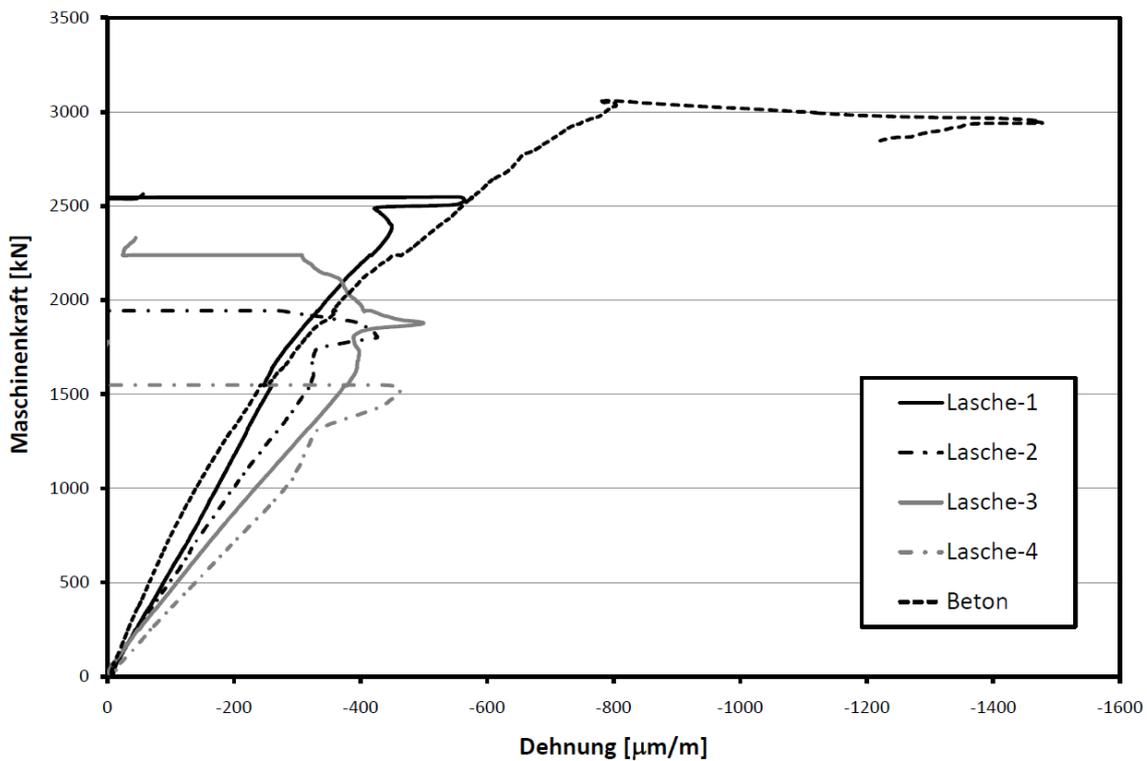


Bild A.6: Dehnung des Versuches S-10-3

Verbunddruckversuche 15 mm Stahlflaschen

Klebstoff (Mittelwert über die 4 Seiten)

Alter: 16 d
Rohdichte: 1,85 g/cm³
Druckfestigkeit: 111,5 N/mm²
Biegezugfestigkeit: 63,7 N/mm²

Beton:

Alter: 107 d
E-Modul: 26812 N/mm²
Würfeldruck: 34,5 N/mm²
Zylinderdruck: 32,4 N/mm²
Oberflächenzugfestigkeit Einfüllseite: 1,9 N/mm²
Oberflächenzugfestigkeit Schalseite: 2,4 N/mm²
Oberflächenzugfestigkeit Unterseite: 2,8 N/mm²

Versuch 1:

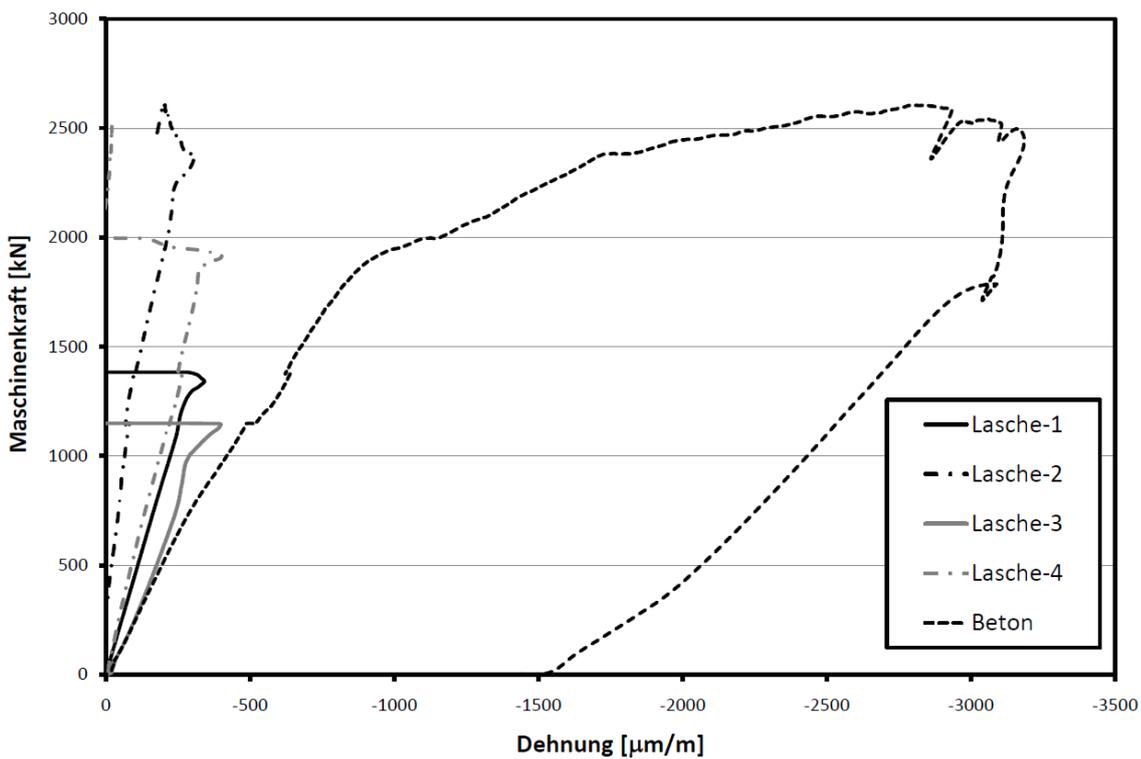


Bild A.7: Dehnung des Versuches S-15-1

Versuch 2:

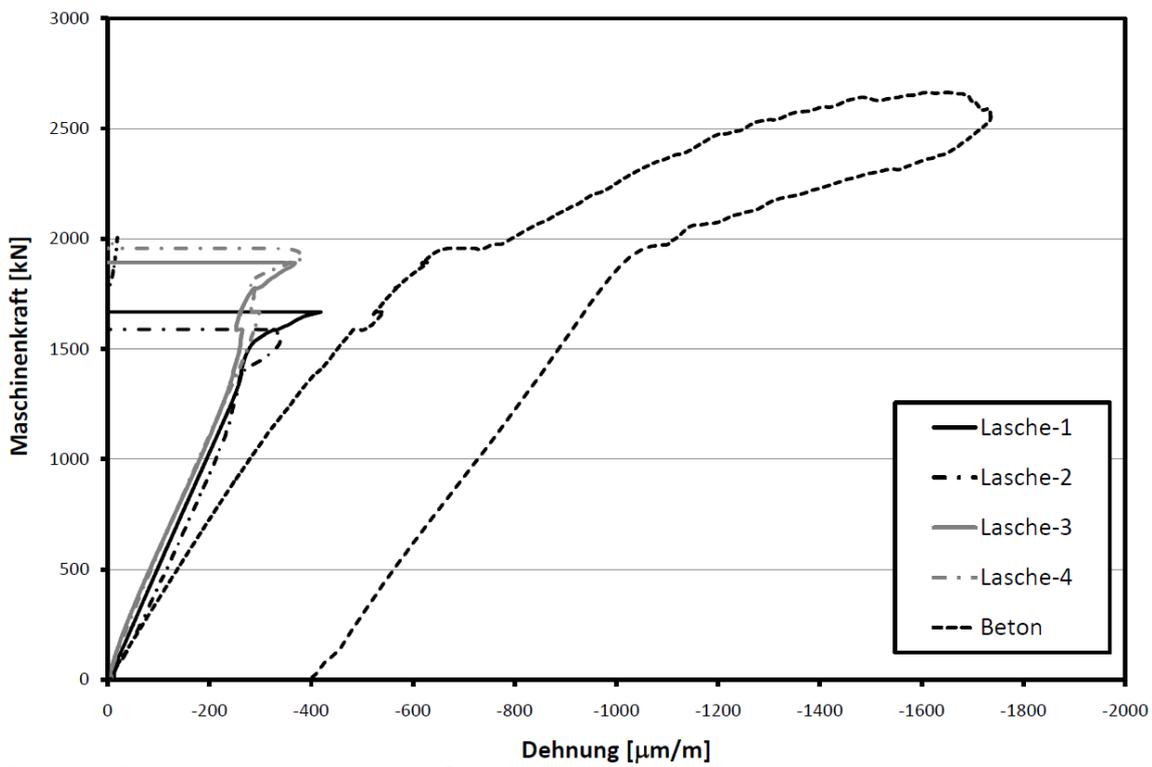


Bild A.8: Dehnung des Versuches S-15-2

Versuch 3:

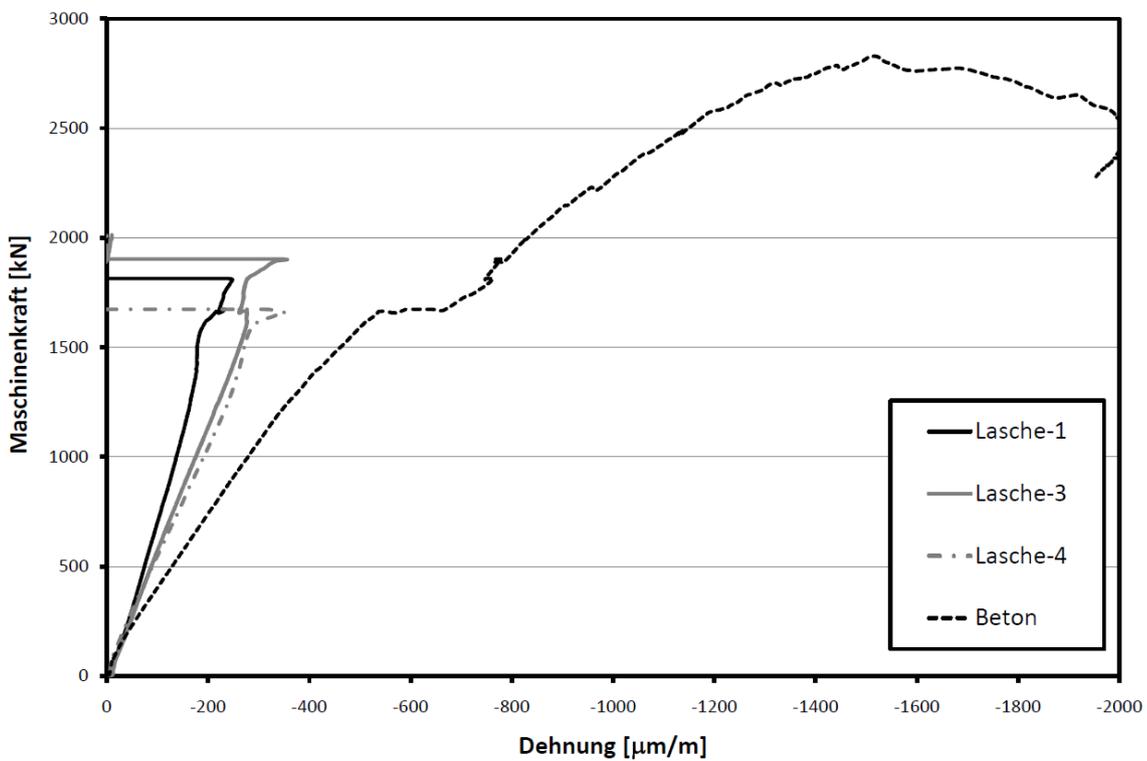


Bild A.9: Dehnung des Versuches S-15-3

Versuche am Zweifeldträger

Baustoffkenngrößen

Klebstoff:

Alter:	4 d
Rohdichte:	1,82 g/cm ³
Druckfestigkeit:	108,2 N/mm ²
Biegezugfestigkeit:	57,8 N/mm ²

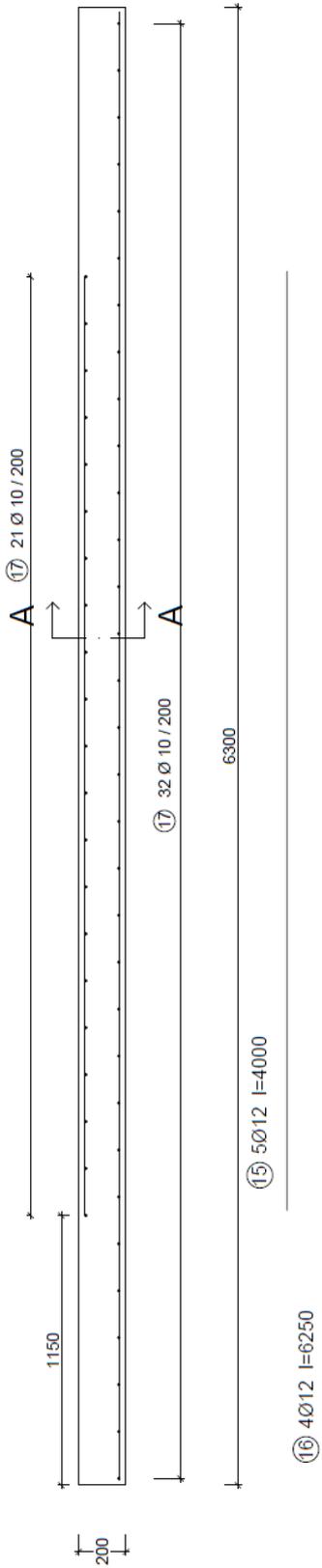
Beton:

Alter:	88 d
E-Modul ⁵ :	25155 N/mm ²
Würfeldruck:	39,3 N/mm ²
Zylinderdruck:	30,3 N/mm ²
Oberflächenzugfestigkeit Oberseite:	1,6 N/mm ²
Biegezugfestigkeit ⁶ :	4,06 N/mm ²
Spaltzugfestigkeit	2,64 N/mm ²

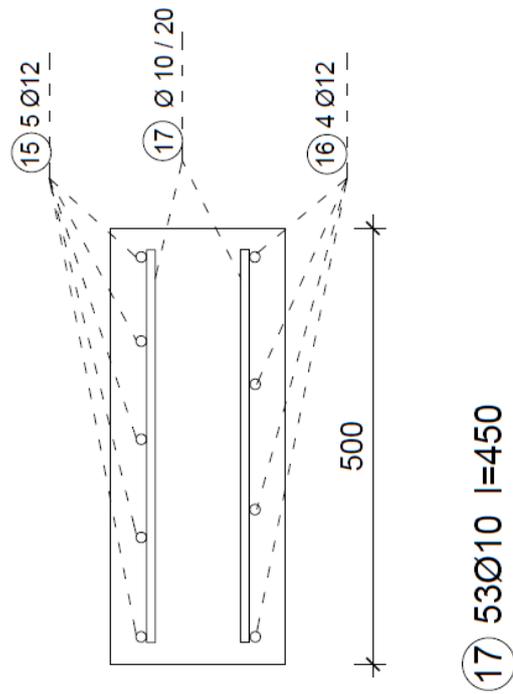
⁵ Der E-Modul wurde im Alter von 76 Tagen geprüft

⁶ Die Biegezug- und die Spaltzugfestigkeit wurden nur einmal je Betonage zum Alter von 79 Tagen geprüft

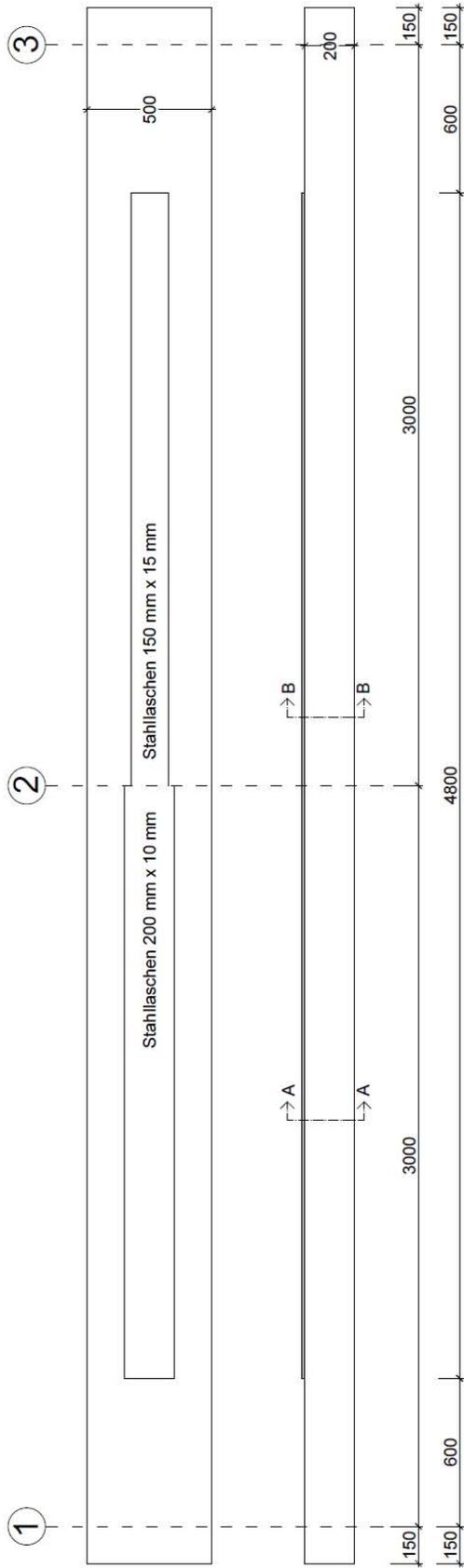
Bewehrungsführung der einbetonierten Bewehrung



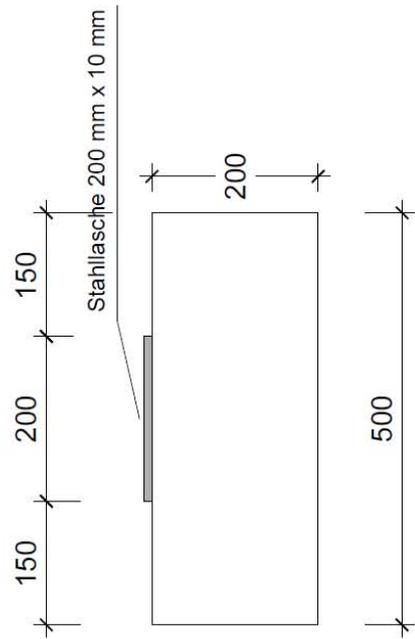
Schnitt A-A



Bewehrungsführung der geklebten Bewehrung



Schnitt A-A



Schnitt B-B

