Gradientenvorspannung

Verstärkung von Holzbalken mit vorgespannten CFK-Lamellen, die in Gradienten verankert sind

Forschungsbericht

Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau



Bericht Nr.	2655-SB-01		
Auftrag Nr.	2655.DHB		
Klassifizierung	Öffentlich		
Datum	31.03.2007		
Auftraggeber	BAFU Bundesamt für Umwelt Fond zur Förderung der Wald- und Holzforschung Herr M. Gautschi 3003 Bern		
Adresse der Forschungsstelle	der ngsstelleBerner Fachhochschule Architektur, Holz und Abteilung F+E, Holzbau and Bauphysik Solothurnstrasse 102, CH-2504 Biel Tel / Fax +41 (0)32 344 0 341 / 391 www.ahb.bfh.ch		
Verfasser	Marco Schnüriger Maurice Brunner Martin Lehmann		
Projektverantwortlicher	Maurice Brunner	Malmnner	
Abteilungsleiter	Marc-André Gonin	NF.L.	

ABSTRACT

Die Duktilität und der Biegewiderstand eines Holzbalkens können verbessert werden, wenn man CFK-Lamellen auf die Zugseite klebt. Um Kosten zu reduzieren und die Tragfähigkeit zu verbessern, haben die Autoren die Lamellen vorgängig vorgespannt. Um der Delaminierungsgefahr entgegenzuwirken, wurden die einzelnen Lamellen in Etappen mit einem speziellen Gerät an das Holz geklebt. Nach jeder Klebeetappe wurde die Vorspannkraft leicht reduziert, damit die Krafteinleitung über eine gewisse Länge an den beiden Holzenden erfolgte.

In diesem Projekt wurde in einer Versuchsreihe eine einzige Lamelle aufgeklebt, die noch vor der Auflagerzone aufhörte. Damit wollte man die praxisnahe Situation der Instandsetzung überprüfen. In einer weiteren Versuchsreihe wurden mehrere Lamellen übereinander geklebt, um die Tragfähigkeit weiter zu steigern. Nur die erste Lamelle wurde bis zu den Auflagern geklebt: Die äusseren Lagen mussten aus technischen Gründen vor den Auflagern verankert werden.

Die Biegeversuche bestätigten die Eignung des im Haus entwickelten, nichtlinearen Berechnungsmodells zur Erfassung des Tragverhaltens. Die Gradientenverankerung der Vorspannkraft bietet eine gute Lösung gegen die Delaminierungsgefahr: Bei keinem der Prüfkörper schälte eine Lamelle vor dem Versuch ab. In der Versuchsserie mit nur einer Lamelle blieb diese bis zum Bruch am Holz befestigt.

Bei den Versuchen mit drei übereinander geklebten Lamellen wurden die äusseren Lamellen während der Biegeprüfung plötzlich abgeschält. Dies deutet darauf hin, dass bei der vergrösserten Kraft in der Lamelle eine zusätzliche Verankerung benötigt wird, um die Delaminierungsproblematik vollständig zu lösen.

Keywords: Brettschichtholz, Vorspannung, Multischicht CFK, Delaminierung, Gradientenvorspannung.

ABSTRACT (English)

The ductility and bending resistance of a timber beam can be improved by attaching FRP laminates on the tensile face. In order to reduce costs and to enhance the load-bearing capacity, the authors have prestressed the laminates. The debonding problem has been tackled with a special device to attach the individual laminates in stages to the glulam beam.

In one test serie, a single laminate was attached to a glulam beam and anchored just before the supports, thus simulating the practical situation of the strengthening of structures on site. In the other test series, three laminates were attached on top of each other, in order to increase the load-bearing capacity. Only the first laminate was be extended to the supports: For technical reasons, the other two laminates had to be attached before the supports.

The bending tests confirmed that the proposed, non-linear calculation model could give useful predictions of the load-bearing behaviour of prestressed timber beams. The gradiented anchorage of the prestressing force proved to be very helpful against debonding. None of the laminates debonded before the tests. In case of the beams with only one laminate, they were still attached when the timber failed.

In the tests with three laminates attached on top of each other the outer laminates debonded. The project results sowed that debonding is still an obstacle in case there are many laminates attached on top of each other, especially if there is no additional anchorage on the bonded ends of the laminates.

Keywords: Glulam, prestressing, multilayer FRP, debonding, gradiented attachment.

INHALTSÜBERSICHT

1	Ausgangslage	4		
2	Zielsetzung	4		
3	Projektbeteiligte	4		
4	Vorgehensweise	5		
5	THEORETISCHE GRUNDLAGEN	5		
6	VERFAHREN DER GRADIENTENVERANKERUNG DER VORSPANNKRAFT	13		
7	DIE ERSTE VERSUCHSSERIE	16		
8	DIE ZWEITE VERSUCHSSERIE			
9	SCHLUSSFOLGERUNGEN	28		
10	Dank	28		
11	BESTIMMUNGEN ZUM VORLIEGENDEN BERICHT	29		
12	Verzeichnisse	30		
AN	HANG A: PRÜFAUFZEICHNUNGEN	32		

INHALTSVERZEICHNIS

1	Ause	GANGSLAGE	4
2		SETZUNG	4
3	Pro	JEKTBETEILIGTE	4
4	Vor	GEHENSWEISE	5
5	Тнес	ORETISCHE GRUNDLAGEN	5
	5.1	Vorteile der Vorspannung gegenüber schlaffen CFK-Lamellen	5
	5.2	Vereinfachtes Berechnungsmodell	6
	5.3	Plastisches Berechnungsmodell	8
	5.4 5.5	Plastisches Berechnungsmodell: Zahlenbeispiel	9
	5.5	5.5.1 Sofortige elastische Verluste	
		5.5.2 Langzeitverluste infolge Kriechen und Schwinden des Holzes	
6	Vedi		13
<u> </u>	VEN		15
	6.1 6.2	Funktionsweise des Spezialgeräts Applikation im vorliegenden Projekt	13 14
7	DIE E	ERSTE VERSUCHSSERIE	16
	7.1	Vorbemerkungen	16
	7.2	Prüfgegenstand	16
		7.2.1 Material	16
		7.2.2 Prüfkörper	16
		7.2.3 Lieferanten Material	17
		7.2.4 Hersteller Prüfkörper	
	7.3	Prufgrundlagen	1/
		7.3.1 Grundlagen und Normen, nach denen gepruft wurde	17
	71	7.5.2 Abweichungen von Fruivorschnitten, spezielle Bedingungen	17
	7.4	7 4 1 Prüfmittel und Prüfhilfsmittel	
		7.4.2 Vorklimatisierung	
		7.4.3 Prüfungsdatum	
		7.4.4 Prüfungsanordnung	18
		7.4.5 Prüfungsablauf	18
		7.4.6 Prüfungsdurchführung	18
	7.5	Prüfergebnisse	19
		7.5.1 Allgemeines	
		7.5.2 Daten des Prutkorpers vor der Prutung	
		7.5.3 Lokale und globale Biegestelligkeit	20 21
			21
8	DIE 2		23
	8.1	Vorbemerkungen	
	8.2	Prufgrundlagen	
		o.z.i Grundiagen und Normen, nach denen gepruft Wurde	
	83	o.z.z Abweichungen von Fruivoischniten, spezielle Bealfigungen	∠3 ລວ
	0.5	8.3.1 Material	
		8.3.2 Prüfkörper	
		8.3.3 Lieferanten Material	
		8.3.4 Vorspannen der Prüfkörper	
	8.4	Prüfung	24
		8.4.1 Prüfer	24

IN	HAL	TSVE	RZEICHNIS	3 / 39
		8.4.2	Prüfmittel und Prüfhilfsmittel	24
		8.4.3	Vorklimatisierung	24
		8.4.4	Datum der Prüfungsdurchführung	24
		8.4.5	Übersicht Prüfungsablauf	24
		8.4.6	Prüfungsablauf	24
		8.4.7	Prüfungsdurchführung	25
		8.4.8	Klimadaten zur Zeit der Prüfung	25
	8.5	Prüfer	gebnisse	25
		8.5.1	Daten des Prüfkörpers vor der Prüfung	26
		8.5.2	Lokale und globale Biegestreifigkeit	26
		8.5.3	Biegefestigkeit / Bruchlasten	26
9	Sсн	LUSSFOL	LGERUNGEN	28
10	DAN	к		28
10 11	Dan Bes	K TIMMUNG	GEN ZUM VORLIEGENDEN BERICHT	28 29
10 11	D AN B ES 11.1	к тіммима Umfan	GEN ZUM VORLIEGENDEN BERICHT ng des Berichts	28 29 29
10 11 12	DAN BES 11.1 VER	K TIMMUNG Umfan ZEICHNIS	GEN ZUM VORLIEGENDEN BERICHT ng des Berichts	28 29 29 30
10 11 12	DAN BES 11.1 VER 12.1	K TIMMUNG Umfan ZEICHNIS Tabelle	GEN ZUM VORLIEGENDEN BERICHT ng des Berichts SSE enverzeichnis	28 29 29 30 30
10 11 12	D AN BES 11.1 VER 12.1 12.2	K TIMMUNG Umfan ZEICHNIS Tabelle Abbild	GEN ZUM VORLIEGENDEN BERICHT ng des Berichts SSE enverzeichnis ungsverzeichnis	28 29 29 30 30 30
10 11 12	D AN BES 11.1 VER 12.1 12.2 12.3	K TIMMUNG Umfan ZEICHNIS Tabelle Abbild Literat	GEN ZUM VORLIEGENDEN BERICHT ng des Berichts SSE enverzeichnis ungsverzeichnis	28 29 29 30 30 31
10 11 12 Ani	DAN BES 11.1 VER: 12.1 12.2 12.3 HANG	K TIMMUNG Umfan ZEICHNIS Tabello Abbild Literati	GEN ZUM VORLIEGENDEN BERICHT ng des Berichts SSE enverzeichnis ungsverzeichnis urverzeichnis PRÜFAUFZEICHNUNGEN	28 29 29 30 30 31 32
10 11 12 ANI	DAN BES 11.1 VER 12.1 12.2 12.3 HANG A.1	K Umfan ZEICHNIS Tabelle Abbilde Literate A: I Erste	GEN ZUM VORLIEGENDEN BERICHT ng des Berichts SSE enverzeichnis ungsverzeichnis urverzeichnis PRÜFAUFZEICHNUNGEN Versuchsserie	28 29 29 30 30 31 32 32

1 AUSGANGSLAGE

Zahlreiche Biegeversuche belegen, dass Holzbalken immer auf der spröden Zugseite versagen. Die Biegedruckseite des Querschnittes weist ein duktiles Tragverhalten auf und kann die Spitzenwerte der Spannungen über eine grössere Fläche verteilen. Dies bedeutet, dass die Tragfähigkeit eines Balkens erhöht wird, wenn dessen Zugseite verstärkt wird. Dieses Wissen kann insbesondere für die Verstärkung von alten oder geschwächten Bauteilen gezielt eingesetzt werden.

Die Verstärkung der Zugseite eines Holzbalkens kann verschiedentlich vorgenommen werden. Möglich ist beispielsweise eine Abweichung vom klassischen Rechteckquerschnitt, z.B. ein T-Profil mit dem Flansch auf der Zugseite. Man könnte auch Stahl- oder hochfeste Kunststofflamellen aufkleben. Entsprechende Projekte wurden durchgeführt und technische Artikel sind international publiziert worden. Sie belegen, dass bei einer ausreichenden Verstärkung der Zugseite der Versuchsbalken ein duktiles Versagensverhalten erreicht wird.

Von 2002 bis 2003 wurden an der Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau (ehemals SH-Holz) im Rahmen eines COST E13 Projektes mehrere Brettschichtholz-Balken durch das Aufkleben von vorgespannten Kohlefaserlamellen verstärkt und das bekannte Delaminierungsproblem untersucht. Für Anwendungen im Betonbau hat die EMPA ein Vorspannsystem entwickelt, das die Vorspannkraft in Stufen verankert (Gradientenverankerung). Mit diesem Verfahren gelingt es, die Delaminierung zu verhindern. Das Verfahren wird heute von der Firma Carbo-Link GmbH, Fehraltorf angewendet. Im Rahmen des COST E13 Projektes konnte bestätigt werden, dass diese Methode auch für den Holzbau bestens funktionieren kann.

Allerdings haben die durchgeführten Biegeversuche gezeigt, dass die Verstärkung von grösseren Holzbalken mit nur einer Lamelle nicht ausreicht, um bei zunehmender Belastung die vorgängige "Plastifizierung" des Holzbalkens auf der Biegedruckseite zu induzieren. Damit bleibt eine Restfestigkeit, die nicht ausgeschöpft werden kann.

2 ZIELSETZUNG

Ziel des Projektes war, die Machbarkeit einer Verstärkung von Brettschichtholzbalken mit mehreren vorgespannten CFK-Lamellen zu überprüfen.

3 PROJEKTBETEILIGTE

Die Arbeiten wurden grösstenteils an der Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau, Biel, an der Abteilung Forschung und Entwicklung (F+E) durchgeführt. Die Vorspannung und das Aufkleben der CFK-Lamellen erfolgten im Labor der Firma Carbo-Link GmbH in Fehraltorf.

Finanzierung

• Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern

Projektverantwortung

• Dr. Maurice Brunner, Professor für Baustatik und Konstruktion an der Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau, Biel

Projektleitung

- Marco Schnüriger, Projektleiter Abt. F+E an der Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau, Biel (bis September 2006)
- Martin Lehmann, Projektleiter Abt. F+E an der Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau, Biel (ab September 2006)

Projektmitarbeit / Industriepartner

- <u>Vorspanntechnologie</u>: Carbo-Link GmbH, Undermülistr. 26, 8320 Fehraltorf. Dr. Andreas Winistörfer, Iwan Stöcklin
- <u>Brettschichtholz:</u> Urs Hüsser Holzleimbau, Oberebenestr. 22, 5620 Bremgarten AG Martin Häfeli

4 VORGEHENSWEISE

Der Projektablauf bzw. dessen Inhalt lässt sich in folgende Hauptaktivitäten gliedern:

Theoretische Grundlagen

Die Verstärkung von Holzbalken mit vorgespannten CFK-Lamellen ist ein ziemlich neues Forschungsgebiet. Zunächst stellt sich die Frage nach den Vorteilen der aufwändigen Vorspannung gegenüber der bisherigen Technik der schlaff aufgeklebten Lamellen. Die Berechnung von vorgespannten Holzkonstruktionen ist noch nicht vollständig erforscht. Bestehende Berechnungsansätze der Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau wurden verfeinert und angepasst.

Delaminierung

Es wurden Brettschichtholz-Querschnitte ausgewählt, die sich für eine Verstärkung mit vorgespannten Kohlefaserlamellen eignen. Wegen der begrenzten Breite von Holzbalken wurden die erforderlichen Lamellen übereinander geklebt. Daraus resultiert eine erhöhte Delaminierungsgefahr. Um diese einschätzen zu können, wurden die Balken nach der Verstärkung einige Wochen gelagert und beobachtet.

Biegeversuche

Die Balken wurden anschliessend auf Biegung geprüft. In diesem Zusammenhang wurden die Berechnungsmodelle überprüft und bestätigt.

Bisher wurde das Spezialgerät für die Gradientenverankerung dazu verwendet, einzelne vorgespannte CFK-Lamelle auf Beton oder Holz zu kleben. Die Projektidee, mehrere Lamellen übereinander zu kleben, ist neu. Die Versuche wurden in zwei Serien aufgeteilt, um die Erkenntnisse der ersten Serie in die zweite einfliessen zu lassen.

5 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

5.1 Vorteile der Vorspannung gegenüber schlaffen CFK-Lamellen

Die Verstärkung von Holzbalken mit schlaffen CFK-Lamellen ist gut erforscht. Die Technik wird auch eingesetzt. Viele Ingenieure erwarten einen wachsenden Markt, insbesondere für die Instandsetzung von alten oder geschwächten Konstruktionen. Bei den Klebetechniken sind weitere Untersuchungen notwendig. Bisher kann wegen der Delaminierungsgefahr weniger CFK als 1% des Holzquerschnittes aufgeklebt werden. Lindyberg 2000 schätzt, dass unter zukünftigen, idealisierten Bedingungen mit 3.3% CFK-Bewehrung, ein maximaler Lastvergrösserungsfaktor von ca. 2.0 erreicht werden könnte: d.h. eine Verdoppelung der Biegetragfähigkeit gegenüber herkömmlichen BSH.

Brunner 2002 hat eine ähnliche Studie durchgeführt für BSH-Balken, die mit vorgespannten CFK-Lamellen verstärkt waren. Die Resultate (Tabelle 1) zeigen, dass die Menge an CFK markant reduziert werden könnte. Mit nur 1.2% Bewehrungsgehalt (vergleiche 3.3% für schlaff aufgeklebte CFK) könnte ein Verstärkungsverhältnis von 2.3 - 2.8 erreicht werden. Dieser Wert ist höher als der Faktor 2 für den Fall, dass die CFK-Lamellen schlaff aufgeklebt werden. Des Weiteren wurde festgestellt, dass bei zunehmender Festigkeit des Holzes (mit gleichbleibendem Bewährungsgehalt) das Verstärkungsverhältnis kleiner wird. Deshalb ist diese Technik am effizientesten bei der Verstärkung von Balken mit niedriger Festigkeit. Diese Ergebnisse zeigen zudem, dass es lohnenswert ist, die Delaminierungsproblematik zu untersuchen. Diese ist das Hindernis für den Einsatz der Vorspanntechnik im Holzbau.

		STR	UCTURAL TIN		GLULAM			
GRADE/f# N/mm2	C14	C18	C24	C30	C40	GL20	GL28	GL36
f₄ N/mm2	16	18	21	23	26	21	27	31
E kN/mm2	7	9	11	12	14	10	12	14.5
Yield Strain <i>s</i> ₀%o	2.3	2	1.9	1.9	1.9	2.1	2.25	2.1
Strengthening Ratio	3.1	2.7	2.4	2.1	1.8	2.8	2.6	2.3

Tabelle 1: Verstärkungsverhältnisse, die mit vorgespannten CFK-Lamellen erreicht werden könnten

5.2 Vereinfachtes Berechnungsmodell

Die exzentrische Lage der vorgespannten CFK-Lamelle im Holzquerschnitt erzeugt zusätzlich zur Normalkraft N = -P auch ein Biegemoment $M = P \cdot e$ (Abbildung 1).



Abbildung 1: Spannungen im Holz infolge einer exzentrisch platzierten Vorspannkraft

Da die verwendeten CFK-Lamellen in der Regel sehr flach sind, genügt für eine Abschätzung folgender Wert für die Exzentrizität (1):

$$e \approx \frac{h}{2}$$
 daraus folgt $M \approx P \cdot \frac{h}{2}$ (1)

Die Spannungen im Holz aus der Vorspannkraft lassen sich mit folgenden Formeln berechnen (2):

$$\sigma_N = \frac{N}{A} = \frac{-P}{b \cdot h} \quad \text{und} \quad \sigma_M = \frac{M}{W} = \pm \frac{P \cdot \frac{h}{2}}{\frac{b \cdot h^2}{6}} = \pm \frac{3P}{b \cdot h}$$
(2)

Die Summe davon ergibt folgende Spannungen an der Ober- resp. Unterkante des Holzbalkens (3):

$$\sigma_{0} = +\frac{2 \cdot P}{bh}$$
 (Zug) sowie $\sigma_{U} = -\frac{4 \cdot P}{bh}$ (Druck) (3)

Bei der Nutzung erzeugen äussere Belastungen zusätzliche Momente. Bei der Berechnung der daraus resultierenden Spannungen muss die Verbundwirkung zwischen Holz und der CFK-Lamelle berücksichtigt werden (4).

$$\sigma_m = \pm \frac{M}{W_V} \tag{4}$$

Das Versagen erfolgt, sobald auf der Zugseite die Biegefestigkeit des Holzes erreicht ist.

$$\sigma_B = f_m = -\frac{4 \cdot P}{bh} + \frac{M}{W_{vu}} \quad \text{daraus folgt} \quad M_B = \left(\frac{4 \cdot P}{b \cdot h} + f_m\right) \cdot W_{U,H}$$
(5)

Berechnungsbeispiel

Glulam GL24h: Erfahrungswert $f_{M,U}$ = 40 N/mm², E=11kN/mm², b=80mm, h=320mm Vorspannung CFK, E=165kN/mm², P=49.6 kN



Abbildung 2: Querschnitt des Trägers

Querschnittswerte:

$$n = \frac{E_{CFK}}{E_{H}} = \frac{165}{11} = 15$$

$$z_{U} = \frac{(80 \cdot 320) \cdot 161.2 + 15 \cdot (1.2 \cdot 50) \cdot 06}{(80 \cdot 320) + 15 \cdot (1.2 \cdot 50)} = 155.7 mm$$

$$z_{U} = 155.7 - 1.2 = 154.5 mm$$

$$I_{Y} = \frac{80 \cdot 320^{3}}{12} + 15 \cdot \frac{50 \cdot 1.2^{3}}{12} + (80 \cdot 320) \cdot (155.7 - 161.2)^{2} + 15 \cdot (1.2 \cdot 50) \cdot (155.7 - 0.6)^{2} = 240.9 \cdot 10^{6} mm^{4}$$

$$W_{U,H} = \frac{I_{Y}}{z_{U,H}} = 1.56 \cdot 10^{6} mm^{3}$$

Biegewiderstand:

$$M_{U} = \frac{4 \cdot P \cdot W_{U,H}}{b \cdot h} + W_{U,H} \cdot f_{m} = \frac{4 \cdot 49600 \cdot 1.56 \cdot 10^{6}}{80 \cdot 320} \cdot \frac{1}{10^{6}} + 1.56 \cdot 10^{6} \cdot 40 \cdot \frac{1}{10^{6}} = 74.4 \text{ kNm}$$

Dieser Wert ist ca. 36% grösser als der Bruchwert des unverstärkten Balkens.

Die Vorspannung führt zu einer Überhöhung des Balkens. Diese Deformation lässt sich am einfachsten mit der Arbeitsgleichung berechnen. In diesem Verfahren wird eine fiktive Kraft F=1 entsprechend der gesuchten Deformation eingeführt. Die Berechnung erfolgt über die Integration des Produktes des reellen Momentes mit dem fiktiven Moment (6).

$$\int_{0}^{l} M \cdot \frac{Mp}{El} \, dx \tag{6}$$

Als Vereinfachung kann bei der Gradientenvorspannung über die gesamte Länge eine konstante Vorspannkraft angenommen werden. Dies gilt insbesondere bei einer Lamelle, welche über die gesamte Balkenlänge geführt wird. Dies führt zu einem konstanten Moment (Abbildung 3 a). Bei mehreren, abgesetzten Lamellen übereinander nähert sich die Vorspannkraft einer dreieckförmigen Verteilung an. Dies entspricht näherungsweise einer dreieckförmigen Momentenverteilung (Abbildung 3 b)). Eine solche Verteilung kann auch erreicht werden, wenn ein Balken mittels einer Schalungsstütze überhöht wird, bevor auf der Druckseite eine Lamelle schlaff aufgeklebt wird. Beim Entlasten entsteht eine dreieckförmige Vorspannkraft in der CFK-Lamelle (Lehmann et al. 2006, Abbildung 4).



Abbildung 3: Berechnung der Durchbiegung infolge der Vorspannkraft mit der Arbeitsgleichung





5.3 Plastisches Berechnungsmodell

Um die Biegetragfähigkeit von vorgespannten Holzbalken genauer abzuschätzen, wurde ein plastisches Berechnungsmodell entwickelt. Die nachfolgende Diskussion ist nur für den Bruchzustand gültig; jedoch unter der Voraussetzung, dass sich die vorgespannten CFK-Lamellen nicht vorzeitig ablösen. Es wurde davon ausgegangen, dass dies mit der Gradientenverankerung erreicht wird.

Wenn ein Holzbalken auf der spröden Biegezugseite genügend verstärkt wird, muss man mit einer Plastifizierung der Biegedruckseite rechnen. In Anlehnung an die Berechnungsmodelle für Stahlbeton haben diverse Forscher unterschiedliche Berechnungsansätze für Holzbalken publiziert (Kuilen 1991, Tingly 1995, Brunner 2000, Lindyberg und Dagher 2000, Romani und Blass 2001). Die meisten Modelle machen einen klaren Unterschied zwischen der elastisch-plastischen Spannungsverteilung auf der Biegedruckseite und der linearen Verteilung der Biegezugspannungen. Die in der Abbildung 5 dargestellten Annahmen entsprechen den Ansätzen von Blass und Brunner:

- Lineare Verteilung der Dehnung über die gesamte Balkenhöhe
- Lineare Spannungsverteilung auf der Biegezugseite, Maximalwert entsprechend der Biegefestigkeit der Holz-Festigkeitsklasse
- Lineare Spannungsverteilung auf der Biegedruckseite bis zu einem Maximalwert. Danach bleibt die Spannung konstant, da sie durch Stauchungen abgebaut wird.
- Die Spannung in der CFK entspricht dem Dehnungsniveau ε.

$$\sigma = \mathbf{E} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \tag{7}$$

Die Berechnung ist iterativ. Unter der Annahme, dass der Bruch auf der Biegezugseite beim Erreichen der Biegefestigkeit erfolgt, kann die Dehnung aus der Division der Spannung durch den E-Modul ermittelt werden. Die zugehörigen Dehnungen im Holz auf der Biegedruckseite und auf Höhe der CFK-Lamelle können mit dem Strahlensatz berechnet werden. Aus den Spannungs-Dehnungs-Diagrammen können die Spannungen auf der Biegedruckseite und in der CFK-Lamelle ermittelt werden. Aus den Spannungsverteilungen können die inneren Kräfte berechnet werden. Im Falle der reinen Biegung müssen diese eine Summe von Null ergeben.

$$F_{cT} + F_{tT} + F_{tL} = 0 \tag{8}$$



Abbildung 5: Verteilung der Dehnungen resp. der Spannungen in einem verstärkten Holzbalken

Die Berechnung muss für verschiedene Positionen der neutralen Achse wiederholt werden, bis die oben aufgeführte Bedingung erfüllt ist. Der Biegewiderstand kann durch Aufsummieren der Produkte aus den inneren Kräften mit den zugehörigen Hebelarmen berechnet werden (9).

$$M_{R} = F_{tT} \cdot \mathbf{e}_{1} + F_{tL} \cdot \mathbf{e}_{2} \tag{9}$$

Das oben aufgeführte Berechnungsmodell gilt für den Fall, dass die CFK-Lamellen schlaff aufgeklebt werden. Bei Vorspannung genügt eine kleine Anpassung. Brunner 2002 nimmt Bezug auf die Berechnungsregeln für Spannbeton und modifiziert das in Abbildung 5 dargestellte Berechnungsmodell, indem er die Vorspannkraft zur Lamellenkraft addiert. Die Spannungsverteilungen bleiben im Wesentlich gleich wie dargestellt. Allerdings wird – bedingt durch die grössere Zugkraft – die neutrale Achse nach unten verschoben, was zu einer grösseren Dehnung auf der Biegedruckseite führt.

5.4 Plastisches Berechnungsmodell: Zahlenbeispiel

Als Berechnungsbeispiel wird das Bruchmoment eines verstärkten Balkens (Abbildung 6) ermittelt.

- Dimensionen: 80mm breit, 320mm hoch.
- GL 24: E_m=11 kN/mm²
- 5% Fraktilwerte gemäss Norm SIA 265: $f_{c,k} = 21.8 \text{ N/mm}^2$, $f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$
- Mittelwerte (Erfahrungswerte):
 - o $f_c = 36.3 \text{ N/mm}^2$, $f_m = 40 \text{ N/mm}^2$
- Bruchdehnungen:
 - Zugbruch bei: $\epsilon_t = f_m / E = 40/11'000 = 3.64$ %.
 - Fliessen der Biegedruckseite bei: $\varepsilon_c = f_c / E = 36.3/11'000 = 3.30 \%$

Eigenschaften der CFK-Lamellen:

- Querschnitt 1.2x50mm
- E=165 kN/mm²
- Vorspannkraft: 49.6 kN (anfängliche Kraft 60kN abzüglich Verluste).

Für dieses Beispiel wird angenommen, dass das Versagen bei einer Bruchdehnung von 3.64‰, resp. einer Bruchspannung von 40 N/mm² auf der Zugseite des Holzbalkens eintritt.

Die Berechnung ist iterativ. Eine Annahme von z₁=145mm führt zu folgenden Werten:

$$z_2 = \frac{36.3}{40} \cdot 145 = 131.6mm$$
$$z_3 = 320 - 131.6 - 145 = 43.4mm$$

Maximale Dehnung auf der Druckseite:

$$\varepsilon_{0} = \frac{(131.6 + 43.4)}{145} \cdot 3.64\% = 4.4\%$$

Die zusätzliche Dehnung der CFK-Lamelle führt zur Erhöhung der inneren Kraft:

$$\Delta \varepsilon_{CFK} = \frac{(145.6)}{145} \cdot 3.64\% = 3.65\%$$
$$\Delta \sigma_{CFK} = E_{CFK} \cdot \Delta \varepsilon_{CFK} = 165'000 \cdot 3.65\% = 602.5 N / mm^{2}$$
$$\Delta P_{CFK} = A_{CFK} \cdot \Delta \sigma_{CFK} = \frac{60 \cdot 602.5}{10^{3}} = 36.15 kN$$



Abbildung 6: Berechnungsbeispiel eines vorgespannten BSH-Balkens Innere Kräfte auf der Druckseite des Holzes:

$$D_{1} = \frac{(43.4 \cdot 80) \cdot 36.3}{10^{3}} = 126.03 kN$$
$$D_{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(131.6 \cdot 80) \cdot 36.3}{10^{3}} = 191.08 kN$$
$$D_{Total} = 317.1 kN$$

Innere Kräfte auf der Zugseite des Holzes:

$$Z_{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(145 \cdot 80) \cdot 40}{10^{3}} = 232.0 \text{ kN}$$

Vorspannung:
 $Z_{0} = 49.6 \text{ kN}$
 $Z_{1} = \Delta P_{CFK} = 36.15 \text{ kN}$
 $Z_{Total} = 317.7 \text{ kN}$

Da die totalen Zug- und Druckkräfte annähernd gleich gross sind, kann die Iteration beendet werden. Die Berechnung der Hebelarme erfolgt mit dem Strahlensatz.

$$\mathbf{e}_{D} = \frac{(126.0 \cdot 21.7 + 191.1 \cdot 87.3)}{(126.0 + 191.1)} = 61.2mm$$

Zugseite :

 $\mathbf{e}_{Z} = \frac{(232.0 \cdot 271.7 + 85.75 \cdot 320.6)}{(232.0 + 85.75)} = 284.9 \text{mm}$

Damit beträgt der innere Hebelarm zwischen resultierender Zug- resp. Druckkraft 224mm. Dies ergibt folgendes Bruchmoment.

 $M_{U} = 317 \cdot 0.224 = 71 kNm$

Bemerkungen:

- Das genauere aber aufwendige plastische Berechnungsmodell liefert in diesem Beispiel einen Wert, der 5% kleiner ist als derjenige des einfacheren elastischen Modells. Je grösser die Vorspannung, desto grösser wird der Unterschied: Bei drei CFK-Lamellen auf dem gleichen

Balken ergibt die elastische Berechnung einen Biegewiderstand von 112kNm gegenüber 94kNm gemäss plastischer Berechnung (-19%).

 Die maximale Dehnung auf der Biegedruckseite beträgt in diesem Beispiel 4.4‰ und ist wesentlich kleiner als der Bruchwert von ca. 12‰. Damit ist klar, dass die Tragreserve auf der Biegedruckseite nicht ausgeschöpft wird. Nur mit einer grösseren Vorspannkraft – beispielsweise mittels mehreren, übereinander geklebten CFK-Lamellen – ist dies möglich.

5.5 Spannkraftverluste

5.5.1 Sofortige elastische Verluste

Wie in Abbildung 1 dargestellt, erzeugt die Vorspannung Zwängungen im Holzquerschnitt. Aus diesen resultieren Dehnungen. Auf der Unterseite wird das Holz verkürzt, was wiederum die ursprüngliche Vorspannkraft von P_0 auf (P_0 - ΔP_0) reduziert. Die von der verbleibenden Kraft erzeugte Dehnung auf der unteren Holzkante muss derjenigen der Kraftreduktion ΔP entsprechen. Die Dehnung auf der unteren Seite des Holzbalkens beträgt:

$$\varepsilon_{H,U} = \frac{4 \cdot (P_{O} - \Delta P_{O})}{E \cdot b \cdot h} = \frac{4 \cdot (P_{O} - \Delta P_{O})}{EA_{H}}$$
(10)

Da die Dicke der CFK-Lamelle (inkl. Klebstofffuge) sehr klein ist, ist deren Dehnung ungefähr gleich gross wie diejenige des Holzes auf der gleichen Seite. Damit beträgt die Reduktion in der Spannung in der CFK-Lamelle:

$$\Delta \sigma_{CFK} = \varepsilon_{CFK} \cdot E_{CFK} \approx \frac{4 \cdot (P_{O} - \Delta P_{O})}{EA_{H}} \cdot E_{CFK}$$
(11)

Die Reduktion der Vorspannkraft beträgt:

$$\Delta P_{O} = \Delta \sigma_{CFK} \cdot A_{CFK} \approx 4 \cdot (P_{O} - \Delta P_{O}) \cdot \frac{EA_{CFK}}{EA_{H}}$$
(12)

Der sofortige, elastische Verlust der Vorspannkraft lässt sich durch Umformen der obigen Gleichung abschätzen:

- -

$$\Delta P_{\rm O} = \frac{4 \cdot \frac{EA_{CFK}}{EA_{H}}}{1 + 4 \cdot \frac{EA_{CFK}}{EA_{H}}} \cdot P_{\rm O}$$
(13)

Daraus lässt sich die verbleibende Vorspannkraft ableiten:

$$P_{\text{Oeff}} = P_{\text{O}} - \Delta P_{\text{O}} = \frac{1}{1 + 4 \cdot \frac{EA_{\text{CFK}}}{EA_{\text{H}}}} \cdot P_{\text{O}}$$
(14)

Am Beispiel eines Versuchsbalkens erkennt man, dass die elastischen Spannkraftverluste überproportional mit zunehmender Vorspannkraft steigen (Tabelle 2).

Tabelle 2: Zahlenbeispiel - Elastische Spannkraftverluste von Versuchsbalken

	<u>GL 24h</u> b=80mm h=320mm E=11kN/mm ²	CFK-Lamellen		Po	ΔP_{O}		P _{O,eff}
		Anzahl	A mm ²	kN	kN	%	kN
-		1	60	60	7.4	12	52.6
	$\frac{CFK}{E-16FkN/mm^2}$	2	120	120	26.3	22	93.7
		3	180	180	53.4	30	126.6

5.5.2 Langzeitverluste infolge Kriechen und Schwinden des Holzes

Langjährige Versuche an der EMPA zeigen, dass CFK-Lamellen praktisch keine Dimensions- resp. Deformationsänderung infolge Kriechen, Schwinden und Relaxation erfahren. Andererseits erfährt Holz folgende Veränderungen:

- Kriechen (hiermit mit "φ(t)" bezeichnet) ist die allmähliche Vergrösserung der elastischen Deformationen. Für normal konditioniertes Holz beträgt die Endkriechzahl ca. 0.6 resp. die ursprüngliche elastische Deformation wird nach einigen Jahren bis um ca. 60% vergrössert.
- Das Schwinden oder Quellen (hier mit "ε(t)" bezeichnet) des Holzes ist die axiale Verk
 ürzung resp. Verl
 ängerung des Holzes infolge Wasserverlusts bzw. Wasseraufnahme. Das Schwinden des Holzes ist unabh
 ängig von der elastischen Verformung. Neben dem Wassergehalt des Holzes spielen Umweltbedingungen –speziell relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur – eine ausschlaggebende Rolle.

Åhnlich wie beim elastischen Verlust der Vorspannkraft wird die Vorspannkraft $P_{O,eff}$ allmählich um $\Delta P_{O,eff}$ auf ($P_{O,eff}$ - $\Delta P_{O,eff}$) reduziert. Die von der verbleibenden Kraft ($P_{O,eff}$ - $\Delta P_{O,eff}$) erzeugte Dehnung auf der unteren Holzkante muss derjenigen der Kraftreduktion $\Delta P_{O,eff}$ entsprechen. Die genaue Berechnung beim praktischen Einsatz ist recht komplex. Zunächst sind die äusseren Belastungen während der Bauphase anders als während der Nutzung. Das Schwinden resp. Quellen ist besonders schwierig zu erfassen: Generell schwindet das vorkonditionierte Holz im Winter und quillt im Sommer. Häufig kann eine numerische Integralrechnung in kleinen Zeitschritten zweckmässig sein.

Für den Versuchsbalken wird die Berechnung relativ einfach. Die ständigen Lasten sind klein und konstant (nur Eigenlast). Da nur geringfügige Klimaunterschiede zwischen dem Produktionsort und dem Prüflabor herrschten, traten nur marginale Dimensionsänderungen durch Schwinden resp. Quellen ein. Abschnitt 5.2 zeigt die Berechnung der Druckspannung an der unteren Holzkante infolge der Vorspannung. Die Eigenlast erzeugt ein entgegenwirkendes Moment M_g, welches eine Zugspannung an der Holzunterkante hervorruft:

$$\sigma_{H,U} = \sigma(P) + \sigma(M_g) = -\frac{4 \cdot (P_{O,eff} - \Delta P_{O,eff})}{A_H} + \frac{M_g}{W_U}$$
(15)

Für den Versuchsbalken kann das Eigengewicht vernachlässigt werden. Die Division der Spannung durch den E-Modul ergibt die Dehnung. Durch Multiplikation mit der Kriechzahl ergibt die Kriecheinfluss. Die totale Dehnung setzt sich aus dem Kriech- und Schwindanteil zusammen:

$$\varepsilon_{H,U} = \varepsilon(\varphi) + \varepsilon(t) \approx \frac{4 \cdot \varphi \cdot (P_{O,\text{eff}} - \Delta P_{O,\text{eff}})}{EA_H} + \varepsilon(t)$$
(16)

Da die Dicke der CFK-Lamelle (inkl. Klebstofffuge) klein ist, ist deren Dehnung ungefähr gleich gross wie diejenige des anliegenden Holzes. Damit beträgt die Reduktion der Spannung in der CFK-Lamelle:

$$\Delta \sigma_{CFK} = \varepsilon_{CFK} \cdot E_{CFK} \approx \frac{4 \cdot \varphi \cdot (P_{O,eff} - \Delta P_{O,eff})}{EA_{H}} \cdot E_{CFK} + \varepsilon(t) \cdot E_{CFK}$$
(17)

Resp.

$$\Delta P_{O,eff} = \Delta \sigma_{CFK} \cdot A_{CFK} \approx 4 \cdot \varphi \cdot (P_{O,eff} - \Delta P_{O,eff}) \cdot \frac{EA_{CFK}}{EA_{H}} + \varepsilon(t) \cdot EA_{CFK}$$
(18)

Der allmähliche Verlust der Vorspannkraft lässt sich durch Umformen der obigen Gleichung lösen:

$$\Delta P_{O,eff} = \left(\frac{4 \cdot \varphi \cdot \frac{EA_{CFK}}{EA_{H}}}{1 + 4 \cdot \varphi \cdot \frac{EA_{CFK}}{EA_{H}}} \cdot P_{O,eff}\right) + \frac{EA_{CFK}}{1 + 4 \cdot \varphi \cdot \frac{EA_{CFK}}{EA_{H}}} \cdot \varepsilon(t)$$
(19)

Der erste Teil der obigen Gleichung entspricht dem Kriechen, der zweite dem Schwinden resp. Quellen.

In Tabelle 3 sind die Verluste durch die elastische Deformation und das Kriechen (nach 3 Monaten ist $\phi \approx 0.47$) des Versuchsbalkens von Tabelle 2 dargestellt.

CFK-Lame	ellen	Po	ΔP_{O} kN	P _{O,eff}	ΔP_{O} kN	ΔP_{O} kN (Total)	Pt kN Nach 3 Mona-
Anzahl	A mm ²	kN	elastisch	kN	Kriechen	kN	%	ten vorhanden
1	60	60	7.4	52.6	3.0	10.4	17	49.6
2	120	120	26.3	93.7	9.0	35.3	29	84.7
3	180	180	53.4	126.6	14.4	68.0	38	112.0

Tabelle 3: Zahlenbeispiel - Spannkraftverluste des in Tabelle 2 dargestellten Versuchsbalkens

6 VERFAHREN DER GRADIENTENVERANKERUNG DER VORSPANNKRAFT

6.1 Funktionsweise des Spezialgeräts

Forschungsarbeiten in der Betonindustrie, insbesondere bei der Verstärkung von bestehenden Tragelementen mit CFK-Lamellen, sind weit fortgeschritten. Die EMPA (Eidgenössische Material Prüfungsanstalt) in Dübendorf hat dazu ein neues Vorspannsystem, die Gradientenvorspannung, entwickelt. Das Verfahren ist patentiert und wird heute von der Firma Carbo-Link GmbH, Fehraltorf angewendet. Damit kann die Vorspannung in der Lamelle so variiert werden, dass sie gegen die Lamellenenden abnimmt und so die Gefahr eines Aufreissens, bzw. einer Spaltung des Balkens wegfällt.



Abbildung 7: Spannbalken zur Erzeugung einer Vorspannkraft

Die Lamellenenden werden auf den zwei Spannwalzen befestigt. Durch Drehen oder Schieben der Walzen wird die gewünschte Vorspannung in der Lamelle aufgebracht. Da sie auf der Spannvorrichtung zuoberst liegt, kann die mit Klebstoff bestrichene Lamelle direkt an das zu verstärkende Element herangeführt werden. Mit einem Luftkissen kann während des Klebeprozesses ein konstanter Anpressdruck erzeugt werden.

Einen Vorspannungsgradienten erhält man, indem zuerst im Bereich B (Abbildung 8) der Klebstoff bei voller Vorspannung ausgehärtet wird. Die Steuerung der Aushärtung erreicht man durch lokales Heizen einzelner Bereiche. Ist dieser Bereich ausgehärtet, wird die Vorspannkraft leicht reduziert und die benachbarten Bereiche C vernetzt. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis der gewünschte Vorspannungsverlauf in der Lamelle erreicht ist. Der mittlere Bereich A kann nach Erzeugung des Gradienten ausgehärtet werden.



Abbildung 8: Verankerung der Vorspannkraft in Gradienten



Abbildung 9: Applikation einer Gradientenvorspannung an einem Betonträger (Stöcklin und Meier 2001)

In Abbildung 10 ist der Verlauf der Dehnung in der vorgespannten Lamelle dargestellt. Im mittleren Bereich (ca. 700 bis 1700mm) ist die Spannung konstant (Bereich A gemäss Abbildung 8). Bis zum Balkenende nimmt dann die Spannung kontinuierlich ab: Die Reduktion der Kraft in der Lamelle erfolgte in diesem Bereich in mehreren Schritten (Bereiche B und C gemäss Abbildung 8). Dies führt zu einer kontinuierlichen Einleitung der Vorspannkraft in dieser Zone (ca. 150 - 700 mm und 1700 - 2300mm), was die Spannungsspitzen an den Enden minimiert.

Abbildung 10: Verteilung der Spannungen in der vorgespannten Lamelle in der Längsachse des Balkens (Stöcklin und Meier 2001

6.2 Applikation im vorliegenden Projekt

Bis zu drei Lamellen konnten übereinander geklebt werden, ohne dass eine Delaminierung geschah. Aus zwei Hauptgründen wurde auf die Verklebung von mehr als drei Lamellen verzichtet:

- Die Länge der Versuchsbalken war begrenzt. Wegen der Abstufung der Verankerungszonen (Kapitel 7.3) konnten nicht mehr als drei Lamellen aufgeklebt werden.
- Die Querschnitte der Versuchsbalken waren relativ klein: Gemäss den vorgängigen Berechnungen genügten drei Lamellen, um eine markante Plastifizierung der Biegedruckzone des Holzbalkens zu erreichen.

In Abbildung 11 bis Abbildung 14 ist die Versuchsdurchführung am Beispiel der Verklebung der ersten Lamelle dargestellt.

Abbildung 11: Verteilung des Klebstoffes auf die Lamelle

Abbildung 12: Thermoelemente im Gradientenbereich zur Kontrolle der Heizvorgänge

Abbildung 13: Aufsetzen des Balkens auf die Lamelle

Abbildung 14: Abschnittsweise Aushärtung des Klebers nach der Vorspannung der Lamelle

7 DIE ERSTE VERSUCHSSERIE

7.1 Vorbemerkungen

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden Brettschichtholz-Balken durch das Aufkleben von mehreren, vorgespannten Kohlefaserlamellen (CFK-Lamellen) verstärkt. Die Lamellen wurden übereinander auf die Zugseite des Balkens geklebt. Anschliessend wurden die verstärkten Balken auf Biegung geprüft. Da es sich um ein relativ neues Verfahren handelt, wurde die Versuche in zwei Serien aufgeteilt, um die Erkenntnisse der ersten Serie in die zweite einfliessen zu lassen.

In der ersten Versuchsserie wurden drei CFK-Lamellen übereinander aufgeklebt, um einen schlanken Holzbalken (bxh=80x320mm) zu verstärken.

Das Verkleben der ersten Lamelle erfolgte problemlos. Der Versuch die zweite Lamelle anzubringen, führte zu einem unerwarteten Versagen der Verankerung. Ein wiederholtes Auftreten dieses Ereignisses löste einen Produktionsunterbruch aus.

Die Ursache des Versagens lag darin, dass die Lamellen nicht abgesetzt aufgeklebt wurden (alle Lamellen hatten dieselbe Länge). Die Schubspannungen mehrerer Gradientenverankerungen übereinander bewirkte eine Überbelastung der Fuge. Mit abgesetzten Lamellen konnte diese umgangen werden. Zudem mussten der Zyklus der Aushärtetemperatur und das Timing aufgrund der anderen Wärmeleitfähigkeit von Holz (das Gerät wurde ursprünglich für Beton entwickelt) sowie für den Einsatz mehrerer statt nur einer Lamelle leicht geändert werden.

Die Prüfkörper wurden mehrere Wochen bei Carbo-Link gelagert und auf allfällige Zeichen von Delaminierung beobachtet. Anschliessend erfolgte der Transport nach Biel für die Biegeprüfungen.

Das unvorhergesehene Ereignis hat den Projektplan um mehrere Monate verzögert.

7.2 Prüfgegenstand

7.2.1 Material

Holz Holzart: Fichte Qualität: Brettschichtholz GL24h Dimensionen: 320 x 80 x 6000 mm Brettstärke: 40 mm

CFK-Lamellen	E-Modul:	165'000 N/mm ²
	Zugfestigkeit:	2'800 N/mm ²
	Dimensionen:	50 x 1.2 mm

Klebstoff 2-Komponenten Epoxydharz: Sikadur 30 LP von Sika AG, Zürich

Abbildung 15: Längsansicht mit Dimensionen des Prüfkörpers

7.2.3 Lieferanten Material

Holz Urs Hüsser Holzleimbau, Oberebenestrasse 22, 5620 Bremgarten

CFK-Lamellen Sika Schweiz AG, Tüffenwies 16, 8048 Zürich

Klebstoff Sika Schweiz AG, Tüffenwies 16, 8048 Zürich

7.2.4 Hersteller Prüfkörper

Vorspannung der Lamellen und Verklebung auf Balken: Carbo-Link GmbH, Undermülistr. 26, 8320 Fehraltorf.

7.3 Prüfgrundlagen

7.3.1 Grundlagen und Normen, nach denen geprüft wurde

EN 408:2003: Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften

7.3.2 Abweichungen von Prüfvorschriften, spezielle Bedingungen

Keine Klimatisierung der Prüfkörper gemäss EN 408:2003, Ziff. 8 Keine Bestimmung der Holzfeuchte gemäss EN 408:2003, Ziff. 6 Keine Bestimmung der Rohdichte gemäss EN 408:2003, Ziff. 7

7.4 Biegeprüfung

Prüfer: Marco Schnüriger, Abteilung F+E, Einheit Holzbau und Bauphysik

7.4.1 Prüfmittel und Prüfhilfsmittel

Tabelle 4: Prüfmittel und Prüfhilfsmittel

Gerät oder Messmittel	Interne Nr.
Prüfrahmen	2.42.4012.9117
Prüfzylinder zu Prüfrahmen	2.42.4012.9118 - 9119
Messverstärker HBM Spider 8	2.42.4012.1618
Induktive Wegmessgeräte	2.42.4012.1626
	2.42.4012.1627
	2.42.4012.1633
	2.42.4012.9066
	2.42.4012.9067
Holzfeuchtemessgerät	2.36.4012.9318
BES Bollmann HDI 3.10	

7.4.2 Vorklimatisierung

Es wurde keine Klimatisierung gemäss Norm EN 408:2003, Ziffer 8 vorgenommen, da die Prüfkörper wegen den Dimensionen nicht im Klimaraum gelagert werden konnten. Bis zur Prüfung wurden sie in der Halle des Tragwerklabors neben dem Prüfrahmen bei einer mittleren Temperatur von ca. 22°C und einer relativen Luftfeucht von 45-50% gelagert.

7.4.3 Prüfungsdatum

31. Mai 2006 im Labor der Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau in Biel

7.4.4 Prüfungsanordnung

In folgender Abbildung sind die Prüfanordnung der Vier-Punkt-Biegeversuche und die Abmessungen der geprüften Balken dargestellt. Als Grundlage diente die Norm DIN EN 408:2003.

Abbildung 16: Prüfanordnung, statisches System der Biegeversuche

7.4.5 Prüfungsablauf

Basierend auf der Norm DIN EN 408:2003 wurden Last- und Deformationsmessungen durchgeführt. Der Ablauf ist in Abbildung 17 dargestellt. Es wurden insbesondere folgende normierten Prüfverfahren angewendet:

- Bestimmung der lokalen Biegesteifigkeit nach DIN EN 408:2003; Kapitel 9
- Bestimmung des globalen Biegesteifigkeit nach DIN EN 408:2003; Kapitel 10
- Bestimmung der Biegefestigkeit / Bruchlasten in Anlehnung an DIN EN 408:2003, Kapitel 13

Der Versuchsablauf wurde in 2 Abschnitte unterteilt:

- Steifigkeitszyklus: zur Bestimmung der Biegesteifigkeit
- Bruchzyklus: zur Bestimmung der Biegefestigkeit / Bruchlasten

Abbildung 17: Schematische Darstellung des Versuchablaufs: Zeit-Last-Diagramm

7.4.6 Prüfungsdurchführung

Die Biegeversuche wurden am 31. Mai 2006 im Labor der Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau auf dem Prüfrahmen durchgeführt. Folgende Werte wurden gemessen (Abbildung 18):

- Lasten F1 und F2 und dazugehörende Deformationen w1 und w2 unter den Zylindern
- absolute Deformation wm,global in Balkenmitte
- relative Deformation wm,lokal in Balkenmitte
- Durchbiegung der Auflager

Abbildung 18: Bezeichnung der Messwerte

Abbildung 19: Prüfrahmen mit Versuchsbalken und Messeinrichtung

Klimadaten zur Zeit der PrüfungTemperatur:22°CRel. Luftfeuchte:50%

7.5 Prüfergebnisse

7.5.1 Allgemeines

In Abbildung 20 sind die Prüfergebnisse in einem Kraft-Deformations-Diagramm am Beispiel eines Prüfkörpers dargestellt. Folgende Parameter wurden untersucht:

- globaler und lokaler Biege-Elastizitätsmodul, bzw. Biegesteifigkeit
- Bruchkraft und Deformation
- Versagensart
- Holzfeuchte

Abbildung 20: Last-Verschiebungsdiagramm eines Bruchversuches (Prüfkörper Nr. 320-1)

7.5.2 Daten des Prüfkörpers vor der Prüfung

Tabelle 5: Masse, Holzfeuchte und Vorkrümmung der Prüfkörper

Prüfkörper	Dimensioner	n gemessen	Holzfeuchte	Vorkrümmung ²⁾		
Nr.	Höhe [mm]	Breite [mm]	Länge [mm]	1) [%]	aus Vorspannung [mm]	
320-1	31.9	80	6000	10.7	31.5	
320-2	31.85	80	6000	10.5	35.3	
Berechnet 3)					34.6	

1) Holzfeuchte: Messung mit Holzfeuchtemessgerät. Mittelwert aus 6 Messungen in 15mm Tiefe

2) Vorkrümmung aus Vorspannung gemessen auf der geprüften Spannweite von 5700mm gemäss Abbildung 21

3) Kriechen des BSH-Balkens berücksichtig: Zustand 3 Monate nach Vorspannung

Abbildung 21: Vorkrümmung wm des Balkens infolge Vorspannung

7.5.3 Lokale und globale Biegesteifigkeit

Die Verstärkung mit den CFK-Lamellen erhöht die Biegesteifigkeit des Holzbalkens. Die Biegesteifigkeit des Verbundträgers im linearen Bereich der Last-Verformungskurve wurde nach den unten angegebenen Formeln ((20) und (21)) bestimmt. Für die Berechnung siehe Prüfaufzeichnung im Anhang A.1. In Tabelle 6 sind die Ergebnisse der Versuche zusammengefasst.

$$EI_{mg} = \frac{I^3 \cdot \Delta F}{12 \cdot \Delta w} \cdot \left[\left(\frac{3a}{4I} \right) - \left(\frac{a}{I} \right)^3 \right]$$
(20)

Wobei

EImg = globale Biegesteifigkeit

I = Spannweite

 ΔF = Kraftdifferenz der Berechnungsspanne

 Δw = Durchbiegungsdifferenz der Berechnungsspanne

a = Distanz Auflager bis Krafteinleitungspunkt

$$EI_{ml} = \frac{\mathbf{a} \cdot I_1^2 \cdot \Delta F}{16 \cdot \Delta W}$$
(21)

Wobei

EI_{ml} = lokale Biegesteifigkeit

 $I_1 = Messdistanz (Abbildung 27)$

 ΔF = Kraftdifferenz der Berechnungsspanne

 Δw = Durchbiegungsdifferenz der Berechnungsspanne

a = Distanz Auflager bis Krafteinleitungspunkt

Tabelle 6: Lokale und globale Biegesteifigkeit. Berechnung siehe Prüfaufzeichnung im Anhang A.1

Prüfkörper Nr.	lokale Biegesteifigkeit [kN/m2]	globale Biegesteifigkeit [kN/m2]		
320-1	4599	3445		
320-2	5559	3690		
berechnet*	3106			
BSH unverstärkt*	2403			

* Diese Biegesteifigkeit basiert auf dem Biege-Elastizitätsmodul der Norm SIA 265.

7.5.4 Biegefestigkeit / Bruchlasten

Die Ergebnisse der Biegeversuche sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Für die Berechnung der theoretischen Bruchbelastung wurde das "plastische" Verhalten der Biegedruckzone berücksichtigt.

Tabelle 7: Bruchfestigkeiten / -lasten

Prüfkörper	Totale Bruchlast	Bemerkungen
Nr.	F ₁ + F ₂ [kN]	
320-1	91.8	Vorgängiges Abschälen der äussersten Lamelle: Nur noch zwei Lamellen blieben auf dem Holz bis zum Bruch.
		Bruchursache: Kippversagen, Bruchlast im Holz nicht erreicht.
320-2	69.0	Vorgängiges Abschälen der beiden äusseren Lamellen: Nur noch eine Lamelle blieb auf dem Holz bis zum Bruch. Bruchlast: Zugbruch im Holz
Berechnet. Bereich mit: - 1 Lamelle - 2 Lamellen - 3 Lamellen	75 (bei 320-2) 89 (bei 320-1) 100	Ausgehend von einer Biegebruchspannung von 40 N/mm ² bei GL 24 (Erfahrungswert aus Versuchen)

Tabelle 7 zeigt, dass beim Versuchskörper 320-2 die beiden äusseren Lamellen vorzeitig abschälten und nur noch eine Lamelle beim Bruch vorhanden war. Die berechnete Bruchlast von 75kN ist ca. 8.6% grösser als der gemessene Wert von 69kN. Beim Versuchskörper 320-1 wurde nur die äusserste Lamelle vorzeitig abgeschält: Zwei Lamellen waren noch da, als der Bruch erfolgte. Die Berechnung ergab 89kN, was dem Messwert von 92kN gut entsprach.

In Anlehnung an das im Abschnitt 5.2 vorgestellte elastische Berechnungsmodell konnte die tatsächlich erreichte Biegefestigkeit des Holzes mit folgender Formell (22) geschätzt werden:

$$f_m = \sigma_V + \frac{\mathbf{a} \cdot F_{\max}}{2 \cdot W_V} \cdot \frac{\mathbf{z}_u - \mathbf{h}_{CFK}}{\mathbf{z}_u}$$
(22)

Wobei:

 f_m = Maximale Biegezugspannung im Holz

 σ_V = Spannung im Holz aus der Vorspannung der Träger (Kriechen berücksichtigt)

a = Distanz zwischen Lasteinleitung und Auflager

 F_{max} = Maximale Kraft (F_1 + F_2)

W_V = Widerstandsmoment des Verbundträgers

z_u = Abstand der Neutralenachse des Verbundquerschnittes von unten

 h_{CFK} = Höhe resp. Dicke der CFK-Lamelle.

Tabelle 8: Abgeschätzte Biegezugspannungen bei Bruch

Prüfkörper Nr.	Biegezugspannung [MPa]		
	Holz	CFK	
320-1	36	1459	
320-2	34	1459	

Abbildung 22 bis Abbildung 25 zeigen Bruchbilder.

Abbildung 22: Prüfkörper 320-1 – Bruchfläche am Balken: verbleibende Lamelle

Abbildung 23: Prüfkörper 320-1 – Abgelöste Lamelle

Abbildung 24: Prüfkörper 320-2 - Zugbruch

Abbildung 25: Prüfkörper 320-2 – Bruchfläche am Balken: verbleibende Lamelle

8 DIE ZWEITE VERSUCHSSERIE

8.1 Vorbemerkungen

Die zweite Versuchsserie wurde im Januar 2007 begonnen. Die Resultate der ersten Versuchsserie sowie Erfahrungen seitens der Carbo-Link GmbH im Betonbau liessen vermuten, dass der Auflagerdruck auf die CFK-Lamelle einen günstigen Einfluss auf das Bruchverhalten des verstärkten BSH-Trägers haben könnte. In der Instandsetzung von bestehenden Holzkonstruktionen sind die Auflagerzonen meistens nicht zugänglich. Es stellt sich die Frage, ob beim Vorhandensein einer einzigen, vorgespannten CFK-Lamelle, die vor dem Auflager verankert ist, die Delaminierungsgefahr auch besteht. Aus diesem Grund wurde die CFK-Lamelle bei der zweiten Versuchsserie nicht bis auf die Auflager lager gezogen.

8.2 Prüfgrundlagen

Der Verbundbalken wurde gemäss den Prüfnormen für den Werkstoff Holz geprüft.

8.2.1 Grundlagen und Normen, nach denen geprüft wurde

EN 408:2003: Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften

8.2.2 Abweichungen von Prüfvorschriften, spezielle Bedingungen

Keine Klimatisierung der Prüfkörper gemäss EN 408:2003, Ziff. 8 Keine Bestimmung der Holzfeuchte gemäss EN 408:2003, Ziff. 6 Keine Bestimmung der Rohdicht gemäss EN 408:2003, Ziff. 7

8.3 Prüfgegenstand

Es wurden zwei BSH-Balken, welche mit je einer vorgespannten CFK-Lamelle verstärkt waren, geprüft.

8.3.1 Material

Holz	Holzart: Qualität: Querschnitt: Lamellenstärke:	Fichte Brettsch 240 x 60 40 mm	nichtholz GL24h) mm
CFK-Lamellen	E-Modul: Zugfestigkeit: Dimensionen:	165'000 2'800 N/ 50 x 1.2	N/mm ² /mm ² mm
Klebstoff	2-Komponenten Epo	oxydharz:	Sikadur 30 LP von Sika AG, Züricl

8.3.2 Prüfkörper

Die CFK-Lamelle wurde mit 60 kN vorgespannt. Die Verankerung der CFK-Lamelle auf dem Holz geschah mittels der Gradientenvorspann-Technik.

	60/2	240	240
202	3555	203	
	3960		

Abbildung 26: Abmessung der Prüfkörper (die CFK-Lamelle ist rot dargestellt)

8.3.3 Lieferanten Material

- Holz
 Urs Hüsser Holzleimbau, Oberebenestrasse 22, 5620 Bremgarten
- CFK-Lamellen Sika Schweiz AG, Tüffenwies 16, 8048 Zürich
- Klebstoff Sika Schweiz AG, Tüffenwies 16, 8048 Zürich

8.3.4 Vorspannen der Prüfkörper

Vorspannung und Verklebung der CFK-Lamellen auf die Brettschichtholzbalken: Carbo-Link GmbH, Undermülistr. 26, 8320 Fehraltorf. Es wurden dieselben Parameter wie bei der ersten Versuchsserie angewendet.

8.4 Prüfung

Die Prüfungen wurden im akkreditierten Prüflabor der Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau in Biel durchgeführt.

8.4.1 Prüfer

Martin Lehmann, Abteilung F+E, Einheit Werkstoff und Holztechnologie

8.4.2 Prüfmittel und Prüfhilfsmittel

Tabelle 9: Prüfmittel und Prüfhilfsmittel

Gerät oder Messmittel	Interne Nr.
Prüfrahmen	2.42.4012.9117
Prüfzylinder zu Prüfrahmen	2.42.4012.9118 - 9119
Messverstärker HBM Spider 8	2.42.4012.1618
Induktive Wegmessgeräte	2.42.4012.1626
	2.42.4012.1627
	2.42.4012.1633
	2.42.4012.9066
	2.42.4012.9067
Holzfeuchtemessgerät	2.36.4012.9318
BES Bollmann HDI 3.10	

8.4.3 Vorklimatisierung

Es wurde keine Klimatisierung gemäss Norm EN 408:2003, Ziffer 8 vorgenommen, da die Prüfkörper wegen den Dimensionen nicht im Klimaraum gelagert werden konnten. Bis zur Prüfung wurden sie in der Halle des Tragwerklabors neben dem Prüfrahmen bei einer mittleren Temperatur von ca. 22°C und einer relativen Luftfeucht von 45-50% gelagert.

8.4.4 Datum der Prüfungsdurchführung

30. Januar 2007 im Labor der Berner Fachhochschule in Biel.

8.4.5 Übersicht Prüfungsablauf

In folgender Abbildung sind die Prüfanordnung der Vier-Punkt-Biegeversuche und die Abmessungen der geprüften Balken dargestellt. Als Grundlage diente die Norm DIN EN 408:2003.

🔘 = dial gage

Abbildung 27: Anordnung der Prüfung in der zweiten Versuchsserie

8.4.6 Prüfungsablauf

Basierend auf der Norm DIN EN 408:2003 wurden Last- und Deformationsmessungen durchgeführt. Der Ablauf ist in Abbildung 28 dargestellt. Es wurden insbesondere folgende normierte Prüfverfahren angewendet:

- Bestimmung der lokalen Biegesteifigkeit nach DIN EN 408:2003; Kapitel 9
- Bestimmung der globalen Biegesteifigkeit nach DIN EN 408:2003; Kapitel 10
- Bestimmung der Biegefestigkeit / Bruchlasten in Anlehnung an DIN EN 408:2003; Kapitel 13

Abbildung 28: Schematische Darstellung des Prüfungsablaufes in der zweite Versuchsserie

8.4.7 Prüfungsdurchführung

Die Biegeversuche wurden am 30. Januar 2007 im Labor der Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau in Biel auf dem Prüfrahmen durchgeführt. Folgende Werte wurden gemessen (Abbildung 27):

- Lasten F1 und F2 und dazugehörende Deformationen w1 und w2 unter den Zylindern
- absolute Deformation wm,global in Balkenmitte
- relative Deformation wm,lokal in Balkenmitte (auf beiden Seiten)
- Durchbiegung der Auflager

Die Biegeprüfung wurde auf dem Prüfrahmen durchgeführt (Abbildung 19).

8.4.8 Klimadaten zur Zeit der Prüfung

- Temperatur: 22°C
- Rel. Luftfeuchte: 50%

8.5 Prüfergebnisse

In Abbildung 29 sind die Prüfergebnisse in einem Diagramm am Beispiel eines Prüfkörpers dargestellt. Folgende Parameter wurden untersucht:

- globale und lokale Biegesteifigkeit
- Bruchkraft und Deformation
- Versagensart
- Holzfeuchte

Die Berechnung der gesuchten Werte ist in der Prüfaufzeichnung im Anhang.

Abbildung 29: Kraft-Deformations-Diagramm des Prüfkörpers 240-2

8.5.1 Daten des Prüfkörpers vor der Prüfung

Prüfkörper	Dimer	nsionen ger	nessen	Holzfeuchte 1)	Vorkrümmung 2) aus Vorspannung
Nr.	Höhe [mm]	Breite [mm]	Länge [mm]	[%]	[mm]
240-1	240	60	3960	10.2	11.5
240-2	240	60	3960	10.4	11
Berechnet 3)					10.9

Tabelle 10: Masse, Holzfeuchte und Vorkrümmung der Prüfkörper

1) Holzfeuchte: Mittelwert aus 4 Messungen mit Holzfeuchtemessgerät in 5 und 20mm Tiefe.

Vorkrümmung aus Vorspannung gemessen auf der geprüften Spannweite von 3735mm gemäss Abbildung 30.
 Kriechen des Balkens berücksichtigt. Zustand 1 Woche nach Vorspannung.

Abbildung 30: Vorkrümmung w_m des Balkens infolge Vorspannung

8.5.2 Lokale und globale Biegestreifigkeit

Da es sich um einen Verbundträger handelt, wurden nicht die Biege-Elastizitätsmodule sondern die Biegesteifigkeiten berechnet. Die Biegesteifigkeiten des Verbundträgers wurden im linearen Bereich der Last-Verformungskurve nach den oben angegebenen Formeln (20) und (21) bestimmt (Anhang A.2). In Tabelle 11 und Tabelle 12 sind die Ergebnisse der Versuche zusammengefasst.

Tabelle 11: Lokale und Globale Biegesteifigkeiten (Berechnungen siehe Prüfaufzeichnung im Anhang A.2)

Prüfkörper Nr.	lokale Biegesteifigkeit [kNm2]	globale Biegesteifigkeit [kNm2]
240-1	1402	993
240-2	1573	1042
berechnet *	8	96
BSH unverstärkt*	7	60

* Diese Biegesteifigkeit basiert auf dem Biege-Elastizitätsmodul der Norm SIA 265.

8.5.3 Biegefestigkeit / Bruchlasten

Die Ergebnisse der Biegeversuche sind in Tabelle 12 zusammengefasst. Für die Berechnung der theoretischen Bruchlast wurden die Stauchungen auf der Druckseite des Balkens berücksichtigt.

Prüfkörper Nr.	Bruchlast 1 F ₁ + F ₂ [kN]	Bruchlast 2 F ₁ + F ₂ [kN]	Bruchursache
240-1	61.8	70	Bruchlast 1: Kippversagen, Bruchlast im Holz nicht erreicht. Der Träger wurde ein zweites Mal mit zu- sätzlichen seitlichen Halterungen geprüft => Bruchlast 2: Zugbruch bei Keilzinkenverbindung
240-2	80.1	n.a.	Bruchlast 1: Zugbruch bei Keilzinkenverbindung
berechnet	55	n.a.	Ausgehend von einer Biegebruchspannung von 40 N/mm ² bei GL24 (Erfahrungswert aus Versuchen)
BSH unverstärkt	37	n.a.	Ausgehend von einer Biegbruchspannung von 40 N/mm ² bei GL24 (Erfahrungswert aus Versuchen)

Tabelle 12 Bruchlasten und Versagensursache

Die Vermutung, dass die Lamelle vor die berechnete Bruchlast abschält, wurde nicht bestätigt. Dies deutet darauf hin, dass sich diese Methode für die Sanierung von bestehenden Balken eignet.

Der Vergleich mit einem unverstärkten BSH-Balken derselben Dimension in Tabelle 13 zeigt, dass die Verstärkung mittels einer vorgespannten CFK Lamelle eine erhebliche Steigerung der Tragfähigkeit von 37kN auf 55kN bewirkt (49%: theoretische Berechnungen).

Die gemessene Bruchlast der beiden Träger war grösser als die berechnete Bruchlast. Die tatsächlich erreichte Biegefestigkeit des Holzes wurde aus den gemessenen Bruchlasten mit einer elastischen Betrachtung (Formel (22)) abgeschätzt. Es wurde nur die maximale Biegezugspannung im Holz berechnet. Die elastisch berechnete Biegedruckspannung wäre zwar grösser; diese wird aber über Stauchungen abgebaut.

Prüfkörper Nr.	Biegezugspannung [MPa]		
	Holz	CFK	
240-1	48	1663	
240-2	57	1795	

Tabelle 13: Abgeschätzte Biegezugspannungen bei Bruch

Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen die gebrochenen Versuchsbalken.

Abbildung 31 Bilder des Verbundbalkens Nr. 240-1 nach der Prüfung

Abbildung 32: Bilder des Verbundbalkens Nr. 240-2 nach der Prüfung

9 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Das Projekt hat wertvolle Erkenntnisse gebracht. Das Gradientenvorspanngerät eignet sich gut, um bis zu drei vorgespannte, abgesetzte CFK-Lamellen übereinander auf das Holz zu kleben. Keiner der Versuchsbalken hat vor dem Biegeversuch Delaminierungsprobleme gezeigt. Die Auswertung der Biegeversuche bestätigte die Eignung des im Haus entwickelten, nichtlinearen Berechnungsmodells zur Erfassung des Tragverhaltens.

Die erste Versuchsserie zeigte, dass bei mehreren Lamellen die kürzeren Lamellen teilweise vor dem Erreichen der Bruchlast abschälen. Dies bestätigt, dass vor der Anwendung von übereinander geklebten CFK-Lamellen in der Baupraxis noch weitere Untersuchungen nötig sind. Insbesondere ist eine zusätzliche mechanische Verankerung der äusseren CFK -Lamelle zu überprüfen.

Mit der zweiten Versuchsserie konnte aufgezeigt werden, dass es möglich ist, die CFK-Lamelle vor dem Auflager zu verankern. Der Einsatz des Verfahrens bei Instandsetzungsarbeiten, wo die Auflagerbereiche meistens nicht zugänglich sind, ist somit denkbar. Die Resultate zeigten, dass diese Methode keine Nachteile mit sich bringt und bei nur einer Lamelle gut funktioniert sowie eine erhebliche Steigerung der Bruchlast bewirkt.

10 DANK

Dieses Projekt wurde vom Bundesamt für die Umwelt (BAFU) finanziert. Die Verwaltung erfolgte über den Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung, geleitet von Herrn M. Gautschi.

Wir möchten uns bei den Industriepartnern Carbo-Link, Fehraltorf und Urs Hüsser Holzleimbau, Bremgarten AG für die angenehme Zusammenarbeit bedanken.

11 BESTIMMUNGEN ZUM VORLIEGENDEN BERICHT

Dieser Bericht darf nicht ohne Genehmigung der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau auszugsweise vervielfältigt werden. Jegliche Veröffentlichung des Berichts oder von Teilen davon bedarf der schriftlichen Zustimmung der Fachhochschule. Ein Original dieses Berichts wird für 5 Jahre aufbewahrt. Dieser Bericht ist nur mit den Unterschriften des Abteilungsleiters F+E und des Projektverantwortlichen gültig.

11.1 Umfang des Berichts

Dieser Forschungsbericht besteht aus dem Titelblatt, dem Abstract und 39 Seiten inkl. Anhang.

12 VERZEICHNISSE

12.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verstärkungsverhältnisse, die mit vorgespannten CFK-Lamellen erreicht werden könn	ten 5
Tabelle 2: Zahlenbeispiel - Elastische Spannkraftverluste von Versuchsbalken	11
Tabelle 3: Zahlenbeispiel - Spannkraftverluste des in Tabelle 2 dargestellten Versuchsbalkens	13
Tabelle 4: Prüfmittel und Prüfhilfsmittel	17
Tabelle 5: Masse, Holzfeuchte und Vorkrümmung der Prüfkörper	20
Tabelle 6: Lokale und globale Biegesteifigkeit. Berechnung siehe Prüfaufzeichnung im Anhang A	1.21
Tabelle 7: Bruchfestigkeiten / -lasten	21
Tabelle 8: Abgeschätzte Biegezugspannungen bei Bruch	22
Tabelle 9: Prüfmittel und Prüfhilfsmittel	24
Tabelle 10: Masse, Holzfeuchte und Vorkrümmung der Prüfkörper	26
Tabelle 11: Lokale und Globale Biegesteifigkeiten (Berechnungen siehe Prüfaufzeichnung im An A.2)	hang 26
Tabelle 12 Bruchlasten und Versagensursache	26
Tabelle 13: Abgeschätzte Biegezugspannungen bei Bruch	27

12.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Spannungen im Holz infolge einer exzentrisch platzierten Vorspannkraft	6
Abbildung 2: Querschnitt des Trägers	7
Abbildung 3: Berechnung der Durchbiegung infolge der Vorspannkraft mit der Arbeitsgleichung	8
Abbildung 4: Verteilung der Dehnungen resp. der Spannungen in einem verstärkten Holzbalken	8
Abbildung 5: Berechnungsbeispiel eines vorgespannten BSH-Balkens	. 10
Abbildung 6: Spannbalken zur Erzeugung einer Vorspannkraft	. 13
Abbildung 7: Verankerung der Vorspannkraft in Gradienten	. 14
Abbildung 8: Applikation einer Gradientenvorspannung an einem Betonträger (Stöcklin und Meier 2001)	. 14
Abbildung 9: Verteilung der Spannungen in der vorgespannten Lamelle in der Längsachse des Balkens (Stöcklin und Meier 2001	. 14
Abbildung 10: Verteilung des Klebstoffes auf die Lamelle	. 15
Abbildung 11: Thermoelemente im Gradientenbereich zur Kontrolle der Heizvorgänge	. 15
Abbildung 12: Aufsetzen des Balkens auf die Lamelle	. 15
Abbildung 13: Abschnittsweise Aushärtung des Klebers nach der Vorspannung der Lamelle	. 15
Abbildung 14: Längsansicht mit Dimensionen des Prüfkörpers	. 16
Abbildung 15: Prüfanordnung, statisches System der Biegeversuche	. 18
Abbildung 16: Schematische Darstellung des Versuchablaufs: Zeit-Last-Diagramm	. 18
Abbildung 17: Bezeichnung der Messwerte	. 19
Abbildung 18: Prüfrahmen mit Versuchsbalken und Messeinrichtung	. 19
Abbildung 19: Last-Verschiebungsdiagramm eines Bruchversuches (Prüfkörper Nr. 320-1)	. 20
Abbildung 20: Vorkrümmung w_m des Balkens infolge Vorspannung	. 20
Abbildung 21: Prüfkörper 320-1 – Bruchfläche am Balken: verbleibende Lamelle	. 22
Abbildung 22: Prüfkörper 320-1 – Abgelöste Lamelle	. 22
Abbildung 23: Prüfkörper 320-2 - Zugbruch	. 22
Abbildung 24: Prüfkörper 320-2 – Bruchfläche am Balken: verbleibende Lamelle	. 22
Abbildung 25: Abmessung der Prüfkörper (die CFK-Lamelle ist rot dargestellt)	. 23
Abbildung 26: Anordnung der Prüfung in der zweiten Versuchsserie	. 24
Abbildung 27: Schematische Darstellung des Prüfungsablaufes in der zweite Versuchsserie	. 25
Abbildung 28: Kraft-Deformations-Diagramm des Prüfkörpers 240-2	. 25

31 / 39	
---------	--

Abbildung 29: Vorkrümmung wm des Balkens infolge Vorspannung	26
Abbildung 30 Bilder des Verbundbalkens Nr. 240-1 nach der Prüfung	27
Abbildung 31: Bilder des Verbundbalkens Nr. 240-2 nach der Prüfung	28

12.3 Literaturverzeichnis

- [1] Brunner M. (2000): "On the plastic design of timber beams with a complex cross-section", *WCTE-2000, Canada.*
- [2] Brunner M. (2002): "Theoretical strength limits of timber beams fortified with prestressed artificial fibres", *WCTE-2002, Malaysia.*
- [3] Brunner M., Schnüriger M. (2005): "Timber beams strengthened by attaching prestressed FRP laminates with a gradiented anchoring device", *frprc-7 Congress, Hong Kong.*
- [4] Gustafson J. (2000): "Tests and Test Results on Mechanical Properties of Adhesive Bond Lines", *Chapter 2 of Final Report, COST E13, Version 4.*
- [5] Holzenkaempfer P. (1997): "Ingenieurmodelle des Verbunds geklebter Bewehrung für Betonbauteile", Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 473, Beuth Verlag.
- [6] Kuilen, J. van de (1991): "Theoretical and experimental research on glass fibre reinforced laminated timber beams", *International Timber Engineering Conference, London.*
- [7] Lehmann M. et al. (2006): "Pre-stressed FRP for the in-situ strengthening of timber structures" WCTE-2006 Portland USA
- [8] Lindyberg RF & Dagher HJ (2000): "Probabilistic nonlinear model for reinforced glulam beams", *WCTE2000, Whistler, British Columbia, Canada.*
- [9] Luggin W. F. (2000): "Die Applikation vorgespannter CFK-Lamellen auf Brettschichtholzträger", Dissertation, Universität für Bodenkultur, Vienna, Austria.
- [10] Romani M, Blass HJ (2001): "Design model for FRP reinforced glulam beams", International Council for Research on Innovation in Building and Construction, Working Commission W18 Timber Structures, Meeting 34, Venice, Italy.
- [11] Scherrer J. (2000): "FRP Fibre Reinforcement Polymer", S & P Clever Reinforcement Company, Brunnen, Switzerland.
- [12] Stöcklin & Meier U. (2001): "Strengthening of concrete structures with prestressed and gradually anchored CFRP strips", *IABSE International Conference, Malta.*
- [13] Tingly D. (1995): "FIRP Reinforcement Technology Information Packet", Science and Technology Institute, Corvallis OR, USA.
- [14] Triantafillou T.C., Deskovic N. (1991): "Innovative prestressing with FRP-sheets: Mechanics of short-term behaviour", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 117, Nr. 7, pp1652-1672.
- [15] Triantafillou T.C., Deskovic N. (1992): "Prestressed FRP-Sheets as external reinforcement of wood members", Journal of Structural Engineering, Vol. 118, Nr. 5, pp1270-1284

Anhang A: PRÜFAUFZEICHNUNGEN

A.1 Erste Versuchsserie

Berner Fachhochschule

Architektur, Bau und Holz HSB

Prüfaufzeichnung

Bauholz für tragende Zwecke und BSH - Bestimmung einiger physikalischer

und mechanischer Eigenschaften

Zur Prüfaufzeichnung gehören die Seiten der Prüfungsergebnisse

Weitere, der Aufzeichnung zugehörige Dokumente:	PA 7408, PA 7412	
nach Norm angelehnt an Norm (erfordert Beiblatt Validierung)	✓ EN 408 (Aug 2003)	
Aufzeichnung Nr.	2655-PA-01	Abschnitt (Norm)
Anwendungsbereich: PA gültig für 20	EN 408, ausgenommen Abschnitte 12, 14, 15, 18, 19 un	1

Verantwortlicher Prüfer:

Schnüriger / sgm1

7

Prüfkörpereingang/Grunddaten						
Wareneingangsnummer:	1178					
Datum Anlieferung:						
Prüfkörperbeschreibung:	Angaben	Datum	Visum			
Holzart, Holzqualität:	BSH, GL24h					
Abmessungen	80x320x6000					
Prüfkörpernummer:	320-1 und 320-2	14.05.2006	sam1			
vorgesehene Prüfungen	Biegeprüfung	14.03.2000	Sym			
Datum Beginn Normalklima:	keine					
Klimatisierung	i kontrolliert, in Ordnung 🗖]				

Vorbereitung der erforderlichen Prüfe	/orbereitung der erforderlichen Prüfeinrichtungen				
reservierte Prüfgeräte	Nr	Rese	rviert	Verantwortl.	Datum &
i i i i i i i i i i i i i i i i i i i	NI.	von	bis	Labor	Visum
Prüfrahmen (Max. und min. Dimensionen der Prüfkörper, siehe <mark>i</mark>	2.42.4012.9117	29.5	31.5	Ingenieurholzbau	
Prüfzylinder zu Prüfrahmen	2.42.4012.9118 2.42.4012.9119	29.5	31.5	Ingenieurholzbau	24.05.2006 sgm1
Prüfmaschine Schenk				Werkstoff	
weitere Prüfgeräte	Nr.	Erledigt	Nicht notwendig	Verantwortl. Labor	Datum & Visum
Messverstärker HBM Spider 8	2.42.4012.1618			Ingenieurholzbau	
Induktive Wegmessgeräte (20 oder 50 mm) <i>Fehlertoleranz 1%</i>	xxxx			Ingenieurholzbau	
Zwei Messschiene (1.5-2.5m, 2.5-3.5m oder 3.5-4.5m)				Ingenieurholzbau	24.05.2006 sgm1
Messband (0-2m oder 0-15m) Fehlertoleranz 0.5%, resp. 1%	-			Werkstoff]
Messschieber (0-600mm oder 0- 150mm) <i>Fehlertoleranz 0.5%</i>				Werkstoff	
Hilfsmittel	Nr.	Erledigt	Nicht notwendig	Verantwortl. Labor	Datum & Visum
Stahlplatten (250X400X10mm oder 125X250X10mm)	-			Ingenieurholzbau	
Befestigung für Messschiene	efestigung für Messschiene - 🔽 🗖 Ingenieurholzbau			24.05.2006 sgm1	
Befestigung für Wegmessgerät	-	Ingenieurholzbau			

Bauholz für tragende Zwecke und BSH - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften

Angewandte Norm

EN 408 (Aug 2003)

Aufzeichnung Nr.

2655-PA-01

Prüfungsergebnisse - Biegeversuche (mit El global)

Vo	or Prüfung Datum Vis. Prüfer									
				EN 408 (A	Aug 2003)					
			Prüf	körpernumi	merierung:					
	<u>Spannweite (I) [mm]:</u> 6000 mm									
				Messlänge	e (l₁) [mm]:	1920 mm				
		Abs	stand Lastste	elle-Auflage	r (a) [mm]:	1890 mm				
	Prüfgeschwindigkeite				ndigkeiten:	E-Modul	Bruch	Bruch		
	5 5				-	[N/s]	[N/s]	[mm/s]		
						350	130	0.3		
Au	swertung	der Prüfur	ng			El global			B-Spannung	
	maxii	male Wert:				3.690E+12	2		36.2 N/mm ²	
	minii	male Wert:				3.445E+12	2		34.0 N/mm ²	
		Mittelwert:				3.568E+12	2		35.1 N/mm ²	
3	Standart Ab	weichung:				122.4E+9			1.1 N/mm ²	
_						-			-	
Be	rechnungs	sformeln				globales E	1		B-Spannung	
						1 ³	·∧F [(3a	$\left(a\right)^{3}$, a	$\cdot F_{max} = z_{\mu} - h_{CEK}$
						$EI_{mg} = \frac{1}{12}$		$\left -\left \frac{\alpha}{I}\right \right $	$t_m = \sigma_V + - \sigma_V$	$\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$
						12				$z \cdot v z_u$
	Breite	Höhe	Trägheitsm	ZU bzw.ZO	Fmax	Δw	ΔF	Biegesteifig-	B-Spannung	Bruchart/Wuchseigensch.
Nr.	(mm)	(mm)	(mm4) ¹⁾	(mm) ²⁾	(N) ³⁾	(mm) ³⁾	(N) ³⁾	keit El	max. Zug im Holz	
1	80	320	282396499	148.2	91760	25.7025	24000	3.445E+12	36	Kippen *
2	80	320	282396499	148.2	68970	23.9975	24000	3.690E+12	34	Zugbruch, Querzug **
3										
4										
5										* Versagen der äusser-
6										sten Lamelle auf
7										Querzug bei 80875 N
8										
9										Versagen der mittle-
10										Oueraug hei 56970 N
11										Querzug ber 56670 N
12										
1/										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										
27										
28										
29										
30										

 ¹¹ Trägheitsmoment für Rechteckquerschnitt hinterlegt. Bei anderen Querschnitte Trägheitsmoment direkt eingeben.
 ²¹ Abstand des Schwerpunktes von der unteren bzw. oberen Kante des Prüfkörpers (kleinerer Wert massgebend) Wert für symmetrischen Querschnitt hinterlegt. Bei anderen Querschnitte Wert direkt eingeben.

³⁾ Berechnung im Berechnungsbeiblatt Biegung/Druck

Vorkommnisse während der Prüfung				Bemerkungen	Vi	is. Prüfer
				am 20/03/2007 ergänzt lam5	so	am1
Beiblatt	ja		nein 🔽			

Bauholz für tragende Zwecke und BSH - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften

Angewandte Norm

EN 408 (Aug 2003)

Aufzeichnung Nr.

2655-PA-01

Prüfungsergebnisse - Biegeversuche (mit El lokal)

Vor	Vor Prüfung Datu						Datum	Vis. Prüfer		
				EN 408 (A	Aug 2003)					
			Prüf	körpernumi	merierung:					
				Spannweit	<u>te (l) [mm]:</u>	6000 mm				
	<u>Messlänge (l₁) [mm]:</u> 1920 mm									
		Abs	stand Lastste	lle-Auflage	r (a) [mm]:	1890 mm				
	Prüfgeschwindigkeiter				ndigkeiten:	E-Modul	Bruch	Bruch		
					-	[N/s]	[N/s]	[mm/s]		
						350	130	0.3		
Aus	swertung	der Prüfun	g			El lokal			B-Spannung	
	maxir	nale Wert:				5.559E+12			36.2 N/mm ²	
	minir	nale Wert:				4.599E+12			34.2 N/mm ²	
		Mittelwert:				5.079E+12			35.2 N/mm²	
S	Standart Ab	weichung:				480.1E+9			1.0 N/mm ²	
Ber	echnungs	formeln				lokales El			B-Spannung	
									a	$F = z - h_{arr}$
						$EL_{i} = \frac{a}{a}$	$I_1 \cdot \Delta \Gamma$		$f_m = \sigma_V + -$	$\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$
						1	$6 \cdot \Delta W$			$2 \cdot VV \qquad Z_u$
	Breite	Höhe	Trägheitsm	ZU bzw.ZO	Fmax	Δw	ΔF	Biegesteifig-	B-Spannung	Bruchart/Wuchseigensch.
Nr.	(mm)	(mm)	(mm4) ¹⁾	(mm) ²⁾	(N) ³⁾	(mm) ³⁾	(N) ³⁾	keit El	max. Zug im Holz	
1	80	320	282396499	148.2	91760	2.2725	24000	4.599E+12	36	Kippen *
2	80	320	282396499	148.2	68970	1.88	24000	5.559E+12	34	Zugbruch, Querzug **
3										, <u></u>
4										
5										* Versagen der äusser-
6										sten Lamelle auf
7										Querzug bei 80875 N
8										
9										** Versagen der mittle-
10										ren Lamelle auf
11										Querzug bei 56870 N
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23 24										
24										
20 26										
20 27										
21										
∠0 20										
30										

 Trägheitsmoment für Rechteckquerschnitt hinterlegt. Bei anderen Querschnitte Trägheitsmoment direkt eingeben.
 Abstand des Schwerpunktes von der unteren bzw. oberen Kante des Prüfkörpers (kleinerer Wert massgebend) Wert für symmetrischen Querschnitt hinterlegt. Bei anderen Querschnitte Wert direkt eingeben.

³⁾ Berechnung im Berechnungsbeiblatt Biegung/Druck

Vorkomm	nnisse währei	nd der Prüfung	Bemerkungen	Vis. Prüfer
			am 20/03/2007 ergänzt lam5	sgm1
Beiblatt	ja	nein		

Bauholz für tragende Zwecke und BSH - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften

An Au	gewandte No fzeichnung N	orm Nr.								EN 408	8 (Aug 2003) 655-PA-01
В	erechnu	Ingsbeit	olatt :	⊠ Biege □ Drucł	eversuch oversuch	ie ne				Blatt	Nr. 1
Bo	rechnungsb	araicha				-					
De	recinitingsbe										
			Prüfungsa	ablauf Biegev	ersuch/Druck	versuch					
		× 100					×>-				
		6 90 80 5				/					
		0 1 Cupie									
		Q 40 Pun 30									
		- 20 									
		Ê					Zeit t				
					A Description						
			ΔF und Δw	ΔF und Δw	ΔF und Δ	w					
			=10	= 10		10	40	1		40 1 1 1	
	erwartetes Fmax (N)	Bereiche	F10 (N)	F40 (N)	+ F (N)	w10 global	w40 global	÷ w global	w10 lokal (mm)	w40 lokal (mm)	+ w lokal (mm)
Nr.	00000			. ,	(,	(mm)	(mm)	(mm)	0.54	0.70	()
1	80000	0 a	8000	32000	24000	6.94 8.59	34.09	27.15	0.54	2.79	2.25
		b				8.54	34.27	25.73	0	2.81	2.81
		c d	8000	32000	24000	8.58 8.56	34.3	25.72	0.7	2.81	2.11
		Mittelwert	8000	32000	24000	8.5675	34.27	25.7025	0.525	2.7975	2.2725
2	80000	0	8000	32000	24000	6.53	32.57	26.04	5	2.58	-2.42
		a b	8000	32000	24000	8.59 8.59	32.59 32.74	24 24 15	0.7	2.58	1.88
		c				8.62	32.76	24.14	0.7	2.59	1.89
		d Mittelwert	8000 8000	32000	24000 24000	8.62 8.605	32.32 32.6025	23.7 23 9975	0.7	2.56	1.86
3		0	0000	02000	24000	0.000	02.0020	20.0010	0.7	2.00	1.00
		a									
		Mittelwert									
4		0									
		a b									
		Mittelwert									
5		0									
		b									
6		Mittelwert									
0		a									
		b Mittahuart									
7		0									
		a									
		b Mittelwert									
8		0									
\square		a h			<u> </u>						
\mathbb{H}		Mittelwert			<u> </u>						ļ
9		0									
$\left - \right $		a b									

..... **.**

Berner Fachhochschule

Architektur, Bau und Holz HSB

Prüfaufzeichnung

Bauholz für tragende Zwecke und BSH - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften

Zur Prüfaufzeichnung gehören die Seiten der Prüfungsergebnisse

Weitere, der Aufzeichnung zugehörige Dokumente:	PA 7408, PA 7412	
nach Norm	SN EN 408 (Aug 2003)	7
angelehnt an Norm (erfordert Beiblatt Validierung)		
Aufzeichnung Nr.	2655-PA-02	Abschnitt (Norm)
Anwendungsbereich: PA gültig für 20	EN 408, ausgenommen Abschnitte 12, 14, 15, 18, 19 un	1

Visum

Visum

lam5

7

Verantwortlicher Prüfer: Lehmann / lam5 Prüfkörpereingang/Grunddaten Wareneingangsnummer: хххх 18.01.2007 Datum Anlieferung: Prüfkörperbeschreibung: Angaben Datum Holzart, Holzqualität: BSH, GL 24 Abmessungen 60x240x4000 Prüfkörpernummer: 240-1 und 240-2 18.01.2007 vorgesehene Prüfungen Biegeprüfung

keine

kontrolliert, in Ordnung

Vorbereitung der erforderlichen Prüfei	inrichtungen				
	NI-	Rese	erviert	Verantwortl.	Datum &
reserviene Fruigerate	Nr.	von	bis	Labor	Visum
Prüfrahmen (Max. und min. Dimensionen der Prüfkörper, siehe i	2.42.4012.9117	29.1.	31.1.	Ingenieurholzbau	
Prüfzylinder zu Prüfrahmen	2.42.4012.9118 2.42.4012.9119	29.1.	31.1.	Ingenieurholzbau	10/01/2007 lam5
Prüfmaschine Schenk				Werkstoff	
weitere Prüfgeräte	Nr.	Erledigt	Nicht notwendig	Verantwortl. Labor	Datum & Visum
Messverstärker HBM Spider 8	2.42.4012.1618	◄		Ingenieurholzbau	
Induktive Wegmessgeräte (20, 50, 100 mm) <i>Fehlertoleranz 1%</i>	хххх	V		Ingenieurholzbau]
Zwei Messschiene (1.5-2.5m, 2.5-3.5m oder 3.5-4.5m)	-	V		Ingenieurholzbau	10/01/2007 lam5
Messband (0-2m oder 0-15m) Fehlertoleranz 0.5%, resp. 1%	-	◄		Werkstoff	
Messschieber (0-600mm oder 0-150mm) Fehlertoleranz 0.5%	ł		2	Werkstoff	
Hilfsmittel	Nr.	Erledigt	Nicht notwendig	Verantwortl. Labor	Datum & Visum
Stahlplatten (Verteilung Lasteinleitung/Auflagerlasten: Länge kleiner als halber Prüfkörperhöhe)	-	L		Ingenieurholzbau	10/01/2007
Befestigung für Messschiene	-	•		Ingenieurholzbau	lam5
Befestigung für Wegmessgerät	-	2		Ingenieurholzbau	

Datum Beginn Normalklima:

Klimatisierung

Bauholz für tragende Zwecke und BSH - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften

Angewandte Norm

SN EN 408 (Aug 2003)

Aufzeichnung Nr.

2655-PA-02

Prüfungsergebnisse - Biegeversuche (mit El global)

Vor Prüfung				Datum	Vis. Prüfer
EN 408 (Aug 2003)					
Prüfkörpernummerierung:					
Spannweite (I) [mm]:	3735 mm				
Messlänge (I1) [mm]:	845 mm				
Abstand Laststelle-Auflager (a) [mm]:	1245 mm				
Prüfgeschwindigkeiten:	E-Modul	Bruch	Bruch		
	[N/s]	[N/s]	[mm/min]		

Auswertung der Prüfung	El global	B-Spannung
maximale Wert:	1.042E+12	57.0 N/mm ²
minimale Wert:	953.0E+9	41.2 N/mm ²
Mittelwert:	996.2E+9	48.8 N/mm ²
Standart Abweichung:	36.4E+9	6.5 N/mm ²

Berechnungsformeln	globales El	B-Spannung
	$EI_{ng} = \frac{I^3 \cdot \Delta F}{12 \cdot \Delta w} \cdot \left[\left(\frac{3a}{4I} \right) - \left(\frac{a}{I} \right)^3 \right]$	$f_m = \sigma_V + \frac{\mathbf{a} \cdot F_{\max}}{2 \cdot W} \cdot \frac{\mathbf{z}_u - h_{CFK}}{\mathbf{z}_u}$

	Breite	Höhe	Trägheitsm	zu	Fmax	Δw	ΔF	Biegesteifig-	B-Spannung	Bruchart/Wuchseigensch.
Nr.	(mm)	(mm)	(mm4) ¹⁾	(mm)	(N)	(mm) ³⁾	(N) ³⁾	keit El	max. Zug im Holz	_
1	60	240	81400364	114.6	61799	13.96075	15000	993.5E+9	41.2	Kippen
1a	60	240	81400364	114.6	69961	14.55375	15000	953.0E+9	48.3	* Biegezugbruch im Holz
2	60	240	81400364	114.6	80059	13.31125	15000	1.042E+12	57.0	Biegezugbruch im Holz
3										
5										* Träger Nr. 1 wurde
6										mit zusätzlichen
7										seitlichen Haltepunkte
8										nochmals getestet
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										
27										
28										
29										
30										

¹⁾ Trägheitsmoment für Rechteckquerschnitt hinterlegt. Bei anderen Querschnitte Trägheitsmoment direkt eingeben.

²⁾ Abstand des Schwerpunktes von der unteren bzw. oberen Kante des Prüfkörpers (kleinerer Wert massgebend) Wert für symmetrischen Querschnitt hinterlegt. Bei anderen Querschnitte Wert direkt eingeben.

³⁾ Berechnung im Berechnungsbeiblatt Biegung/Druck

Vorkommnis	sse w	ährend de	r Prüfung	Bemerkungen	Vis. Prüfer
					lam5
Beiblatt	ja		nein		

Bauholz für tragende Zwecke und BSH - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften

Angewandte Norm

SN EN 408 (Aug 2003)

Aufzeichnung Nr.

2655-PA-02

Prüfungsergebnisse - Biegeversuche (mit El *lokal*)

Vor	· Prüfung				Datum	Vis. Prüfer					
				EN 408 (/	Aug 2003)						
			Prüf	örpernum	merieruna:						
				Spannweit	te (I) [mm].	3735 mm					
				Magalänge	(l) [mm]	945 mm					
				wesslange	<u>e (I₁) [mm]:</u>	845 mm					
		Abs	stand Lastste	lle-Auflage	r (a) [mm]:	1245 mm					
			Pr	üfgeschwi	ndigkeiten:	E-Modul	Bruch	Bruch			
						[N/s]	[N/s]	[mm/min]			
								· · ·			
A		den Duitern				Flickel					
Aus	swertung	der Prutun	ig			EI IOKAI			B-Spannung		
	maxir	male Wert:				1.573E+12	2		57.0 N/mm²		
	minir	nale Wert:				1.355E+12	2		41.2 N/mm ²		
		Mittelwert:				1.444E+12	2		48.8 N/mm ²		
S	Standart Ab	weichung:				93.7E+9			6.5 N/mm ²		
		-									
Ber	echnungs	formeln				lokales Fl			B-Spannung		
	connunge					.5.0.00 LI			_ opannung	F - k	
						_, a·	$I_1^2 \cdot \Delta F$		$f = \sigma^{-a}$	r_{max} , $Z_u - n_{CFK}$	
						$EI_m = -$	1		$I_m = O_V + \frac{1}{2}$. 1//	
						1	$6 \cdot \Delta W$		2		
	Breite	Höhe	Trägheitsm	zu	Fmax	Δw	ΔF	Biegesteifig-	B-Spannung	Bruchart/Wuchseigensch.	
NIE	(mm)	(mm)	$(mm4)^{-1}$	(mm)	(NI) ³⁾	$(mm)^{3}$	(NI) ³⁾	keit FI	max. Zug im Holz	G	
INI.	()	()	(11114)	()		(1111)	(IN)	4.4005.40	44.0	1Conserved	
1	60	240	81400364	114.6	61799	0.59425	15000	1.402E+12	41.2	Kippen	
1a	60	240	81400364	114.6	69961	0.615	15000	1.355E+12	48.3	* Biegezugbruch im Holz	
2	60	240	81400364	114.6	80059	0.52975	15000	1.573E+12	57.0	Biegezugbruch im Holz	
3											
5										* Träger Nr. 1 wurde	
6										mit zusätzlichen	
7										seitlichen Haltenunkte	
8										nochmals getestet	
0							-			nochinais getestet	
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
10											
10											
19											
20											
21											
22											
23											
24								I			
25							<u> </u>	1			
26											
27											
21											
28											
29											
30											

¹⁾ Trägheitsmoment für Rechteckquerschnitt hinterlegt. Bei anderen Querschnitte Trägheitsmoment direkt eingeben.

²¹ Abstand des Schwerpunktes von der unteren bzw. oberen Kante des Pr
üfk
örpers (kleinerer Wert massgebend) Wert f
ür symmetrischen Querschnitt hintoriert Bei anderen Querschnitt Mort direkt einerehen

hinterlegt. Bei anderen Querschnitte Wert direkt eingeben. ³⁾ Berechnung im Berechnungsbeiblatt Biegung/Druck

Vorkommni	sse w	ährend der	Prüfung	Bemerkungen	Vis. Prüfer
					lam5
Beiblatt	ja		nein		

Bauholz für tragende Zwecke und BSH - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften

Angewandte Norm	SN EN 408 (Aug 2003)
Aufzeichnung Nr.	2655-PA-02

Berechnungsbeiblatt : ☐ Biegeversuche Blatt Nr. 1 ☐ Druckversuche

	orwartetes	Bereiche	F10	F40		w10	w40	A w	w10 lokal	w40 lokal	Aw lokal
	Emax (NI)	Dereiene	(N)	(N)		alobal			(mm)	(mm)	
Nr			()	()		(mm)	(mm)	(mm)	()	()	(11111)
1	50000	0	5000	20000	15000	4.9	19,185	14.285	0.1905	0.8995	0.709
-		a	5000	20000	15000	5.3495	19.235	13.8855	0.315	0.907	0.592
		b	5000	20000	15000	5.3135	19.3495	14.036	0.3045	0.901	0.5965
-		Mittelwert	5000	20000	15000	5.3315	19.29225	13.96075	0.30975	0.904	0.59425
2	50000	0	5000	20000	15000	5.01	19.858	14.848	0.025	0.9635	0.9385
		a	5000	20000	15000	5.12	19.98	14.86	0.36	0.971	0.611
		b	5000	20000	15000	5.7535	20.001	14.2475	0.3445	0.9635	0.619
		Mittelwert	5000	20000	15000	5.43675	19.9905	14.55375	0.35225	0.96725	0.615
3	50000	0	5000	20000	15000	4.9195	18.88	13.9605	0.189	0.894	0.705
		а	5000	20000	15000	5.705	18.904	13.199	0.374	0.9015	0.5275
		b	5000	20000	15000	5.5935	19.017	13.4235	0.36	0.892	0.532
		Mittelwert	5000	20000	15000	5.64925	18.9605	13.31125	0.367	0.89675	0.52975
4		0									
		а									
		b									
		Mittelwert									
5		0									
		а									
		b									
		Mittelwert									
6		0									
		а									
		b									
		Mittelwert									
7		0									
		а									
		b									
		Mittelwert									
8		0									
		а									
		b									
		Mittelwert									
9		0									
		а									
		b									
		Mittelwert									
10		0									
		а									
		b									
		Mittelwert									
L_				_	Bemerkungen						Vıs. Prüfer
weitere Beiblätter 🛛 🗍 ja 🗖 nein											