

Spannsystem für CFK-Lamellen

Système de précontrainte pour bandes en PRFC

Post-Tensioning System for CFRP-Strips

StressHead AG

Gregor Schwegler, Dr. sc. techn., dipl. Bauing. ETH

Thierry Raoul Berset, dipl. Bauing. ETH

Forschungsauftrag AGB 1999/155 (83/99) auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)

Oktober 2005

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation

BUNDESAMT FÜR STRASSEN

Forschungsauftrag AGB 1999/155 (83/99) auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung

Spannsystem für CFK-Lamellen

Système de précontrainte pour bandes en PRFC

Post-Tensioning System for CFRP-Strips

StressHead AG

Leumattstrasse 33

6002 Luzern

Gregor Schwegler, Dr. sc. techn., dipl. Bauing. ETH

Thierry Raoul Berset, dipl. Bauing. ETH

Oktober 2005

Vorwort

Die ersten Forschungsarbeiten zur nachträglichen Verstärkung von Bauteilen mittels kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK) erfolgten bereits in den 80-er Jahren an der EMPA Dübendorf. Unter der Leitung von Professor Dr. h.c. Urs Meier wurde 1991 weltweit erstmals eine Brücke mittels CFK-Lamellen verstärkt. Dr. M. Deuring setzte mit seiner an der EMPA durchgeführten Arbeit "Verstärken von Stahlbeton mit gespannten Faserverbundwerkstoffen" diese Entwicklung konsequent fort.

In diversen Arbeiten wurde aufgezeigt, dass der Schlüssel zum Erfolg in der sicheren und kompakten Endverankerung der CFK-Lamellen zu suchen ist. Die hervorragenden Materialeigenschaften von CFK können in den meisten Fällen nur durch Vorspannung vollumfänglich genutzt werden. Ein kompaktes Spannsystem für CFK-Lamellen erfordert eine sichere Verankerung der CFK-Lamelle im Spannkopf auf kürzester Distanz. Mit dem Ziel einer Anwendung unabhängig von Bewitterung und Sonneneinstrahlung sollte diese Verankerung ohne Verklebung erfolgen.

Vor diesem Hintergrund erteilte das Bundesamt für Strassen ASTRA der StressHead AG Luzern den Auftrag, einen Anker- und Spannkopf für CFK-Lamellen weiter zu entwickeln, der vollständig aus Kunststoff besteht, korrosions- und witterungsbeständig ist sowie eine Lamellenendverankerung ohne Verklebung und auf kürzester Distanz ermöglicht. Erste Pilotapplikationen sollen die Praxistauglichkeit des Spannverfahrens zeigen.

Die Forschungsarbeit wurde im wesentlichen durch Herrn Thierry Berset durchgeführt. Er begleitete auch die Pilotapplikationen an der Reussbrücke A4, Flüelen UR und Escherkanalbrücke A3, Weesen GL. Nur dank der wertvollen Unterstützung der Herren H. Huber, Brückeningenieur des Kantons Uri, und E. Grünenfelder, Kantonsingenieur des Kantons Glarus, konnten diese ersten Brückenverstärkungen mittels gespannten CFK-Lamellen realisiert werden.

Betreut wurde die Forschungsarbeit durch die Mitglieder der Begleitkommission C, den Herrn P. Matt (Präsident), M. Donzel, H. Figi, H. Fleischer und Prof. Dr. A. Muttoni. Herr Prof. Dr. P. Marti, ETHZ unterstützte die Forschungsarbeit im Bereich der Versuche. Für die wertvolle Mitarbeit sei hier allen herzlich gedankt.

Luzern im September 2005

Dr. Gregor Schwegler

StressHead AG

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG	9
RÉSUMÉ	10
SUMMARY	11
1 EINLEITUNG	13
1.1 Ausgangslage	13
1.2 Ziel	14
1.3 Abgrenzung	15
2 ENTWICKLUNG SPANNVERANKERUNG AUS STAHL	17
2.1 Einleitung	17
2.2 Material	18
2.3 Spannkopf	19
3 PRÜFUNG SPANNVERANKERUNG AUS STAHL	25
3.1 Versuchsprogramm und Resultate	25
3.2 Schlussfolgerungen	26
4 ANWENDUNG SPANNSYSTEM STAHL	27
4.1 Pilotapplikation Reussbrücke N4, Flüelen	27
5 ENTWICKLUNG SPANNSYSTEM KUNSTSTOFF	29
5.1 Überblick	29
5.2 CFK-Lamelle	29
5.3 Spannkopf	30
5.4 Bewegliche Verankerung	30
5.5 Feste Verankerung	32
5.6 Kraffteinleitung	33
5.7 Spanngeräte	33
6 PRÜFUNG SPANNSYSTEM KUNSTSTOFF	35
6.1 Kurzzeitprüfung (Zugversuch)	35
6.2 Ermüdungsversuche	38
6.3 Langzeitprüfung (Zugversuch)	38
7 HINWEISE ZUR BEMESSUNG	39
7.1 Grundlagen	39
7.2 Spannglied	39
7.3 Bemessung der Verankerung	42
7.4 Nachweis des Kraffteinleitungsbereichs	42
7.5 Nachweise am verstärkten Tragwerk	43
7.6 Vorspannung mit Verbund	45

8	ANWENDUNG DES SPANNSYSTEMS	47
8.1	Beschreibung des Spannvorgangs	47
8.2	Brückenbau	51
8.3	Industrie- und Hochbau	55
8.4	Erdbebenverstärkung	58
8.5	Historische Bauten und Mauerwerk	62
9	AUSBLICK	63
9.1	Weitere Anwendungsgebiete	63
9.2	Vergleich mit anderen Verstärkungssystemen	63
	LITERATUR	64
	ANHANG 1	65

Zusammenfassung

Die seit 1982 an der EMPA und der ETH Zürich durchgeführten Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der nachträglichen Verstärkung von Stahlbetontragwerken mit aufgeklebten CFK-Lamellen ermöglichten Schweizer Firmen das Besetzen einer international führenden Position in diesem Bereich. Heute ist diese Art der Verstärkung Stand der Technik.

Neben vielfältigen Vorteilen wie Korrosionsbeständigkeit, einfache Handhabung und Applikation oder Unempfindlichkeit gegen Materialermüdung weisen schlaff aufgeklebte CFK-Lamellen auch einige Nachteile auf. Die steife Verklebung der Lamelle mit dem gerissenen Beton ergibt hohe Zugspannungen in der Lamelle im Bereich der Risse und sehr hohe Verbundschubspannungen an den Rissufern. Aufgrund der beschränkten Zugfestigkeit des oberflächennahen Betons erfolgt das Versagen der Lamellenverstärkung in den meisten Fällen in Form eines Verbundversagens im Beton. Zudem resultiert das linear-elastische Materialverhalten der CFK-Lamelle bis zum Bruch in einem eingeschränkten Verformungsvermögen des verstärkten Stahlbetonquerschnitts.

Wird die CFK-Lamelle vorgespannt und an ihren Enden verankert, kann die Materialfestigkeit besser ausgenutzt werden und es besteht eine geringere Unsicherheit in Bezug auf den Tragwiderstand des verstärkten Bauteils. In Bereichen, in denen darauf verzichtet wird den Verbund zwischen Beton und CFK-Lamelle herzustellen, können plastische Verformungen des verstärkten Stahlbetonquerschnitts zugelassen werden. Aus diesen Überlegungen wurde die Zielsetzung abgeleitet, dass das zu entwickelnde Spannsystem für CFK-Lamellen sowohl mit als auch ohne Verbund anwendbar sein soll.

In einem ersten Schritt werden verschiedene Möglichkeiten untersucht, die CFK-Lamelle in einem Spannkopf zu verankern. Dazu werden Prototypen von Spannköpfen aus Stahl und Aluminium hergestellt und im Zugversuch geprüft.

Diese Versuche dienen als Grundlage für die Entwicklung eines vollständig aus CFK bestehenden Spannkopfs, der in vielen Schritten geprüft und optimiert wird. Bewegliche und feste Verankerungen sowie Möglichkeiten zur Krafteinleitung in bestehende Betontragwerke werden beschrieben.

Hinweise zur Bemessung von Tragwerksverstärkungen mit vorgespannten CFK-Lamellen – sowohl mit als auch ohne Verbund – ermöglichen es, die Vor- und Nachteile der beiden Anwendungsarten gegeneinander abzuwägen und gezielt zu entscheiden, welche Art von Verstärkung an einem bestimmten Bauteil am besten geeignet ist.

Ergänzt wird der Bericht durch die Beschreibung einer Anzahl verschiedenartiger Tragwerksverstärkungen, welche mit vorgespannten CFK-Lamellen ausgeführt wurden. Damit sollen die Möglichkeiten und die Grenzen dieses Verstärkungsverfahrens aufgezeigt werden.

Résumé

Les travaux de recherche effectués depuis 1982 à l'EMPA, (Laboratoires fédéraux d'essais des matériaux et de recherche) et à l'EPFZ (École polytechnique fédérale de Zurich), dans le domaine des renforcements ultérieurs d'ouvrages en béton armé au moyen de bandes de PRFC collées, ont permis à des entreprises suisses d'occuper à l'échelle internationale une position de leaders dans ce domaine. Aujourd'hui, ce type de renforcement représente l'état actuel de la technique.

À part les nombreux avantages comme la résistance à la corrosion, le maniement et l'application simples ou l'insensibilité à la fatigue, les bandes en PRFC collées non précontraintes présentent néanmoins également quelques désavantages. La liaison collée rigide de la bande sur le béton fissuré produit des contraintes de traction élevées dans la bande au droit des fissures et des contraintes de cisaillement très élevées de part et d'autre des fissures. À cause de la résistance à la traction peu élevée de la zone superficielle du béton, la défaillance du renforcement en PRFC se produit dans la plupart des cas sous forme de rupture d'adhérence dans le béton. Du comportement élastique-linéaire des bandes en PRFC jusqu'à la rupture résulte en outre une capacité restreinte de déformation de la section en béton armé renforcée.

Par la mise en précontrainte de la bande en PRFC et son ancrage aux extrémités, la résistance du matériau peut mieux être utilisée, et il existe moins d'incertitude au sujet de la résistance ultime de l'élément structural renforcé. Dans les zones où l'on renonce à l'adhérence de la bande PRFC au béton, les déformations plastiques de la section en béton armé renforcée peuvent être admises. C'est sur ces considérations que le système de précontrainte à développer a dû être utilisable aussi bien avec que sans adhérence.

Le premier pas consiste à étudier les différentes possibilités d'ancrer la bande en PRFC dans un ancrage mobile. Des prototypes d'ancrages, fabriqués en acier et en aluminium, sont soumis à des essais de traction.

Ces essais servent de base pour le développement d'un ancrage mobile intégralement fabriqué en PRFC, testé et optimisé par de multiples essais.

Les ancres mobiles et fixes ainsi que les possibilités du transfert des forces dans des ouvrages en béton existants sont décrits.

Les indications au sujet du calcul et dimensionnement de renforcements d'ouvrages au moyen de bandes en PRFC – aussi bien avec que sans adhérence – permettent de peser les avantages et les désavantages des deux méthodes et de décider de façon bien ciblée quel type de renforcement convient le mieux pour un élément structural donné.

Le rapport est complété par la description d'un nombre de renforcements d'ouvrages divers exécutés au moyen de bandes en PRFC précontraintes, servant à illustrer les possibilités et les limites de cette méthode de renforcement.

Summary

Research work in the field of subsequent strengthening of reinforced concrete structures by means of bonded CFRP strips, being carried out since 1982 at EMPA (Swiss federal laboratories for materials testing and research) and at ETHZ (Swiss federal institute of technology Zurich), has allowed Swiss companies to occupy in this field a leader position on an international level. Today, this strengthening method is state of the art.

Bonded non-tensioned CFRP strips, besides many advantages such as corrosion resistance, ease of handling and application or insensitivity to material fatigue, have also some disadvantages. As a result of the rigid bond of the CFRP strip onto the cracked concrete, high tensile stresses arise in the strip in the cracked concrete zone and very high bond shear stresses occur in the vicinity of cracks. Because of the limited tensile strength of the concrete close to the surface, failure of the strip strengthening occurs in most cases in the form of bond failure in the concrete. From the linear-elastic material behaviour of CFRP strips up to failure, results moreover a limited deformation capacity of the strengthened reinforced concrete section.

If the CFRP strip is tensioned and anchored at the ends, the material strength can be utilized to a higher extent and there is less uncertainty regarding ultimate resistance of the strengthened structural part. In zones where no bond is established between concrete and CFRP strip, plastic deformations of the strengthened reinforced concrete section can be allowed.

The objective that the tensioning system for CFRP strips to be developed should be suitable as well for bonded as for non-bonded application, is based on these considerations.

In a first step, different possibilities for anchoring of the CFRP strip in a tensioning head are analyzed. Prototypes of tensioning heads made from steel and aluminium are subjected to tensile tests.

These tests serve as a basis for the development of a tensioning head made entirely from CFRP, tested and optimized in many steps.

Mobile and fixed anchor heads as well as the possibilities for the transfer of forces into existing concrete structures are described.

Information on design of structural strengthening – as well with as without bond – allows to weigh the advantages and disadvantages of both application methods and to decide which type of strengthening is best suited for a specific structural part.

The description of a number of different kinds of structures strengthened with tensioned CFRP strips completes this report, showing the possibilities and limits of this strengthening method.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Zahlreiche Massivbauten weisen bereits vor Erreichen der geplanten Lebensdauer einen ungenügenden Tragwiderstand auf oder verhalten sich im Gebrauchszustand nicht wie erwünscht. Gründe dafür sind zum Beispiel erhöhte Verkehrs- oder Nutzlasten, Mängel bei Konstruktion oder Ausführung, Änderungen am Tragsystem im Zusammenhang mit Umbauten oder Alterung in Form von Korrosion oder Materialermüdung.

Die Verstärkung von Stahlbetontragwerken kann entweder durch eine Vergrößerung des Querschnitts mit einer im Verbund zum bestehenden Tragwerk stehenden Stahlbetonergänzung oder durch eine ausserhalb des Querschnitts angeordnete Bewehrung erfolgen. Die Verbindung der externen Bewehrung mit dem Stahlbetonquerschnitt erfolgt im Fall einer geklebten Bewehrung über die ganze Länge an der Betonoberfläche, bei einer externer Vorspannung dagegen nur punktuell an den Verankerungs- und Umlenkstellen.

Der Einsatz von nachträglich auf den Beton aufgeklebten Stahllamellen als externe Bewehrung wurde erstmals 1967 von L'Hermite und Bresson [9] vorgestellt. Die begrenzte Länge der Stahllamellen, das hohe Gewicht und die Notwendigkeit, die Lamellen während des Erhärtens des Klebers an die Betonoberfläche anzupressen beschränken jedoch den Einsatzbereich dieses Verfahrens. Langzeitversuche an frei bewitterten, mit Stahllamellen verstärkten Stahlbetonträgern an der EMPA [4] zeigen zudem, dass an der Kontaktfläche Stahl – Beton Rost auftreten kann, welcher den Verbund beeinträchtigt.

Aus diesen Gründen wurde, zunächst hauptsächlich an der EMPA [10], die Entwicklung eines Systems für die Verstärkung von Stahlbeton mit geklebten Lamellen aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CRK) aufgenommen. Die weltweit erste praktische Anwendung von geklebten CFK-Lamellen zur Verstärkung eines Stahlbetontragwerks erfolgte 1991 an der Ibachbrücke in Emmen. In den folgenden Jahren hat sich dieses Bewehrungssystem weltweit verbreitet.

CFK-Lamellen sind im Gegensatz zu Stahllamellen leicht, können in grossen Längen transportiert werden und sind sehr einfach und schnell zu verarbeiten. Das Material ist ohne zusätzliche Schutzmassnahmen gegenüber den meisten Umwelteinflüssen beständig und weist eine ausgezeichnete Ermüdungsfestigkeit auf. Nachteilig ist das rein elastische Materialverhalten von CFK bis zum Bruch. Im Bereich von Rissen im Stahlbeton ergibt sich aufgrund des ebenfalls elastischspröden Klebstoffs eine Dehnungslokalisierung in der Lamelle und sehr hohe Verbundschubspannungen an beiden Rissufern. Das Versagen des Verbunds erfolgt durch Überschreiten der Zugfestigkeit des Betons. Das entfestigende Verhalten hat ein reissverschlussartiges, fortschreitendes Ablösen der Lamelle vom Beton nach überschreiten der maximalen Verbundfestigkeit zur Folge. Die Zugfestigkeit der Lamelle wird dabei im allgemeinen nicht erreicht.

Die Verformungsfähigkeit des Querschnitts ist gering und die Ausbildung von plastischen Verformungsbereichen in verstärkten Zonen ist nicht möglich. Bei der Konzeption von geklebten CFK-Lamellen-Verstärkungen an statisch unbestimmten Systemen ist daher besonders darauf zu achten, dass die Verstärkung nicht in Bereichen angebracht wird, in denen zum Erreichen der Traglast des Systems plastische Verformungen erforderlich sind. Ansonsten ist eine Aussage über die Wirksamkeit der Verstärkung zur Erhöhung der Tragfähigkeit nicht möglich.

Die kleine Querschnittsfläche und der verhältnismässig tiefe E-Modul der CFK-Lamellen erlauben nur eine minimale Verringerung von Durchbiegung und Ermüdungsspannung der inneren Bewehrung, insbesondere wenn sich das Tragwerk beim Anbringen der Verstärkung bereits im gerissenen Zustand befindet.

Mit einer Vorspannung der Lamelle vor dem Erhärten der Verklebung kann ein Teil der Lamellendeckung unmittelbar beim Anbringen der Verstärkung aktiviert werden. Die resultierende exzentrische Normalkraft führt zu einer Reduktion der Rissweiten und damit auch zu reduzierten Durchbiegungen und Ermüdungsspannungen der inneren Bewehrung. Zudem reduziert die Normalkraft die Öffnung und den Versatz von Schubrissen und ermöglicht damit grössere Lamellendeckung bis zum Abschälen von der Betonoberfläche [2]. Insgesamt wird mit der aufgetragenen Vordehnung und der im Vergleich zu schlaff aufgeklebten Lamellen grösseren Zusatzdehnung die Bruchdehnung der Lamelle erreicht und die Festigkeit des Materials kann voll ausgenutzt werden. Die Verbundspannungen am Ende einer gespannten Lamelle überschreiten jedoch bereits bei geringem Vorspanngrad die Verbundfestigkeit. Eine Endverankerung ist in jedem Fall notwendig, um ein Ablösen der Lamelle vom Beton unmittelbar nach dem Vorspannen zu verhindern.

Die Verformungsfähigkeit des verstärkten Bereichs ist beschränkt, wobei das Versagen im Allgemeinen in Form eines Lamellenbruchs erfolgt. Die Ausbildung von plastischen Verformungsbereichen in verstärkten Zonen ist wie bei schlaff aufgeklebten Lamellen nicht möglich.

Eine externe Vorspannung ohne Verbund verbessert sowohl das Gebrauchs- und Ermüdungsverhalten als auch die Traglast des verstärkten Systems. Die mit der Vorspannung aufgetragenen Normal- und Umlenkkräfte sind auch an der Abtragung von Lasten beteiligt, welche beim Anbringen der Verstärkung bereits auf das Tragwerk wirken. Unter der Voraussetzung, dass genügend schlaffe Bewehrung vorhanden ist, weist eine korrekt bemessene externe Vorspannung eine hervorragende Verformungsfähigkeit und Duktilität auf.

Ein Spannsystem für CFK-Lamellen ohne Verbund verbindet die Vorteile der CFK-Lamellenbewehrung mit denen einer externen Vorspannung. Die Spannglieder sind leicht, weisen einen kleinen Querschnitt auf und benötigen keinen Korrosionsschutz. Durch die Vorspannung wird das Gebrauchs- und Ermüdungsverhalten verbessert und die Traglast erhöht. Bei korrekter Bemessung bleibt die Duktilität des Systems auch nach der Verstärkung erhalten.

1.2 Ziel

Ziel der ersten Phase der Forschungsarbeit ist die Entwicklung eines am Bauwerk anwendbaren Spannsystems für CFK-Lamellen. Spannkopf und Verankerung werden aus Stahl hergestellt. Mit Prototypen aus Stahl kann mit verhältnismässig geringem Aufwand eine grosse Variation von grundsätzlich verschiedenen Konstruktionen erprobt werden. Das System wird bei einer Pilotapplikation im praktischen Einsatz erprobt.

Die zweite Phase hat zum Ziel, ein praxistaugliches Vorspannsystem für CFK-Lamellen mit einem Spannkopf aus Kunststoff zu entwickeln. Die Entwicklung des Spannkopfs erfolgt auf Grundlage der Resultate mit den Spannköpfen aus Stahl. Der Kunststoff-Spannkopf weist keine Korrosionsprobleme auf. Das Langzeitverhalten wird in Laborversuchen und Pilotapplikationen geprüft. Für die Verankerung und die Krafteinleitung in das Tragwerk werden Lösungen aus Stahl entwickelt.

1.3 Abgrenzung

Die weitere Optimierung des Spannkopfs aus Kunststoff sowie die Herstellung der für die Produktion notwendigen Werkzeuge erfolgt durch die StressHead AG mit eigenen Mitteln ausserhalb dieses Projekts.

Für einige Anwendungen sind Verankerungen aus Kunststoff wünschbar; deren Entwicklung erfordert einen sehr hohen finanziellen und zeitlichen Aufwand und ist daher nicht Bestandteil dieses Forschungsprojekts.

Im Anschluss an diese Forschungsarbeit wurde in Zusammenarbeit mit der Kommission für Technologie und Innovation (KTI) und der ETH Zürich bereits ein neues Projekt zur Entwicklung eines CFK-Lamellen-Spannsystems ohne Verbund in Angriff genommen. Die Entwicklung und Prüfung des Spannsystems mit einem optimierten Spannkopf aus Kunststoff, welche in diesem Bericht dargestellt wird, erfolgte teilweise bereits im Rahmen dieses neuen Projekts.

2 Entwicklung Spannverankerung aus Stahl

2.1 Einleitung

Ausgehend von einem Patent der StressHead AG wurden vier unterschiedliche Funktionsmuster von Spannköpfen aus Stahl entwickelt und im Frühling 1999 an insgesamt 8 Prototypen im Labor geprüft. Die wichtigsten Eigenschaften der Prüfkörper sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Prüfungen bestätigen die Machbarkeit einer Spannverankerung für CFK-Lamellen. Mit den 8 Prototypen wurde primär das Ziel verfolgt, den Einfluss verschiedener Parameter auf das Verhalten der Spannköpfe experimentell zu untersuchen. Zudem zeigte sich, dass eine kunststoffgerechte Formgebung des Spannkopfs realisierbar ist. Es wurde daher entschieden, direkt mit der Entwicklung eines Spannkopfs aus Kunststoff zu beginnen. Der Spannkopf aus Stahl wurde in der Praxis nur einmal an der Reussbrücke N4 in Flüelen eingesetzt. Für die ausgeführte Pilotapplikation wurde eine funktionsfähige Spannvorrichtung entwickelt. Die Entwicklung wurde aber nicht bis zu einem vollständigen, baustellentauglichen Spannsystem weitergeführt.

Versuch	Spannkopf	Lamelle	Länge	Bemerkungen
1-1	Typ 1	SIKA	2.50 m	Spannköpfe an beiden Enden
1-2	Typ 1	hexel	2.00 m	Fehlerhafte Verklebung
1-3	Typ 1	SIKA	3.00 m	Stahlbleche nicht aufgebogen
2-1	Typ 2	SIKA	3.00 m	
2-2	Typ 2	SIKA	3.00 m	
3-1	Typ 3	SIKA	3.00 m	
4-1	Typ 4	SIKA	3.00 m	kein Trennmittel
4-2	Typ 4	SIKA	3.00 m	Trennmittel, grössere Schrauben

Tabelle 1: Eigenschaften der Prüfkörper aus Stahl

2.2 Material

CFK-Lamelle

Die Eigenschaften der CFK-Lamellen welche für die Versuche und die Pilotapplikation eingesetzt wurden sind in Tabelle 2 zusammengefasst

Hersteller			SIKA	hexel ⁽²⁾
Typ			CarboDur S 812	
Querschnitt einer Lamelle	b/t	mm	80 / 1.2	80 / 0.7
Verklebte Lamellen			2	3
Gesamtquerschnitt ⁽¹⁾	b/ t	mm	80 / 2.4	80 / 2.1
E-Modul E	E	N/mm ²	165'000	113'000
Zugfestigkeit	σ_u	N/mm ²	2'800	1'170
Bruchdehnung	ϵ_u	‰	17.0	10.8

⁽¹⁾ Die Dicke der Klebstoffschichten zwischen den Lamellen wird nicht mitgerechnet, da der Beitrag zur Festigkeit und Steifigkeit des Gesamtquerschnitts vernachlässigt werden kann.

⁽²⁾ Dieser Lamellentyp kam bei einem Versuch mit einem Spannkopf vom Typ 1 und bei der ersten Pilotapplikation zum Einsatz

Tabelle 2: CFK-Lamellen Spannkopf Stahl

Eine Einführung über Herstellung, Materialeigenschaften und Anwendung von CFK-Lamellen ist in Anhang 1 enthalten.

Klebstoff

Sämtliche Verklebungen an den Versuchskörpern wurden mit dem Zweikomponenten-Epoxidharz-Klebstoff Araldit 2011 (Ciba-Geigy) ausgeführt.

Die Resultate der Vorversuche, welche im September 1998 mit diesem Klebstoff durchgeführt wurden, sind in Tabelle 3 zusammengestellt

		kalt erhärtet ⁽¹⁾		warm erhärtet ⁽²⁾
E-Modul	E	N/mm ²	1'500	12'000
Zugfestigkeit	f_t	N/mm ²	14	53
Bruchdehnung	ϵ_t	‰	9.2	9.0

⁽¹⁾ 24 Std bei Raumtemperatur ($\approx 20^\circ\text{C}$)

⁽²⁾ 20 Std bei Raumtemperatur ($\approx 20^\circ\text{C}$), anschliessend 50 Min. bei 70°C

Tabelle 3: Mechanische Eigenschaften von Araldit 2011

Bei allen Versuchskörpern wurde der Klebstoff warm ausgehärtet.

Stahlblech

Die Bleche zur Verklebung der CFK-Lamellen bei den Versuchskörpern Typ 1,2 und 3 bestehen aus Stahlblech HARDOX 400. Ausgangsmaterial sind Bleche von 4 mm Stärke. Die Mittelwerte der mechanischen Eigenschaften dieses harten, hochfesten Feinkornstahls sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Elastizitätsmodul	E	210'000	N/mm ²
Zugfestigkeit	f _t	1'250	N/mm ²
Streckgrenze	f _y	1'000	N/mm ²
Brinellhärte	HB	400	

Tabelle 4: Materialeigenschaften Stahlblech Hardox 400

Aluminium

Die Aluminiumteile der Spannköpfe wurden in QP-60 Formalu (DIN Al Zn Mg Cu 2.0; EN AW – 7050) ausgeführt. Das Material ist sehr gut verarbeitbar, weist eine gute Formstabilität auf und hat eine hohe Streckgrenze. Die Mittelwerte der mechanischen Eigenschaften sind in Tabelle 5 zusammengefasst:

Elastizitätsmodul	E	71'000	N/mm ²
Zugfestigkeit	f _t	580	N/mm ²
Streckgrenze	f _y	540	N/mm ²
Brinellhärte	HB	190	

Tabelle 5: Materialeigenschaften Aluminium QP-60

2.3 Spannkopf

Problematik

Wird eine Klebverbindung zwischen einer dünnen CFK-Lamelle und einem steifen Untergrundmaterial auf Schub belastet, entstehen am freien Ende der CFK-Lamelle sehr hohe Schubspannungsspitzen in der Klebschicht. Die Festigkeit der Verklebung wird bereits bei geringen Zugspannungen in der Lamelle überschritten und das entfestigende Verhalten des Klebstoffs führt in der Folge zu einem reissverschlussartigen, fortschreitenden Versagen der Verbindung.

Dieses Verhalten der Klebverbindung kann mit einer einfachen FE-Berechnung anschaulich aufgezeigt werden. Eine 2.4 mm dicke CFK-Lamelle wird auf einer Länge von 80 mm über eine 0.2 mm dicke Klebschicht mit zwei Stahlblechen von 20 mm Stärke verklebt. Die Lamelle wird mit einer Spannung von 3000 N/mm² in Längsrichtung belastet (Abbildung 1).

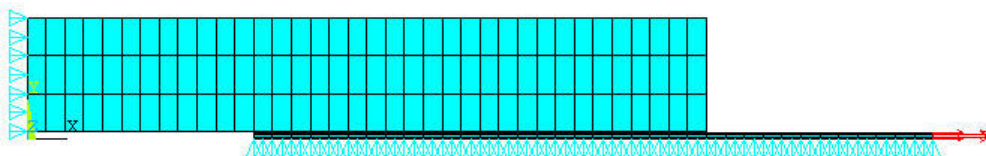


Abbildung 1: FE-Modell Klebverbindung unter Schubbeanspruchung

Spannsystem für CFK-Lamellen

Der Verlauf der 1. Hauptspannung in der Klebstoffschicht über die Länge der Klebfuge ist in Abbildung 2 dargestellt.

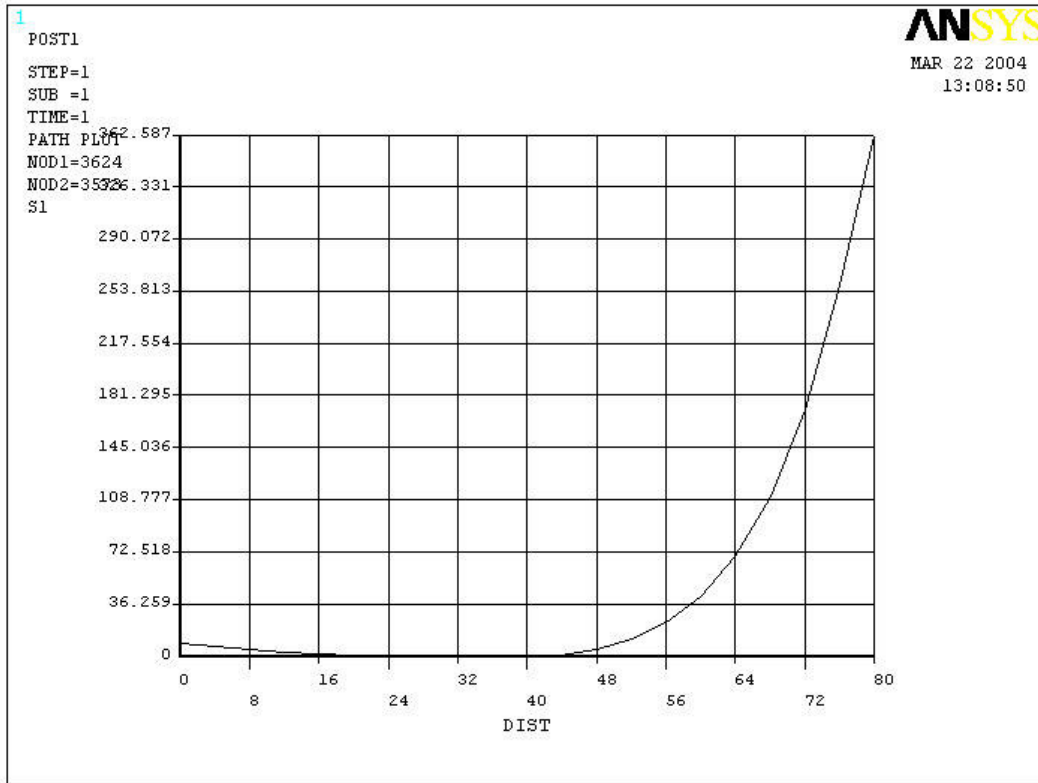


Abbildung 2: 1. Hauptspannung in der Klebstoffschicht

Es ist deutlich erkennbar, dass nur etwa die ersten 20 mm der Klebverbindung an der Kraftübertragung beteiligt sind. Die maximale Spannung überschreitet die Zugfestigkeit des Klebstoffs um mehr als das 6-fache. Damit ist klar, dass mit einer derartigen Verankerung nicht die gewünschte Effizienz erreicht werden kann.

Mit vier unterschiedlichen Arten der Verankerung der CFK-Lamelle im Spannkopf wird versucht, diese Problematik zu umgehen und eine Verankerung zu entwickeln, welche es erlaubt, die Zugfestigkeit der CFK-Lamelle weitgehend auszunützen.

Die grundsätzliche Funktion dieser Typen wird nachfolgend kurz beschrieben und in Zeichnungen dargestellt.

Typ 1

Die CFK-Lamelle wird am Ende in drei Teile von je 0.8 mm Dicke aufgespaltet und zwischen hochfesten Stahlblechen verklebt. Um den Steifigkeitsunterschied zwischen Stahlblechen und CFK-Lamelle zu reduzieren sind die Bleche derart zugeschliffen, dass die Blechstärke am Ende gegen Null ausläuft. Die zwei inneren Stahlbleche sind kürzer als die äusseren. Zudem sind die beiden äusseren Bleche am Ende aufgebogen, um eine grössere Klebschichtdicke zu erreichen. Die Blechstärke wird durch die Verwendung von hochfestem Stahlblech verringert. Diese Massnahmen dienen dazu, die Spannungsspitzen in der Klebschicht durch eine abgestufte Steifigkeitszunahme der Stahlbleche zu reduzieren. Die Form mit aufgebogenen, gegen das Ende dünner werdenden Stahlblechen wurde aus Berechnungen mit Finite-Element-Modellen abgeleitet. Die Kraft wird von den Stahlblechen über einen Bolzen in einen Verankerungsblock aus Aluminium

Spannsystem für CFK-Lamellen

übertragen, welcher in der Prüfmaschine festgeklemmt wird. Der Aufbau des Spannkopfs ist in Abbildung 3 dargestellt. In Abbildung 4 ist der Spannkopf vor dem Vergiessen der CFK-Lamellen zu sehen.

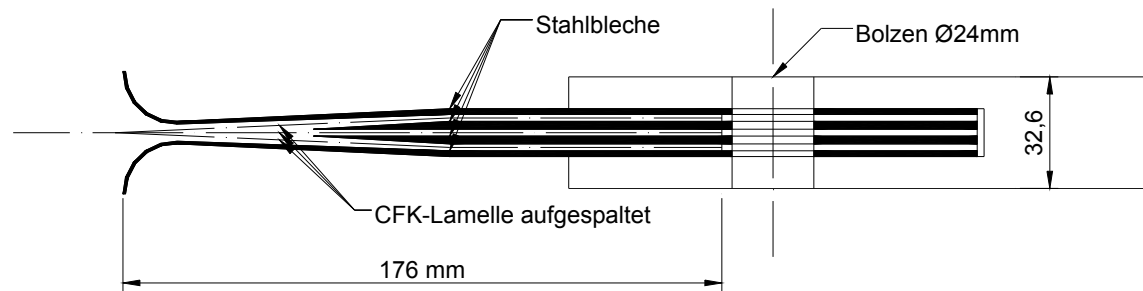


Abbildung 3: Aufbau Spannkopf Stahl Typ 1

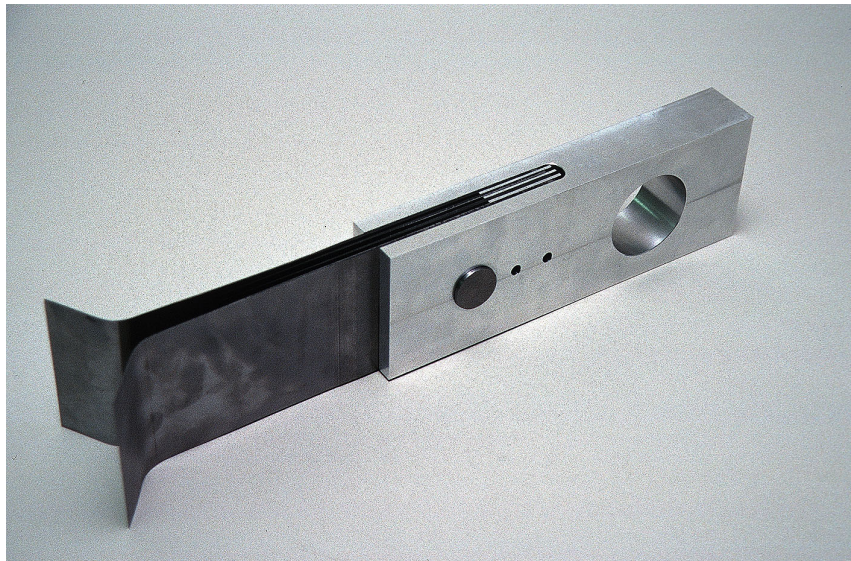


Abbildung 4: Spannkopf Stahl Typ 1 vor dem Vergiessen der CFK-Lamellen

Typ 2

Die äusseren Bleche werden bei diesem Typ nicht aufgebogen und alle Bleche weisen die gleiche Länge auf. Der Umlenkwinkel der einzelnen Enden der Lamelle wird damit gegenüber Typ I vergrössert. Um ein weiteres Aufspalten der Lamellen ausgehend vom Spannkopf zu vermeiden, wird die CFK-Lamelle vor dem Spannkopf mit einer Klemme zusammengepresst.

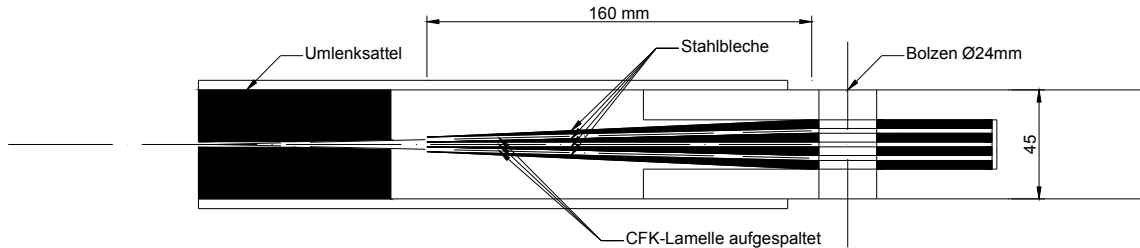


Abbildung 5: Spannkopf Stahl Typ 2

Typ 3

Im Bereich der höchsten Schubspannungen in der Klebverbindung am Ende der Stahlbleche wird auf einer Länge von 40 mm ein Querdruck von 50 N/mm^2 aufgebracht. Zu diesem Zweck wird eine Klemmvorrichtung angebracht, die mit vorgespannten Schrauben gegen die Stahlbleche gedrückt wird. Der Aufbau des Spannkopfs ist in Abbildung 6 dargestellt. In Abbildung 7 ist der Prototyp nach Abschluss der Prüfung zu sehen.

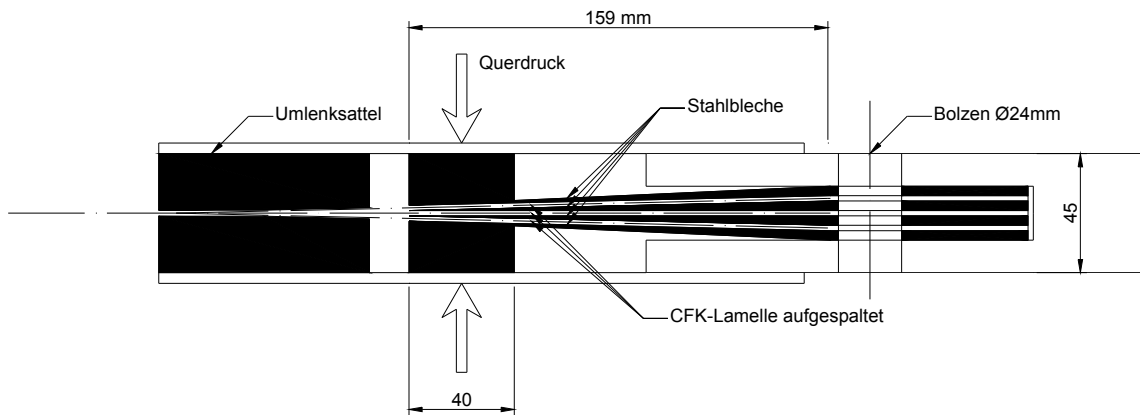


Abbildung 6: Spannkopf Stahl Typ 3

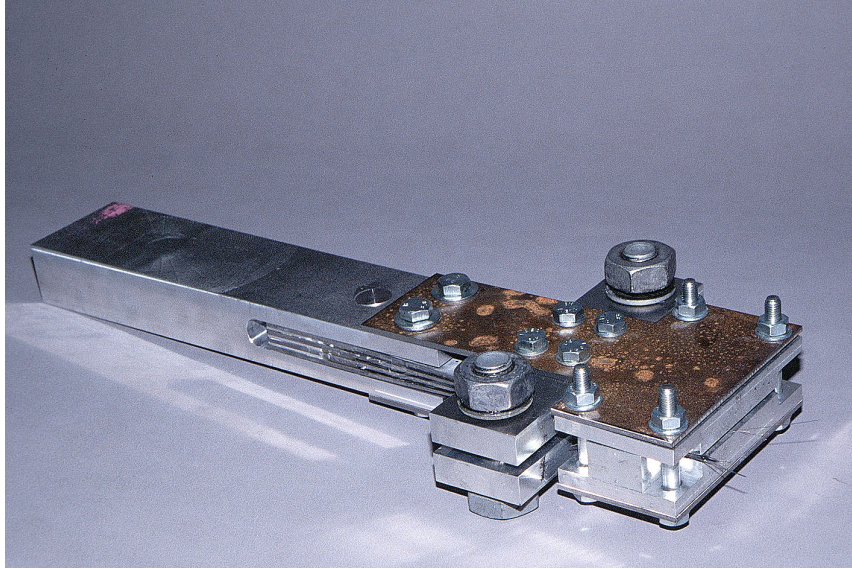


Abbildung 7: Spannkopf Stahl Typ 3 nach der Prüfung

Typ 4

Die CFK-Lamelle wird in zwei Enden aufgespaltet und zwischen einem Innenkeil und einem Aussenkeil in einem Klebstoffverguss verankert. Der Aussenkeil ist in einen zweiteiligen Aluminiumblock eingefräst, der zugleich zur Verankerung in der Prüfmaschine dient. Die beiden Teile des Aluminiumblocks werden durch vorgespannte Schrauben verbunden. Bei Zugbeanspruchung der Lamelle erzeugt die Bewegung der Keile einen günstig wirkenden Querdruck auf die Verklebung. Der Aufbau des Spannkopfs ist in Abbildung 8 dargestellt. In Abbildung 9 ist der Prototyp 4-1 nach der Prüfung in demontiertem Zustand zu sehen.

Beim Versuchskörper 4-2 wird die Oberfläche des äusseren Keils mit einem Trennmittel behandelt, um eine gemeinsame Bewegung von Innenkeil und CFK-Lamelle gegenüber dem Aussenkeil zu erreichen.

Spannsystem für CFK-Lamellen

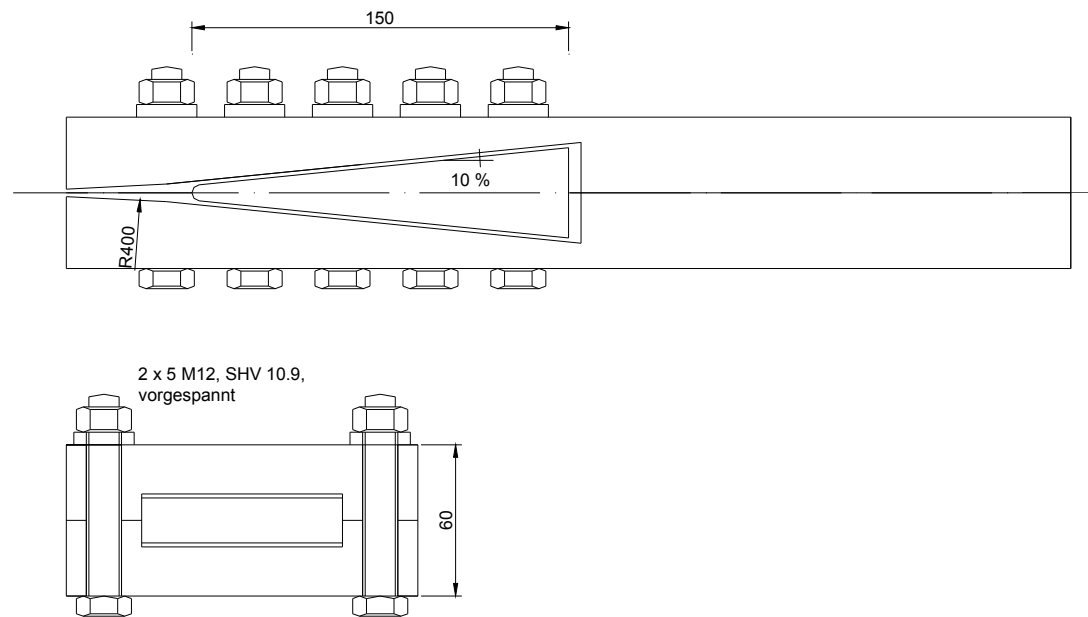


Abbildung 8: Spannkopf Stahl Typ 4

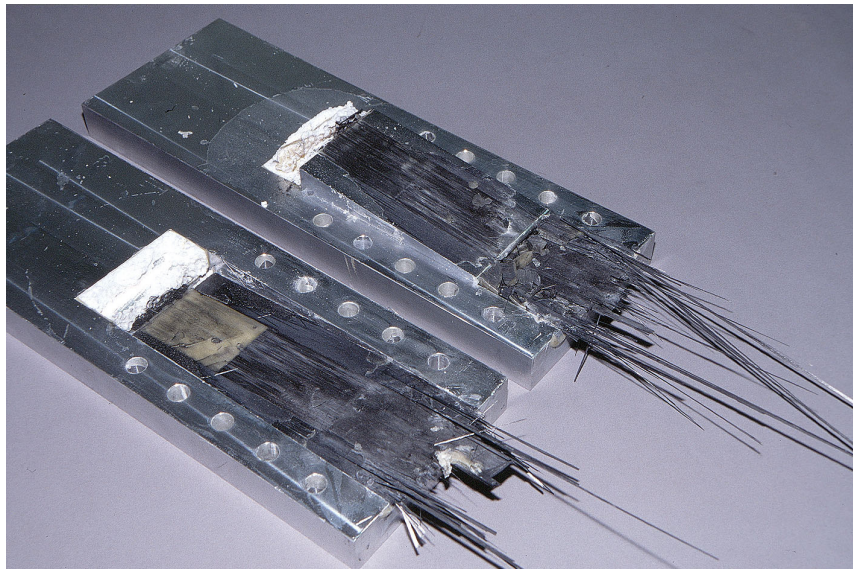


Abbildung 9: Spannkopf Stahl Typ 4 nach der Prüfung, demontiert

3 Prüfung Spannverankerung aus Stahl

3.1 Versuchsprogramm und Resultate

Versuche am Spannglied

Die Versuche am Spannglied wurden an der ETH Zürich in einer servohydraulischen Universalprüfmaschine durchgeführt. Die CFK-Lamellen sind an einem Ende mit dem zu prüfenden Spannkopf versehen. Die Aluminiumblöcke der Spannköpfe dienen dabei zum festklemmen der Prüfkörper in der Prüfmaschine. Am anderen Ende der Lamelle sind Aluminiumbleche aufgeklebt, über welche die Lamelle in die Klemmbanken der Prüfmaschine eingespannt werden kann. Die ganze Anordnung ist in Abbildung 10 dargestellt. Die Resultate aller durchgeführten Versuche sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Von Interesse ist dabei vor allem die Effizienz der Verankerung, welche durch das Verhältnis $\sigma_{\max} / f_{t,Lamelle}$ ausgedrückt wird.

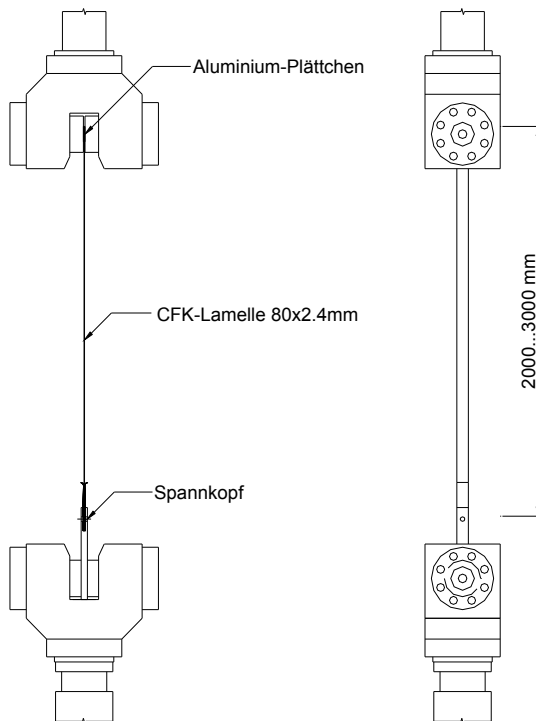


Abbildung 10: Prüfmaschine mit Spannkopf Typ 1

Versuch am Spannsystem

Vor der ersten Anwendung an einem Bauwerk wurde ein komplettes Spannsystem an der Materialprüfstelle der Hochschule Technik + Architektur Luzern geprüft. Das System besteht aus einem Schlaufen-Spannglied mit 2 Spannköpfen, einer beweglichen Verankerung in Form einer Anker-

platte, an welche die Spannköpfe angehängt werden können und einem justierbaren Umlenksattel. Das Spannsystem wurde um einen Prüfbalken gelegt, welcher den zu verstärkenden Querträger ersetzt, und mit einer hydraulischen Presse bis zur vorgesehenen Vorspannkraft belastet. Die Prüfeinrichtung sowie die Resultate sind in [5] beschrieben. Die Pilotapplikation ist in Abschnitt 4.1 sowie in [1] und [12] beschrieben.

Versuch	Datum	σ_{\max} [N/mm ²]	$f_{t,Lamelle}$ [N/mm ²]	$\sigma_{\max} / f_{t,Lamelle}$ %
Versuch 1-1	18.09.98	1060	2800	38%
Versuch 1-2	04.02.99	615	1170	53%
Versuch 1-3	24.02.99	1420	2800	51%
Versuch 2-1	24.03.99	1450	2800	52%
Versuch 2-2	24.03.99	1860	2800	66%
Versuch 3-1	24.02.99	2890	2800	103%
Versuch 4-1	24.02.99	2460	2800	88%
Versuch 4-2	24.03.99	1790	2800	64%

Tabelle 6: Zusammenstellung Versuchsergebnisse Spannkopf Stahl

3.2 Schlussfolgerungen

Eine Endverankerung der CFK-Lamelle im Spannkopf ausschliesslich über eine Klebverbindung ist zum Erreichen der vorgesehenen hohen Vorspanngrade nicht geeignet. Die Streuung der Festigkeit infolge von Ungenauigkeiten bei der Herstellung und weiteren, nicht näher bekannten Parametern ist zu gross. Im Bereich der Verklebung muss zwingend ein Querdruck aufgebracht werden.

Eine sehr einfache Lösung für die Endverankerung einer gespannten CFK-Lamelle besteht darin, die Lamelle wie üblich mit der Betonoberfläche zu verkleben und darüber auf einer Klebstoffschicht eine Stahlplatte zu versetzen und mit vorgespannten Dübeln gegen den Beton zu drücken. Die Dübel dienen dabei zugleich zum Aufbringen des Querdrucks auf die Verklebung als auch zum Abtragen des Anteils der Zugkraft der Lamelle, welcher in die Stahlplatte eingeleitet wird. Diese Lösung wurde bereits von Deuring [2] zum Verankern der gespannten CFK-Lamellen an Versuchsträgern verwendet.

Die gespannten Dübel verlieren durch Kriechen im Verankerungsbereich einen Teil ihrer Vorspannkraft. Zusätzlich kriecht auch der Klebstoff. Damit reduziert sich langfristig der auf die Klebschicht wirkende Querdruck und damit auch deren Festigkeit. Wird die Schubfestigkeit der Dübel ausgenutzt, wie dies bei einem derartigen System der Fall ist, tritt eine grosse Kriechverformung auf. Diese ist ungefähr um den Faktor 10 grösser als die Verschiebung der Lamelle bei Erreichen der maximalen Schubverformung des Klebstoffs. Langfristig entziehen sich die Dübel der Lastabtragung und die Beanspruchung der Klebverbindung nimmt zu. Die Vorspannkraft muss daher erheblich tiefer angesetzt werden als die in kurzfristigen Versuchen ermittelten Festigkeiten erlauben würden.

Günstiger verhalten sich Systeme, bei denen der Querdruck durch ein Keilsystem aus der Vorspannkraft der Lamelle erzeugt wird. Die Krafteinleitung in das Tragwerk sollte dabei zusätzlich mit Systemen erfolgen, welche eine kleinere Kriechverformung aufweisen als Dübel, die auf Schub beansprucht werden.

Es wurde daher entschieden, den Spannkopf aus Kunststoff ausgehend vom Typ 4 zu entwickeln, auch wenn Typ 3 im Kurzzeitversuch die besseren Resultate zeigte.

4 Anwendung Spannsystem Stahl

4.1 Pilotapplikation Reussbrücke N4, Flüelen

Die Autobahn A4 überquert die Reuss bei Flüelen ungefähr 500 m oberhalb deren Einmündung in den Vierwaldstättersee auf einer dreifeldrigen Spannbetonbrücke. Die Brücke besteht aus fünf vorgefertigten, vorgespannten Längsträgern, welche mit vorgespannten Ortsbeton-Querträgern verbunden sind. Die Fahrbahnplatte besteht aus Betonbrettern mit einer Ortsbeton-Ergänzung.

Die Tragfähigkeit der Längsträger sowie der Widerstand der Fahrbahnplatte gegen Durchstanzen von Einzelradlasten ist ungenügend. An verschiedenen Stellen wurde infolge einer ungenügenden Betonüberdeckung Korrosion an schlaffer und gespannter Bewehrung festgestellt. Aufgrund dieser Resultate der Zustandsuntersuchung wurde entschieden, die Brücke durch einen Neubau zu ersetzen.

Während des Brückenersatzes musste ständig eine Fahrspur für den Verkehr zur Verfügung gestellt werden. In einer ersten Phase wird eine Hälfte der bestehenden Brücke mit zwei Längsträgern abgebrochen. An dieser Stelle wird der komplette Überbau der neuen Brücke um eine halbe Brückenbreite versetzt angeordnet erstellt. Der Verkehr rollt während dieser Phase über die verbleibende Hälfte der bestehenden Brücke. Anschliessend wird der Verkehr auf die neue Brücke umgeleitet und die zweite Hälfte der bestehenden Brücke wird abgebrochen. Zum Abschluss erfolgt der Querverschub des neuen Überbaus an seine definitive Lage.

Die Querträger, welche in der ersten Bauphase durchtrennt werden müssen, sind hauptsächlich mit einem Vorspannkabel bewehrt, das in einem glatten Kunststoffhüllrohr liegt. Es ist davon auszugehen, dass die Vorspannkraft nach dem Durchtrennen des Spannkabels aufgrund des auftretenden Schlupfs zwischen Injektionsmörtel und Hüllrohr weitgehend verloren geht. Am Bauwerk wurde diese Annahme bestätigt. Die Querträger sind zur Verteilung der Verkehrslasten, zur Stabilisierung der Längsträger sowie zum Einleiten der Horizontalkräfte in die Widerlager und Pfeiler notwendig. Um diese Funktionen während des provisorischen Betriebs zu gewährleisten, wird eine temporäre externe Vorspannung als Ersatz für die durchtrennten Spannkabel angebracht.

Bei 10 der 11 Querträger werden dazu gespannte Stahlstangen eingesetzt. Bei einem Querträger kommt ein schlaufenförmig angeordnetes CFK-Lamellen-Spannglied zum Einsatz wie es auf Abbildung 11 zu sehen ist. Die beiden Spannköpfe am Ende der Lamelle sind in Brückenmitte angeordnet und stützen sich auf eine gemeinsame Ankerplatte ab, die in einer Aussparung im Querträger versetzt ist. Am Rand-Längsträger wird der in Abbildung 12 sichtbare, mit Mörtel untergossene, justierbare Stahl-Umlenksattel mit einem Umlenkradius von 15 cm angebracht. Zur Durchführung der Lamellen werden beidseitig des Querträgers Schlitze in den Längsträgern erstellt. Das Spannen des Schlaufen-Spannglieds erfolgt mit einer Flachpresse, welche unter der Ankerplatte in Brückenmitte angebracht ist. Nach dem Spannen des CFK-Spannglieds und aller Stahl-Spannstangen werden die Querträger und die Fahrbahnplatte durchtrennt. Der Spannvorgang wurde durch die Materialprüfstelle der Hochschule Technik + Architektur Luzern überwacht [6]. Kurz vor dem Abbruch der zweiten Brückenhälfte wurde die Dehnung der CFK-Lamelle nochmals überprüft [7]. Es konnte keine Reduktion der Lamellendehnung festgestellt werden.

Spannsystem für CFK-Lamellen

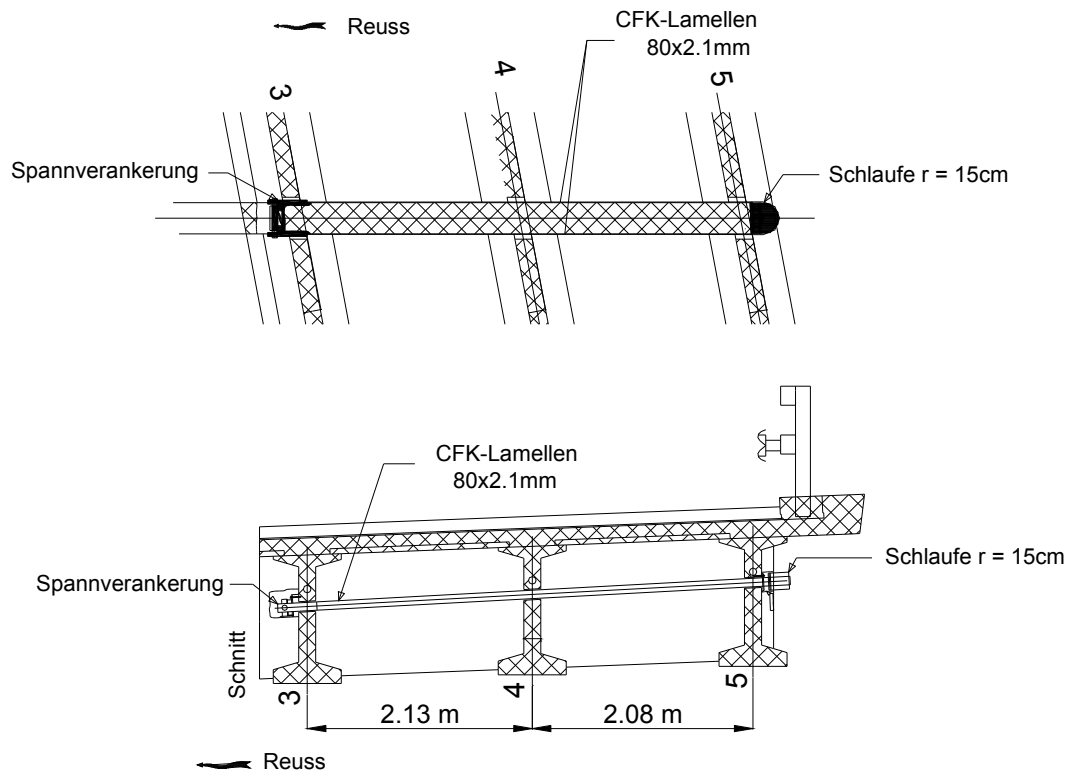


Abbildung 11: Übersicht Querträgerverstärkung Reussbrücke N4



Abbildung 12: Umlenksattel am Randträger

5 Entwicklung Spannsystem Kunststoff

5.1 Überblick

Die Entwicklung eines Spannkopfs aus Kunststoff sowie der erforderlichen festen und beweglichen Verankerungen ist Bestandteil dieses Forschungsauftrags. Zudem sollen Lösungen für die Kräfteinleitung in das Tragwerk aufgezeigt werden. Die Bezeichnung der Bestandteile des Spannsystems ist in Abbildung 13 definiert.

Spannvorgang

Endzustand

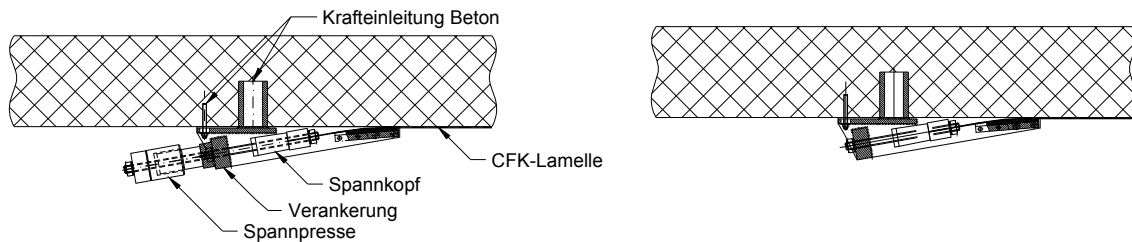


Abbildung 13: Bezeichnung der Bestandteile

Die Herstellung von Prototypen eines Spannkopfs aus Kunststoff erfordert zunächst erhebliche Investitionen in den Formenbau. Ausgehend von der Entscheidung für das Prinzip der Keilverankerungen wurden umfangreiche Berechnungen an Finite-Element-Modellen durchgeführt. Die Kraftübertragung von der Lamelle in den Spannkopf wurde mit einfachen Modellen experimentell untersucht.

Trotz den umfangreichen Abklärungen vor der Herstellung der ersten Prototypen wurden inzwischen noch erhebliche Änderungen an der Konstruktion vorgenommen. Diese erfolgten teilweise aufgrund der Versuchsergebnisse zur Verbesserung der Effizienz der Verankerung; teilweise dienten sie der kostenmässigen Optimierung der Herstellung. Inzwischen ist kein Bestandteil des aktuell produzierten Spannkopfs mehr identisch mit dem ersten Prototyp.

5.2 CFK-Lamelle

Die Eigenschaften der verwendeten hochfesten CFK-Lamelle sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Bezeichnung	Sika CarboDur S624
Querschnitt	60 mm x 2.4 mm = 144 mm ²
Bruchspannung	$f_{tk} = 2'800 \text{ N/mm}^2$
Bruchdehnung	1.7 %
E-Modul	$E = 165 \text{ kN/mm}^2$
Zugfestigkeit	$F_{u,L} = 403 \text{ kN}$

Tabelle 7: Eigenschaften der CFK-Lamelle

Spannsystem für CFK-Lamellen

Die Dicke dieser Lamelle ist doppelt so gross wie die einer schlaff aufgeklebten Lamelle. Die übrigen Materialeigenschaften sind identisch. Querschnittsfläche, E-Modul und Bruchspannung der Lamelle werden während der Produktion laufend überwacht.

Ohne spezielle Massnahmen kann ein minimaler Umlenkradius von 1 m realisiert werden.

5.3 Spannkopf

Die CFK-Lamelle wird in einem vollständig aus kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen bestehenden Spannkopf verankert, der auf Abbildung 14 zu sehen ist. Das Spannglied, bestehend aus CFK-Lamelle und CFK-Spannkopf, wird im Werk montiert. Vor der Auslieferung wird an jedem Spannglied eine Zugprüfung mit 1.1-facher Vorspannkraft durchgeführt.

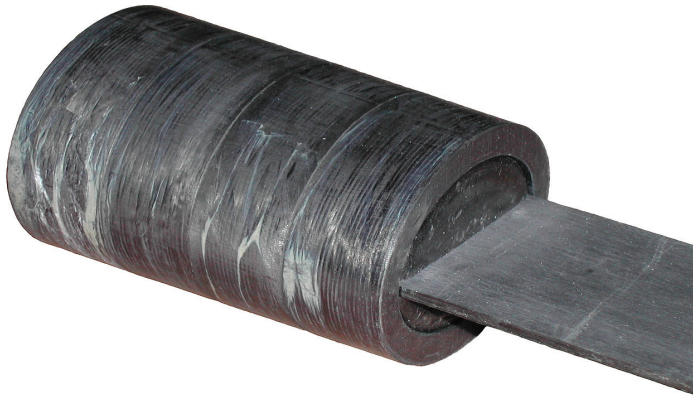


Abbildung 14: Spannkopf Kunststoff

Die Eigenschaften des CFK-Lamellen-Spannglieds sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

Vorspannkraft P_0	220 kN
Vorspannung σ_{P0}	1540 N/mm ²
Lamellendehnung bei P_0	9.1 ‰
Verankerte Zugkraft $F_{u,S}$ (Minimum)	300 kN
Bruchspannung des CFK-Spannglieds (Minimum)	2080 N/mm ²

Tabelle 8: Eigenschaften des CFK-Lamellen-Spannglieds

5.4 Bewegliche Verankerung

Der Spannkopf stützt sich auf die Verankerung ab, welche die Spannkraft über eine Krafteinleitung in das Tragwerk weiterleitet. Die Konstruktion von Verankerung und Krafteinleitung kann an die Randbedingungen des jeweiligen Projekts angepasst werden.

Spannsystem für CFK-Lamellen

Die bewegliche Verankerung weist eine genügend grosse Verstellbarkeit auf, um zusätzlich zum Spannweg sämtliche Toleranzen, welche beim Versetzen der Verankerung sowie bei der Herstellung des Spannglieds auftreten, aufnehmen zu können. Nach Abschluss des Spannvorgangs ermöglicht sie eine dauerhafte Blockierung in beliebiger Endstellung.

Bei ersten Art der beweglichen Verankerung, welche in Abbildung 15 zu sehen ist, stützt sich der Spannkopf auf eine geschlitzte Traverse ab, welche vor dem Spannkopf über die CFK-Lamelle geschoben wird. Die Kraft wird über zwei seitlich neben dem Spannkopf liegende Gewindestangen in die Konstruktion zur Krafteinleitung in das Tragwerk weitergeleitet.

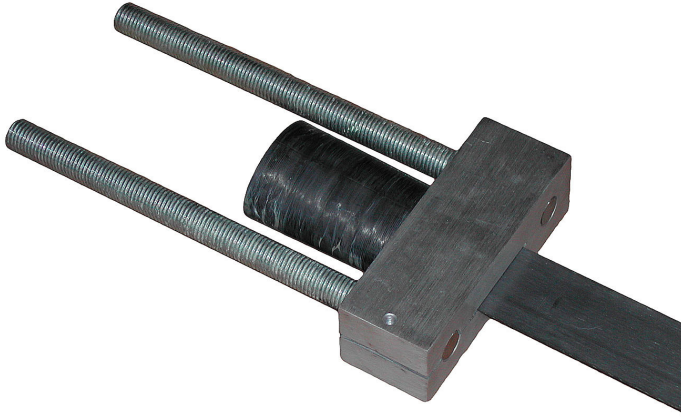


Abbildung 15: Verankerung Typ I

Die zweite Art der Verankerung, welche in Abbildung 16 zu sehen ist, besteht aus einer mit einem Aussengewinde versehenen Auflage für den Spannkopf, welche sich über eine Ringmutter auf die Konstruktion zur Krafteinleitung in das Tragwerk abstützt.

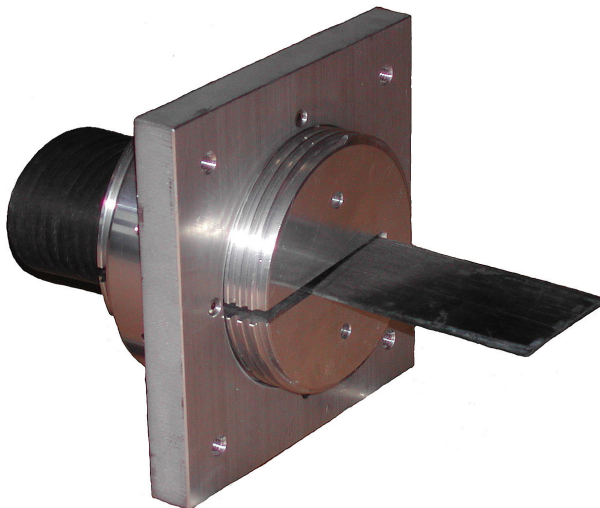


Abbildung 16: Verankerung Typ II

5.5 Feste Verankerung

Bei der festen Verankerung der gespannten CFK-Lamelle können zwei grundsätzlich verschiedene Fälle unterschieden werden. Im einen Fall muss die CFK-Lamelle in einem Bereich verankert werden, in dem sie parallel zur Betonoberfläche verläuft. Im anderen Fall kann das Spannglied an einer Betonoberfläche verankert werden, die rechtwinklig zur Lamellenachse steht.

Im zweiten, einfacheren, Fall besteht die feste Verankerung lediglich aus einer geschlitzten Stahlplatte, welche als Auflage für den Spannkopf und zur Krafteinleitung in den Beton dient. Eine feste Verankerung dieser Art wurde bei der Verstärkung eines Unterzugs im Shopping Center Emmen (Abschnitt 0) eingesetzt und ist auf Abbildung 17 zu sehen. In anderen Anwendungen wurde das Spannglied in einer Kernbohrung durch die als Auflage dienende Betonoberfläche hindurchgeführt.

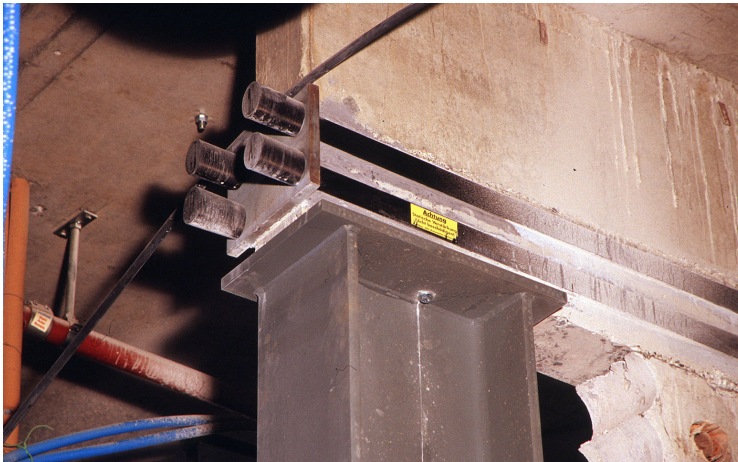


Abbildung 17: Feste Verankerung mit Ankerplatte

Für den ersten Fall mit Vorspannkraft parallel zur Betonoberfläche wurde eine feste Verankerung mit Krafteinleitung über einen Schubdorn entwickelt. Der Spannkopf liegt auf einer geschlitzten Traverse, welche sich über eine kreisförmige Auflagefläche auf den Schubdorn abstützt. Dieser ist in ein mit einer Kernbohrung erstelltes Loch im Beton eingeklebt. Die kreisförmige Auflagefläche zwischen Traverse und Schubdorn ermöglicht es dem Spannkopf, sich zwängungsfrei auszurichten.



Abbildung 18: Feste Verankerung mit Schubdorn

5.6 Krafteinleitung

Die Krafteinleitung in das Tragwerk muss an das Material sowie die geometrischen und sonstigen Randbedingungen des zu verstärkenden Bauteils angepasst werden. Für die Krafteinleitung von beweglichen Verankerungen in den Beton kommen die bei den festen Verankerungen vorgestellten Lösungen in Frage.

Die Krafteinleitung normal zu einer Bauteiloberfläche erfolgt mit einer aufgelegten Stahlplatte.

Die Krafteinleitung tangential zur Bauteiloberfläche kann durch ein in einer Kernbohrung versetztes Stahlrohr erfolgen, welches als grosser Schuborn wirkt. Für jede Verankerung ist damit nur eine einzige Kernbohrung erforderlich, deren Lage an die Lage der Bewehrung angepasst wird. Zwängungen und Schiefstellungen werden vermieden, da sich das System selbsttätig ausrichtet. Eine bewegliche Verankerung mit Krafteinleitung über einen Schubdorn ist in Abbildung 19 zu sehen. Im Allgemeinen wird der Zwischenraum zwischen Beton und Stahlrohr vergossen.

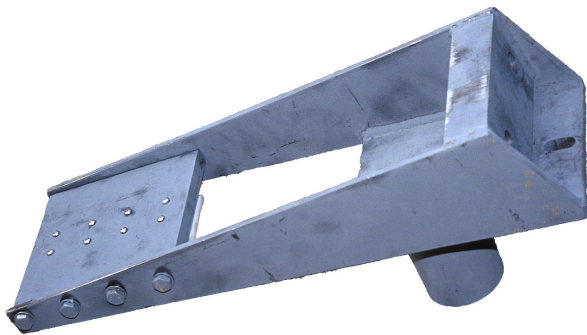


Abbildung 19: Krafteinleitung mit Schubdorn

Dübel sind zum Einleiten der Vorspannkraft in das Tragwerk weniger geeignet. Zum Einleiten der Vorspannkraft sind mindestens 6 Schwerlastanker mit genügend gegenseitigem Abstand (mehr als 30 cm) notwendig. Ob eine solche Dübelgruppe sich in der gewünschten Weise an der Lastabtragung beteiligt ist sehr unsicher, allein schon aufgrund der unvermeidlichen Ungenauigkeit beim versetzen der Dübel. Der minimale gegenseitige Abstand der Spannsysteme beträgt damit mindestens 50 cm. Bei Verstärkungen an Bauteilen mit beschränkten Platzverhältnissen, beispielsweise an einem Unterzug, ist damit der maximal mögliche Verstärkungsgrad sehr beschränkt.

Aus den hier vorgestellten Lösungen für bewegliche und feste Verankerungen und für die Krafteinleitung in den Beton lässt sich durch Kombination und Anpassung für beinahe jede Situation einen passende Verankerung herstellen. Beispiele dazu sind in Abschnitt 8 vorgestellt.

Der Korrosionsschutz der Verankerung wird an die jeweilige Exposition angepasst. Grundierung, Anstrich, Feuerverzinkung, Feuerverzinkung und Anstrich oder rostfreier Stahl sind möglich.

5.7 Spanngeräte

Der Spannvorgang erfolgt in jedem Fall mit einer hydraulischen Presse. Dies ermöglicht die Kontrolle von Spannweg und Spannkraft und den Vergleich mit den errechneten Sollwerten.

6 Prüfung Spannsystem Kunststoff

6.1 Kurzzeitprüfung (Zugversuch)

Die Kurzzeitversuche werden in einer servohydraulischen Universalprüfmaschine mit einer maximalen Zugkraft von 1600 kN durchgeführt. Die CFK-Lamellen weisen eine Länge von 2.00 m auf und sind an einem Ende mit einem Spannkopf versehen. Die Auflagefläche des Spannkopfs weist die gleichen Abmessungen auf wie die Verankerung, welche im Spannsystem verwendet wird. Von dieser Auflage wird die Zugkraft über Gewindestangen auf einen in der Prüfmaschine festgeklemmten Verankerungsblock aus Stahl übertragen. Am anderen Ende der Lamelle sind Aluminiumbleche aufgeklebt, über welche die Lamelle in die Klemmbacken der Prüfmaschine eingespannt werden kann. Die ganze Anordnung ist in Abbildung 20 dargestellt.

Zusätzlich zum Kolbenweg und der Zugkraft der Maschine wird auch die Lamellendehnung mit Dehnmessstreifen (DMS) gemessen. Ein eventueller Schlupf der Lamelle gegenüber dem Spannkopf kann mit insgesamt 3 Weggebern u_1 - u_3 gemessen werden. Alle Messwerte werden während der ganzen Belastungsdauer kontinuierlich (in einem Abstand von 2 Sekunden) ausgelesen.

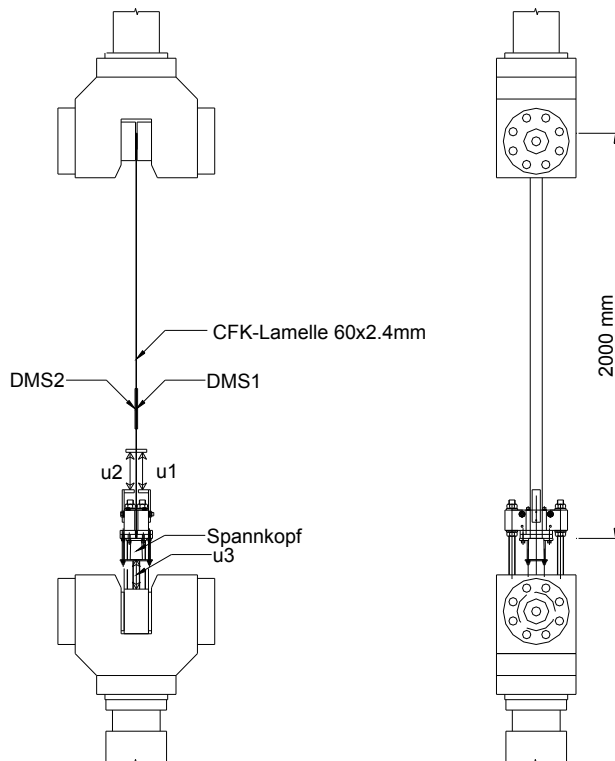


Abbildung 20: Anordnung Kurzzeitprüfung

Die Belastung erfolgt weggesteuert nach einem Programm, das von den Prüfbedingungen für konventionelle Spannsysteme abgeleitet wurde. Der Versuchsablauf ist in Abbildung 21 dargestellt. Nach einer langsamen, weggesteuerten Belastung bis 65% der minimalen Zugfestigkeit f_{tk} der Lamelle (Vorspannung: $0.55 f_{tk}$) wird diese Kraft 2 Stunden lang gehalten. Nach einer Entlas-

ung auf 10% der Zugfestigkeit wird der Versuchskörper mit einer erhöhten Verformungsgeschwindigkeit bis zum Bruch belastet.

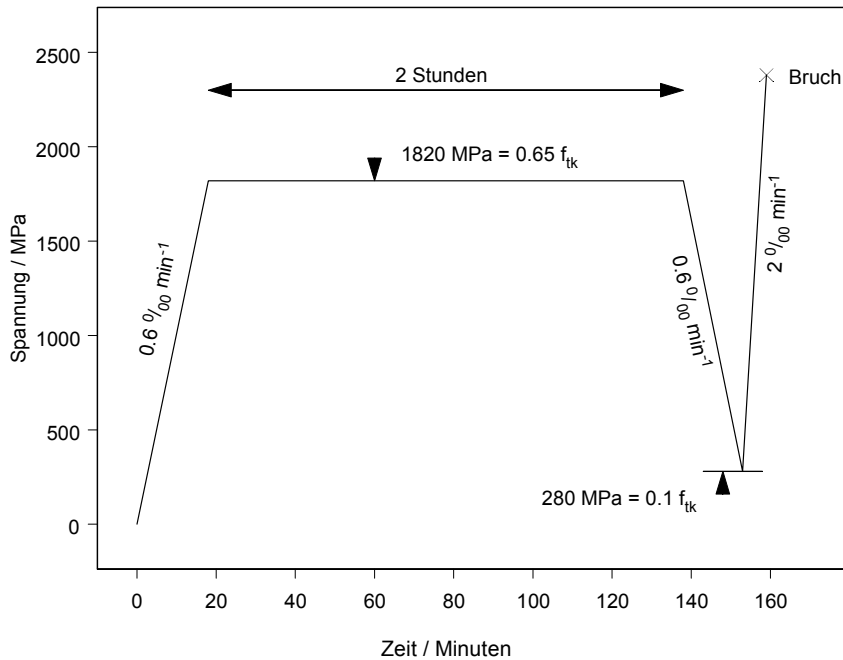


Abbildung 21: Verlauf Kurzzeitprüfung

Als Anforderung wurde festgelegt, dass in einer Versuchsserie von 3 Prüfkörpern bei keinem die minimale Bruchlast von $0.75 f_{tk}$ unterschritten werden darf. Diese Bedingung wird mit dem zurzeit produzierten Spannkopf problemlos erfüllt. Vorspanngrad und die Mindestanforderung an die Zugfestigkeit des Spannglieds wurde auf Grundlage der in Abschnitt 7.2 dargestellten Überlegungen festgelegt.

Insgesamt wurden 7 Versuchsreihen mit je 3 oder 4 Zugprüfungen durchgeführt. Bei jeder Versuchsreihe wurde der Spannkopf gegenüber der vorherigen Reihe modifiziert. Ziel der Entwicklung war die Gewährleistung einer zuverlässigen Verankerung unter reproduzierbaren Bedingungen bei gleichzeitiger Optimierung des Herstellungsprozesses. Die erzielten Spannglied-Bruchlasten aller durchgeführten Kurzzeit-Zugversuche sind in Abbildung 22 zusammengestellt. Die Zuordnung der Zugversuche zu den Versuchsreihen ist in Tabelle 9 aufgeführt.

Reihe	Zugversuche	Bemerkungen
1	1, 2, 3	Ursprünglicher Entwurf
2	4, 5, 6	Wie Reihe 1
3	7, 8, 9, 10	Vereinfachte Konstruktion
4	11, 12, 13	Weitere Vereinfachungen
5	14, 15, 16	Konstruktion wie Reihe 4, optimierte Abmessungen (variabel)
6	17, 18, 19	Abmessungen und Toleranzen abgestimmt
7	20, 21, 22, 23	Wie Reihe 6, Stichprobe aus laufender Produktion entnommen

Tabelle 9: Versuchsreihen Kurzzeit-Zugversuche

Spannsystem für CFK-Lamellen

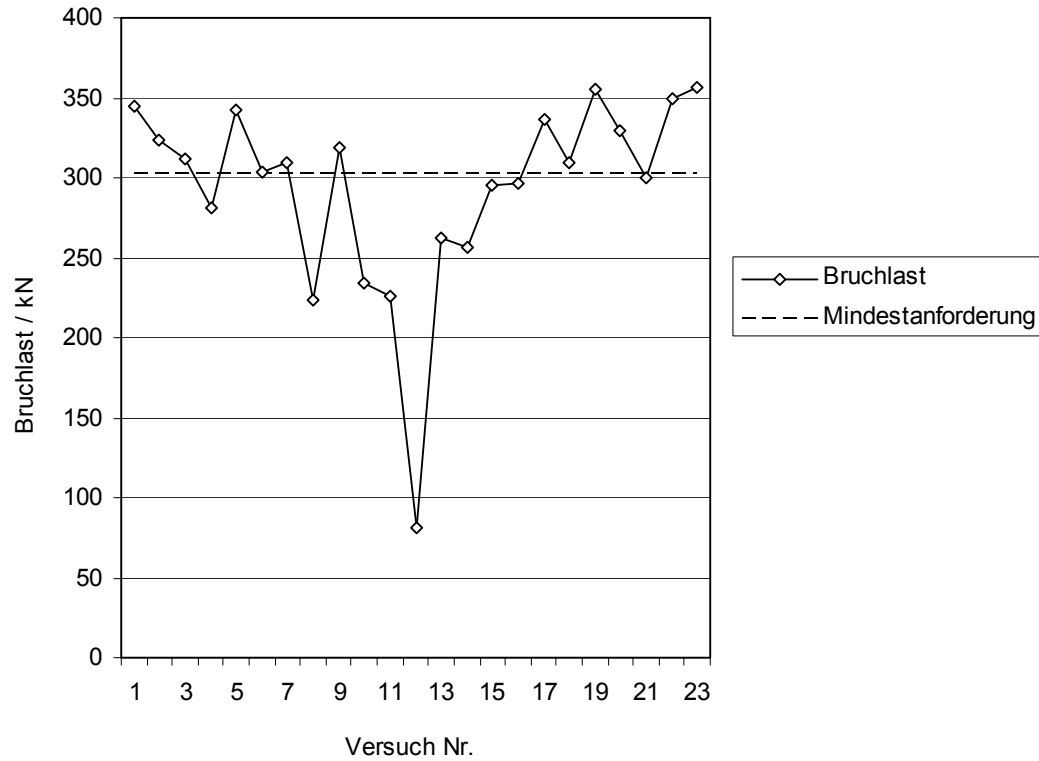


Abbildung 22: Resultate Kurzzeit-Zugversuche

In Abbildung 23 sind die Resultate der Zugversuche nach Versuchsreihe zusammengestellt. Dargestellt ist jeweils die minimale und die maximale Zugfestigkeit sowie der Mittelwert der Versuchsreihe.

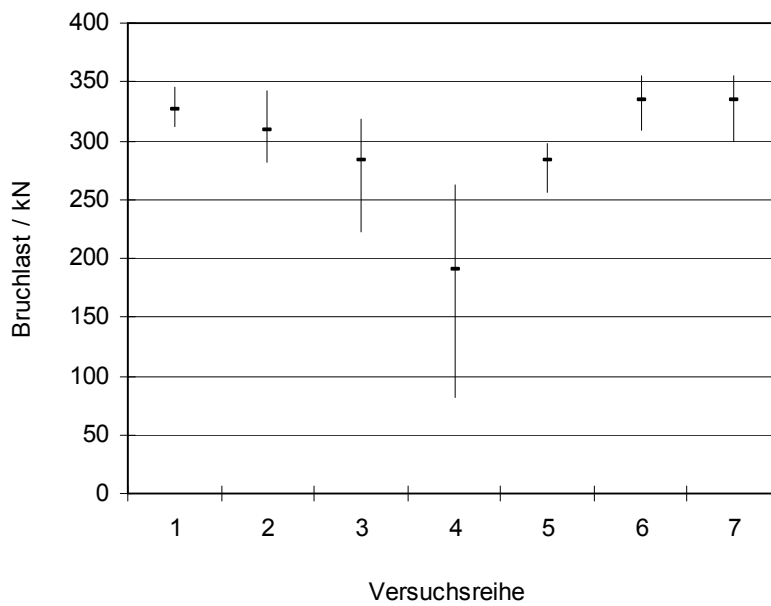


Abbildung 23: Resultate Kurzzeit-Zugversuche nach Versuchsreihen (Min., Max., Mittelwert)

6.2 Ermüdungsversuche

Ein Ermüdungsversagen der CFK-Lamelle oder des komplett aus CFK bestehenden Spannkopfs ist bei den an Tragwerken effektiv auftretenden Kombinationen von Spannungsamplitude und Schwingungszahl nicht zu erwarten. Mit dem „Ermüdungsversuch“ soll geprüft werden, ob die zyklische Beanspruchung einen sich ständig vergrößernden Schlupf zwischen Lamelle und Spannkopf bewirken kann.

Im Rahmen dieses Entwicklungsprojekts wurde ein Vorversuch mit dem gleichen Versuchsaufbau wie bei den Kurzzeitversuchen durchgeführt. Die Ermüdungslast wurde mit folgenden Parametern aufgebracht:

- Unterspannung / Oberspannung: $\sigma_u / \sigma_o = 1540 \text{ N/mm}^2 / 1740 \text{ N/mm}^2$
- Spannungsamplitude: $\Delta\sigma = 200 \text{ N/mm}^2$
- Anzahl Zyklen: 157'000

Um in kurzer Zeit eine näherungsweise Prognose über das Verhalten bei einer grösseren Anzahl von Schwingungszyklen zu ermöglichen, wurde im Versuch eine im Vergleich zu real auftretenden Werten sehr hohe Spannungsamplitude von 200 N/mm^2 gewählt. Dieser Versuch musste vor dem geplanten Ende abgebrochen werden, weil bei der Einspannung der CFK-Lamelle in die Prüfmaschine ein Bruch aufgetreten ist. Beim Spannkopf, der eigentlich geprüft werden sollte, konnten dagegen keine Anzeichen einer „Ermüdung“ festgestellt werden. Insbesondere ergab sich keine Zunahme des Schlupfs zwischen CFK-Lamelle und Spannkopf während der zyklischen Belastung.

6.3 Langzeitprüfung (Zugversuch)

Die Langzeitprüfung des Spannglieds wurde in Form eines Relaxationsversuchs durchgeführt. Eine CFK-Lamelle mit Spannköpfen an beiden Enden wird mit einer hydraulischen Presse vorgespannt und anschliessend mit einer konstanten Gesamtverlängerung blockiert. Öldruck und Dehnmessstreifen dienen der Kontrolle der Vorspannkraft. Während der Dauer des Versuchs werden die Lamellendehnung und der Schlupf zwischen Lamelle und Spannkopf kontinuierlich gemessen.

Ein Spannglied wurde als Vorversuch von Dezember 2001 bis Februar 2002 auf diese Weise geprüft. Der Versuch diente hauptsächlich der Prüfung der Versuchsanordnung. Das Spannglied bestand aus überzähligem Material der Versuchsreihe 4 der Kurzzeitversuche und das Verhalten der Spannköpfe variierte dementsprechend stark. Der einwandfrei funktionierende Spannkopf an einem Ende des Spannglieds wies am Ende des Versuchs einen Schlupf infolge Kriechen von nur ungefähr 0.02 mm auf. Infolge des starken Anfangskriechens des Spannkopfs am anderen Ende des Spannglieds und dem dadurch erforderlichen mehrmaligen Nachspannen ist eine genauere Auswertung des Versuchs nicht möglich. Ein Kriechversuch mit konstanter Lamellenzugkraft würde eine einfachere Auswertung der Versuchsergebnisse erlauben.

Einige Erfahrung mit dem Langzeitverhalten des Systems konnte bereits im Rahmen von ausgeführten Verstärkungen gesammelt werden. Bei der ersten Pilotapplikation, der Querträgerverstärkung einer Brücke (Abschnitt 4.1), wurden die Lamellendehnungen unmittelbar nach dem Spannen und 6 Monate später vor dem Ausbau des Systems gemessen [6] [7]. Die bei der Verstärkung der Fahrbahnplatte der Escherkanalbrücke (Abschnitt 0) eingebauten CFK-Spannglieder sind vom Hohlkasten aus dauerhaft gut zugänglich. Einige Lamellen wurden nicht mit dem Beton verklebt. Bei diesen kann die verbliebene Vorspannkraft auch langfristig einfach mit Hilfe einer hydraulischen Presse (Abhebetest) überprüft werden.

7 Hinweise zur Bemessung

7.1 Grundlagen

Die Erläuterungen in diesem Abschnitt beziehen sich auf das Spannsystem ohne Verbund für CFK-Lamellen. Wie in Abschnitt 1.1 dargestellt, weist dieses System klare Vorteile gegenüber einem Spannsystem mit Verbund auf. Bemessungsempfehlungen für ein CFK-Lamellen-Spannsystem mit Verbund wurden daher nicht im Detail ausgearbeitet.

Eine Verstärkung muss folgende Anforderungen erfüllen:

- Das verstärkte Tragwerk entspricht hinsichtlich Gebrauchstauglichkeit und Tragsicherheit den gültigen Normen
- Das vorhandene Verformungsvermögen wird so wenig wie möglich eingeschränkt; das Versagen der Verstärkung erfolgt während dem Fließen der internen Bewehrung
- Das Versagen der Verstärkung erfolgt im Spannglied und nicht in der Verankerung

Das Bemessungskonzept basiert auf folgenden Normen:

- SIA 260 „Grundlagen der Projektierung von Tragwerken“, Ausgabe 2003
- SIA 261 „Einwirkungen auf Tragwerke“, Ausgabe 2003
- SIA 262 „Betonbau“, Ausgabe 2003
- SIA 263 „Stahlbau“, Ausgabe 2003
- SIA 166 „Klebebewehrungen“, Ausgabe 2004 (Vornorm)

7.2 Spannglied

Die Anforderungen an das CFK-Spannglied werden sinngemäss aus den Anforderungen an ein konventionelles Spannglied mit Stahllitzen oder Stahldrähten abgeleitet. Dabei sind materialspezifische Besonderheiten von CFK zu berücksichtigen.

Bei konventionellen Spannsystemen mit Stahlzuggliedern wird verlangt, dass die Prüflast des Spannglieds mindestens 95% der effektiven Zugfestigkeit $A_{p,eff} \cdot f_{p,eff}$ des Zugglieds erreicht. Dies entspricht näherungsweise 100% der nominellen Zugfestigkeit. Gleichzeitig muss die Verlängerung des Zugglieds auf der freien Strecke mindestens 20 ‰ betragen. In Abbildung 24 links sind diese beiden Bedingungen in ein typisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Spannstahl eingetragen. Diese beiden Anforderungen, die gut auf das Materialverhalten von Spannstahl abgestimmt sind, ergeben einen genügenden Abstand des Bruchzustands von der aufgebrachten Vorspannung σ_{P0} sowohl in Bezug auf die Verlängerung $\Delta \epsilon$ als auch in Bezug auf die Spannungszunahme $\Delta \sigma$.

Spannsystem für CFK-Lamellen

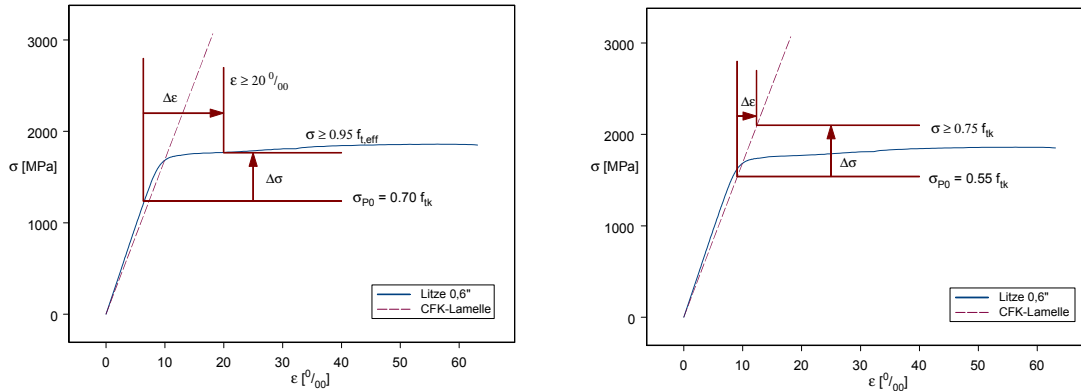


Abbildung 24: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Spannstahl und CFK

Die sehr stark anisotropen Materialeigenschaften von CFK-Lamellen und das rein elastische Materialverhalten schliessen eine ähnlich einfache und effiziente Endverankerung wie bei Stahlлитzen aus. Das Verhältnis von Längszugfestigkeit zu Querszugfestigkeit beträgt ungefähr 70:1 (2800 MPa / 40 MPa).

Bei konventionellen Spannsystemen wird mit der geforderten Effizienz der Verankerung von 95% erreicht, dass das Zugglied auch bei einem Spannsystem ohne Verbund ins Fließen kommen kann, vorausgesetzt, das Tragwerk weist eine ausreichende Verformung auf. Bei CFK-Lamellen gibt es aufgrund des rein elastischen Materialverhaltens bis zum Bruch keine vergleichbare Begründung für die Forderung nach einer hohen Effizienz der Verankerung. Die zum Gewährleisten einer genügenden Sicherheit erforderliche Differenz zwischen Vorspannung und Bruchspannung bleibt in jedem Abschnitt des Spannungs-Dehnungs-Diagramms gleich. Die Zielsetzung besteht darin, einen Sprödbruch des Spannglieds vor Erreichen der Traglast des Gesamttragwerks zu vermeiden.

Bei CFK-Lamellen-Spannsystemen ohne Verbund kann damit die Effizienz der Verankerung auf der Grundlage einer wirtschaftlichen Optimierung gewählt werden; die zulässige Vorspannung ergibt sich daraus. Eine genügende Verformungsfähigkeit des verstärkten Tragwerks ist in jedem Fall gegeben.

Dabei kann die Verlängerung eines Spannglieds ohne Verbund im Bruchzustand näherungsweise mit einem Starrkörper-Rotationsmechanismus [13] ermittelt werden. Der nominelle Bruchzustand einer vorgespannten Platte wird in SIA 262 mit $w_R = L/40$ festgelegt. Bei einer üblichen Plattenschlankheit von $h = L/30$ ergibt sich für die Spanngliedverlängerung:

$$\frac{\Delta l}{L} = 4 \frac{w_R}{L} \frac{h}{L} = 4 \frac{L}{40} \frac{1}{30} = 3.3 \text{ ‰}$$

Bei Balken ist die Spanngliedverlängerung im Bruchzustand im allgemeinen geringer. Eine Abschätzung wird in Abbildung 25 vorgenommen. Zum Vergleich werden zwei vorgespannte Betonträger betrachtet, die in der Mitte durch eine monoton steigende Einzellast F belastet werden (Abbildung 25a). Die Träger haben eine Spannweite von 12 m. Im Querschnitt sind sie als Stringer-Querschnitt gemäss Abbildung 25b idealisiert. In Abbildung 25b ist oben rechts das Spannungs-Dehnungs Diagramm der Spannstahlлитze und der CFK-Lamelle dargestellt. Unten links ist das Last-Verformungs-Diagramm für beide Balken angegeben.

Das Verhalten des Systems mit einer Vorspannung mit Verbund wurde nach dem Zuggurtmodell berechnet [11]. Das Verhalten des Systems mit Vorspannung ohne Verbund wird mit Starrkörper-Rotationsmechanismus nach [13] erfasst. Dabei wird nach SIA 262 eine nominelle Bruchdurchbiegung von $1/40$ der Spannweite angenommen. Die Querschnittsfläche der beiden Vorspannun-

Spannsystem für CFK-Lamellen

gen wurden so gewählt, dass die Bruchlast beider Systeme ungefähr gleich ist. Die Vorspannung des Lamellenspannglieds wird mit 1540 N/mm^2 angenommen, der Bruch erfolgt bei 2080 N/mm^2 .

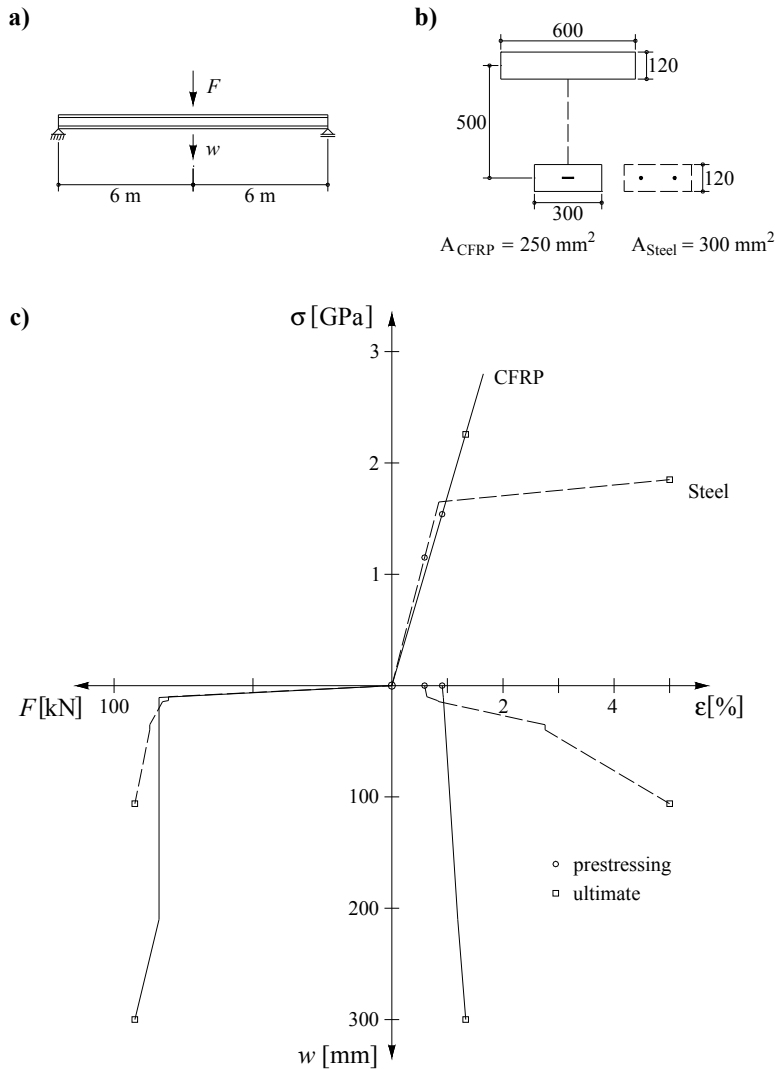


Abbildung 25: Last-Verformungs-Verhalten von vorgespannten Betonträgern mit einer Vorspannung aus CFK-Lamelle ohne Verbund oder Stahlritzen: (a) Statisches System; (b) Querschnitt (Abmessungen in mm); (c) Spannungs-Dehnungs- und Kraft-Verformungs-Diagramm

Bei einer Zusatzdehnung des CFK-Spannglieds ohne Verbund von 3.3 ‰ resultiert eine wesentlich grössere Bruchdurchbiegung als beim konventionell mit Stahl im Verbund vorgespannten Balken. Mit einer Vorspannung von 220 kN und einer minimalen Bruchlast des Spannglieds von 300 kN resultiert in jedem Fall eine ausreichende Bruchverformung.

Die Bestimmungen aus SIA 166 über die Festlegung des Bemessungswerts der Lamellenzugfestigkeit können nicht ohne Anpassung verwendet werden, da sie sich auf ein Verstärkungssystem mit schlaff auf die Betonoberfläche aufgeklebten Lamellen beziehen, welche ein vollständig anderes Verhalten aufweisen. Gemäss SIA 166 wird der Bemessungswert der Lamellenzugfestigkeit mit folgender Formel bestimmt:

$$f_{td} = \frac{\eta \cdot f_{tk}}{\gamma_M} \quad \text{mit } \gamma_M = 1.30 \text{ für Faserverbundwerkstofflamelle}$$

Spannsystem für CFK-Lamellen

Der Umrechnungsfaktor kann für ein Spannsystem ohne Verbund mit $\eta = 1.0$ eingesetzt werden. Bei einer minimalen Zugfestigkeit der Lamelle von $f_t = 2800 \text{ N/mm}^2$ resultiert damit ein Bemessungswert der Lamellenzugfestigkeit $f_{td} = 2150 \text{ N/mm}^2$ bzw. bei einem Lamellenquerschnitt von 144 mm^2 ein Bemessungswert der Lamellenbruchlast $F_{td} = 310 \text{ kN}$.

Die wichtigsten mechanischen Eigenschaften des Spannglieds, welche für die Bemessung der Verankerung, der Krafteinleitung in das Tragwerk und zum Nachweis des verstärkten Systems benötigt werden sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Lamellenquerschnitt	$60 \text{ mm} \times 2.4 \text{ mm} = 144 \text{ mm}^2$
E-Modul	$E = 165 \text{ kN/mm}^2$
Bruchdehnung	1.7 %
Vorspannkraft P_0	220 kN
Lamellendehnung bei P_0	9.3 ‰
Verankerte Zugkraft $F_{u,S}$ (Minimum)	300 kN

Tabelle 10: Mechanische Eigenschaften des Spannglieds

7.3 Bemessung der Verankerung

Die Bruchlast der Verankerungsteile aus Stahl $F_{u,Verankerung}$ muss grösser sein als die Bruchlast des CFK-Spannglieds $F_{u,Spannglied}$. Es gilt die Bedingung:

$$F_{u,Spannglied} \leq F_{u,Verankerung}$$

Mit den in Tabelle 10 aufgeführten Kennwerten des Spannglieds gilt:

$$F_{u,Verankerung} \geq 300 \text{ kN}$$

Zudem darf die Verankerung unter Vorspannlast an keiner Stelle ins Fließen kommen.

Der Nachweis der Verankerung kann sowohl rechnerisch als auch experimentell erfolgen.

7.4 Nachweis des Krafteinleitungsbereichs

Für den Nachweis der Krafteinleitung in den Beton wird zwischen einem inneren und einem äusseren Krafteinleitungsbereich unterschieden. Im inneren Krafteinleitungsbereich wird die Übertragung der Vorspannkraft von den Stahlteilen der Verankerung auf den Beton nachgewiesen. Im äusseren Krafteinleitungsbereich wird die Ausbreitung der Vorspannkraft im Beton untersucht.

Das Bemessungsziel für den inneren Krafteinleitungsbereich besteht darin, einen Betonbruch vor Versagen des Spannglieds oder der Verankerung zu vermeiden. Dies wird durch folgende Anforderung erreicht:

$$1.1 \text{ Max}(F_{u,Spannglied}, F_{u,Verankerung}) \leq F_{u,Beton}$$

Mit den in Tabelle 10 aufgeführten Kennwerten ergibt sich:

$$F_{u,Beton} \geq 1.1 \cdot 300 \text{ kN} = 330 \text{ kN}$$

Der Nachweis der Tragsicherheit des unmittelbaren Krafteinleitungsbereichs erfolgt im allgemeinen experimentell durch Verankerungsversuche. Ein rechnerischer Nachweis ist prinzipiell möglich, ergibt jedoch meist geringere Bruchlasten.

Spannsystem für CFK-Lamellen

Die Untersuchung der Kraftausbreitung im äusseren Krafteinleitungsbereich erfolgt nach Norm SIA 262. Zusätzlich zu der oben genannten Bedingung ist auch der Fall Vorspannung als Leiteinwirkung nachzuweisen mit:

$$P_d = \gamma_p P_0 \text{ mit } \begin{array}{l} \gamma_p = 1.5 \text{ für ein einzelnes Spannglied} \\ \gamma_p = 1.2 \text{ für eine Spanngliedgruppe} \end{array}$$

Genügt die vorhandene Bewehrung für den Nachweis der Tragsicherheit nicht, kann die erforderliche Ergänzung zum Beispiel in Form einer geklebten Oberflächenbewehrung angebracht werden.

7.5 Nachweise am verstärkten Tragwerk

Günstige Wirkung der Vorspannkraft

Das CFK-Lamellen-Spannsystem ohne Verbund kann analog zu einer konventionellen Vorspannung ohne Verbund behandelt werden.

Zur Bestimmung der langfristig wirksamen Vorspannkraft P_∞ müssen die Spannkraftverluste bekannt sein. Diese treten an folgenden Stellen auf:

- Relaxation der CFK-Lamelle
- Kriechen des Betons
- Kriechen der Krafteinleitung
- Kriechen im Spannkopf

Die Relaxation der CFK-Lamelle ist bei der aufgetragenen Vorspannung vernachlässigbar.

Der Vorspanngrad einer externen Vorspannung mit CFK-Lamellen, welche nachträglich zur Verstärkung eines Tragwerks angebracht wird, ist im Allgemeinen klein. Zudem weist der Beton beim aufbringen der Spannkraft meist ein grosses Alter auf. Aus diesen Gründen ist das Kriechen des Betons infolge Vorspannung in den meisten Fällen vernachlässigbar.

Bei den vorgeschlagenen Konstruktionen zur Krafteinleitung in den Beton sind die lokalen Spannungen wesentlich tiefer als bei einer Verankerung mit Dübeln. Der Beton im Krafteinleitungsbereich weist meist ein hohes Alter auf. Der Spannkraftverlust infolge Kriechverformung in diesem Bereich ist daher sehr klein.

Erste Resultate der Langzeitversuche zeigen, dass der Schlupf zwischen Spannkopf und CFK-Lamelle eine zeitabhängige Komponente aufweist. Die Versuchsdauer ist im Moment noch zu kurz, um eine zuverlässige Prognose über den Endwert dieser Verformungen zu machen. Sie beträgt jedoch mit Sicherheit nicht mehr als wenige 1/10 mm.

Bis genauere Resultate vorliegen, wird vorgeschlagen, pauschal pro Verankerung eine Kriechverformung von 1 mm anzunehmen. Bereits bei einer Spanngliedlänge von 4 m entspricht dies einem Verlust von nur 5 %.

Für Gebrauchstauglichkeitsnachweise wird die Vorspannkraft P_∞ eingesetzt.

Für den Nachweis der Tragsicherheit darf ein Zuwachs der Lamellenzugkraft infolge der Verformung des Tragwerks im Bruchzustand berücksichtigt werden. Bei Platten kann der Spannungszuwachs mit einem einfachen Starrkörpermechanismus unter Annahme einer nominellen Bruchdurchbiegung von 2.5% der Spannweite abgeschätzt werden. Balkentragwerke weisen im Allgemeinen eine geringere Bruchdurchbiegung auf (siehe Abschnitt 7.2). Der Spannungszuwachs wird

mit einem iterativen Vorgehen berechnet. Aus der Integration der Spannglieddehnung über die ganze Länge zwischen zwei Verankerungen ergibt sich die Spanngliedverlängerung und damit ein Spannkraftzuwachs. Mit dieser neuen Vorspannkraft wird anschliessend die gleiche Berechnung nochmals durchgeführt, bis sich, im Allgemeinen bereits bei der 1. Iteration, eine genügend kleine Differenz zum vorhergehenden Resultat ergibt. Aufgrund des grossen Berechnungsaufwandes und des kleinen resultierenden Zuwachses der Vorspannkraft wird dieser beim Nachweis von Balkentragwerken häufig vernachlässigt. Für den Nachweis der Tragsicherheit ist die totale Vorspannkraft um den Widerstandsbeiwert $\gamma_s = 1.15$ abzumindern. Zusätzlich sind die Beschränkungen aufgrund der Lamellenzugfestigkeit und der Spanngliedfestigkeit zu berücksichtigen. Es ergibt sich folgender Bemessungswert der Vorspannkraft:

$$P_d = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_0 + \Delta P}{1.15} \\ F_{u,\text{Spannglied}} \\ \frac{1.15}{F_{u,\text{Lamelle}}} \\ 1.3 \end{array} \right\}$$

Mit den Kennwerten nach Tabelle 10 wird die Beschränkung der Lamellenzugfestigkeit nicht massgebend.

Es empfiehlt sich, die Vorspannung durch Einführen von Verankerungs- und Umlenkkräften als Einwirkung zu berücksichtigen. Bei Tragwerken, welche sich aufgrund der Einwirkung der Vorspannung nicht frei verformen können ist damit eine einfache Abschätzung der auftretenden Zwangsschnittkräfte und der effektiven Wirkung der Vorspannung möglich.

Ungünstige Wirkung der Vorspannkraft

Bei ungünstiger Wirkung der Vorspannkraft sowie in Tragwerksbereichen mit Spannverankerungen und Umlenkungen ist die Spannkraft $P_d = \gamma_P P_0$ als Leiteinwirkung zu betrachten. Die Spannkraft einzelner Spannglieder P_0 ist mit $\gamma_P = 1.5$ zu erhöhen, die Spannkraft mehrerer Spannglieder mit $\gamma_P = 1.2$.

Brandfall

Brand ist nach SIA 260 eine aussergewöhnliche Bemessungssituation. Ohne Schutz des Systems, zum Beispiel mit einer Brandschutzverkleidung, muss davon ausgegangen werden, dass das CFK-Lamellen-Spannsystem vollständig ausfällt. Die aussergewöhnliche Einwirkung besteht in diesem Fall im Ausfall der Verstärkung.

An der EMPA durchgeführte Brandversuche mit schlaff aufgeklebten CFK-Lamellen [3] bestätigen die Wirksamkeit von Brandschutzplatten zur Erhöhung des Feuerwiderstands. Als erstes versagt die Verklebung CFK-Lamelle – Beton. Die CFK-Lamelle sowie die Bestandteile des Spannkopfs weisen eine höhere Temperaturbeständigkeit auf. Ein CFK-Lamellen-Spannsystem ohne Verbund lässt sich damit einfacher schützen.

Ausfall der Verstärkung

Ein Ausfall des CFK-Lamellen-Spannsystems ohne äussere Ursache ist nicht zu erwarten. Der Ausfall eines einzelnen Spannglieds, zum Beispiel zum Auswechseln einer beschädigten Lamelle, ist als Bemessungssituation hingegen zu berücksichtigen. Bei speziellen Konstruktionen, wie zum

Beispiel gemeinsame Endverankerungen, ist auch der Ausfall einer Gruppe von CFK-Spanngliedern zu berücksichtigen.

7.6 Vorspannung mit Verbund

Werden die Lamellen nach dem Vorspannen mit dem zu verstärkenden Tragwerks verklebt, kann der Spannungszuwachs der Lamelle aus der Verbundwirkung im Tragsicherheitsnachweis berücksichtigt werden.

Es empfiehlt sich, die Lamellendehnung aus Vorspannung und aus Verbund getrennt zu betrachten.

Die langfristige Lamellendehnung aus Vorspannung $\varepsilon_{p\infty}$ wird wie bei der Vorspannung ohne Verbund bestimmt.

Der Dehnungszuwachs der Lamelle aus Verbund $\Delta\varepsilon_p$ kann analog zu einer schlaff aufgeklebten Lamelle nach [15] berechnet werden. Von besonderer Bedeutung ist das Verbundversagen, da die vorgespannte Lamelle eine wesentlich grössere Dicke als die üblichen, schlaff aufgeklebten Lamellen aufweist.

Aus der Summation der beiden Dehnungsanteile ergibt sich die Lamellendehnung im Bruchzustand: $\varepsilon_p = \varepsilon_{p\infty} + \Delta\varepsilon_p$. Es ist zu kontrollieren, ob die auf diese Art bestimmte Lamellendehnung kleiner ist als die Bruchdehnung der Lamelle. Die aus der Lamellendehnung ε_p errechnete Lamellenzugkraft ist um den Widerstandsbeiwert γ_s abgemindert bei der Berechnung des Tragwiderstands zu berücksichtigen.

Kann sich das Tragwerk infolge der Wirkung der Vorspannung nicht frei verformen, ist die Wirkung der Zwangsschnittkräfte zu berücksichtigen.

Das Verformungsvermögen einer geklebten, vorgespannten CFK-Lamelle ist geringer als das eines unverstärkten Stahlbeton-Biegeträgers.

Die Lamellendehnung im Bruchzustand und damit die Zugkraft der Lamelle ist bei der Vorspannung mit Verbund grösser als bei einem Spannglied ohne Verbund. Bei einer Verstärkung durch Vorspannung mit Verbund sind daher in der Regel weniger Spannglieder erforderlich als bei einer Vorspannung ohne Verbund.

Bei der Applikation von vorgespannten CFK-Lamellen mit Verbund müssen die gleichen Anforderungen an die Bauteiltemperatur und die Betonvorbereitung gestellt werden wie bei schlaff aufgeklebten Lamellen. Der Arbeitsaufwand ist höher als bei einer Vorspannung ohne Verbund.

Der Entscheid zwischen einer Vorspannung mit Verbund und einer Vorspannung ohne Verbund muss für jedes zu verstärkende Bauteil unter Berücksichtigung der jeweiligen Anforderungen und Randbedingungen einzeln gefällt werden. Eine allgemeingültige Empfehlung kann nicht abgegeben werden.

8 Anwendung des Spannsystems

Die hauptsächlichlichen Anwendungsgebiete von vorgespannten CFK-Lamellen sind:

- Verstärkung von Brücken-Fahrbahnplatten in Querrichtung
- Verstärkung von Brücken in Längsrichtung
- Verstärkung von Industrie- und Hochbauten
- Erdbebenverstärkungen von Mauerwerksbauten
- Instandsetzung von historischem Natursteinmauerwerk
- Schubverstärkungen von Brückenträgern

Der maximal mögliche Verstärkungsgrad wird einerseits durch die geometrischen Randbedingungen beschränkt, aus welchen sich die maximal mögliche Anzahl von Lamellen ergibt. Andererseits können auch die Anforderungen an die Tragsicherheit im Brandfall oder bei Ausfall eines Spannsystems einschränkend wirken.

Im Gegensatz zu schlaff aufgeklebten Lamellen, bei denen die Qualität der Betonoberfläche in Form der Haftzugfestigkeit eine sehr grosse Rolle spielt, kann dieser Faktor bei der Konzeption einer Verstärkung mit Vorspannung ohne Verbund vernachlässigt werden.

8.1 Beschreibung des Spannvorgangs

Vorbereitung

- Ausmessen des Tragwerks
- Festlegen der Verankerungspunkte in Abhängigkeit von der Lage der Bewehrung (Abbildung 26)
- Bohrung für die Verankerungen (eine Kernbohrung für jede Verankerung) (Abbildung 27)
- Montage der festen und beweglichen Verankerungen, teils trocken im Bohrloch, teils verklebt (Abbildung 28 und Abbildung 29)
- Minimale Untergrundvorbereitung der Betonoberfläche in der Lamellenachse falls erforderlich
- Herstellung der Zugglieder (Lamelle und Spannkopf) auf vorgegebene Länge im Werk, im Allgemeinen zeitgleich mit den Vorbereitungsarbeiten; in speziellen Fällen aufgrund der gemessenen effektiven Lage der Verankerungen
- Prüfen des Zugglieds im Werk mit einer um 10% erhöhten Vorspannkraft ($P_0 + 10\%$)

Spannsystem für CFK-Lamellen



Abbildung 26: Bestimmen der Lage der Bewehrung



Abbildung 27: Kernbohrung



Abbildung 28: Bewegliche Verankerung versetzt



Abbildung 29: Feste Verankerung

Spannvorgang

- Bei Vorspannung im Verbund: Kleber auf Lamelle auftragen (Abbildung 30)
- Lamelle in Verankerung einsetzen (Abbildung 31)
- Spannen mit hydraulischer Presse; Kontrolle von Druck und Weg (Abbildung 32)
- Blockieren der Verankerung, Presse entfernen (Abbildung 33)



Abbildung 30: Reinigen des Spanngliedes und Auftrag des Klebers



Abbildung 31: Einsetzen des Spanngliedes



Abbildung 32: Spannen bei der beweglichen Verankerung

Spannsystem für CFK-Lamellen



Abbildung 33: Vorgespanntes System nach Ausbau der Spannpresse

Abschlussarbeiten

- Falls erforderlich: Abdeckung der Verankerung montieren

Der Spannvorgang dauert je nach Lage der Endverankerung für geklebte Lamellen 20-30 Minuten pro Spannglied. Falls die Lamellen ohne Verbund in einem Hüllrohr versetzt werden, reduziert sich die Zeit für den Spannvorgang auf 10-15 Minuten.

8.2 Brückenbau

Escherkanalbrücke Wesen

Biegeverstärkung einer Brückenfahrbahnplatte in Querrichtung

Die im Jahre 1957 erstellte Brücke der Autobahn A3 Sargans – Zürich überquert den Escherkanal bei Wesen mit drei Feldern von 21.40 m, 55.40 m und 21.40 m Spannweite. Der Überbau besteht aus einem 2.00 m bis 2.45 m hohen, voll vorgespannten Hohlkasten (Abbildung 34) mit Gelenken in den Randfeldern. Auf der 11.10 m breiten Fahrbahnplatten verlaufen heute zwei Fahrspuren der A3 Richtung Zürich. Am Objekt wurden bisher keine baulichen Instandsetzungsarbeiten vorgenommen.

Sechs Jahre nach der Fertigstellung musste die Brücke angehoben werden, um die aufgetretenen Setzungen im Betrag von 10-15 cm zu kompensieren. Bei einer Inspektion wurde 1964 in der Mitte der Untersicht der Fahrbahnplatte ein über die ganze Brückenlänge durchlaufender Riss entdeckt. Bei einer weiteren Inspektion wurde 1985 festgestellt, dass die Dauerhaftigkeit der Brücke durch die ungenügende Bewehrungsüberdeckung und das Fehlen einer Abdichtung der Fahrbahnplatte ernsthaft gefährdet ist.

Eine statische Nachrechnung nach aktuellen Normen ergab, dass der Biegewiderstand in Brückenlängsrichtung genügend ist. Die Tragsicherheit der Fahrbahnplatte über dem Steg ist in Ordnung. Im Feld ist der Biegewiderstand klar ungenügend, was den Längsris in der Fahrbahnplatte erklärt. Die vorhandene obere Bewehrung im Feld erfüllt die Anforderungen an eine Mindestbewehrung nicht.

Die Fahrbahnplatte ist in Querrichtung im Feld für positive und negative Momente zu verstärken. Eine weitere Öffnung des Risses an der Unterseite der Fahrbahnplatte ist zu verhindern.

Während der ganzen Bauzeit muss mindestens eine Fahrspur für den Verkehr zur Verfügung stehen. Das Innere des Hohlkastens ist nur durch eine kleine Öffnung an der Unterseite zugänglich.

Eine Verstärkung mit bewehrtem Überbeton ist nicht möglich, da mit dem zusätzlichen Eigengewicht der Tragwiderstand der Brücke in Längsrichtung überschritten würde. Zudem könnten neue Setzungen der Fundamente erfolgen.

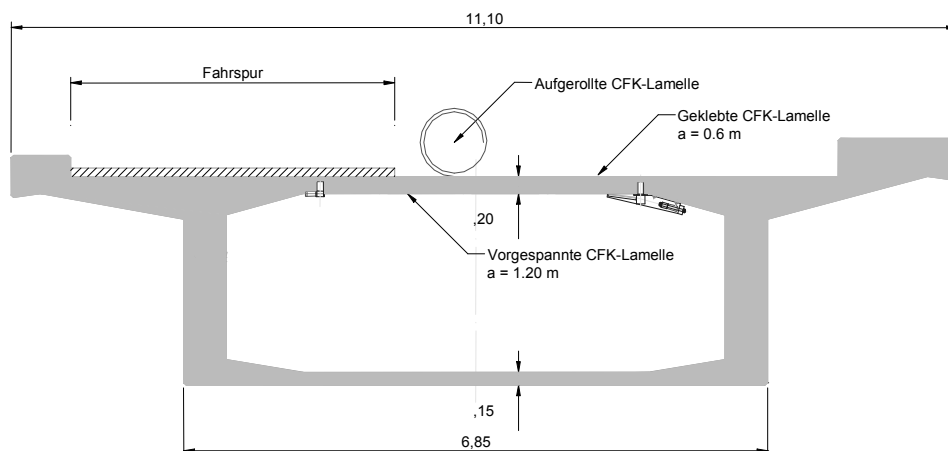


Abbildung 34: Brückenquerschnitt und Verstärkung

Spannsystem für CFK-Lamellen

Der Biege widerstand für negative Momente wird mit schlaff aufgeklebten CFK-Lamellen vergrößert. Die Lamellen für die Oberseite der Fahrbahnplatte werden zunächst nur auf einer Hälfte der Fahrbahnplatte aufgeklebt, der Rest wird aufgerollt (Abbildung 34). Nach dem Wechsel der Verkehrsführung werden die CFK-Lamellen auf der zweiten Hälfte aufgeklebt. Die unter Abdichtung und Belag angeordneten, schlaff aufgeklebten CFK-Lamellen erfordern keinen Unterhalt.

Der Biege widerstand der Fahrbahnplatte für positive Feldmomente wird kurz nach dem Ende der Vouten überschritten, wobei der Momentengradient beträchtlich ist. Für schlaff aufgeklebte CFK-Lamellen steht keine genügende Verankerungslänge zur Verfügung. Gespannte CFK-Lamellen an der Unterseite der Fahrbahnplatte wirken als externe Vorspannung. Die Krafteinleitung in den Beton erfolgt ausschliesslich am Lamellenende über die festen und beweglichen Verankerungen, welche direkt bei den Vouten angeordnet sind (Abbildung 35). Das Material ist flexibel und leicht und kann problemlos durch die Zustiegsöffnung ins Innere des Hohlkastens gebracht werden.

Weil diese Brücke Bestandteil des Nationalstrassennetzes ist, musste für das CFK-Lamellen-Spannglied eine Zulassung im Einzelfall beantragt werden. Die Verankerungen und die Krafteinleitung in den Beton wurden durch einen Prüfingenieur kontrolliert.



Abbildung 35: Bewegliche Verankerung bei der Voute

Hüttenbrücke, Werthenstein

Biegeverstärkung von Brückenlängsträgern

Die Hüttenbrücke in Werthenstein vermittelt den einzigen Zugang zu einem ausgedehnten land- und forstwirtschaftlich genutzten Gebiet. Sie wurde in den 50-er Jahren für eine Nutzlast von 16 t erstellt. Um eine wirtschaftliche Nutzung des Waldes zu ermöglichen, muss die Traglast der Brücke auf 40 t erhöht werden.

Zur Erhöhung des Biegewiderstands wurden vier vorgespannte CFK-Lamellen mit einer totalen Vorspannkraft von 800 kN über die ganze Länge der Brücke von 30 m angebracht. Die Vorspannung wurde als Vorspannung mit Verbund ausgelegt und die CFK-Lamellen mit dem Beton verklebt. Zur Erhöhung der Schubtragfähigkeit wurden die Längsträger örtlich mit bis zu 12 Lagen CFK-Gewebe umwickelt.

Entscheidend für die Wahl von vorgespannten CFK-Lamellen war die einfache Ausführung und die Korrosionsbeständigkeit des Spannglieds. Die Verankerungen wurden aus rostfreiem Stahl hergestellt.



a)



b)



c)

Abbildung 36: a) Spannverankerung; b) Durchführung durch Querträger; c) Feste Verankerung

Sung San Bridge, Seoul, Korea

Biegeverstärkung einer Plattenbrücke in Längsrichtung

Die als durchlaufender Rahmenträger ausgebildete Brücke weist 8 Felder mit einer Spannweite von 15 m und einer Breite von 17 m auf. In einem Abstand von 1.50 m von der Stützenachse wurde ein grosser, durchgehender Riss in der Fahrbahnplatte festgestellt.

Mit 11 vorgespannten CFK-Lamellen mit einer Länge von 11.80 m konnte die Tragsicherheit der Brücke wiederhergestellt werden. Die CFK-Lamellen wirken als Vorspannung ohne Verbund und wurden nicht mit der Betonoberfläche verklebt. Da der Riss am Ende der Voute aufgetreten ist, wurden die CFK-Lamellen umgelenkt und entlang der Voute bis zur Stütze geführt.



Abbildung 37: Vorgespannte CFK-Lamellen

Clinton & Hopkins Bridges, Defiance County, Ohio, USA

Biegeverstärkung von vorfabrizierten Brückenträgern

Die Hopkins Street Bridge ist eine 6-feldrige, zweispurige Strassenbrücke aus vorgespannten, vorfabrizierten Hohlkastenträgern mit einer Gesamtlänge von 155 m. Die Clinton Street Bridge ist eine 6-feldrige, vierspurige Strassenbrücke aus vorgespannten, vorfabrizierten Hohlkastenträgern mit einer Länge von 131 m. Bei einer Brückeninspektion wurden an verschiedenen Trägern korrodierte Spannlieder entdeckt.

Mit einer vorgespannten CFK-Lamelle werden ungefähr 2 korrodierte Spannlieder ersetzt. Insgesamt wurden 11 vorgespannte CFK-Lamellen mit Längen von 6 – 10 m eingesetzt.



Abbildung 38: Feste Verankerung mit Gewebeerstärkung als Spreizbewehrung

8.3 Industrie- und Hochbau

Papierfabrik Perlen

Biegeverstärkung eines Unterzugs

Für eine Papiermaschine wird, unter Einbezug eines bestehenden Gebäudes, ein neues Produktionsgebäude erstellt. Der Stützenabstand in der ehemaligen Aussenfassade des bestehenden Gebäudes ist kleiner als die Breite der Papierrollen, welche durch die Öffnung befördert werden sollen. Die bestehenden Stützen müssen versetzt und die Spannweite des Unterzugs vergrössert werden.

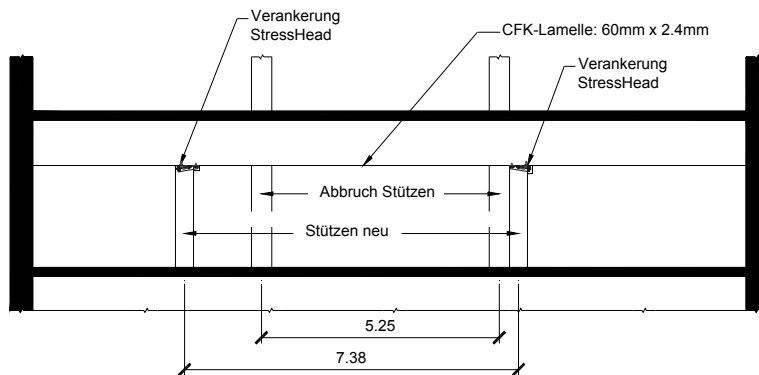


Abbildung 39: Übersicht Verstärkung Unterzug Papierfabrik Perlen

Zur Verstärkung des Unterzugs wird zunächst eine CFK-Lamelle 60 x 2.4 mm in einer Kernbohrung durch die bestehenden Stützen durchgeführt und im Bereich der neuen Stützen verankert und gespannt (Abbildung 40). Anschliessend werden die neuen Stützen betoniert und die bestehenden Stützen abgebrochen. Die Verankerungen der Lamelle sind im Endzustand in den neuen Stützen einbetoniert.



Abbildung 40: Detail bewegliche Verankerung

Die dünnen CFK-Lamellen schränken den knappen Raum im neuen Durchbruch nicht weiter ein. Eine genügende Zahl schlaff aufgeklebter CFK-Lamellen könnte auf dem schmalen Unterzug jedoch nicht angeordnet werden. Vorgespannte CFK-Lamellen mit einer konzentrierten Endverankerung erfüllen die statischen und geometrischen Randbedingungen optimal.

Orly Centre Amsterdam

Ergänzung der Spreizarmierung an einem vorgefertigten Träger

Beim Neubau eines 8-stöckigen Bürogebäudes aus vorgefertigten Betonelementen traten bereits während der Bauzeit in den Abfangträgern über dem Erdgeschoss im Bereich der Stützen grössere Risse auf. Darauf wurde vom holländischen Staat ein Baustop verfügt. Die statische Überprüfung ergibt, dass die obere Bewehrung im Stützenbereich nicht ausreicht, um zusätzlich zur Biegebeanspruchung auch die exzentrisch zum Lager angreifenden Auflagerkräfte der oberliegenden Fassadenelemente umzulenken.

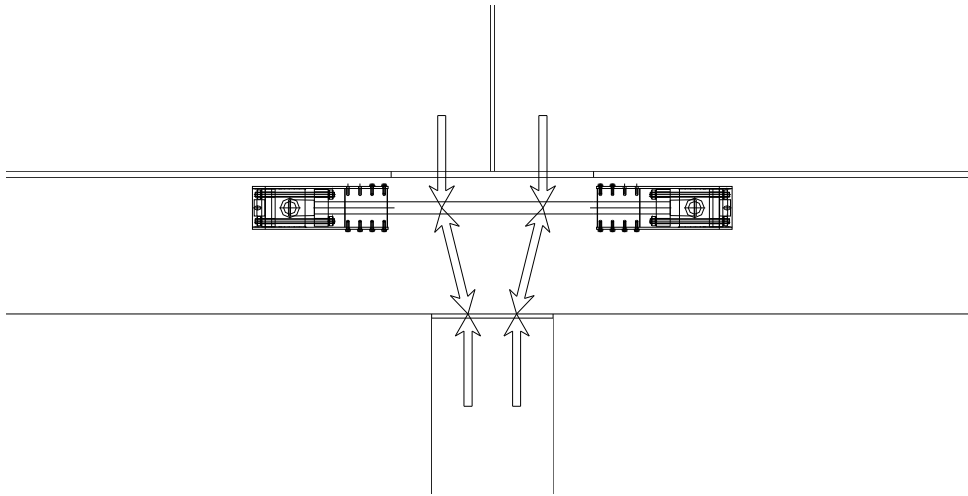


Abbildung 41: Übersicht Verstärkung Orly Centre Amsterdam

Erforderlich ist ein flexibles und vorgespanntes Verstärkungssystem, das in kürzester Zeit appliziert werden kann. Die Träger werden fassadenseitig über 12 Stützen mit je einer kurzen, gespannten und drei schlaff aufgeklebten CFK-Lamellen verstärkt. Die Vorbereitungsarbeiten, das Versetzen der 24 Verankerungen und das Spannen des Systems StressHead erfolgte in 1½ Tagen.

Die Dicke der vorgespannten CFK-Lamelle mit Klebstoff beträgt im Bereich der Stütze nur 3 mm. Eine grössere Dicke der Verstärkung würde zu einem Konflikt mit der nachträglich zu montierenden Fassadenkonstruktion führen. Die konzentrierte Krafteinleitung am Ende der Lamelle ermöglicht die Ausbildung des in Abbildung 41 angenommenen Spannungsfeldes.



Abbildung 42: Detail Verankerung

Aupoint Brandstetter, Österreich

Verstärken von brandgeschädigten Stahlbeton-Dachbindern

Infolge eines Brandes wurde die Tragkonstruktion des Hallendachs beschädigt. Die vorgefertigten, 14m langen Stahlbetonbinder sind im Einflussbereich des Brandherdes zu verstärken. Damit die Produktion nicht behindert wird, sind die Verstärkungsarbeiten innerhalb von 1 ½ Tagen zu tätigen. Weiter sind Forderungen in Bezug auf die geringe Bauteilhöhe und den baulichen Brandschutz einzuhalten.

Als Sanierung wurde mit CFK-Lamellen eine Vorspannung in Grössenordnung der Nutzlastbeanspruchung aufgebracht.



Abbildung 43: Bewegliche und feste Verankerung an den Stahlbeton-Dachbindern

Autofabrik Audi, Győr, Ungarn

Zusammenspannen einer Bodenplatte über Dilatationsfugen hinweg

Im Rahmen einer internen Umstellung wird eine Fläche, welche vorher der Logistik diente, neu durch Produktionsmaschinen belegt. Die bestehende Stahlbeton-Bodenplatte, welche durch Dilatationsfugen in mehrere Teile gegliedert ist, erfüllt die neu gestellten Anforderungen nicht. Die differentiellen Verformungen überschreiten die für die Produktion zulässigen Werte.

Die durch Dilatationsfugen getrennten Teile der Bodenplatte werden mit den in Abbildung 44 sichtbaren, in die Oberfläche versenkten vorgespannten CFK-Lamellen über die Fugen hinweg zusammengespannt. Die drei CFK-Spannglieder mit einer aufgetragenen Vorspannung von je 200 kN weisen eine Länge von 29 m auf.

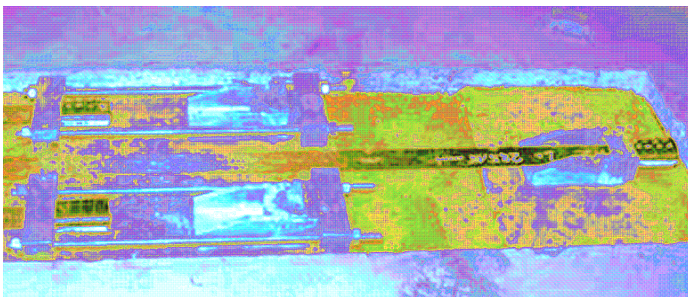


Abbildung 44: Endverankerung in der Platte

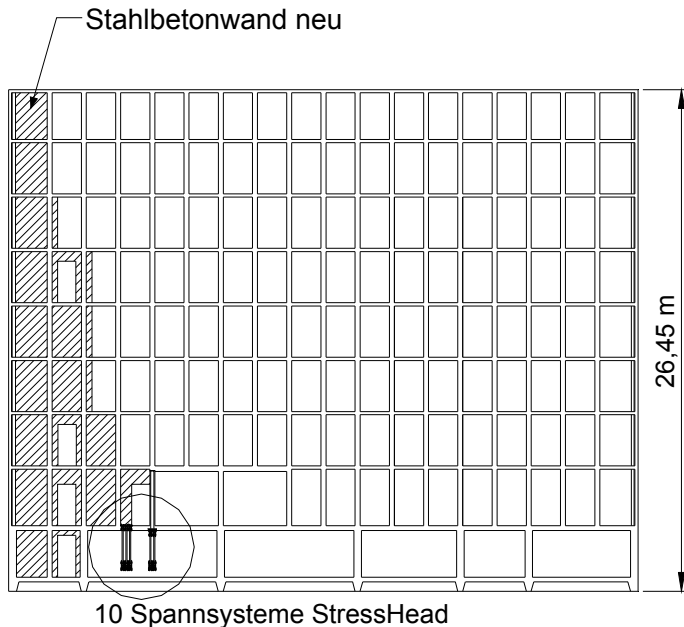
8.4 Erdbebenverstärkung

Kantonspolizei Luzern

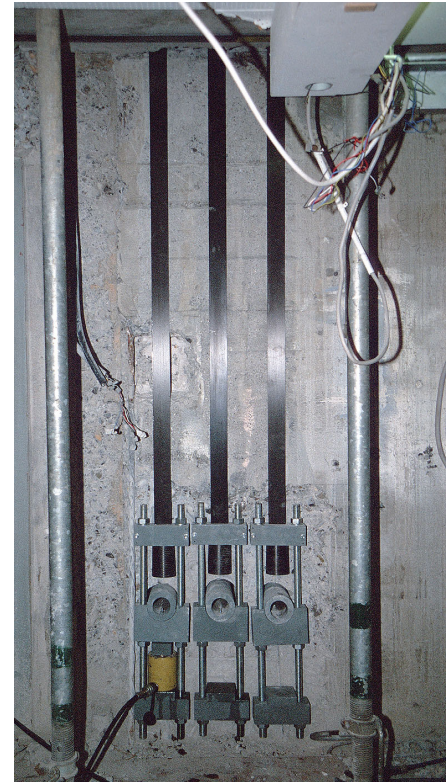
Anschluss einer neuen Tragwand an Untergeschosswände als Erdbebenverstärkung

Das Tragsystem des 7-stöckigen Bürogebäudes ist in einer Richtung als reines Rahmensystem konzipiert. Die Tragfähigkeit unter Erdbebeneinwirkung ist ungenügend.

Eine neue, durchgehende Stahlbetontragwand reicht vom Erdgeschoss bis zum Dach des Gebäudes. Die Verbindung dieser neuen Tragwand mit der bestehenden Wand eines Schutzraums im Erdgeschoss erfolgt durch insgesamt 10 vertikal angeordnete, gespannte CFK-Lamellen.



a)



b)

Abbildung 45: a) Übersicht Erdbebenverstärkung Kantonspolizei Luzern; b) Lamellen beim Vorspannen

Die kompakte Endverankerung und die geringe Dicke der CFK-Lamelle ermöglichen die Realisierung der Verstärkung mit minimalem Raumverlust und nur geringer Beeinträchtigung der Nutzung während der Bauzeit. Dank der grossen Lamellendehnung bleiben die Spannkraftverluste auch bei kurzen Spannglieder verhältnismässig klein.

Stützpunktfeuerwehr Visp

Vertikale Vorspannung von Mauerwerk zur Erhöhung der Schubtragfähigkeit für Erdbebenbeanspruchung

Das Gebäude der Feuerwehr Visp wurde 1974 erstellt. Es beherbergt heute neben dem Zivilschutz die Stützpunktfeuerwehr von Visp, welche im Brand- und Katastrophenfall eine regionale Bedeutung hat. Im Untergeschoss aus Stahlbeton sind die Zivilschutzanlagen untergebracht. Die zwei oberirdischen Stockwerke der Feuerwehr wurde als Rahmentragwerk aus vorgefertigten Rahmen-, Decken- und Fassadenelementen erstellt. Das 20 m breite und 60 m lange Gebäude weist ein Flachdach auf. Im Rahmen der Bauwerkserhaltung des Gebäudes wurden neben diversen baulichen Schäden auch schwerwiegende Mängel der Tragstruktur hinsichtlich der Erdbebensicherheit erkannt. Als hauptsächlichster Schwachpunkt stellten sich die weichen, durch Kalksandsteinwände ausgefachten Stahlbetonrahmen an den Giebelseiten des Gebäudes heraus. Mit Mauerwerk ausgefachte Stahlbetonrahmen verhalten sich bei Erdbeben sehr ungünstig. Zum einen kann die Ausfachung relativ leicht herausfallen. Zum anderen wird die Bewegung der weichen Rahmen durch die steife Wände behindert, was zu einer sehr ungünstigen Beanspruchung der Stützen und schliesslich zu deren vorzeitigen Versagen führt.

Durch einen Anbau auf der Nordseite konnte das Gebäude hinsichtlich Erdbebeneinwirkung teilweise stabilisiert werden. Für die ausgefachte Giebelwand auf der Südseite musste eine zweckmässige Verstärkung gesucht werden. Die Nutzung des Feuerwehrlokals während den Bauarbeiten sowie die bestehenden Einrichtungen sollten so wenig wie möglich beeinträchtigt werden. Verschiedene Varianten zur Verstärkung, darunter auch der Einsatz von auf das Mauerwerk aufgeklebten CFK-Lamellen, wurden geprüft. Weil der ausgefachte Stahlbetonrahmen bis zu seiner Zerstörung nur geringe Verformungen aufweist, kann die hohe Zugfestigkeit von aufgeklebten Lamellen aber nur ungenügend genutzt werden.

Als optimal stellte sich schliesslich eine Lösung mit vertikal angeordneten, vorgespannten CFK-Lamellen heraus (Abbildung 46). Die vertikale Vorspannung des Mauerwerks erhöht den Tragwiderstand für Horizontalkräfte soweit, dass die Beanspruchung aus Erdbeben ausschliesslich über die Ausfachung abgetragen werden kann. Zudem wird verhindert, dass die Wand aus dem Rahmen herausfällt.

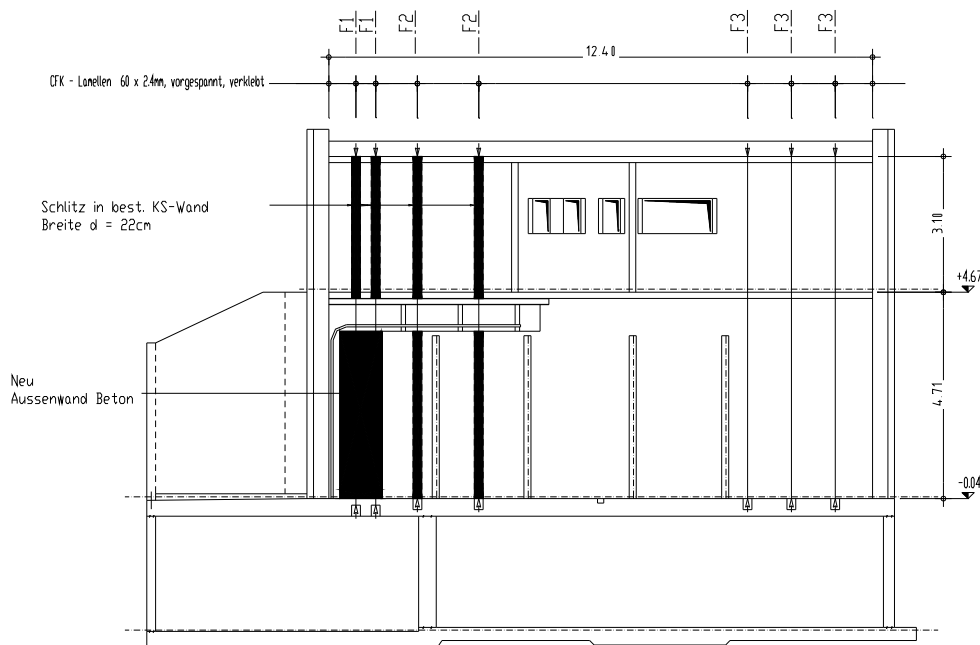


Abbildung 46: Ansicht Giebelwand Süd mit Verstärkung

Spannsystem für CFK-Lamellen

Die insgesamt acht vorgespannten CFK-Lamellen verlaufen auf der Innenseite der Aussenwand und sind als externe Vorspannung ohne Verbund konzipiert. Die Krafteinleitung erfolgt über kompakte Endverankerungen in der Decke über 1. OG und in der Decke über UG. Die Montage und die Vorspannarbeiten konnten jeweils innerhalb eines Tageseinsatzes abgewickelt werden. Das Gebäude konnte während dieser Zeit normal genutzt werden. Für die Verankerungen auf dem Dach wird die Abdichtung örtlich entfernt und eine Ankerplatte versetzt. Die Gewindestangen der Spannverankerung werden in je zwei Bohrlöchern pro Verankerung durch die Decke geführt (Abbildung 47). In der Decke über EG sind nur kleine Aussparungen von 8 cm Breite notwendig um die CFK-Lamellen durch die Geschossdecke zu führen. Die Verankerung der festen Verankerung in der Decke über UG erfolgt teilweise mit Gewindestangen, welche durch die Decke geführt werden und auf der Unterseite mit Stahlplatten verankert sind. Wo dies nicht möglich ist, wird der CFK-Spannkopf in einer Aussparung in der Decke versenkt. Die Übertragung der Vorspannkraft auf die Geschossdecke erfolgt in diesem Fall mit eingeklebten Bügeln aus Bewehrungsstahl.



Abbildung 47: Bewegliche Verankerung auf dem Dach

Shopping Center Emmen

Verstärkung eines aus einer Wand erstellten Unterzuges

Im Rahmen der Gesamterneuerung des Shopping Center Emmen wurden wesentliche Änderungen am statischen System vorgenommen und Erdbebenverstärkungen eingebaut. Verschiedene aussteifende Treppenhauskerne und Wandscheiben wurden entfernt. Andere mussten entsprechend verstärkt werden.

Eine bestehende Tragwand muss im Rahmen einer Erweiterung der Verkaufsflächen in Höhe des Erdgeschosses entfernt werden. Der obere Teil der Wand wird als neuer Unterzug belassen und auf eine neue Stütze aus Stahl abgestellt. Die vorhandene Bewehrung der Wand ist für die neue Funktion als Unterzug ungenügend.

Als Verstärkung werden CFK-Lamellen gewählt, die über das Auflager geführt und auf kürzester Distanz zu verankern sind. Hinter dem Auflager des Unterzuges auf der neuen Stütze wird eine Stahlplatte positioniert. Die CFK-Lamellen mit den montierten Ankerköpfen „StressHead“ werden durch Schlitze in der Stahlplatte geführt und auf dem Unterzug verklebt. Mit den Spannköpfen kann die Zugkraft der Lamelle am Ende sicher verankert werden. Bei dieser Anwendung ist eine kurze Endverankerung, jedoch keine Vorspannung erforderlich.

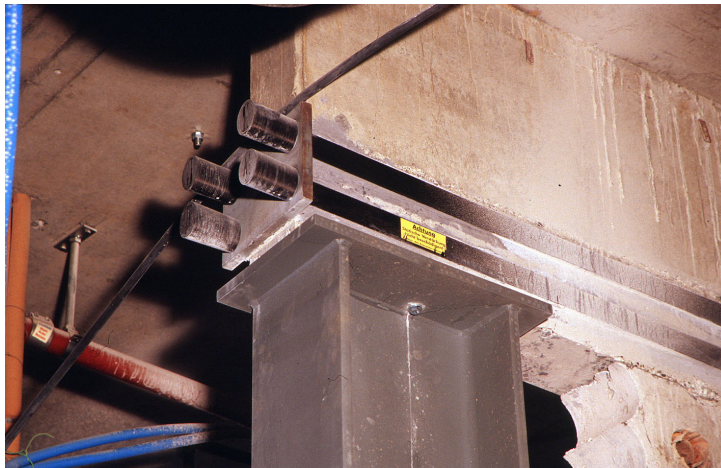


Abbildung 48: Endverankerung

8.5 Historische Bauten und Mauerwerk

Credit Suisse Communication Center, Horgen

Vorgespannte Ringanker und vertikale Vorspannung von Mauerwerkspfeilern

Die unter Heimatschutz stehende Reithalle mit Pferdestallungen auf dem Landgut Brocken wird zu einem Kommunikationszentrum umgebaut. Die historische Bausubstanz ist zu erhalten. Das aus drei U-förmig angeordneten Gebäuden bestehende Landgut wird komplett unterkellert. Die Wandmalereien an den Stirnfassaden der Reithalle sind zu konservieren, das Mauerwerk zu sichern und die weit gespannte, tonnenförmige Dachkonstruktion der Reithalle zu stabilisieren.

Im Bereich der Auflager der tonnenförmigen Binder der Reithalle wird ein horizontal angeordneter Ringanker aus vorgespannten CFK-Lamellen angebracht. Die zusätzlichen Lasten aus den historischen Hallenbindern werden über Mauerwerkspfeiler in das neu erstellte Untergeschoss abgeleitet. Die Mauerwerkspfeiler werden mit innenliegenden vorgespannten CFK-Lamellen verstärkt.

Um Risse in den wertvollen bemalten Stirnfassaden während den Unterfangungsarbeiten zu vermeiden, werden die Mauerwerkswände vorgängig in vertikaler und horizontaler Richtung mit CFK-Lamellen verstärkt und stabilisiert.

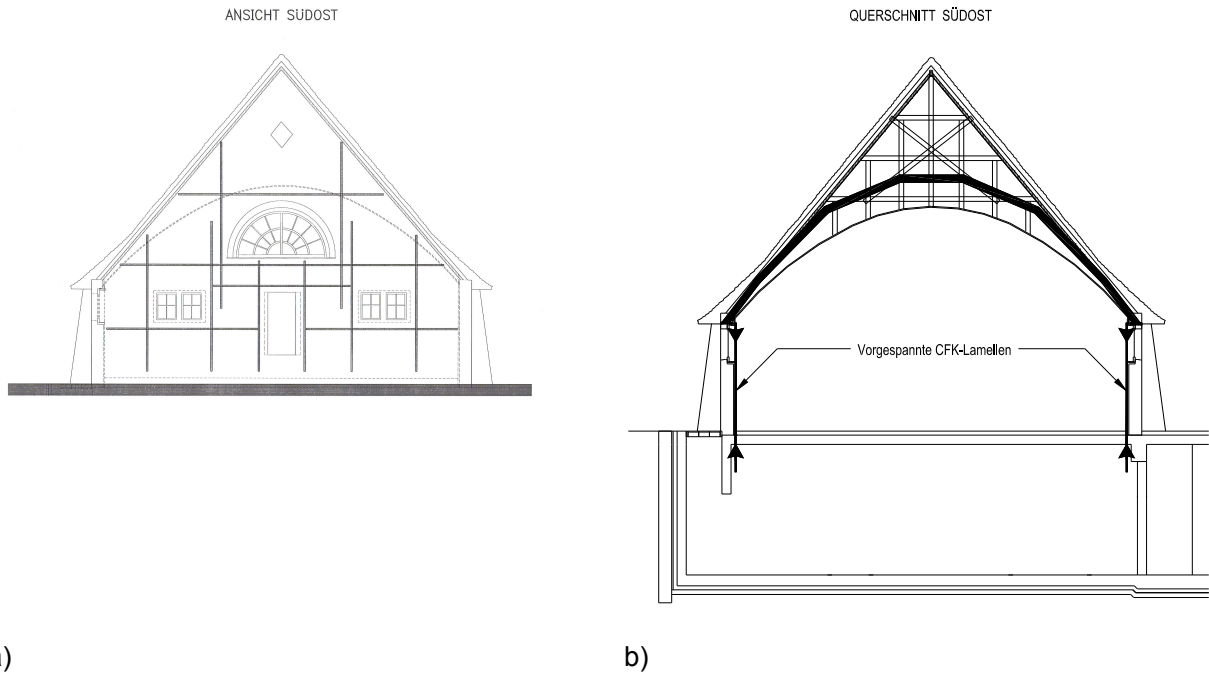


Abbildung 49: a) Stirnfassade mit CFK-Lamellen-Verstärkung; b) Neuer Bogenbinder und vertikale Vorspannung der Mauerwerkspfeiler

9 Ausblick

9.1 Weitere Anwendungsgebiete

Schubverstärkungen müssen die Längsarmierung und die Betondruckzone umfassen, um statisch optimal wirksam zu sein. Im Brückenbau sind damit Durchdringungen der Fahrbahnplatte unumgänglich. Da die Verformungen bei Schubbeanspruchung im Gegensatz zu den Verformungen bei Biegebeanspruchung sehr viel kleiner sind und es sich beim Versagen infolge Schub um eine spröde Versagensart handelt, sind vorgespannte Verstärkungssysteme mit wenig Relaxation und Schlupf erforderlich.

Mittels speziell gefertigten, vorgespannten CFK-Lamellen kann der gesamte Längssteg oder Träger umfasst werden. Im Gegensatz zu Gewindestangen resultieren beim Spannen der CFK-Lamellen grosse Dehnungen. Dadurch sind kleinste Spannverluste trotz kurzem Zugglied möglich. Bei der Verwendung eines Schlaufenspannglieds mit CFK-Lamellen liegen unter dem Belag keine unkontrollierbaren Stahlteile. Mit einer Mörtelschicht kann die CFK-Lamelle gegenüber der Erhitzung durch den Einbau von Gussasphalt geschützt werden.

9.2 Vergleich mit anderen Verstärkungssystemen

Die vergleichsweise hohen Materialkosten von vorgespannten CFK-Lamellen lassen einen Einsatz nur dort sinnvoll erscheinen, wo mehrere Vorteile gegenüber anderen Verstärkungssystemen zum Tragen kommen.

Die wichtigsten Vorteile von vorgespannten CFK-Lamellen sind:

- Anwendbarkeit bei schlechter Qualität der Betonoberfläche
- Konzentrierte Krafteinleitung am Ende
- Einfache Applikation bei schlechter Zugänglichkeit, beschränkten Platzverhältnissen und Montage von Hand
- Geringe Dicke (keine Vergrößerung des Bauteils, versenkte Anordnung mit geringem Aufwand möglich, kein weiterer Schutz erforderlich)
- Kurze Montagezeit, witterungsunabhängig
- Korrosionsbeständigkeit ohne Umhüllung

Literatur

- [1] Berset, T und Schwegler, G., "The use of pre-stressed CFRP-Laminates as post-strengthening", *16th Congress of IABSE*, Lucerne, 18.-21. September 2000, 8 pp.
- [2] Deuring, M., *Verstärken von Stahlbeton mit gespannten Faserverbundwerkstoffen*, Dissertation, EMPA Bericht Nr. 224, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA, Dübendorf 1993, 279 pp.
- [3] Deuring, M., *Brandversuche an nachträglich verstärkten Trägern aus Beton*, EMPA Bericht Nr. 148 795, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA, Dübendorf, 1994
- [4] Egger, G. und Cantieni, R., *Fünfzehnjährige Stahlbetonbalken mit aufgeklebter Bewehrung*, EMPA-Bericht Nr. 150'582, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA, Dübendorf, 1994.
- [5] Fachhochschule Zentralschweiz, Untersuchungsbericht 2656, Belastungsversuch, Hochschule Technik + Architektur Luzern, Materialprüfstelle, Horw, 29. Dezember 1998, 3 pp.
- [6] Fachhochschule Zentralschweiz, Untersuchungsbericht 2565-1, Messung der CFK-Lamellendehnungen mittels Dehnungsmessstreifen (DMS) beim Spannen vor Ort, Hochschule Technik + Architektur Luzern, Materialprüfstelle, Horw, 5. Februar 1999, 5 pp.
- [7] Fachhochschule Zentralschweiz, Ergänzung zu Untersuchungsbericht 2565-1, Nachmessung CFK-Lamelle an Bauobjekt N4 Reussbrücke, Hochschule Technik + Architektur Luzern, Materialprüfstelle, Horw, 31. August 1999
- [8] Glaus, P. und Schwegler, G., "Seismic upgrading of masonry building with fibre composites", *20th European Regional Earthquake Engineering Seminar, Seismic Assessment and Upgrading of Existing Structure*, Sion, 3.-7. September 2001
- [9] L'Hermite, R., Bresson, J., „Béton armé d'armatures collées“, *Colloque RILEM sur Les résines de synthèse dans la construction*, Paris, 4.-6. September 1967, Ed. Eyrolles, Paris, pp. 175-203
- [10] Kaiser, H.P., *Bewehren von Stahlbeton mit kohlenstofferverstärkten Epoxidharzen*, Dissertation ETH Nr. 8918, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich ETHZ, Zürich, 1989
- [11] Marti, P., Alvarez, M., Kaufmann, W., Sigrist, V., „Tension Chord Model for Structural Concrete“, *Structural Engineering International*, IABSE, Vol. 8, No. 4, November 1998, pp. 287-298
- [12] Plüss + Meyer Bauingenieure AG, Luzern, Reussbrücke N4, Objekt Nr. 426, Querträgerverstärkung mit CFK-Lamellen, Pilotapplikation, Schlussbericht, Luzern, 2. März 1999, 8 pp.
- [13] Ritz, P., *Biegetragverhalten von Platten mit Vorspannung ohne Verbund*, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, IBK Bericht Nr. 80, Birkhäuser Verlag, Basel, Mai 1978, 131 pp.
- [14] Schwegler, G., *Verstärken von Mauerwerk mit Faserverbundwerkstoffen*. Dissertation, EMPA-Bericht 229, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA, Dübendorf, 1994.
- [15] SIA 166 (2004): Klebebewehrung, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, Vornorm

Anhang 1

„Materialtechnologische Grundlagen für den praktischen Einsatz von Faserverbundwerkstoffen im Bauingenieurwesen“

Beitrag anlässlich der Fachveranstaltung 994381 „Faserverbundwerkstoffe für Ingenieurbauwerke: Umnutzungen und Neubauten“ an der TFB vom 15. März 2000.

Abdruck mit freundlicher Genehmigung durch die Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton TFB:

TFB
Lindenstrasse 10
CH-5103 Wildegg
Telefon 062 887 72 72
Fax 062 887 72 70
E-Mail: info@tfb.ch
www.tfb.ch

