



Masterarbeit

# **Sanierung und Verstärkung von Betonbrücken mit CFK-Lamellen**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplomingenieurs der  
Studienrichtung Bauingenieurwissenschaften

unter der Leitung von

O. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Viet Tue Nguyen

Institut für Betonbau

eingereicht an der Technischen Universität Graz

Fakultät für Bauingenieurwissenschaften

von

Christoph Riedl, BSc

Graz, Mai 2015

## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

.....

(Unterschrift)

## STATUARY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, .....

date

.....

(signature)

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Jahr 2015 am Ende meiner Studienzeit am Institut für Betonbau und am Institut für Bauwirtschaftslehre.

Mein Dank gilt meinen Betreuern Dipl.-Ing. BSc Johannes Oppeneder und Dr.-Ing. Duc Tung Nguyen, dem Institutsvorstand des Instituts für Betonbau Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Viet Tue Nguyen und dem Institutsvorstand des Instituts für Baubetrieb und Bauwirtschaft Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Heck. Sie haben mich im Zuge meiner Arbeit sehr unterstützt, und mir ein Umfeld geschaffen, das es mir ermöglichte, mich ganz auf meine Arbeit zu konzentrieren. Für die offene Aufnahme an den Instituten bedanke ich mich recht herzlich.

Den Firmen Sika Österreich GmbH, OAT - Bohr- und Fugentechnik Gesellschaft m. b. H., S&P Handels GmbH und S&P Clever Reinforcement GmbH, Asfinag Bau Management GmbH, LAP-Stuttgart und den verschiedenen Ansprechpersonen in den einzelnen Sparten der Firma STRABAG, bedanke ich mich für die fachliche und informelle Unterstützung.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Rieder von STRABAG. Durch seine Unterstützung bestärkte er meine Motivation. Er ermöglichte mir die Zugänge zu den einzelnen Firmen und deren Ansprechpartnern.

Nicht vergessen möchte ich meine Eltern und meine Schwester, sowie meine Freunde, die mich in meiner Studienzeit moralisch unterstützten.

(Ort), am (Datum)

\_\_\_\_\_  
(Unterschrift des Studenten)

## Kurzfassung

Tragwerksverstärkungen von Brücken stehen immer mehr im Vordergrund. Durch die Erhöhung der Nutzungsdauer, der Nutzungsänderungen in Verbindung mit der Materialalterung, der fehlerhaften Planung und Ausführung, muss die Tragfähigkeit der bestehenden Bauwerke erhöht werden.

Zur nachträglichen Verstärkung werden seit längerer Zeit Kohlenstofffaserlamellen angewendet und lösen somit andere Materialien, wie die Stahllaschen ab. Die Vorteile sind die hohen mechanischen Eigenschaften der CFK-Lamellen, wie zum Beispiel der Elastizitätsmodul mit bis zu 210.000 N/mm<sup>2</sup> und einer Zugfestigkeit bis 2.900 N/mm<sup>2</sup>, sowie einer leichten Handhabung wegen des geringen Gewichts der Lamellen.

Die Anwendung der Kohlenstofffaserlamellen als Zugverstärkung bei Betonbauteilen kann wie folgt durchgeführt werden:

- Oberflächige schlaffe Verklebung
- Eingeschlitzte schlaffe Verklebung
- Oberflächige vorgespannte Verklebung
- Eingeschlitzte vorgespannte Verklebung

Wesentlicher Vorteil der vorgespannten Verklebungen im Gegensatz zu den schlaffen Verklebungen ist die bessere Aktivierung der Kapazität der Lamellen. Hierdurch wird die Bauwerkeigenschaft sowohl im SLS als auch im ULS deutlich verstärkt.

Mit den Informationen der Materialien, den verschiedenen Herstellern und der Richtlinien und Normen, wie der EUROCODE 2, der DAfStb-Richtlinie und der ÖBV-Richtlinie "Nachträgliche Verstärkung von Betontragwerken mit geklebter Bewehrung", wird ein Bemessungskonzept für ein schlaffes und vorgespanntes System dargestellt.

Da die Verstärkung mit CFK- Lamellen im europäischen Markt rasch wächst, sind anschließend eine Ausschreibungsempfehlung und eine Beispielkalkulation angegeben.

## Abstract

Structural reinforcements of bridges are increasingly featured in the foreground. Through the increase of the useful life, usage changes associated with the aging of the materials, faulty planning and execution, the sustainability of existing buildings has to be increased.

Fibre-reinforced polymer (FRP) has been used for a long time for subsequent reinforcing and therefore other materials, like steel plates, have been superseded. The advantages are the high mechanical properties of the FRP strips, such as the modulus of elasticity of up to 210,000 N/mm<sup>2</sup> and a tensile strength up to 2,900 N/mm<sup>2</sup>, as well as easy handling due to the low weight of the strips.

The application of carbon fiber strips as tensile reinforcement in concrete structures can be carried out as follows:

- superficial limp bonding
- louvered limp bonding
- superficial prestressed bonding
- louvered prestressed bonding

An important advantage of the prestressed bonding in contrast to the limp bondings, is the better activation of the capacity of the strips. Thereby, the building property as well the SLS as the ULS is significantly increased.

With the information of materials from different manufacturers and the guidelines and standards , EUROCODE 2, the DAfStb guideline and OEBV guideline "Subsequent reinforcement of concrete structures with bonded reinforcement", a design concept for a limp and prestressed system is shown.

Due to the fast growth in the area of reinforcing with FRP strips in the European market, a tender recommendation and a sample calculation is attached.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>8</b>
1.1	Überblick und Motivation .....	8
<b>2</b>	<b>Verstärken von Betonbauteilen mit CFK-Lamellen</b>	<b>10</b>
2.1	Nicht vorgespannte Systeme.....	11
2.1.1	Oberflächlich aufgeklebte CFK-Lamellen .....	11
2.1.2	In Schlitze verklebte CFK-Lamellen.....	12
2.1.3	Verankerung für nicht vorgespannte Systeme .....	12
2.2	Vorgespannte Systeme .....	13
2.3	Verankerung für vorgespannte Systeme .....	13
2.3.1	Oberflächige Verklebung.....	13
2.3.2	Geschlitzte Verklebung .....	14
<b>3</b>	<b>Darstellung der Materialeigenschaften</b>	<b>16</b>
3.1	CFK - Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff .....	16
3.1.1	Vergleich.....	18
3.2	Untergrund - Beton.....	19
3.3	Klebstoff .....	20
3.3.1	Vergleich.....	21
3.4	Teilsicherheitsbeiwerte .....	21
3.5	Zulassung .....	22
<b>4</b>	<b>Darstellung der Sanierungs- und Verstärkungsmöglichkeiten mit CFK-Lamellen</b>	<b>23</b>
4.1	Arbeitsschritte und technische Anforderungen .....	24
4.1.1	Oberflächige nichtvorgespannte Verklebung .....	24
4.1.2	Oberflächige vorgespannte Verklebung.....	25
4.1.3	Geschlitzte nicht vorgespannte Verklebung.....	28
4.1.4	Eingeschlitzte vorgespannte Verklebung.....	29
4.2	Qualitätssicherung und Qualifikationen .....	31
<b>5</b>	<b>Bemessung von vorgespannten und nichtvorgespannten System</b>	<b>32</b>
5.1	Versagungsarten von Kohlenstofffaserlamellen.....	32
5.2	Nichtvorgespannte System ULS.....	33
5.3	Nichtvorgespannte System SLS .....	40
5.4	Vorgespannte Systeme ULS .....	43
5.5	Vorgespannte Systeme SLS .....	49
<b>6</b>	<b>Ausschreibung</b>	<b>52</b>
6.1	Ausschreibungsempfehlung nach ÖBV .....	52
<b>7</b>	<b>Kalkulation</b>	<b>57</b>
7.1	Aufwandswert .....	57
7.1.1	Einflüsse auf Einheitswert .....	57
7.2	Kalkulationswerte .....	58
7.2.1	Lohn- und Materialverteilung.....	58
7.2.2	Materialkosten.....	58
7.3	Beispiel Kalkulation .....	59
7.3.1	Angebots-Leistungsverzeichnis.....	59
7.3.2	Kalkulation .....	61

<b>8</b>	<b>Alternativen zur Kohlenstofflamelle</b>	<b>68</b>
8.1	Druckzonenverstärkung .....	68
8.1.1	Querschnittsergänzung .....	68
8.2	Zugzonenverstärkung .....	69
8.2.1	Verstärkung mit Stahllaschen.....	69
8.2.2	Bewehrungsaustausch bzw. -zugabe .....	70
8.2.3	Externe Spannglieder.....	71
<b>9</b>	<b>Conclusio</b>	<b>72</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>73</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>74</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>75</b>

## 1 Einleitung

### 1.1 Überblick und Motivation

Eine wesentliche Aufgabe in den kommenden Jahren ist es, die Brückentragwerke zu erhalten und diese an die ständig sich ändernden Anforderungen anzupassen. Durch einige Einflüsse, wie Verkehrslasterhöhungen, Setzungen, veränderte statische Systeme und Korrosion von Bewehrung, kann es in der Nutzungsdauer von Brücken dazu führen, dass die Tragsicherheit oder Gebrauchstauglichkeit nicht mehr gewährleistet wird. Auch bei einer nicht ordnungsgemäßen Ausführung oder einer falsch durchgeführten Bemessung können die geforderten Sicherheiten nicht eingehalten werden. Die Instandhaltung, Verstärkung und somit das Bauen im Bestand, ist ein wachsender Bereich der Baubranche.

Die Auswahl der Verstärkung soll einer ganzheitlichen Betrachtung der betroffenen Konstruktion erfolgen. Dabei ist nicht nur die erforderliche Tragfähigkeitssteigerung eines Bauteiles relevant, sondern auch eine geschwächte Dauerhaftigkeit, der Brandschutz oder die Gebrauchstauglichkeit zu berücksichtigen. Von Bedeutung sind die spätere Nutzung und auch die während der Verstärkungsarbeiten einwirkenden Belastungen. Zur nachträglichen Verstärkung stehen verschiedene Verfahren und Materialien zu Verfügung, wie zum Beispiel Stahllaschen oder die Aufbringung eines Betons zur Erhöhung des Querschnittes.

Für eine Betoninstandsetzung und Verstärkung von Betonbauteilen haben sich Kohlenstofflamellen (CFK-Lamellen) in den letzten 20 Jahren ausgezeichnet. Diese Art der Verstärkung zeichnet sich durch das geringe Eigengewicht und der leichten Verbauung aus. Die geklebte Bewehrung bietet unter anderem kurze Ausführungszeiten und geringe Baustelleneinrichtung. Ein weiterer Vorteil ist, dass das Anbringen der Verstärkung ohne einer weiteren Zerstörung des Betonbauteiles angebracht werden kann. Durch die geringen Bauteilabmessungen der Verstärkung wird die Bauhöhe und somit die mögliche Durchfahrtshöhe nicht beeinflusst.

Der CFK-Verbrauch in der Bauwirtschaft ist derzeit aufgrund des hohen Herstellungspreis gering, jedoch werden verschiedenste neue Anwendungsmöglichkeiten wie Sandwichbauweisen, Textilbeton, Bewehrungselemente und Vorspannlitzen in der Forschung untersucht und teilweise in Pilotprojekten umgesetzt. Für eine nachträgliche Bewehrungsergänzung hat sich in den letzten Jahren, die Verklebung mit CFK-Lamellen gegenüber der Verklebung mit Stahllaschen eindeutig durchgesetzt.

Die Materialvorteile sowie erste wirtschaftliche Überlegungen deuten, dass aufgrund der einfacheren Handhabung, die eingesparten Arbeitsstunden den teuren Materialpreis mehr als nur kompensieren.

Die Möglichkeiten der Anwendung, die Verfahren und die Materialien, sowie die Bemessungsansätze werden ständig erforscht und erweitert. Die meisten Länder in der EU haben bereits eigene Bemessungsrichtlinien für eine Verstärkung eines Betonbauteiles eingeführt. Diese Bauweise ist heute Stand der Technik. Durch die Weiterentwicklung der Bemessungssoftwares ist die Bemessung einfach und schnell realisierbar.



Bauaufsichtliche Zulassungen und Richtlinien für CFK Lamellen existieren in mehreren Ländern und regeln auch deren Einsatz und die Bemessung.

Das Ziel dieser Masterarbeit ist, die Möglichkeit einer Verstärkung mit zusätzlicher geklebten Bewehrung mit CFK-Lamellen einzusetzen. Im Mittelpunkt stehen die Materialien, die Ausführung, die Bemessung, sowie die Kalkulation. Mit dieser Arbeit soll der Einblick, als auch die sinnvolle Verwendungsmöglichkeit der CFK-Lamellen näher gebracht werden.

## 2 Verstärken von Betonbauteilen mit CFK-Lamellen

Bewehrungsergänzungen werden heute vorrangig durch Verklebungen mit Epoxidharz und Kohlenstofffaser am Bauwerk angebracht. Die CFK-Lamellen werden so verklebt, dass sie bei einer Einwirkung auf das Tragsystem auf Zug beansprucht werden. Die Kohlenstofflamellen erhöhen nachträglich die Tragfähigkeit des beanspruchten Bauteils. Durch vorgespannte Systeme kann auch die Gebrauchstauglichkeit des Brückensystems verbessert werden.

Bei der Einwirkung von Verkehrslasten übernimmt die nachträgliche Bauteilverstärkung die Funktion der im Beton vorhandenen Bewehrung. Wird die Zugfestigkeit des Betons überschritten, bilden sich im Beton Risse. Im Bereich dieser Risse übernimmt die CFK-Lamelle als Unterstützung für die Bewehrung die im Beton wirkenden Zugkräfte. Die entstehenden Zugkräfte nehmen vom Ende zur Mitte der Lamelle hin zu. In den Endbereichen der Verstärkung wird hauptsächlich die Zugkraft in diese eingeleitet. Deshalb wird dort der Klebeverbund besonders stark beansprucht. (Weber, 2013)

In den letzten Jahren wurden die Kohlenstofflamellen als Verstärkung des Querschnitts mehr und mehr an den Brückenbau herangezogen. Diese Verstärkungsmaßnahme hat sich in den letzten Jahrzehnten in der Sanierung von Tiefgaragen und Hochbauten sehr durchgesetzt.

Bei einer nachträglichen Bauteilverstärkung mit Kohlenstofflamellen sind zwei Arten bei der Ausführung zu unterscheiden. Das Verstärken von bestehenden Brückenbauwerken kann durch Aufkleben oder Einkleben in zuvor hergestellte Schlitze einer Lamelle erfolgen, wie in der Abbildung 2-1 dargestellt. Bei beiden Systemen ist eine Vorspannung der Lamelle möglich. Um die Vorspannkräfte direkt in den Bauteil einleiten zu können, werden Verankerungen für die Lamellen benötigt.

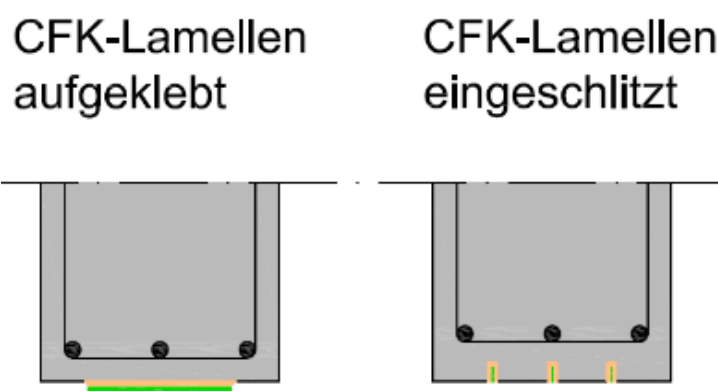


Abbildung 2-1: Aufgeklebte und in Schlitze geklebte Lamellen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> <http://www.ruhr-uni-bochum.de/baustoffe/mam/zilch.pdf>, Datum des Zugriffes: 10.12.2014

## 2.1 Nicht vorgespannte Systeme

Schon in den 1970er Jahren wurde das Verfahren der nachträglichen Bewehrungsergänzung durch das Aufkleben von Stahllaschen bei einer Halle erstmalig in der Schweiz angewandt.

Durch umfangreiche Forschungsarbeiten mit aufgeklebter Bewehrung konnte die Grundlage für ein Bemessungskonzept für eine an der Oberfläche aufgeklebte Bewehrung ermittelt werden.

### 2.1.1 Oberflächlich aufgeklebte CFK-Lamellen

Bei einer Verstärkung mit aufgeklebten CFK-Lamellen werden dünne Lamellen mit Dicken von 1,2 bis 2,5 mm mit einem Epoxidharzkleber an Biegebauteile mit keiner planmäßigen Normalkraft angewendet. Die Lamelle und der Betonbauteil wirken nach Aushärtung des Klebers als Verbundwerkstoff. In der Abbildung 2-2 ist ein Anwendungsbeispiel einer Brücke in Frohnleiten abgebildet.



Abbildung 2-2: Anwendungsbeispiel einer CFK verstärkten Brücke<sup>2</sup>

Diese Anwendung einer CFK-Lamelle wird meist nur bei Stahlbetonbauwerken herangezogen, also bei Hochbauten, Wohnungsbauten und nicht vorgespannten Brücken. Die Tragfähigkeit nach der Verstärkung darf laut Zulassungen, wie zum Beispiel der ÖBV, den doppelten Wert nicht überschreiten. Die Betongüte bei einer aufgeklebten Verstärkung liegt zwischen einer Güte von C12/15 und C45/55. Dazu muss der Beton mindestens einen Haftzugwert von 1,5 N/mm<sup>2</sup> besitzen. Die maximal zugelassene Lamellendehnung wird mit zirka 0,6% begrenzt.

<sup>2</sup> Firma STRABAG, Frohnleiten S35

### **2.1.2 In Schlitze verklebte CFK-Lamellen**

Kohlefaserverbundwerkstoffe können sehr effektiv durch eine Verklebung in Schlitze senkrecht zur Betonoberfläche angeordnet werden. Bei dieser Anordnung werden Lamellen in Dicken von 1 bis 2,5 mm im Bereich der Betondeckung verklebt. Diese Anwendung wird im Bereich von Stahl- und Spannbetonbauteilen angewendet. Es gibt keine Verstärkungsgradbeschränkung und keine Beschränkung des Haftzugwertes, da die Lamellen nicht auf der Oberfläche verklebt werden. Es muss eine Betongüte von mindestens C20/25 vorliegen und ist mit C45/55 nach oben hin begrenzt. Die maximal zugelassene Lamellendehnung beträgt zirka 0,8%.

Der Einbau einer eingeschlitzten Lamelle benötigt etwa gleich viel Arbeitszeit wie das Aufkleben an der Oberfläche. Die Lamellen sind bei der Anordnung in Schlitzen besser gegen Vandalismus oder mechanische Beschädigung geschützt, die Oberfläche wird nur minimal verändert.

Die schmalen CFK-Lamellen, die in Schlitze verklebt werden, unterscheiden sich gegenüber den oberflächlich geklebten Lamellen durch ein deutlich besseres Verbundverhalten zwischen Betonbauteil und der verklebten Lamelle, da die Lamelle mehr Angriffsfläche hat und besser ausgenutzt wird. Bei einer in Schlitze verklebte Lamelle ist es möglich, die volle Zugkraft über geringere Verbundlängen in den Beton zu übertragen. Das duktile Verhalten wird verbessert und die Gefahr des unangekündigten Sprödbruches ist nicht mehr gegeben. (Mihala)

### **2.1.3 Verankerung für nicht vorgespannte Systeme**

Bei nicht vorgespannten Systemen werden keine zusätzlichen Verankerungen zur Krafteinleitung in den Beton benötigt. Die Verankerungslänge ist vom Querschnitt und den mechanischen Eigenschaften der aufgeklebten Lamelle abhängig. Diese Länge soll ein Verbundversagen verhindern.

## 2.2 Vorgespannte Systeme

Durch Aufbringung einer Vorspannkraft kann die Kohlenstofflamelle besser genutzt werden. Eine Verstärkung ist entweder am Bauwerk im Verbund mit Epoxidharz oder mittels Spannsysteme als externe Vorspannung (Spannbeton) anzubringen.

Es kann neben einer Steigerung der Tragfähigkeit auch eine Erhöhung der Gebrauchstauglichkeit stattfinden.

Um die Vorspannkraft der Lamelle in den Beton einzuleiten, sind Verankerungen am Ende der Lamelle vorzusehen.

Ein großer Vorteil der vorgespannten Systeme ist, dass bei einer Bewehrungsergänzung die ständigen Lasten, wie Eigengewicht, aktiviert werden. Im Gegensatz zu nicht vorgespannten Systemen wirkt die Klebbewehrung nur für Ausbau- und Nutzlasten, welche nachträglich aufgebracht werden.

## 2.3 Verankerung für vorgespannte Systeme

Die Verankerung und der Formschluss der Lamelle haben einen großen Einfluss auf die Bemessung des verstärkten Bauteiles, da die Vorspannkraft direkt in den Beton eingeleitet wird. Es wird zwischen geklebten oder mechanischen Endverankerungen, welche über Reibung funktionieren, unterschieden.

Die derzeit am Markt befindlichen zugelassenen Endverankerungen werden ausschließlich für oberflächlich aufgeklebte Lamellen angewendet. Verankerungen für vorgespannte, eingeschlitzte Lamellen werden derzeit noch erforscht und in der Praxis noch nicht umgesetzt.

### 2.3.1 Oberflächige Verklebung

Bei oberflächlich geklebten Lamellen wird meist eine Verankerungsplatte auf beiden Seiten der Lamelle eingesetzt. An der feststehenden (fixen) Seite wird die Ankerplatte geklebt und mit Dübeln befestigt. Nach dem Vorspannen der Lamelle mit einer Hydraulikpresse wird an der Spannseite, wie auch auf der fixen Seite, die Verankerungsplatte befestigt. Somit wird die Vorspannkraft über den Klebstoff und der beiden Ankerplatten in den Beton dauerhaft eingeleitet. (S&P, 2010)

Verankerungsplatten werden von verschiedenen Anbietern gleich oder in ähnlicher Form ausgeführt, wie in der Abbildung 2-3 ersichtlich.



Abbildung 2-3: Verankerungsplatte der Firma S&P<sup>3</sup>

Ein weiteres Verankerungssystem für vorgespannte Lamellen ist von der Firma Stresshead. Es weist ein ähnliches Verankerungssystem auf. Der Unterschied liegt darin, dass die Lamelle mit einer Vorrichtung und nicht mit einer Verankerungsplatte befestigt wird. In der Abbildung 2-4 wird dies demonstriert.

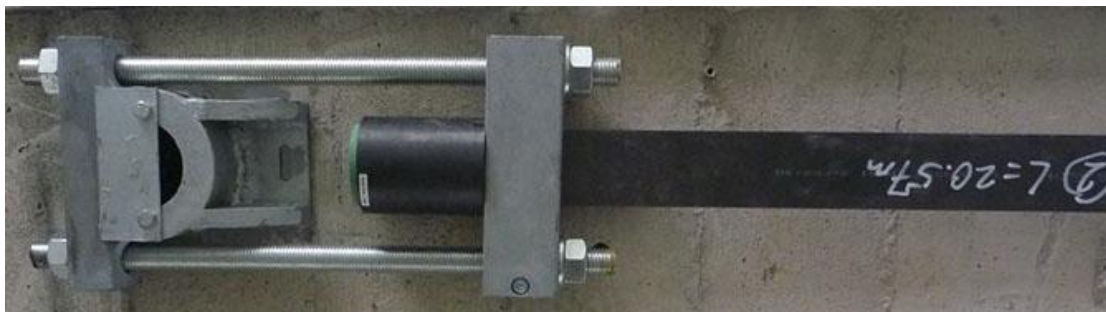


Abbildung 2-4: Verankerungssystem Stresshead<sup>4</sup>

### 2.3.2 Geschlitzte Verklebung

Bei einem Verankerungssystem für geschlitzte eingeklebte Lamellen wird zwischen temporären Anker für den Spannvorgang und Permanentankern für die dauerhafte Verankerung der Vorspannkraft unterschieden.

Die permanente Verankerung besteht aus einer zweiteiligen, runden, scheibenförmigen Ankerhülse, die eine keilförmige Ausnehmung besitzt, siehe Abbildung 2-5. Die Keile werden mit zwei Aluminiumplättchen an ein Ende der Kohlefaserlamelle geklebt. Diese Keile bauen Spreizkräfte bei einer Vorspannung auf, die über die zweiteilige Hülse an den Beton weitergeleitet werden. Die Verklebung der Lamelle mit den Plättchen ist insofern wichtig, da bei der ersten Vorspannung die Spreizkräfte nicht groß genug sind, um die Lamelle in der Verankerung zu halten. (Mihala)

<sup>3</sup> [http://www.tecnokraft.it/beta/Stahl\\_beton.html](http://www.tecnokraft.it/beta/Stahl_beton.html), Datum des Zugriffs: 18.11.2014

<sup>4</sup> <http://www.stresshead.ch/eigenschaften.html>, Datum des Zugriffs: 11.03.2015

Abbildung 2-5: Permanenter Anker<sup>5</sup>

Der Temporäranker besteht aus zwei Teilen. Ein Teil besitzt eine Hülse mit einer keilförmigen Ausnehmung, wie der permanente Anker. Der zweite Bestandteil ist ein Adapter, der die Vorspannung mit Hilfe einer hydraulischen Presse in die Lamelle einbringt. Dieser Adapter wird auf einer montierten Stahlplatte gezogen und im Anschluss verankert. Die Übertragung der Vorspannkraft vom Adapter zur Ankerhülse erfolgt über Formschluss. (Mihala)

---

<sup>5</sup> Mihala, R.: Bauwerksverstärkung mit eingeschlitzten CFK-Lamellen in Beton, S. 5

### 3 Darstellung der Materialeigenschaften

Kohlenstoffverstärkungssysteme bestehen aus mehreren Hauptkomponenten. Das sind zum einen die faserverstärkte Kunststofflamelle und zum anderen die Kunststoffmatrix, auf Epoxidharzbasis. Die Fasern bestimmen die globalen, mechanischen Eigenschaften, wobei die Kunststoffmatrix die einzelnen Fasern formstabil zusammenhält.

Weiters wird ein Kleber für die Befestigung der Lamelle am Betonuntergrund benötigt.

In diesem Kapitel werden die Materialeigenschaften, bzw. Materialanforderungen von Kleber und Kohlenstofflamellen erläutert. Für alle Materialien werden die allgemeinen Eigenschaften und Kennwerte von zwei verschiedenen Anbietern für die Bemessung angeführt. Die Produkte sind von der Firma Sika und der Firma Sto.

#### 3.1 CFK - Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff

Im Bauwesen werden Kohlenstofffasern für die Bauteilverstärkung als Lamellen verwendet, da es eine einfache und wirtschaftliche Lösung ist. Diese Faserverbundwerkstoffe werden durch das Pultrusionsverfahren hergestellt. Dabei durchlaufen die Kohlenstofffasern ein Epoxidharzbad, welches die Kunststoffmatrix bildet. Anschließend werden sie durch eine Form gezogen und thermisch ausgehärtet. Durch dieses Verfahren können beliebig lange Lamellen hergestellt werden, welche meist in Rollen auf die Baustelle geliefert werden.

Eine große Besonderheit von Faserverbundwerkstoffen ist, dass sie bis zum Bruch ein nahezu linearelastisches Verhalten aufweisen. Die Arbeitslinien eines Faserverbundwerkstoffes, eines Betons und eines Betonstahls sind in Abbildung 3-1 gegenübergestellt.

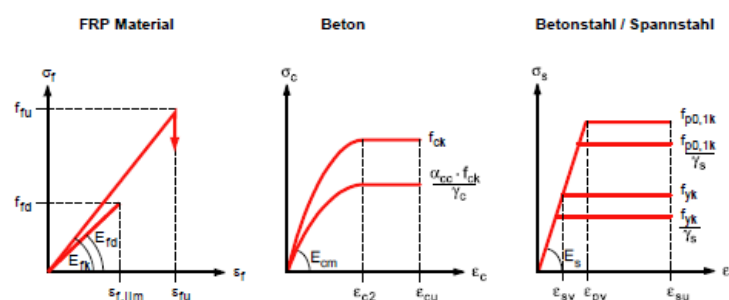


Abbildung 3-1: Rechnerische Spannungsdehnungslinien<sup>6</sup>

Die Eigenschaften der CFK-Lamelle sind parallel zur Faser ausschließlich von der Faser abhängig, wobei in Querrichtung der Kleber maßgebend ist. Dadurch besitzt die Lamelle eine hohe Belastbarkeit in Faserlängsrichtung. (Raupach M., 2008)

<sup>6</sup> Firma bow ingenieure GmbH - "Bemessungsgrundlage zur Biegezug- und Querkraftverstärkung mit FRP - Materialien", S.14



Der Elastizitätsmodul ist vom Fasergehalt und der Orientierung abhängig und liegt zwischen 150.000 und 210.000 N/mm<sup>2</sup> in Faserlängsrichtung. Die Bruchgrenze für eine faserparallele Beanspruchung beträgt für eine CFK-Lamelle, je nach Hersteller und Ausführung, 2000 bis 3100 N/mm<sup>2</sup>. Normal zur Faserrichtung ist die Belastbarkeit wesentlich geringer und somit hauptsächlich von der Matrix und dem Verbund zur Faser abhängig. CFK-Materialien haben normal zur Faserrichtung eine Festigkeit von ca. 5% der Längszugfestigkeit. (Mehlhorn, 2010)

Der Vorteil von diesem Verstärkungssystem ist das geringe Eigengewicht. Bei der Montage besteht eine leichte Handhabbarkeit und Verarbeitbarkeit der Lamellen. Bei einem Faseranteil von rund 70% besitzen die Kohlenstofflamellen eine 4-6 fache Festigkeit des Betonstahls. Sie weisen einen hohen Elastizitätsmodul auf und es besteht keine Gefahr von Korrosion. Kohlenstofflamellen haben auch ein ausgezeichnetes Relaxations- und Dauerschwingverhalten, weshalb sie sich hervorragend zum Vorspannen eignen. Ihre Erweichungstemperatur beträgt rund 100°C bevor die Festigkeiten und Steifigkeiten sinken. (Borchert, 2009)



Abbildung 3-2: Kohlenstofflamelle<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> [http://www.sto.com/webdocs/0000/images/PRODPIC\\_250px/21267.jpg](http://www.sto.com/webdocs/0000/images/PRODPIC_250px/21267.jpg), Datum des Zugriffs: 20.11.2014

### 3.1.1 Vergleich

In der Tabelle 3-1 werden je zwei verschiedene Lamellen von der Firma Sika und der Firma S&P angeführt. Von jeder Firma werden eine niedrigmodulige und eine hochmodulige Kohlenstofflamelle für den Vergleich herangezogen. Die angegebenen, mechanischen Eigenschaften sind laut technischem Merkblatt gültig und beziehen sich auf die Faserlängsrichtung.

Diese Lamellen sind mit einer Breite von 15 bis 120 mm und einer Dicke von 1,2 bis 2,5 mm erhältlich. Alle diese Lamellen besitzen eine Dichte von  $1,6 \text{ g/cm}^3$  mit einem Fasergehalt von größer als 68%.

Tabelle 3-1: Mechanische Eigenschaften<sup>8</sup>

	Sika CarboDur S	Sika CarboDur H	Sto S&P CFK Lamelle NM	Sto S&P CFK Lamelle HM
mittlerer Elastizitätsmodul $E_L$	165.000 N/mm <sup>2</sup>	210.000 N/mm <sup>2</sup>	> 160.000 N/mm <sup>2</sup>	> 210.000 N/mm <sup>2</sup>
Mindestzugfestigkeit $f_{t,u,k}$	> 2.800 N/mm <sup>2</sup>	> 2.900 N/mm <sup>2</sup>	> 2.350 N/mm <sup>2</sup>	> 2.500 N/mm <sup>2</sup>
Bruchdehnung $\epsilon_{crac}$	> 1,7 %	> 1,35 %	> 1,5 %	> 1,3 %
Grenzdehnung $\epsilon_{grenz}$	< 0,85 %	< 0,65 %	< 0,65 %	< 0,60 %
Gebrauchstemperatur	< 50 °C	< 50 °C	< 50 °C	< 50 °C
thermische Beständigkeit	> 150 °C	> 150 °C	> 150 °C	> 150 °C

<sup>8</sup> Technische Datenblätter, Firma S&P und Firma Sika

### 3.2 Untergrund - Beton

Der Betonuntergrund muss gemäß Planung tragfähig, frei von trennend wirkenden, arteigenen oder artfremden Substanzen und von korrosionsfördernden Bestandteilen sein. Minderfeste Schichten und Anreicherungen sind mittels geeigneter mechanischer Verfahren, wie zum Beispiel Schleifen oder Strahlen mit festen Strahlmitteln oder Hochdruckwasserstrahlen, zu entfernen und vorzubereiten. Ziel dabei ist es, das Korngerüst freizulegen und die dafür erforderliche Abreißfestigkeit zu erzielen. Bei einer Untergrundrauigkeit von 0,5 - 1,0 mm, die keine optimale Rauigkeit darstellt, muss eine Ausgleichsschicht mit einer Spachtelung oder eines Ausgleichmörtels aufgetragen werden. (S&P)

Nach der Untergrundvorbereitung ist die Festigkeit bzw. Abreißfestigkeit der gereinigten Betonoberfläche mit einem Abreißversuch nachzuweisen und festzustellen. Bei Kohlenstofflamellen ist eine Mindestabreißfestigkeit von 1,5 N/mm<sup>2</sup> erforderlich. Wenn dieser Mindestwert nicht erreicht wird, darf keine Verklebung stattfinden. ((ÖBV), 2014)

Temperatur, Feuchtigkeit und der Zustand der zu klebenden Betonoberfläche sind Umgebungsbedingungen, die für das Erhitzen des Klebers eine wichtige Rolle spielen. (Borchert, 2009)

Die Restfeuchte vom Beton darf maximal 4% betragen. Sie ist abhängig von der Betonklasse des bestehenden Bauteils und wird mit dem Gewichtsprozentanteil angegeben. Die Mindestuntergrundtemperatur sollte größer als +8°C, die Betonoberflächentemperatur muss mindestens +3°C betragen. ((ÖBV), 2014)

### 3.3 Klebstoff

Für die Verklebung zwischen den Kohlenstofflamellen und dem Beton wird hauptsächlich ein Klebstoffsystem auf Epoxidharzbasis angewendet. Diese kalthärtenden Klebstoffe sind Zweikomponentenkleber aus einem Epoxidharz und einem Härter, der zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften mit Quarzsand verfüllt wird. Dieses Klebstoffsystem ermöglicht durch eine gute Misch- und Verarbeitbarkeit eine In-Situ-Anwendung.

Zu den allgemeinen Eigenschaften des Epoxidharzklebers zählt ein guter Verbund zwischen dem Betonuntergrund und dem zu klebenden Kohlenstoffwerkstoffes. Die Klebeschicht weist eine hohe Druck-, Zugfestigkeit, sowie eine gute Härte, Abriebfestigkeit, hohe Haftfestigkeit und Dimensionsfestigkeit auf. Durch diesen Kleber besteht eine gute Witterungs- und UV - Beständigkeit und eine geringe Schlagempfindlichkeit. Epoxidharz ist gut beständig gegen verdünnte Säuren und Laugen, Benzin, Mineralöle, Fette und Kohlenwasserstoffe, aber auch gegenüber biologische Einflüsse, wie Schimmelpilze, Bodenbakterien und Insekten. Nicht beständig ist er jedoch gegen konzentrierte Säuren und Laugen, sowie organische Lösungsmittel wie Aceton und Schwefelkohlenstoff. Für den Brandschutz ist Epoxidharz ausgezeichnet geeignet, da dieser schwer entzündlich ist. (Raupach M., 2008)

Kleber aus Epoxidharz besitzen einen mittleren Elastizitätsmodul von 5000 bis 15000 N/mm<sup>2</sup> bei einer Dichte zwischen 1,60 und 1,80 g/cm<sup>3</sup>. Der Mindestwert der charakteristischen Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit wird in der Tabelle 3-2 allgemein für Epoxidharz angeführt. Diese Eigenschaften verringern sich erst bei einer Glasübergangstemperatur von rund 60°C, da Epoxidharz sehr wärmebeständig ist. (Mehlhorn, 2010)

Tabelle 3-2: Materialkennwerte für Klebstoffe<sup>9</sup>

Charakteristische Biegezugfestigkeit	$f_{k,t,k} \geq 15 \text{ N/mm}^2$
Charakteristische Druckfestigkeit	$F_{k,c,k} \geq 60 \text{ N/mm}^2$
Mittlerer Elastizitätsmodul	$E_{k,m} = 5-15 \text{ kN/mm}^2$ für Lamellenklebstoffe $E_{k,m} = 2-19 \text{ kN/mm}^2$ für Mattenklebstoffe
Glasübergangstemperatur	$T_G \geq 60^\circ\text{C}$
Schwinden	< 0,1 %

<sup>9</sup> MEHLHORN, G., Handbuch Brücken, S. 996

### 3.3.1 Vergleich

In der Tabelle 3-3 werden zwei verschiedene Klebstoffe auf Epoxidharzbasis von der Firma Sika und der Firma S&P angeführt. Die angegebenen mechanischen Eigenschaften sind laut technischem Merkblatt nach der vorgegebenen Aushärtungszeit erreicht.

Tabelle 3-3: Mechanische Eigenschaften der Klebstoffe<sup>10</sup>

	Sika Dur-30	StoPox SK 41
mittlerer Elastizitätsmodul $E_{K,m}$	11.200 N/mm <sup>2</sup>	7.100 N/mm <sup>2</sup>
Druckfestigkeit $f_{K,c,k}$	70 - 80 N/mm <sup>2</sup>	70 N/mm <sup>2</sup>
Zugfestigkeit $f_{K,t,k}$	24 - 27 N/mm <sup>2</sup>	26 N/mm <sup>2</sup>
Scherfestigkeit $\tau$	14 - 17 N/mm <sup>2</sup>	16 N/mm <sup>2</sup>
Haftzugfestigkeit	4 N/mm <sup>2</sup>	3 N/mm <sup>2</sup>
Schwindverhalten	0,04 %	keine Angabe
Glasumwandlungstemperatur	62 °C	60 °C
Gebrauchstemperatur	45 °C	45 °C

### 3.4 Teilsicherheitsbeiwerte

Die Teilsicherheitsbeiwerte für die verschiedenen Einwirkungen sind gemäß EUROCODE 0 anzusetzen. Die Teilsicherheitsbeiwerte für den Widerstand sind für Beton, Betonstahl und Spannstahl aus dem EUROCODE 1 zu entnehmen. Der Teilsicherheitsbeiwert bei CFK-Lamellen beträgt 1,5. ((ÖBV), 2014)

<sup>10</sup> Technische Datenblätter, Firma S&P und Firma Sika

### 3.5 Zulassung

In mehreren Ländern werden derzeit die Bemessung, die Ausführung und die zu verwendenden Materialien durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen geregelt.

Mit der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung ist die Verwendbarkeit, bzw. die Anwendbarkeit der verstärkenden Produkte im Sinne der Landesbauordnung, nachgewiesen. Die Zulassungen beruhen auf Stand der Technik der Produkte und deren Hersteller. Es werden die Eigenschaften und die Zusammensetzung der einzelnen Produkte zur Verstärkung angegeben.

Diese Zulassung erstreckt sich auf vorgefertigte Kohlenstofflamellen und deren Verwendung für die Verstärkung der Stahlbetonbauteile. Weiters werden die Umgebungsbedingungen für den Beton und die Produkte angeführt.

Die Angaben über die Herstellung, die Verpackung, den Transport, der Lagerung und der Kennzeichnung werden in der Zulassung festgelegt. Die einzelnen Punkte müssen laut der allgemeinen, bauaufsichtlichen Zulassung angegeben und berücksichtigt werden.

Die Zulassungen werden stets mit den Produkten verändert. In Deutschland soll in nächster Zeit die Bemessung, sowie große Teile der Verarbeitung einer geklebten Bewehrung in eine eigene Norm umgewandelt werden. Es werden grundsätzlich nur mehr die Kennwerte der Komponenten der Verstärkung angegeben.

## **4 Darstellung der Sanierungs- und Verstärkungsmöglichkeiten mit CFK-Lamellen**

Es werden die Arbeitsschritte und die technischen Anforderungen für ein nicht vorgespanntes und ein vorgespanntes System angeführt. Bei beiden sind zwei unterschiedliche Ausführungen zu betrachten. Einerseits wird die Verstärkungslamelle auf die Oberfläche des Betons verklebt und andererseits in eingeschnittene Schlitze.

Die genauen Arbeitsschritte für das Anbringen einer Lamelle ist baustellenabhängig, da die Umgebungseinflüsse, wie zum Beispiel die Höhe, die Länge der Brücke und die Ausnutzung während des Verstärkungsablaufes ausschlaggebend sind. Bei einer geringen Betondeckung ist bei beiden Systemen ein Auftrag mit Spritzbeton notwendig, damit der zulässige Wert erreicht wird.

Es ist darauf zu achten die Verarbeitungstemperaturen während der Verstärkung einzuhalten. Die Untergrenze der Lufttemperatur liegt bei +10 °C und die Obergrenze bei +30 °C. Die Untergrundtemperatur darf +8 °C nicht unterschreiten und +30 °C nicht überschreiten. Diese Temperaturen sind maßgebend für die Aushärtung des Klebers. (S&P)

Qualifikationen der Arbeiter und der Führungspersonen sind aus dem Kapitel 4.6 zu entnehmen. Dieses Wissen über nachträgliche verklebte Bewehrung ist für jedes System zu voraussetzen.

## 4.1 Arbeitsschritte und technische Anforderungen

### 4.1.1 Oberflächige nichtvorgespannte Verklebung

Bei einer Verklebung einer CFK-Lamelle muss mindestens eine Betonfestigkeitsklasse von C12/15 herrschen. Die Betondeckung im Bereich der Klebefläche muss mindestens 10 mm betragen. Die allgemeinen Eigenschaften und Anforderungen des Untergrundes sind in Kapitel 3.2 zu entnehmen.

Für die Vorbereitung der Lamellen zur Verklebung am Betonuntergrund sind verschiedene Arbeitsschritte vorgesehen. Kohlenstofflamellen, die auf Rollen auf die Baustelle geliefert werden, sind vor der Reinigung plangemäß abzuschneiden. Wenn die Lamellen nicht vorangeschliffen sind, sollten sie an der zu verklebenden Fläche angeschliffen werden, um eine bessere Haftung zu gewährleisten. Die Reinigung der Lamellen ist vor der Verklebung vorzusehen, um Verunreinigungen und auch Kohlenstoffstaub zu entfernen. Diese erfolgt mit einem entfettenden, schnellverflüchtigen Lösungsmittel. ((ÖBV), 2014) (S&P)

Bei der Verklebung sollte der Klebstoff sowohl auf den Betonuntergrund als auch auf die Lamelle aufgetragen werden. Danach wird der Kleber dachförmig auf die gereinigte Oberfläche der Lamelle, mit einer Dicke von ca. 2 mm, aufgetragen. Die maximale Dicke des Klebers darf einen Wert von 5mm nicht überschreiten. Dies geschieht mit einer Spachtel oder mit einer vorgefertigten Vorrichtung, wie in Abbildung 4-1 ersichtlich. Am Anfang wird die Lamelle mit leichtem Druck an die vorbereitete Betonoberfläche gedrückt. Anschließend wird diese mit einer Schiene oder einem Hartgummiroller gleichmäßig angepresst um den Verbund mit dem Beton herzustellen. Der Kleber sollte gleichmäßig aus der Fuge quellen. Dieser ist im nicht ausgehärteten Zustand zu entfernen. Es dürfen maximal zwei übereinanderliegende Lamellen angebracht und in der Bemessung berücksichtigt werden. Während der Klebearbeiten und der Aushärtung des Klebers sollten ca. 2 Tage lang Erschütterungen vermieden werden. Nach der Aushärtungsphase des Klebers werden die Lamellen abgeklopft um Hohlstellen zwischen Beton und Lamelle auszuschließen. ((ÖBV), 2014)(S&P)



Abbildung 4-1: Vorrichtung für Kleber<sup>11</sup>

<sup>11</sup> Firma Strabag, Frohnleiten S35



In Abhängigkeit von den Umwelteinflüssen, wie Sonneneinstrahlung, mechanische oder chemische Einflüsse und Feuchtigkeit, können Schutzschichten aufgetragen werden. Die Maßnahmen und Einflüsse sind bei der Planung der Verstärkung einzubeziehen.

Kreuzungspunkte sind wegen der geringen Dicke der Lamellen problemlos möglich, siehe Abbildung 4-2. Diese Verklebungsart ist bei größeren Tragwerken und Belastungen oft vorzusehen.



Abbildung 4-2: Oberflächlich verklebte Kohlenstofflamellen<sup>12</sup>

#### 4.1.2 Oberflächige vorgespannte Verklebung

Bei einer Verklebung einer CFK-Lamelle bei einem vorgespannten System muss eine Betondruckfestigkeit von mindestens  $30\text{N/mm}^2$  vorliegen, damit die Vorspannung in den Bauteil eingeleitet werden kann. Die Betondeckung im Bereich der Klebefläche muss mindestens 10 mm betragen. Die allgemeinen Eigenschaften und Anforderungen des Untergrundes sind aus Kapitel 3.2 zu entnehmen.

Die Verankerungsplatten müssen parallel und zentrisch zur CFK-Lamelle vermessen werden. Danach werden die Klemmschuhe auf der Ankerplatte (siehe Abbildung 4-3) eingeschoben, ausgerichtet und befestigt, wobei auf die Fix- und Spannseite zu achten ist. (S&P, 2010)

---

<sup>12</sup> <http://itbgary.at/wp-content/gallery/clk-lamellen/CFK-Lamellen-2.png>, Datum des Zugriffs: 18.11.2014



Abbildung 4-3: Klemmschuh eines vorgespannten Systems<sup>13</sup>

Wenn beide Seiten der Klemmschuhe montiert sind, wird die Länge der Lamelle bestimmt und vorbereitet. Die Vorbereitung und das Reinigen der Lamelle erfolgt gleich wie beim nicht vorgespannten System. Danach wird der Kleber dachförmig auf die gereinigte und entfettete Lamelle aufgebracht und auf den vorbereiteten und gereinigten Untergrund gepresst. Bei der Aufbringung des Klebers ist darauf zu achten, dass die Enden beidseitig kleberfrei sind. Die Klemmschuhe werden geschlossen und angezogen. Die gereinigten Ankerplatten werden auf ihre Position geklebt und im Bauteil verankert. (S&P, 2010)

Die Montage der Zylinderhalterung und des Zylinders werden auf den Ankerplatten der Spannseite montiert, wie in Abbildung 4-4 ersichtlich. Nachdem der Zylinder angeschlossen wurde, kann mit dem Vorspannen begonnen werden. Zuerst wird eine Grundspannung aufgebracht, bis die Lamelle gestreckt ist. Die Vorspannkraft wird mittels Distanzschrauben fixiert und der Zylinder entnommen. (S&P, 2010)

In Abbildung 4-5 ist das gesamte Spannsystem von der Firma S&P abgebildet.

---

<sup>13</sup> S&P: Vorgespannte S&P Lamellen CFK - Manual, S.11



Abbildung 4-4: Montage des Zylinderhalterung mit dem Zylinders<sup>14</sup>

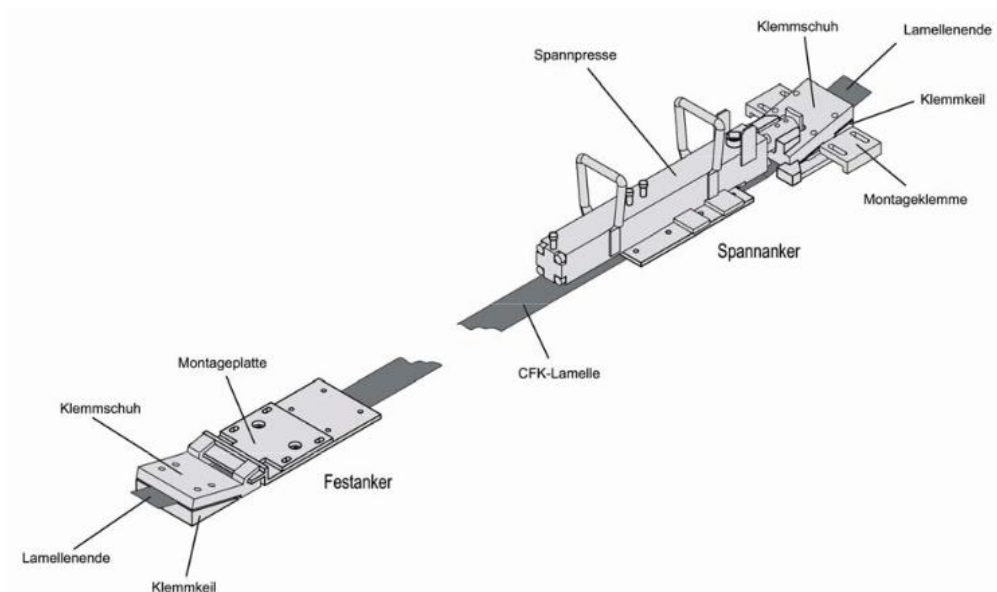


Abbildung 4-5: Vorgespannte Lamelle - fixierte Vorspannkraft<sup>15</sup>

Bei der Demontage wird auf beiden Seiten der Zylinder wieder eingesetzt und soweit gespannt, bis sich die Distanzschrauben lösen. Weiters wird der Klemmschuh entfernt. (S&P, 2010)

<sup>14</sup> S&P: Vorgespannte S&P Lamellen CFK - Manual, S.16

<sup>15</sup> S&P: Verstärkung mit vorgespannten S&P CFK-Lamellen, S.30-31

### 4.1.3 Geschlitzte nicht vorgespannte Verklebung

Bei einer schlaffen Verklebung in Schlitzen mit CFK-Lamellen muss mindestens eine Betonfestigkeitsklasse C12/15 herrschen. Bei diesem Verfahren werden die Kohlenstofflamellen innerhalb der Betondeckung in geschnittene Schlitze eingeklebt. Die Betondeckung im Bereich der Klebefläche muss daher mindestens 35 mm betragen. Im Gegensatz zur oberflächlich geklebten Lamelle wird bei dieser Ausführung die doppelte Fläche der Lamelle im Bauteil verklebt, wie in Abbildung 4-6 ersichtlich. (S&P)

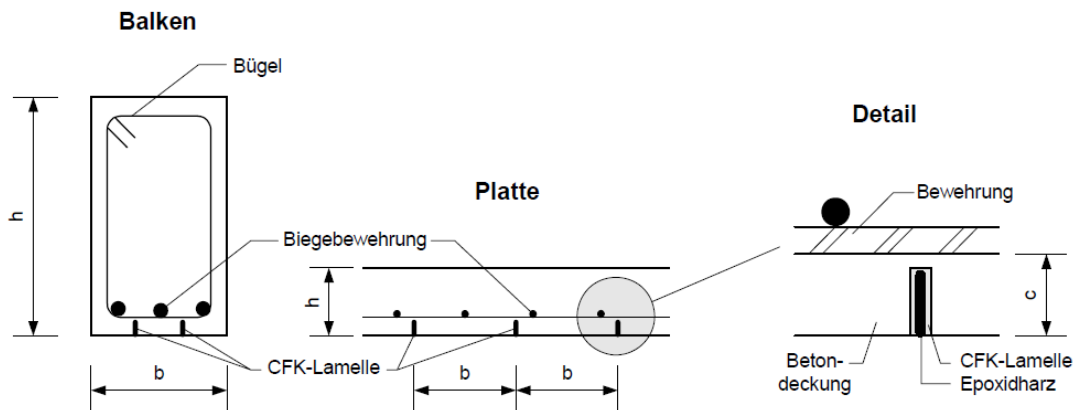


Abbildung 4-6: Bauteilverstärkung mit einer eingeschlitzten Kohlenstofflamelle<sup>16</sup>

Die Schlitze werden senkrecht in das Betonbauteil geschnitten und sind 4-5 mm breit und 20-30 mm tief. Die Lamellen sollten Breiten von 10-25 mm und Dicken von 1-3 mm nicht unter- bzw. überschreiten. Die Schlitze müssen staubfrei und frei von losen Teilen sein. (S&P)

Verunreinigungen und Kohlestaub werden von den Lamellen entfernt. Der Kleber wird mittels Spachtel oder maschinell in die Schlitze eingebracht. Die gereinigte und entfettete Kohlenstofflamelle wird hochkant in den Schlitz gedrückt. Der überflüssige Kleber wird abgezogen, damit ein ebener Abschluss entsteht. (S&P)

<sup>16</sup> Mihala, R.: Bauwerksverstärkung mit eingeschlitzten CFK-Lamellen im Beton, S. 3

#### 4.1.4 Eingeschlitzte vorgespannte Verklebung

Mit einer Verklebung einer CFK-Lamelle bei einem vorgespannten System muss auch für ein geschlitztes System eine Betondruckfestigkeit von mindestens  $30\text{N/mm}^2$  vorliegen, damit die Krafteinleitung für die Vorspannung übertragen werden kann. Bei diesem Verfahren wird die Kohlenstofflamelle innerhalb der Betondeckung in einen geschnittenen Schlitz eingeklebt. Die Betondeckung im Bereich der Klebefläche muss daher mindestens  $35\text{ mm}$  betragen. Im Gegensatz zur oberflächlich geklebten Lamelle wird bei dieser Ausführung die doppelte Fläche der Lamelle im Bauteil verklebt. (S&P)

Die Ausführung dieser vorgespannten Systeme wird noch erforscht und in der Praxis noch nicht umgesetzt. Ein Ablauf von einem vorgespannten System wird trotzdem erläutert.

Der Schlitz wird senkrecht in das Betonbauteil geschnitten und beträgt je nach Lamellengröße  $4\text{-}5\text{ mm}$  in der Breite und  $20\text{-}30\text{ mm}$  in der Tiefe. Die Lamelle sollte Breiten von  $10\text{-}25\text{ mm}$  und Dicken von  $1\text{-}3\text{ mm}$  nicht unter- bzw. überschreiten. Schlitz sind staubfrei und frei von losen Teilen vorzubereiten. Die Vertiefungen für den permanenten Anker werden mittels Kernbohrung hergestellt, siehe Abbildung 4-7. Dieser Anker wird nach der Herstellung der Vertiefung eingesetzt. Auf der gegenüberliegenden Seite ist eine Ausfräsung für den Spannvorgang des temporären Ankers vorzusehen. (Mihala)

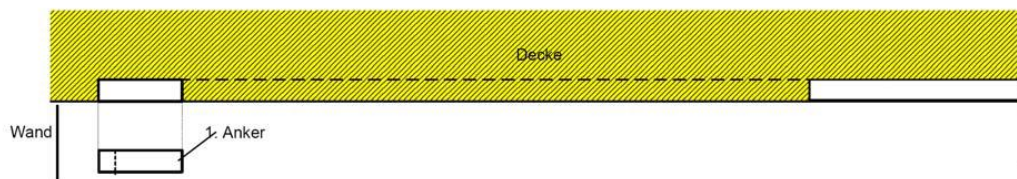


Abbildung 4-7: 1. Arbeitsschritt bei eingeschlitzten Lamellen<sup>17</sup>

Mit einer Spachtel oder einer maschinellen Spritze bringt man den Kleber in den Schlitz ein. Die gereinigte Lamelle wird mit den Aluminiumplättchen in beide Anker eingeklebt und danach in den Schlitz gedrückt (Abbildung 4-8). Auf der Spannseite wird eine Metallplatte montiert, wo der temporäre Anker aufliegt.

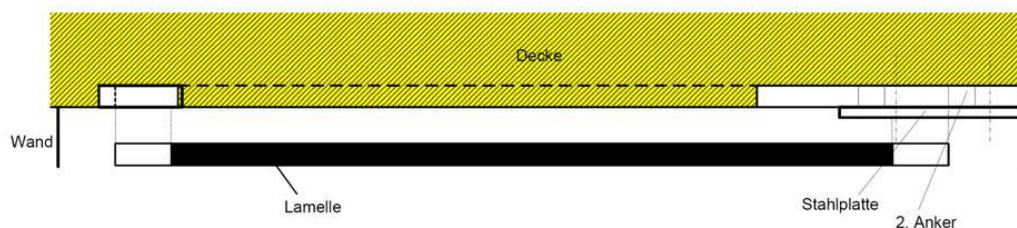


Abbildung 4-8: 2. Arbeitsschritt bei eingeschlitzten Lamellen<sup>18</sup>

<sup>17</sup> Mihala, R.: Bauwerksverstärkung mit eingeschlitzten CFK-Lamellen in Beton, S. 6

Nach der Montage der hydraulischen Presse setzt man den Adapter als Verbindung zwischen der Presse und dem Anker an. Ist die Vorspannkraft in die Lamelle eingebracht, wird die bewegliche Ankerhülse mit einem Bolzen im Betonbauteil gesichert (Abbildung 4-9). Bei der Sicherstellung der Verankerung wird die Presse entfernt und die Stirnseiten vermörtelt. (Mihala)

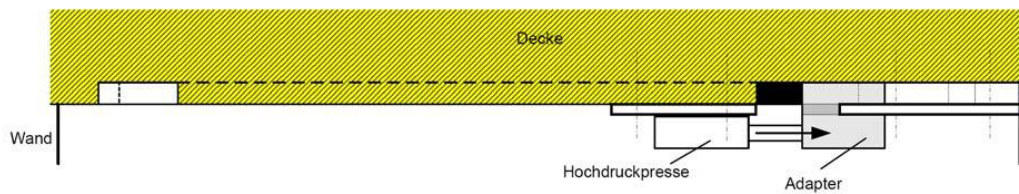


Abbildung 4-9: 3. Arbeitsschritt bei eingeschlitzte Lamellen<sup>19</sup>

Nach der Aushärtung des Mörtels und des Klebers kann der Bolzen wieder entfernt werden und die gesamte Vorspannkraft wird durch die Ankerhülse über Stirndruck in das verstärkende Bauteil übertragen. (Mihala)

<sup>18</sup> Mihala, R.: Bauwerksverstärkung mit eingeschlitzten CFK-Lamellen in Beton, S. 6

<sup>19</sup> Mihala, R.: Bauwerksverstärkung mit eingeschlitzten CFK-Lamellen in Beton, S. 6

## 4.2 Qualitätssicherung und Qualifikationen

Ziel einer Qualitätssicherung bei nachträglichen Verstärkungen mit einer geklebten Bewehrung ist das Erreichen der erhöhten Eigenschaften und Parameter des Bauwerks. Zu Überprüfen sind Hohlstellen, Ebenflächigkeit und der Verklebungserfolg mittels Haftzugversuchs.

Da die Verklebung von zusätzlicher Bewehrung mit Kohlefaserlamellen vergleichbar mit einem Eingriff in die Standsicherheit eines Bauwerks ist, sind für diese verantwortungsvollen Arbeiten nur Firmen geeignet, die folgende Qualifikationen erfüllen und aufweisen: ((ÖBV), 2014)

- Konzessioniertes Baumeistergewerbe
- Instandsetzungsfachbetrieb für Konstruktive Instandsetzung nach der ÖBV-Richtlinie "Erhaltung und Instandsetzung von Bauten aus Beton und Stahlbeton"
- Referenznachweis für Arbeitsausführung und Arbeitsumfang
- Zertifiziertes Führungs- und Fachpersonal mit Schulungsnachweis

Nachträgliche Verstärkungsmaßnahmen dürfen nur Instandsetzungsarbeiter durchführen, die je nach Umfang und Art der Arbeit ausreichende Fachkenntnisse auf dem Gebiet der nachträglichen Verstärkung nachweisen können. Die für die Einweisungen erforderliche Führungskraft, sowie zwei Fachkräfte müssen diese Fachkenntnisse durch einen Nachweis eines firmenunabhängigen Instituts erbringen. ((ÖBV), 2014)

## 5 Bemessung von vorgespannten und nichtvorgespannten System

In diesem Kapitel wird die Bemessung der vorgespannten und nichtvorgespannten Systeme dargestellt und verglichen. Angaben zum Bestandsquerschnitt, zum statischen System und zu den Einwirkungen müssen vor der Bemessung mit CFK-Lamellen bekannt sein. Danach erfolgen die Schnittgrößenermittlung und die Bemessung am nicht verstärkten Bauteil. Es wird kontrolliert, ob eine Verstärkung überhaupt notwendig ist.

### 5.1 Versagensarten von Kohlenstofffaserlamellen

In diesem Kapitel werden Versagensarten am Querschnitt angeführt. Es treten neben den konventionellen Stahlbetonbau gut bekannten Versagensformen, noch weitere besondere Versagensformen auf.

Versagensarten im Stahlbetonbau:

- Betonversagen in der Druckzone
- Betondruckzonenversagen nach dem Fließen der inneren Bewehrung
- Bruch der Zugbewehrung nach dem Fließen der inneren Bewehrung

Versagensarten nach der Verstärkung mit CFK-Lamellen: (Abbildung 5-1)

- Zugbruch der geklebten Bewehrung
- Betondruckversagen bei einer großer Menge der geklebten Bewehrung
- Versatzbruch
- Schubversagen am Ende der Lamelle
- Versagen des Verbundes

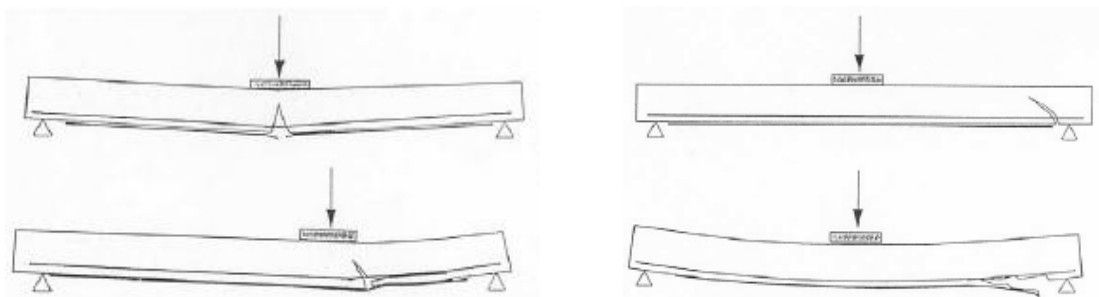


Abbildung 5-1: Arten des Lamellenbruches<sup>20</sup>

<sup>20</sup> Ebner M., Konzepte zur Betonerhaltung - Verstärkung mittels Faserverbundwerkstoffe, S.9



## 5.2 Nichtvorgespannte System ULS

Nicht vorgespannte Kohlenstofflamellen kommen erst durch eine zusätzliche Einwirkung in Spannung, die nach dem Verkleben der Lamelle auftreten.

### Nachweis der Biegetragfähigkeit

Der Nachweis der Biegetragfähigkeit kann gleich wie an einem Stahlbetonbauteil durchgeführt werden. Bei der Ermittlung der Widerstände muss jedoch die genaue Wirkungsweise der Lamelle und auch die Vordehnung des vorhandenen Betonquerschnitts aufgrund der Belastung berücksichtigt werden.

$$\sum M = 0: M_{Rd} = M_{Ed} \quad (1)$$

$$\sum N = 0: N_{Rd} = N_{Ed} \quad (2)$$

Die Widerstände des Querschnitts werden mit der CFK-Lamelle erweitert, wie in der Abbildung 5-2 ersichtlich:

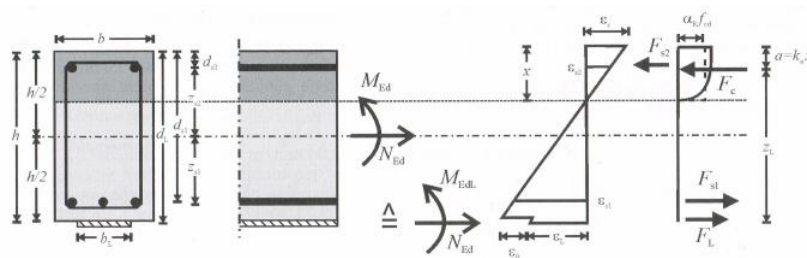
$$N_{Rd} = F_{cd} + F_{Ld} + F_{s1d} + F_{s2d} \quad (3)$$

$$M_{Rd} = -F_{cd} * (z - z_L) + F_{Ld} * z_L + F_{s1d} * z_{s1} - F_{s2d} * z_{s2} \quad (4)$$

Der Momentenwiderstand des Querschnitts wird jeweils auf die Achse der Lamellenkraft und die Achse der Betondruckkraft gelegt.

$$\begin{aligned} M_{RdL} &= M_{Rd} - N_{Rd} * z_L \\ &= -F_{cd} * z - F_{s1d} * (d_L - d_{s1}) - F_{s2d} * (d_L - d_{s2}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} M_{Rdc} &= M_{Rd} - N_{Rd} * (z - z_L) \\ &= -F_{Ld} * (d_L - k_a * x) + F_{s1d} * (d_{s1} - k_a * x) + F_{s2d} * (k_a * x - d_{s2}) \end{aligned} \quad (6)$$


 Abbildung 5-2: Dehnungsverteilung und Bauteilwiderstände eines verstärkten Bauteils<sup>21</sup>

Der Beiwert  $k_a$ , der die Höhe der Betondruckkraft beschreibt, wird in Abhängigkeit der Betonstauchung  $\varepsilon_c$  berechnet:

$$k_a = \begin{cases} \frac{8 + \varepsilon_c}{24 + 4 * \varepsilon_c} & \text{für } \varepsilon_c \geq -2 \text{ mm/m} \\ \frac{3 * \varepsilon_c^2 + 4 * \varepsilon_c + 2}{6 * \varepsilon_c^2 + 4 * \varepsilon_c} & \text{für } -2 \text{ mm/m} > \varepsilon_c \geq -3,5 \text{ mm/m} \end{cases} \quad (7)$$

Die Druckzonenhöhe kann in Abhängigkeit der Lamellendehnung  $\varepsilon_L$  und der Betonstauchung  $\varepsilon_c$  unter der Berücksichtigung der Vordehnung  $\varepsilon_0$  ermittelt werden:

$$x = \frac{-\varepsilon_c}{-\varepsilon_c + \varepsilon_0 + \varepsilon_L} * d_L \quad (8)$$

Über die Druckfestigkeit  $f_{ck}$ , die Druckzonenhöhe, die Druckzonbreite und den Völligkeitsbeiwert  $\alpha_R$  kann die Betondruckkraft beschrieben werden. Der Völligkeitsbeiwert  $\alpha_R$  berücksichtigt das Verhältnis der mittleren Betondruckspannung zur Betondruckfestigkeit und ist von der Betonstauchung  $\varepsilon_c$  abhängig.

$$F_{cd} = b * x * f_{cd} * \alpha_R \quad (9)$$

<sup>21</sup> Bergmeister, K.: Betonkalender 2013, S. 479

$$\alpha_R = \begin{cases} \frac{-\varepsilon_c}{2} - \frac{\varepsilon_c^2}{12} \\ 1 + \frac{2}{3 * \varepsilon_c} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{für } \varepsilon_c \geq -2 \text{ mm/m} \\ \text{für } -2 \text{ mm/m} > \varepsilon_c \geq -3,5 \text{ mm/m} \end{array} \quad (10)$$

Die Lamellenzugkraft wird mit der Lamellendehnung, den Elastizitätsmodul und der Lamellenfläche beschrieben, wobei die Lamellenbruchkraft nicht überschritten werden darf.

$$F_{Ld} = A_L * E_L * \varepsilon_L \leq A_L * f_{Lud} \quad (11)$$

Die Betonstahlkräfte werden wie folgt ermittelt, sie dürfen jedoch die Fließkraft nicht überschreiten:

$$F_{s1d} = A_{s1} * E_s * \varepsilon_{s1} \leq A_{s1} * f_{yd} \quad (12)$$

$$F_{s2d} = A_{s2} * E_s * \varepsilon_{s2} \leq A_{s2} * f_{yd} \quad (13)$$

Mit der Druckzonenhöhe und der Betonstauchung wird die Dehnung für den Betonstahl berechnet:

$$\varepsilon_{s1} = -\varepsilon_c * \frac{d_{s1} - x}{x} \quad (14)$$

$$\varepsilon_{s2} = -\varepsilon_c * \frac{d_{s2} - x}{x} \quad (15)$$

### Querkraftnachweis oder Querkraftverstärkung

Die Querkraftnachweise sind laut EUROCODE zu führen. Es wurde gezeigt, dass die Nachweise der Querkrafttragfähigkeit auch für verstärkte Betonbauteile angewendet werden dürfen. Beim Längsbewehrungsgrad darf jedoch die aufgeklebte Biegeverstärkung nicht angerechnet werden. (Bergmeister, 2013)

Bei einer Überschreitung der Grenzwerte müssen die aufgeklebten Lamellen zusätzlich mit einer Querkraftverstärkung mittels aufgeklebter Bügel ausgebildet werden.

$$\frac{V_{Ed} * \sigma_{sw}}{V_{Rd,max}} \leq \begin{cases} 75 \frac{N}{mm^2} & \text{für gerippte Bügel} \\ 25 \frac{N}{mm^2} & \text{für glatte Bügel} \end{cases} \quad (16)$$

$$\sigma_{sw} = \frac{V_{Ed}}{(A_{sw}/s) * z * \cot\theta} \quad (17)$$

Falls die Querkrafttragfähigkeit des verstärkenden Betonbauteils nicht ausreichend ist, kann die Tragfähigkeit der Querkraft mittels einer Querkraftverstärkung erhöht werden. Die Kraft für die erforderlichen aufgeklebten Bügel können über das Verhältnis der Steifigkeiten der Längsbewehrung berechnet werden.

$$V_{LEd} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{EA_s}{EA_L + EA_s} * V_{Ed} \\ V_{Ed} - V_{Rds} \end{array} \right. \quad (18)$$

## Verbundnachweis

Da das Verbundverhalten von geklebten Lamellen und einbetonierten Betonstählen sehr unterschiedlich ist, sind besondere Betrachtungen erforderlich. Bei einer zunehmenden Verankerungslänge können Betonstähle bis zur Streckgrenze ausgenutzt werden. Bei einer CFK-Lamelle steigt die Verbundbruchkraft bei einer bestimmten Verankerungslänge nicht mehr, siehe Abbildung 5-3.

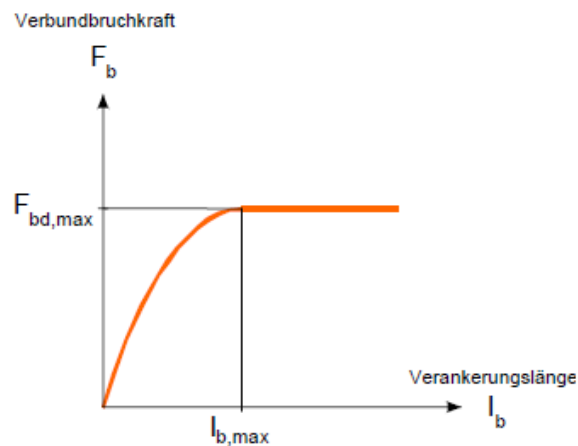


Abbildung 5-3: Zusammenhang zwischen Verbundbruchkraft und Verankerungslänge<sup>22</sup>

Einerseits kann dieser Nachweis mit einem vereinfachten Verfahren durchgeführt werden, das heißt, die Grenzdehnung der Lamelle darf nicht überschritten werden.

$$\varepsilon_{Ld,max} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,5\text{mm/m} + 0,1\text{mm/m} * \frac{l_0}{h} - 0,04\text{mm/m} * \phi_s + 0,06\text{mm/m} * f_{cm} \\ \left\{ \begin{array}{l} 3,0\text{mm/m} * \frac{l_0}{9700\text{mm}} * \left(2 - \frac{l_0}{9700\text{mm}}\right) \\ 3,0\text{mm/m} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (19)$$

<sup>22</sup> FRP Lamella, Bemessungsgrundlagen - zur Biegezug- und Querkraftverstärkung mit FRP Materialien nach EC2, S. 22

Andererseits kann ein Widerstand der Verbundbruchkraft mittels vorhandener Daten der Lamelle und dem Betonuntergrund ermittelt werden.

$$F_{bk,max} = 0,225 * m_L * b_L * \sqrt{E_L * n_L * t_L * \sqrt{f_{cm} * f_{csm}}} \quad (20)$$

Der Bemessungswert ergibt sich durch eine Division mit dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_b=1,5$ :

$$F_{bk,max} = \frac{F_{bk,max}}{\gamma_b} \quad (21)$$

Die dazugehörige Verankerungslänge in mm kann mit folgender Beziehung ermittelt werden:

$$l_{b,max} = 1,46 * \sqrt{\frac{E_L * n_L * t_L}{\sqrt{f_{cm} * f_{csm}}}} \quad (22)$$

In den Gleichungen (20)-(23) bedeuten:

$m_L$	Lamellenanzahl nebeneinander [-]
$b_L$	Lamellenbreite [mm]
$n_L$	Lamellenschichten übereinander [-]
$t_L$	Lamellendicke [mm]
$E_L$	Elastizitätsmodul der CFK-Lamelle [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{csm}$	Rechenwert der Oberflächenzugfestigkeit des Betons [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{cm}$	Druckfestigkeit des bestehenden Betons [N/mm <sup>2</sup> ]
$\gamma_b$	Teilsicherheitsbeiwert des Klebeverbunds [-]

Die Verbundkraft zu einer Verankerungslänge  $l_b$  beträgt:

$$F_{bd} = F_{bd,max} * \frac{l_b}{l_{b,max}} * \left( 2 - \frac{l_b}{l_{b,max}} \right)$$

(23)

### 5.3 Nichtvorgespannte System SLS

Große Durchbiegungen und auch große Rissbreiten können durch das Anbringen der Lamelle nicht mehr rückgängig gemacht werden. Mit diesem System wird hauptsächlich die Tragfähigkeit des Bauteils angehoben.

#### Spannungsbegrenzung

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird wegen der Dauerhaftigkeit des Verbundes die Gebrauchsdehnung in der geklebten Verstärkungsmaßnahme mit 80% der Bruchspannung beschränkt. Damit sollen Schädigungen des Verbundes zwischen Beton und der Kohlenstofflamelle verhindert werden. Alle europäischen Regelwerke verweisen bei den Beton- und Betonstahlspannungen auf die Regelung im EUROCODE 2. Bei einer seltenen Lastfallkombination wird das Fließen des Betonstahls ausgeschlossen, um hohe Beanspruchungen des Verbundes auszuschließen und nicht wiederherstellende Verformungen des Tragwerkes zu vermeiden. (Bergmeister, 2013) (Zilch, 2011)



## Rissbreiten

Mit geklebten Kohlenstofflamellen kann man zwar eine rissbreitenbeschränkende Wirkung erzielen, aber diese wird für den Nachweis der Beschränkung der Rissbreiten nicht herangezogen. (Bergmeister, 2013)

Für die Rissbreite wird als Zusammenwirken der verschiedenen Bewehrungen wie folgt, angegeben: (Zilch, 2011)

$$w_m \approx \frac{F}{E_s * A_s + E_L * A_L} * \left(1 - \frac{F_r}{2 * F}\right) * s_m \quad (26)$$

Der mittlere Rissabstand wird über das Bewehrungsverhältnis  $\eta_L$  und das Verhältnis des Verbundes  $\xi_1$  bestimmt.

$$s_m \approx 50 + 0,1 * \frac{f_{ctm}}{\tau_{sm}} * \frac{d_s}{\rho_{sw} * (1 + \eta_L * \xi_1)} \quad (27)$$

$$\xi_1 = \sqrt{\frac{\tau_{Lm}}{\tau_{sm}} * \frac{E_s * d_s}{4 * E_L * t_L}} \approx \sqrt{0,7 * \frac{E_s * d_s}{4 * E_L * t_L}} \quad (28)$$

$$\eta_L = \frac{A_L}{A_s} \quad (29)$$

### **Bauteilverformung**

Die Grenzwerte der Bauteilverformung sollen auch nach dem Verstärken mit Kohlenstofflamellen nicht überschritten werden. Bei der Berechnung der Durchbiegung, bzw. des Durchbiegungsparameters kann die aufgeklebte Lamelle berücksichtigt werden. (Bergmeister, 2013) (Zilch, 2011)

### **Ermüdungsnachweis**

Da die Kohlenstofflamellen kaum eine Ermüdung zeigen, muss für die Lamellen nur die Ermüdung des Verbundes nachgewiesen werden. Die üblichen Ermüdungsnachweise für Beton und Betonstahl müssen geführt werden, da die Ermüdung des Betonstahls maßgebend ist. (Bergmeister, 2013) (Zilch, 2011)

**5.4 Vorgespannte Systeme ULS**

Werden Stahlbetonbauteile mit CFK-Lamellen verstärkt, so muss bei der Berechnung das unterschiedliche Materialverhalten von Bewehrungsstahl, Beton und CFK berücksichtigt werden. Vorgespannte Systeme werden wie im Spannbetonbau mit einem nachträglichen Verbund berechnet und bemessen. Die Kohlenstofflamellen werden bis zu 50% der Bruchlast vorgespannt. Bei Einzelfällen kann auch mehr vorgespannt werden, dies ist aber mit dem Hersteller abzuklären. (Hans-Peter Andrä, 2001)

Eingeschlitzte und aufgeklebte Lamellen haben bei einer Vorspannung die gleichen Kriterien und Bemessungsansätze.

**Nachweis der Biegetragfähigkeit**

Der Nachweis der Biegetragfähigkeit kann gleich wie an einem Spannbetonbauteil mit nachträglichen Verbund durchgeführt werden. Bei der Ermittlung der Widerstände muss jedoch die genaue Wirkungsweise der Lamelle und auch die Vordehnung des vorhandenen Betonquerschnitts aufgrund der Belastung berücksichtigt werden.

In der Abbildung 5-4 ist ein Querschnitt mit einer vorgespannten Lamelle ersichtlich. Weiters sind die Dehnungszustände für die im Spannbett vorgespannte Lamelle (0), Umsetzen der Vorspannkraft auf den Beton (1), Fließen der inneren Bewehrung (2) und der Bruch der Lamelle (3) abgebildet.

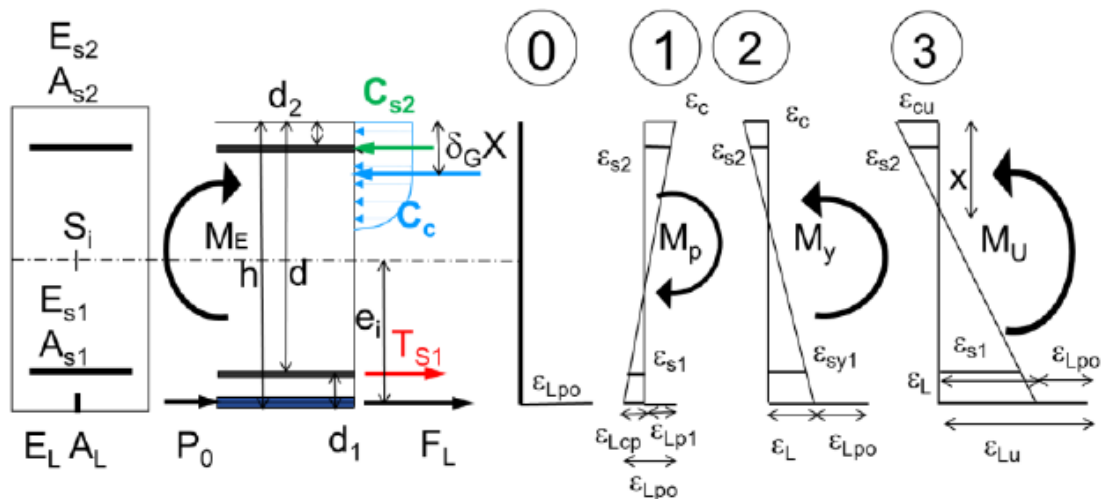


Abbildung 5-4: Dehnungszustände von vorgespannten Systemen<sup>23</sup>

<sup>23</sup> Vorwagner A., Entwicklung eines effizienten

Die Gesamtdehnung in der Lamelle setzt sich aus der Lastdehnung  $\varepsilon_L$ , der Vordehnung  $\varepsilon_{L,p0}$  und der Betonstauchung  $\varepsilon_{L,cp}$  in der Faser des Spanngliedschwerpunktes durch die Vorspannkraft zusammen.

Die Vordehnung  $\varepsilon_{L,p0}$  ist im Fall einer Spannbettvorspannung die Dehnung, die im Spannzustand vor der Kraftaufbringung auf den Querschnitt vorliegt. Der Beton ist dabei spannungsfrei. Wird die Spannkraft auf den Beton übertragen, dann reduziert sich die Spannkraft um den Anteil der Betonverkürzung  $\varepsilon_{L,cp}$ .

$$\varepsilon_{Lp0} = \frac{P_0}{E_L * A_L} = \varepsilon_{Lp1} + \varepsilon_{Lcp} \quad (30)$$

Der Momentenwiderstand wird wie folgt durch die Gleichgewichtsbedingung berechnet:

$$M_{Rd} = A_L * f_L * z_L + A_{S1} * f_{yd} * z_{s1} + A_{S2} * f_{yd} * z_{s2} \quad (31)$$

mit dem Materialgesetz:

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (32)$$

ergibt eine Formel für den Momentenwiderstand:

$$M_{Rd} = A_L * E_L * (\varepsilon_L + \varepsilon_{Lp0}) * (h - \delta * x + t_L/2) + A_{S1} * E_s * \varepsilon_{s1} * (d - \delta * x) + A_{S2} * E_s * \varepsilon_{s2} * (\delta * x - d_2) \quad (33)$$

Der Beiwert  $\delta$ , der die Höhe der Betondruckkraft beschreibt, wird in Abhängigkeit der Betonstauchung  $\varepsilon_c$  berechnet:

$$\delta = \begin{cases} \frac{8 + \varepsilon_c}{24 + 4 * \varepsilon_c} & \text{für } \varepsilon_c \geq -2 \text{ mm/m} \\ \frac{3 * \varepsilon_c^2 + 4 * \varepsilon_c + 2}{6 * \varepsilon_c^2 + 4 * \varepsilon_c} & \text{für } -2 \text{ mm/m} > \varepsilon_c \geq -3,5 \text{ mm/m} \end{cases} \quad (34)$$

Die Berechnung der Vordehnung muss mit der gesamten Lastgeschichte ermittelt werden. Dazu gehört auch die zukünftige Lasterhöhung. Die Vordehnung am Beton wird über den Spannungsblock ermittelt und umgerechnet.

$$\varepsilon_L = \frac{\varepsilon_{s1} * (h - x + d1)}{(h - x)} \quad (35)$$

Die Dehnung des Betons infolge Vorspannung  $\varepsilon_{L,p0}$  wird ohne Kriechen, Schwinden und Relaxation dargestellt. Die Betonfläche wird auf den Bruttoquerschnitt bezogen. Die Höhe  $z_{cp}$  ist der Abstand zwischen der Lamelle und dem Querschnittmittelpunkt und beträgt  $h/2$ .

$$\varepsilon_{L,p0} = \frac{\sigma_L}{E_L} * ((1 + \alpha_L * \varrho_L) + \alpha_L * \varrho_L * \frac{A_c * z_{cp}}{I_c}) \quad (36)$$

Dabei ist:

$$\alpha_L = \frac{E_L}{E_s} \quad (37)$$

$$\varrho_L = \frac{A_L}{A_s} \quad (38)$$

Die gesamte Lamellendehnung  $\varepsilon_{Lu}$  muss kleiner als die halbe Bruchdehnung der Lamelle sein: (Hans-Peter Andrä, 2001)

$$\varepsilon_{Lu} = \varepsilon_L + \varepsilon_{L,p0} \leq 0,5 * \varepsilon_{crac} \quad (39)$$

### Maximale Vorspannkraft

Die maximale Vorspannkraft ermittelt man über die Spannungsberechnung und des Materialgesetzes. Die Lamelle wird bei vorgespannten Systemen 50% von der Bruchdehnung ausgenutzt. Das bedeutet, dass die Lamelle, abhängig von den Materialeigenschaften, mit einer Dehnung von 5 bis 7‰ vorgespannt wird. Bei einer Erhöhung der Vorspannung, bzw. der Dehnung, sollte der Hersteller der Lamelle herangezogen werden. (Hans-Peter Andrä, 2001)

$$\sigma_L = \frac{N}{A_L} \quad (40)$$

und

$$\sigma_L = E_L * \varepsilon \quad (41)$$

ergibt eine maximale Vorspannkraft  $P_0$  von:

$$N = P_0 = A_L * E_L * \varepsilon \quad (42)$$

### Sicherheit gegen Lamellenbruch

Der Tragsicherheitsnachweis des Lamellenbruchs wird mit der Dehnung geführt.

$$\varepsilon_{LE,d} \leq \varepsilon_{LR,d} = \begin{cases} \varepsilon_{Rd,max} \\ 5 \frac{f_{yk}}{E_s} \end{cases} \quad (46)$$

Die maximale Lamellendehnung wird, wie folgt, berechnet:

$$\varepsilon_{LRd,max} = 0,8 * \frac{\frac{\sigma_{L,k}}{E_L}}{\gamma_L} \quad (47)$$

### Querkraftnachweis oder Querkraftverstärkung

Die Querkraftnachweise sind laut EUROCODE zu führen. Es wurde gezeigt, dass die Nachweise der Querkrafttragfähigkeit auch für verstärkte Betonbauteile angewendet werden dürfen. Beim Längsbewehrungsgrad darf jedoch die aufgeklebte Biegeverstärkung nicht angerechnet werden. (Bergmeister, 2013)

Bei einer Überschreitung der Grenzwerte müssen die aufgeklebten Lamellen zusätzlich mit einer Querkraftverstärkung mittels aufgeklebter Bügel ausgebildet werden.

$$\frac{V_{Ed} * \sigma_{sw}}{V_{Rd,max}} \leq \begin{cases} 75 \frac{N}{mm^2} & \text{für gerippte Bügel} \\ 25 \frac{N}{mm^2} & \text{für glatte Bügel} \end{cases} \quad (43)$$

$$\sigma_{sw} = \frac{V_{Ed}}{(A_{sw}/s) * z * \cot\theta} \quad (44)$$

Falls die Querkrafttragfähigkeit des verstärkenden Betonbauteils nicht ausreichend ist, kann die Tragfähigkeit der Querkraft mittels einer Querkraftverstärkung erhöht werden. Die Kraft für die erforderlichen, aufgeklebten Bügel können über das Verhältnis der Steifigkeiten der Längsbewehrung berechnet werden. (Bergmeister, 2013)

$$V_{LEd} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{EA_s}{EA_L + EA_s} * V_{Ed} \\ V_{Ed} - V_{Rds} \end{array} \right. \quad (45)$$



## 5.5 Vorspannte Systeme SLS

### Spannungsbegrenzung

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird wegen der Dauerhaftigkeit des Verbunds die Gebrauchsdehnung in der geklebten Verstärkungsmaßnahme mit 80% der Bruchspannung beschränkt. Damit sollen Schädigungen des Verbundes zwischen Beton und der Kohlenstofflamelle verhindert werden. Alle europäischen Regelwerke verweisen bei den Beton- und Betonstahlspannungen auf die Regelung im EUROCODE 2. Bei einer seltenen Lastfallkombination wird das Fließen des Betonstahls ausgeschlossen, um hohe Beanspruchungen des Verbundes auszuschließen und nicht wiederherstellende Verformungen des Tragwerkes zu vermeiden. (Bergmeister, 2013) (Zilch, 2011)

## Rissbreiten

Mit vorgespannten geklebten Kohlenstofflamellen kann eine rissbreitenbeschränkende Wirkung erzielt werden. Für die Rissbreite wird als Zusammenwirken der verschiedenen Bewehrungen wie folgt, angegeben: (Zilch, 2011)

$$w_m \approx \frac{F}{E_s * A_s + E_L * A_L} * \left(1 - \frac{F_{cr}}{2 * \Delta F}\right) * s_m \quad (48)$$

$$\Delta F = F - P_0 \quad (49)$$

Der mittlere Rissabstand wird über das Bewehrungsverhältnis  $\eta_L$  und das Verhältnis des Verbundes  $\xi_1$  bestimmt.

$$s_m \approx 50 + 0,1 * \frac{f_{ctm}}{\tau_{sm}} * \frac{d_s}{\rho_{sw} * (1 + \eta_L * \xi_1)} \quad (50)$$

$$\xi_1 = \sqrt{\frac{\tau_{Lm}}{\tau_{sm}} * \frac{E_s * d_s}{4 * E_L * t_L}} \approx \sqrt{0,7 * \frac{E_s * d_s}{4 * E_L * t_L}} \quad (51)$$

$$\eta_L = \frac{A_L}{A_s} \quad (52)$$

### **Bauteilverformung**

Die Grenzwerte der Bauteilverformung soll auch nach dem Verstärken mit Kohlenstofflamellen nicht überschritten werden. Bei der Berechnung der Durchbiegung bzw. des Durchbiegungsparameter mit einer vorgespannten aufgeklebten Lamelle, wird die Berechnung wie im Spannbetonbau mit nachträglichen Verbund berechnet. (Bergmeister, 2013) (Zilch, 2011)

### **Ermüdungsnachweis**

Da die Kohlenstofflamellen kaum eine Ermüdung zeigen, muss für die Lamellen nur die Ermüdung des Verbundes nachgewiesen werden. Die üblichen Ermüdungsnachweise für Beton und Betonstahl müssen geführt werden, da die Ermüdung des Betonstahls maßgebend ist. (Bergmeister, 2013)

## 6 Ausschreibung

In der Richtlinie für nachträgliche Verstärkung von Betontragwerken mit geklebter Bewehrung, von der österreichischen Bautechnik Vereinigung, ist eine Ausschreibungsempfehlung mit Ausschreibungstext vorgeschlagen. Diese Empfehlung soll für Verstärkungen mittels Kohlenstofflamellen angewendet werden und ist hier angeführt.

### 6.1 Ausschreibungsempfehlung nach ÖBV

#### Baustelleneinrichtung

Einrichten und technische Betreuung der Baustelle, einmalige An- und Abfahrt der Spezialisten, sowie An- und Abtransport der Geräte, einschließlich aller Vorhaltekosten, Räumung bzw. Reinigung der Manipulationsflächen und Entsorgung der Restgebände. Kosten der Bauüberwachung und der Bauleitung.

	Lohn	.....	
	Sonstiges	.....	
PA	-----		
	Einheitspreis	.....	EURO .....

#### Untergrundprüfung

Prüfung der Untergrundfeuchtigkeit, Untergrundtemperatur und des Taupunktes nach der Richtlinie der ÖVBB, inklusive der Dokumentation im Prüfprotokoll.

	Lohn	.....	
	Sonstiges	.....	
PA	-----		
	Einheitspreis	.....	EURO .....

**Haftzugprüfung vor der Verklebung**

Prüfung der Abreißfestigkeit mittels Haftzugmessgerät, Bohrdurchmesser 50mm

	Lohn	.....	
	Sonstiges	.....	
per 3er-Prüfserie	-----		
	Einheitspreis	.....	EURO .....

**Haftzugprüfung nach der Verklebung**

Prüfung der Haftzugfestigkeit an den Referenzstücken mittels Haftzugmessgerät, Bohrdurchmesser 50mm

	Lohn	.....	
	Sonstiges	.....	
per 3er-Prüfserie	-----		
	Einheitspreis	.....	EURO .....

**Untergrundvorbereitung für Lamellenverklebung**

Entfernen der Betonschlempe und reinigen der Betonoberflächen bis zu einer zu protokollierenden Mindestzugfestigkeit von 1,5 N/mm<sup>2</sup> für die CFK-Lamellen. In der Position sind das Entfernen und das Abtransportieren des Betonabtrages, sowie eine notwendige Einhausung des Arbeitsplatzes nicht enthalten.

Ausmaß: Klebefläche + 20%

Gewählte Untergrundvorbereitung: .....

	Lohn	.....	
	Sonstiges	.....	
m <sup>2</sup>	-----		
	Einheitspreis	.....	EURO .....

**Fräsen von Schlitzten**

Fräsen von Schlitzten in den Betonuntergrund, inkl. Reinigung mit Druckluft oder Staubsauger. Diese Position inkludiert auch die erforderlichen Maßnahmen, dass keine Bewehrung in diesem Bereich durchtrennt wird.

Schlitzbreite: ..... z.B. 5-7mm (je nach Lamellentype)

Schlitztiefe: ..... z.B. 15-25mm (je nach Lamellentype)

	Lohn	.....	
	Sonstiges	.....	
m	-----		
	Einheitspreis	.....	EURO .....

**Grundierung**

Vorbehandlung des Untergrundes mittels niederviskosem Epoxidharz durch Rollen.

	Lohn	.....	
	Sonstiges	.....	
m <sup>2</sup>	-----		
	Einheitspreis	.....	EURO .....

**Kratzspachtelung**

Egalisieren von Lunkern und Poren in der Betonoberfläche mit einer Epoxidharzspachtelmasse bis zu einer Porentiefe von maximal 5mm.

	Lohn	.....	
	Sonstiges	.....	
m <sup>2</sup>	-----		
	Einheitspreis	.....	EURO .....

**Ausgleich mit Epoxidharzmörtel**

Herstellen der für die Lamellenverklebung erforderlichen Ebenflächigkeit durch Aufspachteln eines Epoxidharzmörtels auf die vorbereitete Betonoberfläche.

	Lohn	.....	
	Sonstiges	.....	
kg	-----		
	Einheitspreis	.....	EURO .....

**Ausgleich mit Klebstoff**

im "Nass in Nass" - Verfahren ausgleichen von Unebenheiten bis 5mm im Zuge des Klebevorganges.

	Lohn	.....	
	Sonstiges	.....	
kg	-----		
	Einheitspreis	.....	EURO .....

**CFK - Lamellenverklebung**

Liefern und verkleben von CFK - Lamellen nach dem Verlegeplan des Tragwerksplaners. Die Vorbereitungen der Lamelle, der Verklebungsvorgang und die zu protokollierende Qualitätssicherung müssen nach den Richtlinien der ÖBV erfolgen und sind in die Einheitspreise einzurechnen.

E-Modul	.....	N/mm <sup>2</sup>
Zugfestigkeit	.....	N/mm <sup>2</sup>
Bruchdehnung	.....	%
Lamellenbreite	.....	cm
Lamellendicke	.....	mm

	Lohn	.....	
	Sonstiges	.....	
m	-----		
	Einheitspreis	.....	EURO .....

**CFK - Einschlitzlamellenverklebung**

Liefern und verkleben von CFK - Lamellen nach dem Verlegeplan des Tragwerksplaners. Die Vorbereitungen der Lamelle, der Verklebungsvorgang und die zu protokollierende Qualitätssicherung müssen nach den Richtlinien der ÖBV erfolgen und sind in die Einheitspreise einzurechnen.

E-Modul	.....	N/mm <sup>2</sup>	
Zugfestigkeit	.....	N/mm <sup>2</sup>	
Bruchdehnung	.....	%	
Lamellenbreite	.....	cm	
Lamellendicke	.....	mm	
	Lohn	.....	
	Sonstiges	.....	
m	-----		
	Einheitspreis	.....	EURO .....

**Verkleben von Referenzstücken für Haftzugprüfungen**

Liefern und verkleben von CFK - Lamellen als Referenzstücke für spätere Haftzugprüfungen. Länge der Referenzstücke mindestens 20cm.

	Lohn	.....	
	Sonstiges	.....	
Stk.	-----		
	Einheitspreis	.....	EURO .....



## 7 Kalkulation

In der Kalkulation werden die Kosten für die Verstärkung mittels Kohlenstofflamellen ermittelt, die in weiterer Folge als Grundlage für die Preisbildung dienen. Die Einzelkosten setzen sich aus den Anteilen Lohn, Gerät und Material zusammen.

Die Ermittlung der Kosten erfolgt unter Berücksichtigung der Bauwerks-, Baustellen-, Betriebsbedingungen und des Bauverfahrens.

### 7.1 Aufwandswert

Aufwandswerte haben eine zentrale Bedeutung für die Kalkulation von arbeitsintensiven Tätigkeiten. Als wesentliche Einflussgröße auf die Arbeitsleistung haben Aufwandswerte auch einen hohen baubetrieblichen Stellenwert für den Verfahrenvergleich und die Planung des Bauablaufs, die Baustelleneinrichtung und die Logistik.

Die Größenordnung der Aufwandswerte beeinflusst die Arbeitsproduktivität und damit maßgeblich die Leistung in den einzelnen Ablaufabschnitten. Aufwandswerte stellen in der Angebotsphase eine wesentliche Grundlage zur Kosten- und Zeitberechnung dar. In der Phase der Arbeitsvorbereitung sind sie wichtiger Bestandteil für die Berechnung der Dauer der einzelnen Vorgänge und damit, in weiterer Folge, des gesamten Fertigungsablaufs. (Hofstadler, 2008)

Der Aufwandswert ist wie folgt definiert:

$$\text{EINHEITSWERT} = \frac{\text{Arbeitsaufwand} \left[ \frac{\text{Std}}{\text{VE}} \right]}{\text{Verrechnungseinheiten} \left[ \frac{\text{Std}}{\text{VE}} \right]}$$

Da diese Verstärkungsmethode mit Kohlenstofflamellen für Firmen noch relativ unbekannt ist, wird der Einheitswert entweder geschätzt oder aus den Nachkalkulationen herangezogen.

#### 7.1.1 Einflüsse auf Einheitswert

Es gibt einige Einflüsse auf den Aufwandswert, die bei Verstärkungsmaßnahmen eine große Rolle spielen. Die Aufwandswerte sind für jedes Sanierungsprojekt spezifisch an die Bauwerks-, Baustellen- und Betriebsbedingungen anzupassen, bzw. zu bestimmen.

Einige Bedingungen für den Aufwandswert sind:

- Höhenlage der Brücke
- Länge der Brücke
- Verkehrssituation
- Straßensperren

- Temperatur
- Untergrundbeschaffenheit
- Qualifikation der Mitarbeiter
- Baustoffe

## 7.2 Kalkulationswerte

### 7.2.1 Lohn- und Materialverteilung

Die Verteilung der Lohn- und Materialkosten hat sich in den letzten Jahren sehr verändert. Laut Herstellerfirmen der CFK-Lamellen haben sich die Materialkosten im Gegensatz zu früher bis zum 10fachen vermindert. Durch diese Minderung ist die Verteilung zwischen den Materialkosten und den Lohnkosten ziemlich gleich, das heißt, es herrscht ein annäherndes Verhältnis von 1:1.

### 7.2.2 Materialkosten

Bei den Materialkosten der CFK-Lamelle sind die Herstellerangaben zu verwenden. Bei den meisten Herstellern wird der Preis auf Anfrage bekanntgegeben und erst bei einer Ausschreibung direkt am Objekt festgelegt.

Die ungefähren Preiswerte der CFK-Lamelle und des Klebers werden wie folgt angegeben und für eine Vorkalkulation angenommen. Der Preis der Lamelle richtet sich nach dem Querschnitt der Lamelle und der jeweiligen Materialeigenschaften. Je höher der Elastizitätsmodul, desto höher die Kosten:

- CFK-Lamelle: 10 €/lfm bis 70 €/lfm
- Epoxidharzkleber: 5 €/kg bis 6 €/kg

### 7.3 Beispiel Kalkulation

Im Zuge dieser Masterarbeit ist ein Beispiel der Kalkulation für eine Verstärkung mit Kohlenstofflamellen angeführt. Das Angebot-Leistungsverzeichnis und die Kalkulation werden mit Hilfe eines Kalkulationsprogramms durchgeführt. Die angegebenen Preise und Werte sind für dieses Beispiel fiktiv angenommen. Sie müssen immer auf das Objekt bezogen und gewählt werden. Der Zuschlag bei der Kalkulation beträgt 12%.

Für dieses Kalkulationsbeispiel wird eine oberflächige Verklebungslänge mit Kohlenstofflamellen von 100m angenommen. Die daraus resultierenden Positionen sind, wie folgt, herausgenommen und kalkuliert. Im Kapitel 7.3.2 ist die Kalkulation bzw. das K7-Blatt dargestellt und beschrieben.

#### 7.3.1 Angebots-Leistungsverzeichnis

Angebots-Leistungsverzeichnis			
Projektschlüssel:	San	Projektbezeichnung:	Brückensanierung
Proj.var.schlüssel:	San	Proj.var.bezeichnung:	Bauseitige Anfrage
LV-Name:	1	LV-Bezeichnung:	Brückensanierung
Positionsnummer	Positionstext Menge EH	K P V ZZ w G R NNR	Positionspreis in EUR
<b>01.</b>	<b>Baustelleneinrichtung</b>	<b>Z</b>	FF 999 2009.01
<b>01.01.</b>		<b>Z</b>	
<b>01.01.01.</b>	<b>Baustelleneinrichtung</b>	<b>Z</b>	
	Lohn:		1.012,60
	Sonstiges:		615,21
	1,00 PA Einheitspreis:		1.627,81
			1.627,81
<b>01.01.02.</b>	<b>Untergrundprüfung</b>	<b>Z</b>	
	Lohn:		230,59
	Sonstiges:		168,00
	1,00 PA Einheitspreis:		398,59
			398,59
<b>01.01.03.</b>	<b>Haftzugprüfung vor Verklebung</b>	<b>Z</b>	
	Lohn:		138,35
	Sonstiges:		112,00
	1,00 PA Einheitspreis:		250,35
			250,35
<b>01.01.04.</b>	<b>Haftzugprüfung nach Verklebung</b>	<b>Z</b>	
	Lohn:		138,35
	Sonstiges:		112,00
	1,00 PA Einheitspreis:		250,35
			250,35
<b>Summe 01.01.</b>			<b>2.527,10</b>
<b>Summe 01. Baustelleneinrichtung</b>			<b>2.527,10</b>

### Angebots-Leistungsverzeichnis

Positionsnummer	Positionstext Menge EH	K P V ZZ w G R NNR	Positionspreis in EUR						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Projektschlüssel: San</td> <td style="width: 50%;">Projektbezeichnung: Brückensanierung</td> </tr> <tr> <td>Proj.var.schlüssel: San</td> <td>Proj.var.bezeichnung: Bauseitige Anfrage</td> </tr> <tr> <td>LV-Name: 1</td> <td>LV-Bezeichnung: Brückensanierung</td> </tr> </table>				Projektschlüssel: San	Projektbezeichnung: Brückensanierung	Proj.var.schlüssel: San	Proj.var.bezeichnung: Bauseitige Anfrage	LV-Name: 1	LV-Bezeichnung: Brückensanierung
Projektschlüssel: San	Projektbezeichnung: Brückensanierung								
Proj.var.schlüssel: San	Proj.var.bezeichnung: Bauseitige Anfrage								
LV-Name: 1	LV-Bezeichnung: Brückensanierung								
02.	<b>Sanierung</b>	Z	FF 999 2009.01						
02.01.		Z							
02.01.01.	<b>Untergrundvorbereitung für Lamellenverklebung</b>	Z							
	Lohn: 8,96								
	Sonstiges: 4,48								
	6,00 m² Einheitspreis: 13,44		80,64						
02.01.02.	<b>Grundierung</b>	Z							
	Lohn: 2,61								
	Sonstiges: 7,45								
	6,00 m² Einheitspreis: 10,06		60,36						
02.01.03.	<b>Kratzspachtel</b>	Z							
	Lohn: 7,84								
	Sonstiges: 11,76								
	6,00 m² Einheitspreis: 19,60		117,60						
02.01.04.	<b>Epoxidharzmörtel</b>	Z							
	Lohn: 7,84								
	Sonstiges: 2,59								
	2,50 kg Einheitspreis: 10,43		26,08						
02.01.05.	<b>CFK Lamellenverklebung</b>	Z							
	Lohn: 13,07								
	Sonstiges: 20,49								
	100,00 m Einheitspreis: 33,56		3.356,00						
02.01.06.	<b>Verkleben von Referenzstücken für Prüfung</b>	Z							
	Lohn: 19,60								
	Sonstiges: 20,49								
	2,00 Stk Einheitspreis: 40,09		80,18						
<b>Summe 02.01.</b>			<b>3.720,86</b>						
<b>Summe 02. Sanierung</b>			<b>3.720,86</b>						

<b>Angebots-Leistungsverzeichnis</b>			
<b>Zusammenstellung</b>			
Projektschlüssel: San		Projektbezeichnung: Brückensanierung	
Proj.var.schlüssel: San		Proj.var.bezeichnung: Bauseitige Anfrage	
LV-Name: 1		LV-Bezeichnung: Brückensanierung	
Gruppe	Bezeichnung	ULG	Betrag in EUR LG
<b>Zusammenstellung</b>			
01.01.		2.527,10	
<b>01.</b>	<b>Baustelleneinrichtung</b>		<b>2.527,10</b>
02.01.		3.720,86	
<b>02.</b>	<b>Sanierung</b>		<b>3.720,86</b>
<b>LV</b>			<b>6.247,96</b>
Gesamtpreis in EUR		6.247,96	EUR
Zuzüglich der gesetzlichen Umsatzsteuer von 20,00 %		1.249,59	EUR
<b>Angebotspreis (zivilrechtlicher Preis) in EUR</b>		<b>7.497,55</b>	<b>EUR</b>

### 7.3.2 Kalkulation

In der Beispielkalkulation werden bei der Baustelleneinrichtung die unten angeführten Positionen angenommen. Die Einrichtung besteht aus den Untergruppen Antransport, Gehälter, Vorhaltekosten, Reinigung, Räumung und Abtransport, sowie Prüfungen der Werkstoffe. Die dazu benötigten Mengen werden für die Kalkulation im K7-Blatt herangezogen. Die Ansatzmengen werden immer auf die Ausschreibungseinheit angegeben.

Position Antransport:	Ansatzmenge
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kastenwagen</li> <li>• zwei Arbeiter</li> <li>• Hebebühne</li> </ul>	5h jeweils 5h 1/2 Tag
Position Gehälter:	Ansatzmenge
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bauleiter für die Aufsicht</li> </ul>	1/2h alle 3 Tage
Position Vorhaltekosten:	Ansatzmenge
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kastenwagen</li> <li>• Hebebühne</li> </ul>	8,5h alle 3 Tage 1 Tag alle 3 Tage

Reinigung:	Ansatzmenge
• zwei Arbeiter	jeweils 2h
Räumen:	Ansatzmenge
• Kastenwagen	5h
• zwei Arbeiter	jeweils 5h
• Hebebühne	1/2 Tag
• Entsorgung - Deponiekosten	250kg
Untergrundprüfung:	Ansatzmenge
• Techniker	5h
• Prüfkosten	150€
Haftzugprüfung vor der Verklebung:	Ansatzmenge
• Techniker	3h
• Prüfkosten	100€
Haftzugprüfung nach der Verklebung:	Ansatzmenge
• Techniker	3h
• Prüfkosten	100€

Bei der Sanierung mit Kohlenstofflamellen werden die Positionen Untergrundvorbereitung für die Lamellenverklebung, Grundierung, Kratzspachtel, Epoxidharzmörtel für Ausgleichsschicht, CFK-Lamellenverklebung und Verkleben von Referenzstücken für Prüfung verrechnet und kalkuliert. Die unten angeführten Mengen werden für die Kalkulation im K7-Blatt herangezogen.

Untergrundvorbereitung für Lamellenverklebung:	Ansatzmenge
• Sub. Arbeiter Hochdruckwasserstrahlen	8€
• Sub. Hochdruckwasserstrahlen	4€
Grundierung:	Ansatzmenge
• Epoxidgrundierung	0,4kg + 10%
• Arbeiter	1/15h
Kratzspachtel:	Ansatzmenge
• Epoxidharzmörtel	5kg
• Arbeiter	0,2h
Epoxidharzmörtel:	Ansatzmenge
• Epoxidharzmörtel	1,1kg
• Arbeiter	0,2h
CFK Lamellenverklebung:	Ansatzmenge
• Epoxidharzmörtel	1,5VE
• Lamelle	16,79€
• Arbeiter	0,33h
Verkleben von Referenzstücken für Prüfung:	Ansatzmenge
• Epoxidharzmörtel	1,5VE
• Lamelle	16,79€
• Arbeiter	0,5h

Preisermittlung		FORMBLATT K7		
Proj.schlüssel: San		Erstellt am: 22.04.2015 9:41		
Angebot: San / Bauseitige Anfrage		Währung: EUR		
Positionnummer	Positionsschlüssel	LV-Menge	PVZZ	Preis
BM-Nummer	Ansatz formal / Betriebsmittelbezeichnung	EH	Kosten/EH	Sonstiges
1	Brückensanierung			
01.	Baustelleneinrichtung			
01.01.	Baustelleneinrichtung			
01.01.01.	Baustelleneinrichtung	1,00 PA		
U1	1,00; Baustelleneinrichtung	1,00000000 PA	1.453,40154661	1.453,40154661
U11	1,00; Antransporte	1,00000000 PA	424,38752910	424,38752910
G	5; KASTENW.FORD G-346 GH-Variable Kosten	5,00000000 h	5,37750582	
B	2*5; Lohn Beton- u. Mauerungsarbeiten	10,00000000 h	35,00000000	
U12	3* Tage; Gehälter	0,50000000 D	95,00000000	
B	0,5*170; Bauleiter	0,00294118 Mo	8,500,00000000	
U13	3* Tage; Vorhaltekosten	3,00000000 PA	140,70879947	401,22185337
G	8,5; KASTENW.FORD G-346 GH-Variable Kosten	8,50000000 h	5,37750582	
B	1; Gelenksbohrne F-16 TKX, 16m Arbeitshöhe, 4WD, Diesel	1,00000000 D	95,00000000	
U14	1,00; Reinigung	1,00000000 PA	70,00000000	70,00000000
B	2; Lohn Beton- u. Mauerungsarbeiten	2,00000000 h	35,00000000	
U15	1,00; Räumen	1,00000000 PA	461,88752910	461,88752910
B	0,250; Deponiekosten Baustellenabfälle (t)	0,25000000 t	150,00000000	
G	5; KASTENW.FORD G-346 GH-Variable Kosten	5,00000000 h	5,37750582	
B	2*5; Lohn Beton- u. Mauerungsarbeiten	10,00000000 h	35,00000000	
B	0,5; Gelenksbohrne F-16 TKX, 16m Arbeitshöhe, 4WD, Diesel	0,50000000 D	95,00000000	
	Herstellkosten		904,10249584	549,29905077
	Zuschlag		108,49229953	65,91588649
	Rundungsausgleich		0,00520463	-0,00493726
	<b>Einheitspreis je PA</b>	<b>22,00000000 h/ME Pos.</b>	<b>1,012.60</b>	<b>615.21</b>
01.01.02.	Untergrundprüfung	1,00 PA		
U1	1,00; Untergrundprüfung	1,00000000 PA	355,86232000	355,86232000
B	5*170; Techniker Mo	0,02941176 Mo	7,000,00000000	
B	150; PRUFKOSTEN ALLGEMEIN \$	150,00000000 VE	1,0000000000	
	Herstellkosten		205,88232000	150,00000000
	Zuschlag		24,70587840	18,00000000
	Rundungsausgleich		0,00180160	0,00000000
	<b>Einheitspreis je PA</b>	<b>0,00000000 h/ME Pos.</b>	<b>230.59</b>	<b>168.00</b>
				<b>398.59</b>



Preisermittlung		FORMBLATT K7				
Proj.schlüssel: San		Erstellt am: 22.04.2015 9:41				
Angebot: San / Bauseitige Anfrage		Preisbasis:				
Währung: EUR						
BM-Nummer	Positionsschloßwort Ansatzformel / Betriebsmittelbezeichnung	LV-Menge Ansatzmenge	PVZZ Kosten/EH	Lohn	Sonstiges	Preis
01.01.03.	Haftzugprüfung vor Verklebung	1,00 PA				
U1	1,00; Haftzugprüfung vor Verklebung 3/170; Techniker Mo 100; PRÜFKOSTEN ALLGEMEIN \$	1,00000000 PA 0,01764706 Mo 100,00000000 VE	223,52942000 7,000,00000000 1,0000000000	123,52942000	100,00000000	223,52942000
	Herstellkosten Zuschlag Rundungsausgleich			123,52942000 14,82353040 -0,00295040	100,00000000 12,00000000 0,00000000	223,52942000 26,82353040 -0,00295040
01.01.04.	Haftzugprüfung nach Verklebung	0,00000000 h/ME Pos.		138,35	112,00	250,35
U1	1,00; Haftzugprüfung nach Verklebung 3/170; Techniker Mo 100; PRÜFKOSTEN ALLGEMEIN \$	1,00 PA	223,52942000 7,000,00000000 1,0000000000	123,52942000	100,00000000	223,52942000
	Herstellkosten Zuschlag Rundungsausgleich			123,52942000 14,82353040 -0,00295040	100,00000000 12,00000000 0,00000000	223,52942000 26,82353040 -0,00295040
02.	Sanierung	0,00000000 h/ME Pos.		138,35	112,00	250,35
02.01.01.	Untergrundvorbereitung für Lamellenverklebung	6,00 m²				
U1	1,00; Untergrundvorbereitung für Lamellenverklebung	1,00000000 m²	12,00000000	8,00000000	4,00000000	12,00000000
U11	1,00; HDW Reinigen Subunternehmerleistung	1,00000000 m²	12,00000000	8,00000000	4,00000000	12,00000000
	8; HOCHDRUCK WASSERSTRAHLEN SUB. LOHNANT. 4; HOCHDRUCK WASSERSTRAHLEN SUB.	8,00000000 VE 4,00000000 VE	1,00000000 1,00000000	8,00000000 0,96000000	4,00000000 0,48000000	12,00000000 1,44000000
02.01.02.	Grundrierung	0,00000000 h/ME Pos. 0,00 h gesamt		8,96 53,76	4,48 26,88	13,44 80,64
U1	1,00; Grundrierung	1,00000000 m²	8,96296545	2,33333345	6,64963200	8,96296545

Preisermittlung		FORMBLATT K7			
Proj.schlüssel: San		Erstellt am: 22.04.2015 9:41			
Angebot: San / Bauseitige Anfrage		Preisbasis:			
Währung: EUR					
Positionsnummer BM-Nummer	Positionstichwort Ansatzformel / Betriebsmittelbezeichnung	LV-Menge Ansatzmenge	EH Kosten/EH	PVZZ Kosten/EH	Preis
A	0,4*1,10; EPOXI/GRUND 300 10kg (Spezialgrundierung Epoxi) 1/15; Lohn Beton- u. Mauerungsarbeiten  Herstellkosten Zuschlag Rundungsausgleich	0,44000000 kg 0,06666667 h	15,11280000 35,00000000		8,98296545 1,07795585 -0,00092130
	<b>Einheitspreis je m²</b> <b>Gesamtbetrag für 6,00 m²</b>	<b>0,06666667 h/ME Pos.</b> <b>6,00 m²</b>	<b>0,40 h_gesamt</b>		<b>7,45</b> <b>44,70</b>
02.01.03.	<b>Kratzspachtel</b>				
U1 A	<b>1,00; Kratzspachtel</b> 5; Planigrout 300 Epoxidharzmörtel 1/5; Lohn Beton- u. Mauerungsarbeiten  Herstellkosten Zuschlag	<b>1,00000000 m²</b> 5,00000000 kg 0,20000000 h	<b>17,50000000</b> 2,10000000 35,00000000		<b>17,50000000</b>  17,50000000 2,10000000
	<b>Einheitspreis je m²</b> <b>Gesamtbetrag für 6,00 m²</b>	<b>0,20000000 h/ME Pos.</b> <b>2,50 kg</b>	<b>1,20 h_gesamt</b>		<b>7,84</b> <b>47,04</b>
02.01.04.	<b>Epoxidharzmörtel</b>				
U1 A	<b>1,00; Epoxidharzmörtel</b> 1,1; Planigrout 300 Epoxidharzmörtel 1/5; Lohn Beton- u. Mauerungsarbeiten  Herstellkosten Zuschlag Rundungsausgleich	<b>1,00000000 kg</b> 1,10000000 kg 0,20000000 h	<b>9,31000000</b> 2,10000000 35,00000000		<b>9,31000000</b>  9,31000000 1,11720000 0,00280000
	<b>Einheitspreis je kg</b> <b>Gesamtbetrag für 2,50 kg</b>	<b>0,20000000 h/ME Pos.</b> <b>100,00 m</b>	<b>0,50 h_gesamt</b>		<b>7,84</b> <b>19,60</b>
02.01.05.	<b>CFK Lamellenverklebung</b>				
U1 A A	<b>1,00; CFK Lamellenverklebung</b> 1/3; Lohn Beton- u. Mauerungsarbeiten 1; CFK Lamelle 1,50; Hilfsstoffe allgemein	<b>1,00000000 m</b> 0,33333333 h 1,00000000 m 1,50000000 VE	<b>29,96056655</b> 35,00000000 16,79390000 1,00000000		<b>29,96056655</b>  18,29390000  29,96056655
	<b>Einheitspreis je m²</b> <b>Gesamtbetrag für 6,00 m²</b>	<b>0,06666667 h/ME Pos.</b> <b>6,00 m²</b>	<b>0,40 h_gesamt</b>		<b>7,45</b> <b>44,70</b>

Preisermittlung		FORMBLATT K7					
Proj.schlüssel: San		Erstellt am: 22.04.2015 9:41					
Angebot: San / Bauseitige Anfrage		Währung: EUR					
Positionsnummer BIM-Nummer	Positionstichwort Ansatzformel / Betriebsmittelbezeichnung	LV-Menge Ansatzmenge	EH Kosten/EH	PVZZ Kosten/EH	Lohn	Sonstiges	Preis
	Herstellkosten Zuschlag Rundungsausgleich				11,66666655 1,38999999 0,00333346	18,29390000 2,19526800 0,00083200	29,96056655 3,58526799 0,00416546
	<b>Einheitspreis je m</b> <b>Gesamtbetrag für 100,00 m</b>	<b>0,33333333</b>	<b>h/ME Pos.</b> <b>33,33 h_gesamt</b>		<b>13,07</b> <b>1.307,00</b>	<b>20,49</b> <b>2.049,00</b>	<b>33,56</b> <b>3.356,00</b>
02.01.06.	Verkleben von Referenzstücken für Prüfung						
U1	<b>1,00: Verkleben von Referenzstücken für Prüfung</b>	<b>1,00000000</b>	<b>m</b>	<b>35,79390000</b>	<b>17,50000000</b>	<b>18,29390000</b>	<b>35,79390000</b>
A	1/2; Lohn Beton- u. Mauerungsarbeiten	0,50000000	h	35,00000000			
A	1; CFK Lamelle	1,00000000	m	16,79390000			
A	1,50; Hilfsstoffe allgemein	1,50000000	VE	1,00000000			
	Herstellkosten Zuschlag Rundungsausgleich				17,50000000 2,10000000 0,00000000	18,29390000 2,19526800 0,00083200	35,79390000 4,29526800 0,00083200
	<b>Einheitspreis je Stk</b> <b>Gesamtbetrag für 2,00 Stk</b>	<b>0,50000000</b>	<b>h/ME Pos.</b> <b>1,00 h_gesamt</b>		<b>19,60</b> <b>39,20</b>	<b>20,49</b> <b>40,98</b>	<b>40,09</b> <b>80,18</b>

## 8 Alternativen zur Kohlenstofflamelle

Es gibt verschiedene Verfahren zur Verstärkung von Brückentragwerken. Die Auswahl des richtigen Verfahrens ist abhängig von den Einflussbedingungen und den Umgebungsparametern. Für die Planung von Verstärkungsmaßnahmen ist die Überprüfung der vorhandenen Betonqualität des Tragwerks von Bedeutung.

### 8.1 Druckzonenverstärkung

#### 8.1.1 Querschnittsergänzung

Eine Verstärkung im Sinne einer Querschnittsergänzung ist nötig, wenn der vorhandene Betonquerschnitt aufgrund von schadhafte Einflüssen, bzw. einer Nutzungserhöhung, nicht mehr standhält. Dabei wird auf den bestehenden Betonuntergrund eine neue Betonschicht aufgebracht. Bei richtiger Ausführung der Ergänzung und Erhöhung des Querschnittes wird die Tragfähigkeit der Konstruktion erhöht. Dadurch sind wesentliche Vorkehrungen für den Haftverbund zu treffen. Voraussetzungen für diese Verstärkungsmaßnahme ist eine Mindestschichtdicke von 30mm. Eine Querschnittsergänzung ist mit Normalbeton, Faserbeton oder UHPC möglich.



Abbildung 8-1: Aufbeton einer Fahrbahn<sup>24</sup>

<sup>24</sup> [http://www.leonhard-weiss.de/bau/de/html\\_docs/leistungsspektrum/big/ref\\_instandsetzung.html](http://www.leonhard-weiss.de/bau/de/html_docs/leistungsspektrum/big/ref_instandsetzung.html), Aufgerufen am: 16.04.2015

## 8.2 Zugzonenverstärkung

### 8.2.1 Verstärkung mit Stahllaschen

Das Prinzip bei der Bauteilverstärkung mit Stahllaschen ist gleich, bzw. ähnlich, wie bei den CFK-Lamellen. Die Stahllaschen können nicht nur als zusätzliche Zugbewehrung, sondern auch für eine zusätzliche Druckbewehrung angebracht werden. Dazu muss der Verbund zwischen dem Beton und der Lasche nachgewiesen werden. Da der Elastizitätsmodul bei Stahl geringer als bei der Kohlenstofflamelle ist, wurde diese Verstärkungsmaßnahme abgelöst. Weiters sind die Umgebungseinflüsse, wie zum Beispiel Korrosion, für den Stahl nicht gerade günstig. Es müssen eigene Konstruktionen, bzw. spezielle Anstriche, angebracht werden.



Abbildung 8-2: Brückenverstärkung mittels Stahllaschen<sup>25</sup>

<sup>25</sup> <http://bauwerksverstaerkung.laumer.de/stahllamellen/>, Aufgerufen am: 16.04.2015

### 8.2.2 Bewehrungsaustausch bzw. -zugabe

Bei einem Bewehrungsaustausch, bzw. einer Bewehrungszugabe, muss die vorhandene Bewehrung freigelegt werden. Dies geschieht meist durch Sandstrahlen. Der Austausch oder das nachträgliche Einschlitzen der Bewehrung ist oftmals schwierig, da die neue Bewehrung wegen vorhandener Bügelbewehrung oder wegen beengten Räumlichkeiten des Bestandes schwer einbaubar ist. Daher wird meist eine Verstärkung gewählt, wo sich die Bewehrungsergänzung nicht mit der bestehenden Bewehrung überkreuzt.



Abbildung 8-3: Bewehrungszugabe<sup>26</sup>

---

<sup>26</sup> [http://www.gladbeck.de/Leben\\_Wohnen/Bauen\\_Wohnen/Aktuelle\\_Baustellen/Europabruoecke.asp](http://www.gladbeck.de/Leben_Wohnen/Bauen_Wohnen/Aktuelle_Baustellen/Europabruoecke.asp), Aufgerufen am: 16.04.2015

### 8.2.3 Externe Spannglieder

Dabei werden nur in seltenen Fällen die Spannglieder durch eine nachträgliche Vorspannung mit vollständigem Verbund innerhalb des Querschnittes geführt. Meist wird mit einer externen Vorspannung des Betonquerschnitts die notwendige und erhöhte Tragfähigkeit erreicht. Die externe Vorspannung stellt, was die Kontrolle und Austauschbarkeit der Spannglieder betrifft, die technisch einfachere Lösung dar. Die Spannglieder können relativ leicht inspiziert und bei Schaden am Spann Stahl auch ausgewechselt werden. Liegen die Spannkabel im Betonquerschnitt, so ist dies natürlich nicht möglich. Mit Hilfe der externen Vorspannung soll die volle Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit der Konstruktion wieder hergestellt werden. Hier werden die Mängel, die aus einer unzureichenden schlaffen oder vorgespannten Bewehrung resultieren, ausgeglichen.



Abbildung 8-4: Externe Spannglieder<sup>27</sup>

<sup>27</sup> <http://www.tp-ing.de/referenzen/bruecken-ing-bau/beton-spannbeton/ruhrthalbruecke-rumbeck/>, Aufgerufen am 16.04.2015

## 9 Conclusio

Neben der Verstärkung von Betonbrücken oder Betonbauteilen lassen sich Kohlenstofflamellen auch zur Verstärkung anderer Baustoffe einsetzen. Historische Holzbrücken, Stahlgussteile oder Natursteinelemente wurden bereits erfolgreich mit angeklebten oder eingeschlitzten CFK-Lamellen verstärkt.

Die Anwendung dieser Lamellen wurde in den letzten Jahren stark erweitert. Durch die rasch fortschreitende Entwicklung werden weitere Anwendungsgebiete erschlossen, wie z.B. das Verstärken mit geklebter Bewehrung unter Wasser oder bei tiefen Temperaturen.

Die Anwendung von vorgespannten Systemen wird durch die Entwicklungen neuer Verankerungssysteme eine größere Rolle spielen. In der Zukunft werden die Systeme vor allem im Hinblick auf die temporäre Verankerung verbessert und praxistauglich gemacht. Nur dadurch lassen sich die hohen Festigkeiten wirtschaftlich einsetzen und nutzen. Durch den zunehmenden Gebrauch der Kohlenstofflamellen in der Baubranche werden sich die Produktionskosten für Faserverbundwerkstoffe zukünftig noch mehr verringern.



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Aufgeklebte und in Schlitze geklebte Lamellen .....	10
Abbildung 2-2: Anwendungsbeispiel einer CFK verstärkten Brücke .....	11
Abbildung 2-3: Verankerungsplatte der Firma S&P .....	14
Abbildung 2-4: Verankerungssystem Stresshead .....	14
Abbildung 2-5: Permanenter Anker.....	15
Abbildung 3-1: Rechnerische Spannungsdehnungslinien .....	16
Abbildung 3-2: Kohlenstofflamelle.....	17
Abbildung 4-1: Vorrichtung für Kleber .....	24
Abbildung 4-2: Oberflächlich verklebte Kohlenstofflamellen.....	25
Abbildung 4-3: Klemmschuh eines vorgespannten Systems .....	26
Abbildung 4-4: Montage des Zylinderhalterung mit dem Zylinders .....	27
Abbildung 4-5: Vorgespannte Lamelle - fixierte Vorspannkraft .....	27
Abbildung 4-6: Bauteilverstärkung mit einer eingeschlitzten Kohlenstofflamelle.....	28
Abbildung 4-7: 1. Arbeitsschritt bei eingeschlitzten Lamellen .....	29
Abbildung 4-8: 2. Arbeitsschritt bei eingeschlitzten Lamellen .....	29
Abbildung 4-9: 3. Arbeitsschritt bei eingeschlitzte Lamellen .....	30
Abbildung 5-1: Arten des Lamellenbruches .....	32
Abbildung 5-2: Dehnungsverteilung und Bauteilwiderstände eines verstärkten Bauteils .....	34
Abbildung 5-3: Zusammenhang zwischen Verbundbruchkraft und Verankerungslänge .....	37
Abbildung 5-4: Dehnungszustände von vorgespannten Systemen.....	43
Abbildung 8-1: Aufbeton einer Fahrbahn .....	68
Abbildung 8-2: Brückenverstärkung mittels Stahllaschen .....	69
Abbildung 8-3: Bewehrungszugabe .....	70
Abbildung 8-4: Externe Spannglieder .....	71

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Mechanische Eigenschaften .....	18
Tabelle 3-2: Materialkennwerte für Klebstoffe.....	20
Tabelle 3-3: Mechanische Eigenschaften der Klebstoffe .....	21

## Literaturverzeichnis

- (ÖBV), Österreichische Bautechnik Vereinigung. 2014.** *Nachträgliche Verstärkung von Betonbauwerken mit geklebter Bewehrung.* Wien : ÖBV, 2014.
- Bergmeister, Fingerloos, Wörner. 2013.** *Betonkalender 2013.* Berlin : Wilhelm Ernst & Sohn, 2013. 978-3-433-03000-4.
- Bergmeister, Konrad. 2005.** Verstärkung mit vorgespannten S&P CFK-Lamellen. *Beton- und Stahlbetonbau Spezial.* 2005, Heft 7/2015.
- Borchert, Kurt. 2009.** *Verbundverhalten von Klebebewehrung unter Betriebsbedingungen.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2009. 3-410-65048-5.
- Hans-Peter Andrä, G. König, M. Maier. 2001.** Einsatz vorgespannter Kohlefaser-Lamellen als Oberflächenspannglieder. *Beton- und Salbetonbau* 96. Heft, 2001, 12.
- Hofstadler, C. 2008.** *Scholarbeiten - Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation.* s.l. : Springer Verlag, 2008. ISBN 978-3-540-85179-3.
- Konrad, Bergmeister. 2009.** *Ertüchtigung im Bestand - Verstärken mit Kohlenstofffasern In: Betonkalender 2009.* 2009.
- Mehlhorn, Gerhard. 2010.** *Handbuch Brücken: Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten.* Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2010. 978-3642044229.
- Mihala, Ronald.** [Online] Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, BOKU WIEN. [Zitat vom: 18. 11 2014.] [http://www.zement.at/Service/literatur/fileupl/koll07\\_mihala.pdf](http://www.zement.at/Service/literatur/fileupl/koll07_mihala.pdf).
- Raupach M., Orlowosky. 2008.** *Erhaltung von Betonbauwerken, Baustoffe und ihre Eigenschaften.* Wiesbaden : Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, 2008. ISBN 978-3-8351-0120-3.
- S&P.** *S&P-Website.* [Online] [Zitat vom: 18. 11 2014.] <http://www.sp-reinforcement.de/technische-datenblaetter-FRP.html>.
- S&P, Firma. 2010.** *Vorgespannte S&P Lamellen CFK - Manual.* [Dokument] s.l. : S&P, 2010.
- Sika, Österreich GmbH. 2015.** Sika Österreich GmbH. [Online] Sika Österreich GmbH, 2015. [www.sika.at](http://www.sika.at).
- Tecnokraft.** *Tecnokraft-Website.* [Online] [Zitat vom: 18. 11 2014.] [http://www.tecnokraft.it/beta/Stahl\\_beton.html](http://www.tecnokraft.it/beta/Stahl_beton.html).
- Tue, Nguyen Viet. 2013.** *Spannbetonvorlesung.* Graz : Technische Universität Graz, 2013.
- . 2013.** *Stahlbetonvorlesung.* Graz : Technische Universität Graz, 2013.
- Weber, Silvia. 2013.** *Betoninstantsetzung, Baustoff-Schadensfeststellung-Instandsetzung.* Wiesbaden : Springer Verlag, 2013. 978-3-8348-2261-1.
- Zilch, Niedermeier, Finckh. 2011.** *Sachstandbericht - Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung.* Berlin : Beuth, 2011. ISBN 978-3-410-65193-2.

