

Martin Gräfe, Philipp Dietsch, Andreas Hipper
Matthias Wild, Stefan Winter

Vorspannung von Brettsperrholzkonstruktionen

F 3099

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2019

ISBN 978-3-7388-0374-7

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Schlussbericht zum Forschungsvorhaben

Vorspannung von Brettsperrholzkonstruktionen

Forschungsstelle:

Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
Arcisstraße 21
80335 München

Projektbearbeitung:

Dipl.-Ing. Martin Gräfe
Andreas Hipper M.Sc.
Dipl.-Ing. (FH) Matthias Wild M.Sc. MBA

Projektleitung:

Dr.-Ing. Philipp Dietsch

Laufzeit

Laufzeit 01/2016 bis 05/2018

Das Vorhaben wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

Aktenzeichen SWD-10.08.18.7-15.49

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt beim Autor.

Zitiervorschlag: Gräfe, M., Dietsch, P., Hipper, A., Wild, M., Winter, S. *Vorspannung von Brettsperrholzkonstruktionen*, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben, Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion. München 2018

Kurzfassung

Hohe und schlanke Bauwerke wie Türme und höhere Geschossbauwerke werden durch Wind- und Erdbebenlasten horizontal beansprucht. Die daraus entstehenden Kräfte sind häufig eine bemessungsmaßgebende Einwirkung, je mehr, umso geringer das Eigengewicht der Tragstruktur ist.

Dies trifft insbesondere für Holzbauten zu, bei denen die Nutzlasten einen großen Anteil der vom Tragwerk aufzunehmenden Kräfte ausmachen. Hinzu kommt, dass infolge gestalterischer Wünsche (große Fensterflächen, flexible Grundrisse) die aussteifenden Bauteile oft möglichst schlank ausgeführt werden sollen. In hohen Geschossbauwerken aus Brettsper Holz sind daher häufig erhebliche Zugkräfte in den Wandscheiben bzw. Gebäudekernen aufzunehmen. Der Baustoff Holz kann diese Zugkräfte zwar aufgrund seiner Zugfestigkeit aufnehmen, allerdings werden häufig aufwendige Verbindungen zur Kraftübertragung an den Stößen der in der Regel geschossweise aufgebauten Gebäudestrukturen erforderlich.

Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung von Möglichkeiten, aussteifende Bauteile für Türme und hohe Geschossbauwerke aus Brettsper Holz vertikal vorzuspannen, um diese Zugkräfte aufzunehmen, bzw. überdrücken zu können. Hiermit sollen die folgenden konstruktiven Vorteile nutzbar gemacht werden:

- Reduzierung der erforderlichen Anzahl von Verbindungsmitteln in den Geschosstößen
- Erhöhung der horizontalen Steifigkeit, bzw. Reduzierung der notwendigen Breite von aussteifenden Bauteilen
- Ermöglichung der Nutzung formschlüssiger, „verzahnter“ Verbindungen

Hierzu wurde untersucht,

- wie Lasteinleitungsbereiche für die Verankerung von Spanngliedern konstruiert werden können,
- wie sich die konzentrierten Lasten aus diesen Spanngliedern innerhalb einer Wandscheibe ausbreiten,
- wie Kanäle zur Aufnahme der Spannglieder in Brettsper Holzbauteilen einbracht werden können,
- wie formschlüssige Verbindungen von Brettsper Holzbauteilen entworfen und bemessen werden können, und
- wie das Kriechverhalten von Brettsper Holz unter Längsdruckbeanspruchung ist.

Die Untersuchungen wurde mit Hilfe von Parameterstudien mittels der Finite-Elemente-Methode mechanischen Bauteilversuchen und Langzeit-Kriechversuchen durchgeführt. Ergebnis sind konstruktive Lösungen und Bemessungsregeln für formschlüssige Verbindungen und Einleitungsbereiche von Spannverankerungen, Lösungen zum Einbau von Spannkanälen in Brettsper Holzelementen und Vorschläge zur rechnerischen Berücksichtigung des Kriechverhaltens von Brettsper Holz.

Abstract

Highrise structures such as towers and multi-storey buildings are loaded horizontally by wind and earthquake loads. The resulting forces are often decisive for the design of the load-bearing structure. Their influence increases with increasing height of the buildings, and with decreasing deadweight of the structure.

This is particularly true for timber structures, where life loads contribute a big proportion to the forces in the load bearing structure. In addition, from the point of architectural design it is often desired to have slender bracing elements, to achieve flexible floor plans and the possibility of free location of openings or windows. Therefore, high rise timber structures typically need to bear significant vertical tension forces in the bracing elements. Timber products are in general able to bear those tension forces due to their tension strength, but, the necessary connections between the single elements often get rather complex, time-consuming to realise and therefore costly to build.

The objective of the project was to study possibilities in using vertical post-tensioning of bracing elements for high-rise timber structures, in order to reduce or superimpose these vertical tension forces generated by horizontal loads. This should enable the following structural advantages:

- Reduction of the necessary amount of mechanical fasteners at horizontal joints
- Enabling the use of form-fitting, interlocking shear connections
- Increase of horizontal stiffness, respectively reduction of the necessary width of bracing elements

This was realized by

- studying the behaviour of load introduction areas of concentrated load from steel tendons,
- the load distribution behaviour downwards in-plane,
- the behaviour of interlocking connections in CLT,
- possibilities of inserting ducts for the prestressing tendons and
- the creep behaviour of CLT loaded in grain direction in-plane.

Several series of finite-element studies were carried out, along with mechanical tests on structural details. The creep behaviour was examined by long-term creep tests with different boundary conditions. Outcome of the project are constructive details and design principles for form-fitting connections and areas of load application, the insertion of ducts for prestressing tendons into CLT-elements and the creep behavior of CLT.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	III
Abstract	V
Danksagung	VII
1 Einleitung, Beispiele und Bemessung	1
1.1 Einleitung und Fragestellung	1
1.2 Anwendungsbeispiele aus Literaturquellen	3
1.2.1 Swiss Re Gebäude, Rüschlikon, CH	3
1.2.2 House of natural resources, ETH Zürich	3
1.2.3 Vorgespannte mehrgeschossige Gebäude in Neuseeland	4
1.3 Bemessungsgrundlagen für vorgespannte Tragwerke aus Holz	5
1.3.1 Allgemeines	5
1.3.2 Nachweise im GZT und GZG	6
1.3.2.1 Nachweisformat	6
1.3.2.2 Sicherheitsbeiwerte	6
1.3.3 Spannkraftverluste	7
1.3.3.1 Allgemeines	7
1.3.3.2 Ankerschlupf	7
1.3.3.3 Relaxation des Spannstahls	8
1.3.3.4 Kriechen des Holzes	8
1.3.3.5 Temperatureinfluss	9
1.3.3.6 Schwinden und Quellen des Holzes	9
1.3.3.7 Summe der Verluste	9
1.3.4 Berechnungsbeispiel	10
2 Lasteinleitungsbereiche und Spannverankerungen	13
2.1 Fragestellung und Vorgehensweise	13
2.2 Technische Regeln und Bemessungsverfahren	14
2.3 Versuchskonzept, Eigenschaften der Versuchskörper	14
2.3.1 Versuchskonzept	14
2.3.2 Überlegungen zur lokalen Verstärkung der Lasteinleitungsbereiche	15
2.3.3 Geometrie und Eigenschaften der Versuchskörper	15
2.3.4 Herstellung der Versuchskörper	17
2.3.5 UHPC-Ankerplatten	20
2.3.5.1 Hybridanker Typ HA-1	21
2.3.5.2 Hybridanker Typ HA-2	22
2.3.6 Ankerplatten aus Stahl	23
	IX

2.3.7	Übersicht der Versuche	24
2.4	Versuchsdurchführung	24
2.5	Versuchsergebnisse	26
2.5.1	Vorversuche und UHPC-Hybridanker	26
2.5.2	Versuchskörper ohne Verstärkung	27
2.5.3	Versuchskörper mit Verstärkung	30
2.5.4	Druckfestigkeitsprüfung	31
2.5.5	Bewertung der Ergebnisse	32
2.5.5.1	Bruchverhalten der Brettsperrholzprüfkörper	32
2.5.5.2	Bruchverhalten der Brettsperrholzprüfkörper mit Verstärkung	33
2.5.5.3	Bruchverhalten der Hybridankerplatten HA1	33
2.5.5.4	Bruchverhalten der Hybridankerplatten HA2	33
2.5.5.5	Druckfestigkeit der Brettsperrholzprüfkörper	34
2.5.5.6	Bewertung der Druckfestigkeiten	34
2.6	Auswertung	35
2.6.1	Bemessungsvorschlag	35
2.6.1.1	Rechnerische Bemessung des Lasteinleitungsbereichs	35
2.6.1.2	Bemessung der Ankerplatten aus Stahl	37
2.6.1.3	Bemessung der Hybridankerplatten	39
2.6.2	Nachweis durch Zulassung	40
2.7	Gesamtergebnis	41
3	Lastausbreitung in Plattenebene	43
3.1	Fragestellung	43
3.2	Finite-Elemente-Studie	44
3.2.1	Untersuchungsziel und Vorgehensweise	44
3.2.2	Geometrie und Materialparameter	45
3.2.3	Modellierung	47
3.2.3.1	Modelleigenschaften	47
3.2.3.2	FE-Netz	48
3.2.4	Lastaufbringung	48
3.2.5	Auswertung der FE-Modelle	49
3.2.6	Ergebnisse	50
3.2.6.1	Einfluss des Querlagenanteils - nicht schmalseitenverklebt	50
3.2.6.2	Einfluss des Querlagenanteils schmalseitenverklebt	51
3.2.6.3	Einfluss der Schmalseitenverklebung	52
3.2.6.4	Einfluss der Bauteilhöhe	53
3.2.6.5	Einfluss der Positionierung der Lasteinleitungsplatte	54
3.2.6.6	Einfluss streuender Materialeigenschaften	56
3.2.6.7	Einfluss der Querdehnzahl	58
3.2.6.8	Verformungen	58

3.2.6.9	Normalspannungsverteilung	59
3.2.7	Zwischenergebnis	60
3.3	Mechanische Versuche	60
3.3.1	Versuchsaufbau	60
3.3.1.1	Versuchskonzept	60
3.3.1.2	Überlegungen zur Messtechnik	60
3.3.1.3	Beschreibung des Bauteils zur Messung der vertikalen Spannungs- verteilung	62
3.3.1.4	Kalibrierung	64
3.3.2	Versuchskörper	64
3.3.3	Versuchsdurchführung	65
3.3.3.1	Montage und Belastungseinrichtung	65
3.3.3.2	Ablauf der Versuche, Laststufen	68
3.3.4	Wandhöhen 750 mm und 1500 mm	68
3.3.5	Berechnung der Lastverteilung aus den Versuchsergebnissen	69
3.3.6	Versuchsergebnisse und Kurvenanpassung	69
3.4	Vergleich FE-Studie - Versuchsergebnisse	71
3.5	Bewertung und Schlussfolgerung	72
3.5.1	Fähigkeit zur Lastumlagerung	72
3.5.2	Stabilitätsnachweise	73
3.5.3	Einfluss der Auflagersteifigkeit	73
3.5.4	Ansatz einer gemittelten Spannungsverteilung	73
3.5.5	Übertragung auf asymmetrische Fälle	73
3.5.6	Fazit	76
4	Kriechverhalten von Brettsperrholz	79
4.1	Stand der Wissenschaft und Technik	79
4.1.1	Stand der Technik und Normung	79
4.1.1.1	Begriffsdefinition	79
4.1.2	Stand der Wissenschaft	80
4.1.3	Einflussparameter auf das Kriechverhalten	81
4.1.3.1	Einleitung	81
4.1.3.2	Holzfeuchtigkeit und Änderungen der Holzfeuchtigkeit	81
4.1.3.3	Belastungsgrad	82
4.1.3.4	Belastungsrichtung	83
4.1.3.5	Geometrie der Prüfkörper	84
4.1.3.6	Temperatur	85
4.2	Identifizierter Forschungsbedarf	85
4.3	Kriechversuche	86
4.3.1	Überblick	86
4.3.2	Versuchskörper und Vorspanntechnik	86

4.3.3	Klima und Messtechnik	87
4.3.4	Spannvorgang	88
4.3.5	Versuche unter Laborbedingungen	91
4.3.5.1	Konstantes Klima	91
4.3.5.2	Wechselklima	92
4.3.6	Versuche im natürlichen Außenklima	94
4.3.7	Versuchsergebnisse	96
4.3.7.1	Berücksichtigung von Temperatur- und Kraftänderungen	96
4.3.7.2	Versuche im konstanten Normklima	97
4.3.7.3	Versuche im Labor-Wechselklima	99
4.4	Auswertung und Extrapolation	100
4.4.1	Modellierung, mathematische und rheologische Modelle	100
4.4.2	Gewähltes Kriechmodell	101
4.4.3	Auswertungsmethode	102
4.4.4	Berücksichtigung der Relaxation des Spannstahles	103
4.4.5	Kriechen im konstanten Normklima	104
4.4.5.1	Versuche A1.1 und A1.2	104
4.4.5.2	Versuch B1	105
4.4.5.3	Versuch C1a	106
4.4.6	Kriechen im Wechselklima unter Laborbedingungen	108
4.4.6.1	Versuch C3	108
4.4.7	Kriechen im natürlichen Außenklima	109
4.4.7.1	Versuche B2 und C2	109
4.4.8	Quellen und Schwinden	113
4.5	Schlussfolgerung und Empfehlungen	114
4.5.1	Einordnung und Vergleich mit Literaturangaben	114
4.5.2	Empfehlungen für Kriechzahlen	114
5	Knicken und Stabilität	117
5.1	Allgemeines	117
5.2	Knicken von Brettsperrholz unter zentrischer Vorspannkraft	118
5.3	Knickversuche	118
5.3.1	Versuchsaufbau und Berechnung	118
5.3.2	Versuchsdurchführung und Ergebnisse	119
5.3.2.1	Übersicht der Knickversuche	119
5.3.2.2	Knicken unter äußerer Last, Versuch Nr. 1	120
5.3.2.3	Knicken unter Spannkraft, Versuch Nr. 2	121
5.4	Schlussfolgerungen	123
6	Formschlüssige Verbindungen	125
6.1	Ausgangslage und Ziel der Untersuchung	125
6.1.1	Ausgangslage, gängige Konstruktionsprinzipien	125

6.1.2	Optimierungspotential	126
6.1.3	Holz-Holz-Verbindungen	126
6.1.4	Aktuelle Entwicklungen formschlüssiger Verbindungen im Geschossbau	126
6.2	Entwurfskriterien	129
6.2.1	Baupraktische und betriebswirtschaftliche Rahmenbedingungen	129
6.2.1.1	Bearbeitungswerkzeuge	129
6.2.1.2	Montierbarkeit, Bauablauf, Toleranzen	129
6.2.2	Referenzsteifigkeit - Holzschraubenverbindung	130
6.2.3	Umgang mit Reibung	131
6.2.4	Festlegung von Verbindungstypen und geometrischen Größen	132
6.2.4.1	Direkte Verbindungen	132
6.2.4.2	Indirekte Verbindungen	133
6.3	Mechanische Modelle	133
6.3.1	Grundlagen	133
6.3.2	Grenzen der Berechnung an mechanischen Ersatzmodellen	134
6.3.3	Schlussfolgerung für die Zackengeometrie	136
6.4	Finite-Elemente-Modellierung	136
6.4.1	Allgemeines	136
6.4.2	Modellierung des Grundelements der Verbindung	137
6.4.2.1	Material und Lagenaufbau	137
6.4.2.2	Berücksichtigung des Schmalseitenverbunds der Bretter	138
6.4.2.3	Modellgröße und Lagerbedingungen	139
6.4.2.4	Finite-Elemente-Netz	140
6.4.2.5	Belastung und Bestimmung der Steifigkeit	140
6.4.3	Qualitative Ergebnisse der FE-Berechnung	141
6.4.4	Eingangsgrößen der Parameterstudie	144
6.4.5	Ergebnisse der Parameterstudie	145
6.4.5.1	Einfluss der Zackenabmessung auf die Elementsteifigkeit bei schmal-seitenverklebtem BSP	145
6.4.5.2	Einfluss der Zackenabmessung auf die Ersatzfederkonstante bei schmal-seitenverklebten BSP	147
6.4.5.3	Einfluss der Flankenneigung und des Querlagenanteils auf die Ele-mentsteifigkeit bei schmalseitenverklebten BSP	148
6.4.5.4	Einfluss der Zackenabmessung und Fugenkonfiguration auf die Ele-mentsteifigkeit bei nicht schmalseitenverklebten BSP	149
6.4.5.5	Einfluss der Schmalseitenverklebung auf die Elementsteifigkeit	151
6.4.6	Schlussfolgerungen aus der FE-Studie	151
6.5	Mechanische Versuche	152
6.5.1	Versuchsaufbau und Prüfkörper	152
6.5.1.1	Versuchsaufbau	152
6.5.1.2	Übersicht Versuchskörper	152

6.5.2	Versuchsdurchführung, Prüf- und Messverfahren	155
6.5.2.1	Allgemeines	155
6.5.2.2	Kräfte	156
6.5.2.3	Wegmessung und Bestimmung der Steifigkeit	156
6.5.3	Auswertung der direkten Verbindungen	159
6.5.3.1	Trag- und Bruchverhalten	159
6.5.3.2	Steifigkeit und Tragfähigkeit	160
6.5.3.3	Versagen auf Längsschub	166
6.5.4	Auswertung der indirekten Verbindungen	166
6.5.4.1	Trag- und Bruchverhalten	166
6.5.4.2	Steifigkeit und Tragfähigkeit	172
6.6	Zusammenführung von Versuchen und FE-Modellen	173
6.6.1	Steifigkeit	173
6.6.1.1	Ergebnisse aus Versuch und FE-Analyse	173
6.6.1.2	Unterschiede zwischen FE-Modell und Versuch	174
6.6.2	Tragfähigkeit und Vorholzlänge	177
6.6.2.1	Versagensmechanismen	177
6.6.2.2	Erforderliche Vorholzlänge	178
6.6.2.3	Vergleich von Längsdruck- und Nettoschub-Widerstand	179
6.6.3	Schlussfolgerungen	179
6.6.3.1	Direkte Verbindungen	179
6.6.3.2	Indirekte Verbindungen	181
6.6.4	Rahmenbedingungen	182
6.7	Ergebnis und Konstruktionsempfehlungen	182
7	Schluss	185
7.1	Gesamtergebnis	185
7.2	Ausblick	185
	Literaturverzeichnis	191
	Anhang	193
A	Spanngliedverankerungen	193
A.1	Messdaten	193
A.2	Bilder	199
B	Lastausbreitung in Plattenebene	208
B.1	Konstruktionszeichnung Messträger	208
B.2	Messdaten	209
B.2.1	Messdaten 1500 mm Wandhöhe	209
B.2.2	Messdaten 750 mm Wandhöhe	210
C	Formschlüssige Verbindungen	214
C.1	Details ausgewählter Verbindungstypen	214

C.2	Finite Elemente Modellierung	216
C.2.1	Materialmodell	216
C.2.2	Übersicht der untersuchten Parameter	217
C.3	Bauteilversuche	219
C.3.1	Zeichnungen der Versuchskörper	219
C.3.2	Versuchsaufbau	220
C.3.3	Holzfeuchtemessung	220
C.3.4	Last-Verschiebungsdiagramme	222
C.3.5	Tabellen	226