



Innovative Bauwerks- verstärkung

mit vorgespannten
CFK-Lamellen

Technische Dokumentation



StressHead AG
Leumattstrasse 33
CH-6002 Luzern
Tel +41 (0)41 210 40 30
Fax +41 (0)41 210 40 32
info@stresshead.ch
www.stresshead.ch

Inhalt

1 Allgemeines	3
1.1 Einleitung	3
1.2 Anwendungsbereiche	4
2 Lamellentyp, Vorspannkraft, spezifische Daten	5
3 Verankerungen	6
3.1 bewegliche / feste Verankerung Typ I	6
3.2 bewegliche / feste Verankerung Typ II	7
3.3 bewegliche / feste Verankerung Typ III	8
4 Einsatzkriterien und Anforderungen an das Vorspannsystem	9
4.1 Einsatzkriterien	9
4.2 Anforderungen an das Vorspannsystem	9
5 Projektierung	10
6 Entwurf und Bemessung	11
7 Konfektionierung und Applikation des Systems	12
8 Qualitätssicherung	14
9 Unterschied Materialverhalten CFK - Stahl	15
10 Weitere Anwendungen	17
10.1 Vorspannsystem mit Verbund	17
10.2 Siloverstärkungen	18
Anhang	19

1 Allgemeines

1.1 Einleitung

Seit über 30 Jahren werden nachträglich aufgeklebte Stahllamellen als Verstärkung eingesetzt. Nachteil dieser Methode ist das hohe Gewicht der Lamellen und die begrenzte Länge, welche die Applikation zum Teil massiv erschweren. Zudem treten Korrosionsprobleme auf, was einen ausgiebigen Korrosionsschutz verlangt.

In den vergangenen zehn Jahren hat der Einsatz von CFK-Lamellen weite Verbreitung gefunden. CFK-Lamellen sind leicht, in grossen Längen problemlos auf die Baustelle lieferbar, einfach zu applizieren, äusserst beständig und weisen keine Ermüdungsprobleme auf.

Die Kombination von rein elastischem Materialverhalten ohne plastisches Verformungsvermögen mit der lokalen Verformung bei Rissen führt aber sehr oft zu einem spröden Versagen der Verstärkung bereits bei einer geringen Verformung. Die sehr hohe Zugfestigkeit von CFK kann somit oftmals nicht ausgeschöpft werden.

Mit geeigneten Massnahmen, wie z.B. der Vorspannung von CFK-Lamellen, können dieses frühzeitige Versagen der Verstärkung verhindert und die hervorragenden Eigenschaften des CFK-Verstärkungsmaterials weitmöglichst ausgeschöpft werden.

Argumente für den Einsatz von CFK-Lamellen

- Geringes Eigengewicht (1.6 g/cm^3)
- Anpassungsfähig
- Geringe Bauhöhe
- Gerollt transportierbar (= einfacher Transport)
- Lamellenkreuzungen einfach möglich
- Sehr hohe Festigkeit (grösser 2800 N/mm^2)
- Ausgezeichnetes Verhalten bei Ermüdung
- Hohe Alkalibeständigkeit
- Keine Korrosion
- Saubere Kanten ohne freiliegende Fasern (bei pultrudierten CFK-Lamellen)
- Wirtschaftliche Applikation (auch bei grossen Längen)

Argumente für das Vorspannsystem StressHead

- Kann unter Betrieb appliziert werden (unter dynamischer Beanspruchung)
- Kann auch bei schlechter Qualität des Untergrundes angewendet werden (Beton: min. 10 N/mm^2)
- Ausnützen der guten Materialeigenschaften der CFK-Lamellen
- Kurze Endverankerung der CFK-Lamellen (kleiner 12 cm)
- Konzentrierte Kräfteinleitung in den Untergrund
- Wirtschaftliche, einfache Applikation ohne Hebezeuge oder Anpressvorrichtungen
- Geringer Platzbedarf von Lamelle und Verankerung
- Schnelle Applikation auf der Baustelle
- Einfache Handhabung auch unter schwierigen Platzverhältnissen
- Kann auch als kurze Endverankerung bei ungenügender Verankerungslänge schlaff applizierter Lamellen verwendet werden
- Applikation ist vollkommen witterungs- und temperaturunabhängig (ohne Verbund)

1.2 Anwendungsbereiche

Erhöhungen der Lasteinwirkungen

- Vergrößerung der Nutzlasten
- Erhöhtes Verkehrsaufkommen
- Einbau von grösseren Maschinen in der produzierenden Industrie
- Umnutzungen

Änderung von Normen

- Erdbeben
- Anpassung an geänderte Bemessungsmethoden

Schäden an Tragwerksteilen

- Alterung von Baustoffen
- Korrosion der Stahlbewehrung
- Aufprall
- Brand
- Erdbeben

Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit

- Verringerung der Verformungen
- Reduktion der Spannungen in der Stahlbewehrung
- Verkleinerung der Rissbreiten

Änderung des statischen Systems

- Entfernen von Wänden oder Stützen
- Aussparungen in Decken, Wänden und Stützen

Mängel bei der Projektierung oder Ausführung

- Bewehrungsquerschnitte zu gering bemessen
- ungenügende statische Höhe

2 Lamellentyp, Vorspannkkräfte und spezifische Daten

Das Vorspannsystem StressHead basiert auf dem Prinzip einer externen Vorspannung ohne Verbund, bestehend aus CFK-Spanngliedern mit konzentrierter Krafteinleitung an den Lamellenenden. Das System kann aber auch im Verbund angewendet werden (siehe Seite 17). Die Vorspannkraft des aktuellen Systems liegt bei $P_{0,max} = 220 \text{ kN}$ pro Spannglied.

Kernstück des Vorspannsystems StressHead bilden die CFK-Lamelle sowie zwei CFK Spannköpfe. Das System besteht aus folgenden Komponenten:

CFK-Spannglied bestehend aus:

- CFK Lamelle: Sika CarboDur S624 (60 mm x 2,4 mm = 144 mm²)
- Beidseitig fixierter CFK Spannkopf „StressHead 220“

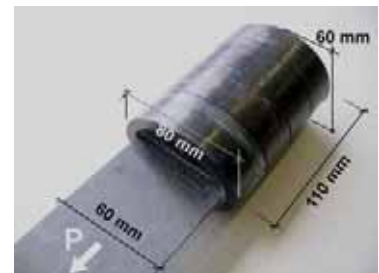


Abb. 1: Spannkopf StressHead 220

Bewegliche Verankerungsvorrichtung bestehend aus:

- Abstützungskonstruktion mit Schubdorn
- Traverse
- 2 M24 Gewindestangen
- 2 M24 Muttern
- Umlenksattel



Abb. 2: Bewegliche Verankerung Typ III

Fester Verankerungsdorn bestehend aus:

- Krafteinleitung mit Schubdorn
- Geschlitzte Kalotte
- Sicherheitsblech
- 2 M8 Schrauben



Abb. 3: Feste Verankerung Typ III

Eigenschaften Vorspannsystem StressHead

Die Eigenschaften des Vorspannsystems richten sich nach der gewählten Qualität des Verankerungssystems und werden in den Zulassungsversuchen bestätigt.

StressHead 220

Material CFK
Gewicht 550g
Abmessung 60/80 x 110 mm

CFK-Lamelle

Typ Sika CarboDur S624
Zugfestigkeit $\geq 2'800 \text{ N/mm}^2$
Abmessung 60 x 2.4 mm

Vorspannsystem StressHead

Spannkraft $P_{0,max}$ 220 kN Vorspannung $\sigma_{P_0} = 1540 \text{ N/mm}^2$
Verankerte Kraft $P_{u,min}$ 300 kN Vordehnung $\epsilon_{P_0} = 0.95 \%$
Lamellen-Umlenkradius minimale Umlenkradien möglich
Kunststoffhüllrohr als Schutz möglich (vorteilhaft bei freiliegendem Spannglied)

3 Verankerungen

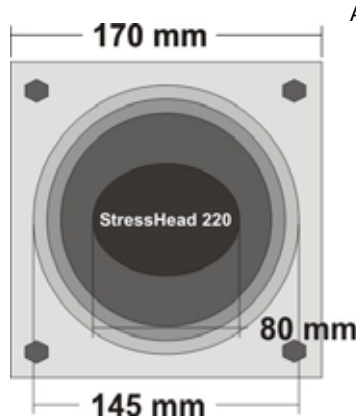
Die Verankerung der vorgespannten CFK-Lamelle ist an die örtlichen Gegebenheiten am Objekt anpassbar. Der Tragwiderstand der Verankerung wurde mittels Versuchen an Betonkörpern nachgewiesen.

3.1 Bewegliche und feste Verankerung Typ I

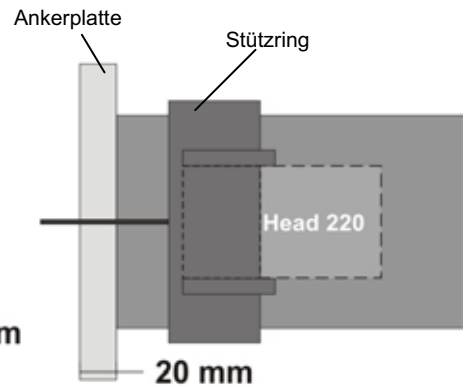
Mit der Verankerung Typ I kann das Spannglied auf kürzester Distanz hinter einem Auflager verankert und gespannt werden. Dabei ist die Strukturveränderung minimal, es setzt einzig eine Kernbohrung $\varnothing 90$ mm voraus. Die Ankerplatte beträgt 170 x 170 mm. Die Vorspannkraft $P_{0,max} = 220$ kN kann somit ab einer Betondruckfestigkeit von minimal 10 N/mm^2 aufgenommen werden.



Abb. 4: Bewegliche Verankerung Typ I



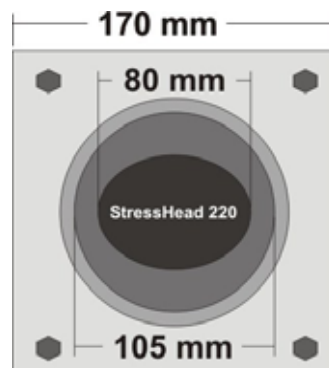
Figur 1: Grundriss



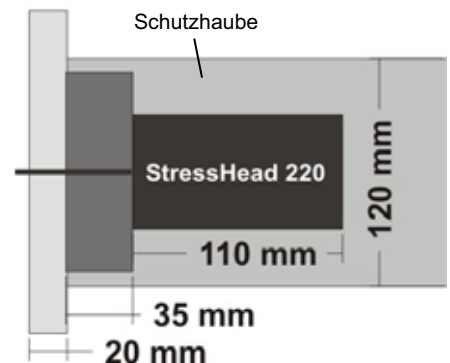
Figur 2: Längsschnitt



Abb. 5: Feste Verankerung Typ I



Figur 3: Grundriss



Figur 4: Längsschnitt

3.2 Bewegliche und feste Verankerung Typ II

Dieser Verankerungstyp kann als bewegliche und als feste Verankerung verwendet werden. Der Spannkopf wird mittels einer geschlitzten Traverse (Abb. 7) gehalten und mit zwei Gewindestangen (M24) in der Endlage fixiert.

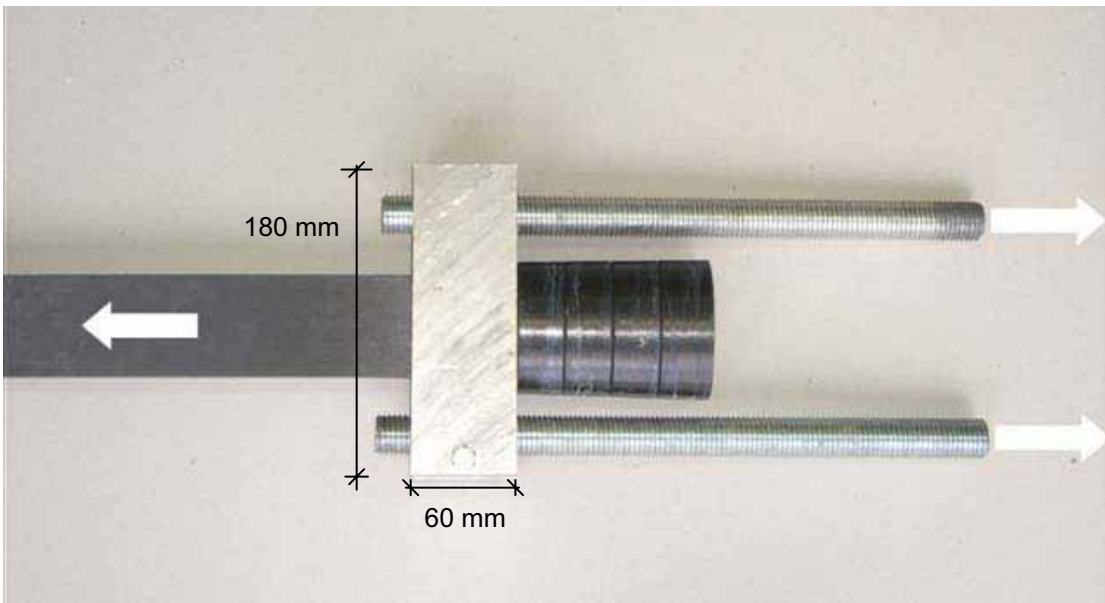


Abb. 6: Bewegliche und feste Verankerung Typ II

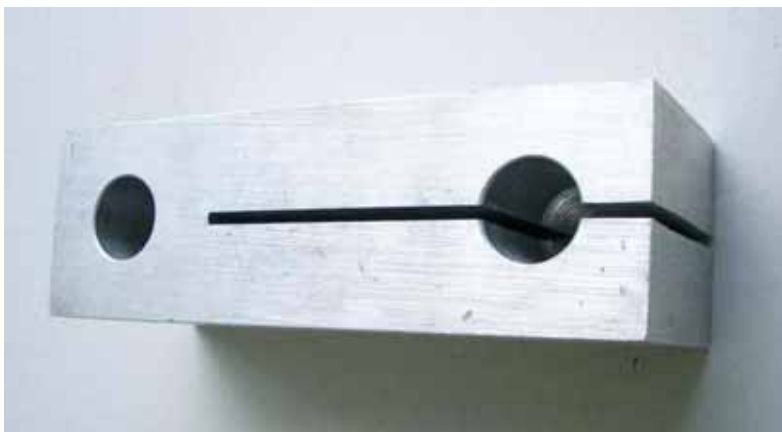


Abb. 7: Traverse (60 x 60 x 180 mm)

3.3 Bewegliche und feste Verankerung Typ III

Bewegliche Verankerung Typ III

Die Krafteinleitung bei der beweglichen Verankerung Typ III erfolgt direkt über einen Schubdorn in das Bauwerk. Die an der Betonoberfläche hervorstehenden Teile des Spannsystems beschränken sich bei der Lamelle auf ca. 5 mm und bei der beweglichen Verankerung verbleibt ein Überstand von 14 cm.



Abb. 8: Bewegliche Verankerung Typ III



Abb. 9: Anwendung: Brückenverstärkung Korea

Feste Verankerung Typ III

Je nach Lage der äussersten Bewehrung wird ein Teil der Verankerung im Bauwerk lokal versenkt. Damit können die über die Betonoberfläche hervorstehenden Teile der festen Verankerung auf 3 cm reduziert werden.



Abb. 10: fester Verankerungsdorn \varnothing 120 mm Typ III

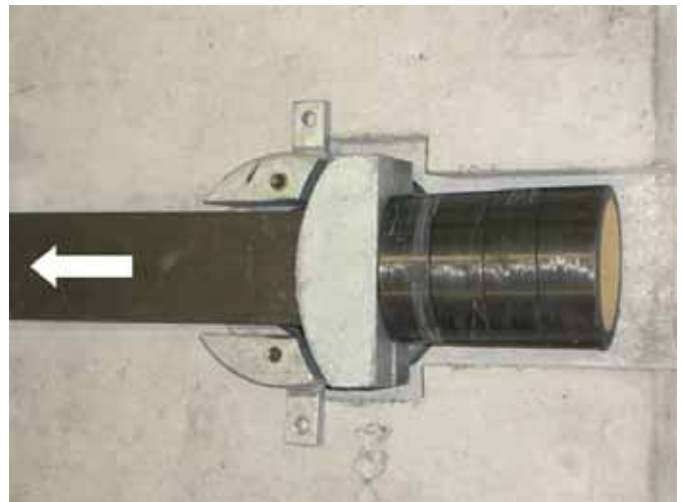


Abb. 11: feste Verankerung Typ III

4 Einsatzkriterien und Anforderungen an das Vorspannsystem

4.1 Einsatzkriterien

Ein Einsatz des Vorspannsystems StressHead ist in folgenden Fällen wirtschaftlich interessant. Oft sind mehrere Kriterien gleichzeitig erfüllt.

Konzentrierte Kraffteinleitung

Die konzentrierte Kraffteinleitung drängt sich auf:

- bei schwierigen, aufwändigen oder unmöglichen Lasteinleitungen über Verbundwirkung
- bei statischen Anforderungen, die einen klaren und sicher kontrollierbaren Kraftfluss bedingen
- bei statischen Anforderungen, die eine Verankerung hinter dem Auflager bedingen
- falls der Endverankerungsnachweis schlaff bemessener Lamellen nicht ohne mechanische Endverankerung erfüllt werden kann

Mit der konzentrierten Lasteinleitung ist das Vorspannsystem unabhängig gegenüber örtlichen, oberflächlichen Materialeigenschaften der zu verstärkenden Struktur (Betonoberfläche, Zementhaut etc..).

Grosse Verstärkungskräfte unter minimalen Platzverhältnissen auf der freien Strecke

Durch die sehr hohe Ausnutzung der Festigkeit der CFK-Lamellen durch die Vorspannung sowie durch die Lamellendicke von 2,4 mm müssen weniger Spannglieder appliziert werden, was unter minimalen Platzverhältnissen hohe Verstärkungskräfte ermöglicht (bis zu 220 kN pro Lamelle).

Verformungsbeschränkung der zu verstärkenden Struktur

Bei grossen oder wachsenden Verformungen unter ständigen Lasten oder Verformungen aufgrund zusätzlicher Lasten muss oft die Durchbiegung reduziert oder verhindert werden. Mit einer äusseren Kraft aus Vorspannung kann eine solche Struktur wirksam verstärkt werden. Probleme im Zusammenhang mit Rissen und Ermüdungsbeanspruchung werden entschärft.

Minimale Eingriffe in die zu verstärkende Struktur

Durch den flexibel platzierbaren Vorspannkopf kann die zur Verankerung notwendige Bohrung auf die Struktur (insbesondere die Bewehrung) abgestimmt werden. Dadurch wird die Struktur nur minimal geschwächt und die bestehende Bewehrung nicht beschädigt.

Einfache und schnelle Applikation

Das Vorspannsystem StressHead kann bei engen Randbedingungen bezüglich Zeitaufwand, Zugänglichkeit, Platzverhältnissen für die Montage und bei schwierigen klimatischen Verhältnissen eingebaut werden. Die Vorbereitungsarbeiten an der Struktur sind minimal.

Korrosionsschutz

Hohe Anforderungen bezüglich Korrosionsschutz bei einem externen Vorspannsystem können durch die Verwendung von CFK-Materialien aufgrund deren ausgezeichneter Korrosionsbeständigkeit problemlos eingehalten werden.

4.2 Anforderungen an das Vorspannsystem

Zur Zeit gibt es noch keine technischen Normen, die spezifische Anforderungen für CFK-Vorspannsysteme formulieren. Deshalb basiert das Vorspannsystem auf der Grundlage der EOTA, European Organisation for Technical Approvals. Diese Richtlinie, die für Stahlvorspannsysteme ausgearbeitet wurde, kann sinngemäss für CFK-Lamellen-Systeme angewendet werden. In technischer Hinsicht werden in folgenden Bereichen Anforderungen und Prüfungen vorgeschrieben:

- Statische Festigkeit
- Kraffteinleitung in den Untergrund
- Umlenkung und Knick
- Ermüdungsfestigkeit
- Reibungskoeffizient und Reibungsverluste
- Zusammenbau, Montage und Spannvorgang

5 Projektierung

Die Projektierungsphase erstreckt sich von der Zustandsaufnahme über die Bestimmung der Massnahmen, der Systemevaluation bis hin zu den detaillierten Ausführungsplänen mit allen Spezifikationen. Die Projektierung mit der Anwendung des Vorspannsystem StressHead kann im Rahmen dieser gewohnten Projektierungsschritte abgewickelt werden.

Zustandsaufnahme

Ausgangslage für die Projektierung bildet eine Zustandsaufnahme des Tragwerkes, aus der allfällige Probleme bezüglich Tragreserven und/oder bezüglich Tragwerksverformungen hervorgehen.

Definition der Sanierungsmassnahmen und Systemevaluation

Nach der Festlegung des Sanierungszieles, müssen die Kriterien für einen sinnvollen und ökonomischen Einsatz des Vorspannsystems StressHead abgecheckt werden.

Systembemessung

An einem statisch relevanten Teilsystem ist die Wirkung einer äusseren Zusatzkraft aus Vorspannung zu bestimmen, basierend auf der Berechnung der bestehenden unverstärkten Struktur. Insbesondere ist die Tragsicherheit und die Spannungsverteilung in den kritischen Querschnitten unter allen massgebenden Lastfällen inklusive Ausfall des Verstärkungssystem zu prüfen.

Die Bemessung erfolgt basierend auf den allgemein gültigen Normen für externe Vorspannung ohne Verbund und den technischen Angaben für die Bemessung des Vorspannsystems StressHead.

Bei der Bemessung sind folgende Anforderungen zu berücksichtigen:

1. Das verstärkte Tragwerk entspricht hinsichtlich Gebrauchstauglichkeit und Tragsicherheit den gültigen Normen
2. Das vorhandene Verformungsvermögen wird so wenig wie möglich eingeschränkt; das Versagen erfolgt während des Stahlfließens
3. Das Versagen der Verstärkung erfolgt im Spannglied und nicht bei der Verankerung

Ausführungsplanung

In der Ausführungsplanung werden die Spannglieder platziert und die Ankerkonstruktionen unter Berücksichtigung der Montage- und Spannanforderungen bestimmt. Alle notwendigen Massnahmen an der Struktur werden in den Ausführungsplänen spezifiziert.

6 Entwurf und Bemessung

Die Richtlinien für die Bemessung werden aus den bekannten Regeln für konventionelle Spannsysteme abgeleitet. Einige Besonderheiten des Materials CFK müssen berücksichtigt werden und können den Bemessungsrichtlinien für geklebte CFK-Lamellen entnommen werden. In Tabelle 1 sind die wichtigsten Regeln zusammengefasst:

	Spannsystem Stahl ohne Verbund	CFK-Lamelle geklebt	CFK-Lamelle gespannt ohne Verbund
Tragfähigkeit, Gebrauchstaug- lichkeit	$\sigma = \sigma_{P,\infty}$	$\sigma = \sigma \{ \text{System, Lastanordnung, Belastungsgeschichte, ...} \}$	$\sigma = \sigma_{P,\infty}$
Brandfall	$\sigma = \sigma(T)$ (Abminderung)	$\sigma = 0$ (Ausfall)	$\sigma = 0$ (Ausfall)

Tabelle 1: Bemessungsgrundlagen System ohne Verbund

Die Annahme $\sigma = \sigma_{P,\infty}$ für gespannte Lamellen ohne Verbund ist eine starke Vereinfachung auf der „sicheren Seite“. Bei Biegeträgern könnte eine Zusatzdehnung im Bruchzustand berücksichtigt werden. Da der E-Modul der Lamelle tief und die Querschnittsfläche im Allgemeinen sehr klein ist, bleibt der Einfluss auf das Tragverhalten aber gering. Bei anderen Anwendungen (wie Schubverstärkungen oder vertikale Vorspannung von Mauerwerk) ist die Zusatzdehnung im Bruchzustand sehr klein.

7 Konfektionierung und Applikation des Systems

Die Ausführung bis zum fertig montierten Vorspannsystem StressHead erfolgt in 4 Schritten (siehe letzte Seite)

1 Vorbereiten, Einmessen, Bohren und Konfektionieren des Vorspannsystems StressHead

Ist die Lage der innenliegenden Bewehrung bestimmt, können die Kernbohrungen für die Verankerungen definitiv festgelegt (Abb. 12) und gebohrt (Abb. 13) werden. Die Bohrlöcher werden anschliessend eingemessen und damit ist die exakte Länge des Spanngliedes bestimmt.

Die Konfektionierung des Vorspannsystems StressHead, d.h. Zusammenfügen der Lamelle und der Spannköpfe und die Vorarbeiten (Versetzen der Verankerungen) auf der Baustelle laufen parallel. Das Spannglied kann auf Wunsch mit einer Werkvorspannung von ($P_0 + 10\%$) bestellt werden (Qualitätssicherung).



Abb. 12: Bestimmen der definitiven Lage (aufgrund der Bewehrungsanordnung) der Kernbohrungen



Abb. 13: Kernbohrungen für die Verankerungen

2 Versetzen der Verankerungen

In der Zwischenzeit wird die bewegliche und feste Verankerung versetzt. Der Kraftschluss der Verankerungen (Abb. 14 und 15) wird mittels Injektion sicher gestellt. Im Normalfall sind nur minimale Untergrundvorbehandlungen an der Betonoberfläche auf der freien Strecke zwischen beweglicher und fester Verankerung erforderlich. Scharfe Kanten und Brauen des Betons sind zu entfernen.



Abb. 14: Versetzen der beweglichen Verankerung (Typ III)



Abb. 15: Versetzen der festen Verankerung (Typ III)

3 Montieren und Spannen des Vorspannsystems StressHead

Jedes CFK-Spannglied wird mit den Spannköpfen in die feste (Abb. 16) und in die bewegliche Verankerung (Abb. 17) eingehängt. Auf der beweglichen Seite wird die Vorspannpresse angesetzt (Abb. 18) um den eingehängten Spannkopf bis auf die geforderte Vorspannkraft zu spannen.



Abb. 16 : Einsetzen des Spanngliedes in die feste Verankerung (Typ III)



Abb. 17 : Einsetzen des Spanngliedes in die bewegliche Verankerung (Typ III)



Abb. 18: Spannen des Spanngliedes

4 Endfixierung

Nach Erreichen der Vorspannkraft $P_{0,max}=220$ kN werden der Spannkopf in der beweglichen Verankerung mit Muttern fixiert, die Presse abgebaut und die überstehenden Gewindestangen abgeschnitten, womit das System fertig montiert ist.



Abb. 19: Definitive bewegliche Verankerung (Typ III)



Abb. 20: Definitive feste Verankerung (Typ III)

8 Qualitätssicherung

Ziel der Qualitätssicherung ist das sichere Erreichen aller in der technischen Dokumentation definierten und garantierten Systemeigenschaften, wobei das dauerhafte Erreichen der garantierten Vorspannkräfte der Schwerpunkt bildet.

Die Qualitätssicherung für das Vorspannsystem StressHead richtet sich nach dem übergeordneten Vorgehens- und Kontrollplan. In diesem Plan sind alle Vorgehensschritte von der Herstellung der Komponenten bis zum gespannten System detailliert aufgeführt. Neben den Vorgehensschritten sind die Kontrollpunkte aufgeführt. Der Weg jeder Komponente ist lückenlos rückverfolgbar dokumentiert vom montierten System zurück bis zur Herstellung. Festgelegte Eingangs- und Ausgangskontrollen ermöglichen ein Sicherstellen der Qualität auf jeder Ebene der drei Qualitätssicherungsstufen:

1. Qualitätssicherung bei der Produktion der Systembestandteile
2. Qualitätssicherung bei der Konfektionierung des Systems
3. Qualitätssicherung bei der Systemapplikation

Die ersten zwei Stufen des dreistufigen Vorgehens- und Kontrollplan richten sich nach dem standardisierten Produktionsprozess im Werk. Alle Schnittstellen sind definiert. Als Kernstück der Qualitätssicherung kann die Werkvorspannung jedes Spanngliedes 10 % über dem vorgesehenen Vorspannniveau verlangt werden ($P_{0,max} + 10\%$).

In der 3. Stufe werden das Vorgehen und die Kontrollen bei der Montage und dem Spannvorgang detailliert beschrieben. Auf dieser Basis erstellt der ausführende Unternehmer einen Prüfplan mit Protokollformularen, mit denen der Applikationsvorgang dokumentiert wird. In dieser Stufe wird unterschieden:

1. Vorbereitungen auf der Baustelle zur Sicherung der Endkonfektionierung
2. Sicherung des richtigen Versetzens der Verankerungen gemäss Spezifikationen in der Ausführungsplanung
3. Sicherung des Vorgangs für die Montage und das Spannen des Systems

9 Unterschied Materialverhalten CFK - Stahl

Als Beispiel für die Berücksichtigung des unterschiedlichen Materialverhaltens von Stahl und CFK wird die Anforderung an die Effizienz der Verankerung betrachtet. 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. Gleichzeitig muss die Verlängerung des Zugglieds auf der freien Strecke mindestens 20 ‰ betragen. In Abbildung 21 links sind diese beiden Bedingungen in ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Spannstahl eingetragen. Es ist ersichtlich, dass die Anforderungen gut auf das Materialverhalten von Spannstahl abgestimmt sind. Zusammen ergeben sie einen genügenden Abstand des Bruchzustands von der aufgebracht initialen Vorspannung σ_{P0} sowohl in bezug auf die Verlängerung $\Delta\varepsilon$ als auch in bezug auf die Spannungszunahme $\Delta\sigma$.

Bei konventionellen Spannsystemen wird mit der geforderten Effizienz der Verankerung von 95% erreicht, dass das Zugglied ins Fließen kommt und damit vor dem Bruch eine grosse Verformung aufweist.

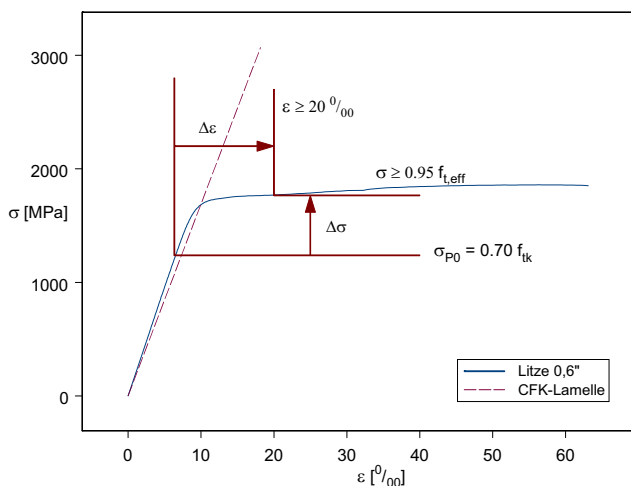


Abb. 21: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Spannstahl im Vergleich mit CFK

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 initialer Vorspannung und Bruchspannung bleibt in jedem Abschnitt des Spannungs-Dehnungs-Diagramms gleich.

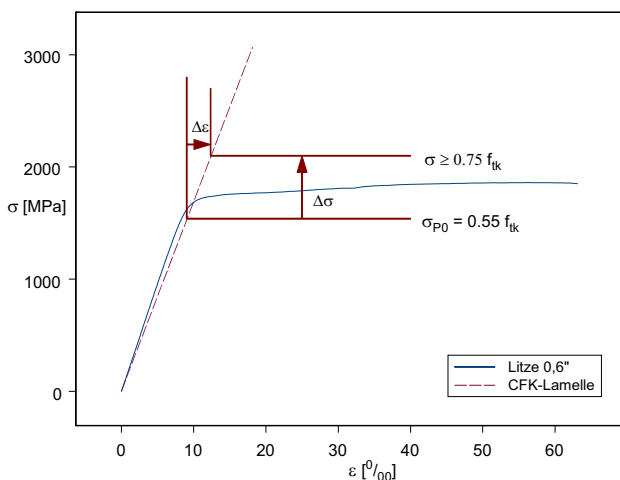


Abb. 22: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von CFK im Vergleich zu Spannstahl

Die Effizienz der Verankerung kann somit auf der Grundlage einer wirtschaftlichen Optimierung gewählt werden; die zulässige Vorspannung ergibt sich daraus.

Wichtig für den richtigen Einsatz von gespannten CFK-Lamellen ist die systematische Gegenüberstellung sämtlicher Lösungsmöglichkeiten und Spannsysteme. Da die heute bekannten CFK-Spannsysteme im Kraftbereich von Monolitzen anzusiedeln sind, ist auch dieses Spannsystem in die Beurteilung miteinzubeziehen. In der Tabelle 2 werden diese Systeme miteinander verglichen.

Eigenschaften		Verstärkungssysteme			Vorspannsysteme			
		geklebte Bewehrung			Stahl		CFK ohne Verbund	CFK mit Verbund
		Stahllamellen	CFK-Gewebe	CFK-Lamellen	Monolitzen	Interne Spannkabel Stahl	CFK-Lamellenvorspannsystem ohne Verbund	CFK-Lamellenvorspannsystem im Verbund
Robustheit	▶ zuverlässige Endverankerung				✓	✓	✓	✓
Effizienz	▶ Materialeigenschaften ausgenutzt	✓			✓	✓	✓	✓
Dauerhaftigkeit	▶ Korrosionsbeständigkeit		✓	✓	(✓)	(✓)	✓	✓
	▶ hohe Alkalibeständigkeit		✓	✓			✓	✓
	▶ Verbesserung Gebrauchstauglichkeit Tragwerk	(✓)			✓	✓	✓	✓
	▶ ausgezeichnetes Verhalten bei Ermüdung		✓	✓			✓	✓
Duktilität	▶ keine Kombination Verformungslokalisierung und Sprödbruch				✓	✓	✓	(✓)
Anpassungsfähigkeit	▶ geringe Abmessungen	✓	✓	✓			(✓)	(✓)
	▶ kleine Umlenk radien		✓	✓	(✓)	(✓)	✓	✓
	▶ Lamellenkreuzungen einfach möglich		✓	✓			✓	✓
	▶ kurze Zugglieder				(✓)		✓	✓
Ausführungsfreundlichkeit	▶ schnelle, witterungsunabhängige Applikation				✓		✓	
	▶ garantierte Ausführungsqualität (Verantwortung)				✓	✓	✓	✓
	▶ geringes Gewicht		✓	✓			✓	✓
	▶ kann auf Baustelle abgelängt werden	✓	✓	✓	(✓)	(✓)		
	▶ keine Gesundheits- und umweltgefährdenden Stoffe				✓	✓	✓	

Tabelle 2: Stahl-CFK Vergleich

Der Vergleich zeigt, dass es verschiedene Anwendungsgebiete gibt, wo CFK-Lamellen mit hohem Vorspanngrad, einer konzentrierten Endverankerung und allenfalls ohne Verbund gegenüber anderen Spannsystemen Vorteile aufweisen.

10 Weitere Anwendungen

10.1 Vorspannsystem mit Verbund

Die Applikation im Verbund kann unter Umständen einige Vorteile mit sich bringen. Der Lamellenquerschnitt kann lokal zusätzliche Kräfte aufnehmen. Dies gewährleistet einen lokalen Spannungsabbau bei ungleichmässiger Belastung. Mit dem CFK-Lamellenquerschnitt (60 x 2.4 mm) kann insgesamt eine Zugkraft von 400 kN aufgenommen werden, bei einer festgelegten Vorspannkraft $P_{0,max} = 220$ kN, können lokal zusätzlich 180 kN übernommen werden, bis die Tragsicherheitsgrenze erreicht wird. Das Ausnützen dieser Grenze setzt aber eine genügend gute Betonqualität und insbesondere einen sehr guten Verbund zwischen Beton und CFK-Lamelle voraus.

Nachteil des im Verbund angewendeten Systems ist die wetterabhängige Applikation und die maximale Temperatureinwirkung von ca. 50° - 80° C (abhängig vom verwendeten Epoxydharz).

	Spannsystem Stahl ohne Verbund	CFK-Lamelle geklebt	CFK-Lamelle gespannt mit Verbund	CFK-Lamelle gespannt ohne Verbund
Tragfähigkeit, Gebrauchstaug- lichkeit	$\sigma = \sigma_{P,\infty}$	$\sigma = \sigma \{ \text{System, Lastanordnung, Belastungsgeschichte, ...} \}$	$\sigma = \sigma \{ s_{P,0}, \text{System, Lastanordnung, Belastungsgeschichte, ...} \}$	$\sigma = \sigma_{P,\infty}$
Brandfall	$\sigma = \sigma(T)$ (Abminderung)	$\sigma = 0$ (Ausfall)	$\sigma = 0$ (Ausfall)	$\sigma = 0$ (Ausfall)

Tabelle 3: Bemessungsgrundlagen System im Verbund

Die Richtlinien für die Bemessung werden aus den bekannten Regeln für konventionelle Spannsysteme abgeleitet. Einige Besonderheiten des Materials CFK müssen berücksichtigt werden und können den Bemessungsrichtlinien für geklebte CFK-Lamellen entnommen werden. In Tabelle 3 sind die wichtigsten Regeln zusammengefasst.

10.2 Siloverstärkungen

Silobauwerke wurden in den Siebziger- und Achtzigerjahren oft in Unkenntnis und ohne Berücksichtigung komplexer dynamischer Lastfälle projektiert und gebaut. Auch wurden während des Baubooms zum Teil elementare bautechnische und Ausführungsfehler gemacht, was nun dazu führt, dass heute statisch unterbemessene und defekte Stahlbetonsilos verstärkt und instandgesetzt werden müssen.

Es müssen somit geeignete Massnahmen gefunden und angewendet werden, um die ursprünglich geplante Lebensdauer der Silos gewährleisten zu können. Bis heute werden Silos vorwiegend mit Stahlmonolizen verstärkt. Diese weisen aber entscheidende Nachteile auf. Das Korrosionsverhalten der eingepackten Litzen kann nur schwer überprüft werden und die notwendige regelmässige Wartung ist aufwendig und teuer.

StressHead AG hat in Zusammenarbeit mit der Sika AG und VSL (Schweiz) AG eine spezielle Verankerung entwickelt, um Silos nachträglich mit gespannten CFK-Lamellen zu verstärken.

Verankerung

Die Verankerung verbleibt am Bauwerk. Sie besteht aus zwei Traversen, die den Spannkopf fassen sowie einem Grundblech und zwei Gewindestangen. Die zwei Traversen werden mit Hilfe eines speziellen Spannstuhls mit der gewünschten Kraft zusammengestossen und anschliessend mit den Gewindestangen definitiv fixiert (analog Verankerung Typ II).



Abb. 23: Siloverankerung im Spannzustand



Abb. 24: Siloverankerung im Endzustand

Untergrund

Die Lamelle kann direkt auf der Betonoberfläche appliziert werden (scharfe Betonkanten müssen entfernt werden). Mit dem Epoxydharzkleber SikaDur 30 (oder ähnliches) können ein optimales Gleiten der CFK-Lamelle auf der Betonoberfläche und ein einwandfreier Verbund sichergestellt werden.

Bemessung

Bei Applikation mit Epoxydharz wird das System im Verbund bemessen. Die auf der gegenüberliegenden Seite des Silos ankommende Kraft kann mit 60 % der Kraft an der Spannstelle angenommen werden. Wird jede Verankerungsstelle um $\frac{1}{4}$ des Umfanges versetzt, kann ein mittlerer Wert von **80%** der aufgebrachten Vorspannkraft angenommen werden. Dies entspricht bei einer Vorspannung $P_{0,max} = 220$ kN einer mittlerer Vorspannung von 180 kN.

