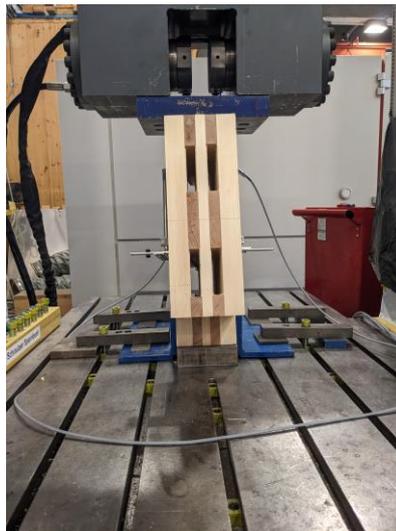


Festigkeits- und Steifigkeitsverhalten eines zugelassenen BSP-Verbinders in aufgelöstem hybridem Brettsperrholz

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science an der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München.



Lehrstuhl

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

Betreuer

Nils Schumacher, M.Sc.
Lucas Bienert, M.Sc.

Eingereicht von

Florian Brückner
03683696

Eingereicht am

01. Juni 2024, in München

Kurzfassung

In Zukunft ist aufgrund des anhaltenden Klimawandels und der damit verbundenen erschwerten Wachstumsbedingungen für Fichtenbäume mit einer Ressourcenknappheit dieses Materials zu rechnen. Um dieser Entwicklung entgegenzuwirken, beschäftigt sich das Forschungsprojekt „LaNaSys“ der Technischen Universität München (TUM) mit der Entwicklung von aufgelösten hybriden Brettsperrholzdeckenelementen (AHBSP). Aufgrund des Herstellungsprozesses und der Transportbedingungen der Holzdeckenelemente ist es jedoch erforderlich, sich Gedanken über die kraftschlüssige Verbindung der einzelnen Elemente beim Einbau zu machen.

Der CLT-Connector der Firma Sherpa verfügt bereits über eine Zulassung für herkömmliches Brettsperrholz (BSP). Ziel dieser Masterarbeit ist es, zu überprüfen, ob die Verwendung dieses Verbindungsmittels (VBM) auch bei AHBSP möglich ist. Außerdem sollen analog zum Datenblatt der Firma Sherpa erste Kennwerte für die Bemessung ermittelt werden.

Zur Klärung der Forschungsfrage wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt. In den Versuchsreihen wurde neben den Geometrien der AHBSP-Elemente auch die Länge der im Sherpa CLT-Connector verbauten Schrauben variiert. Um Vergleichswerte zu erzielen, wurde zudem eine Prüfreihe getestet bei der eine Buchenholzlamelle als VBM diente.

Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse wird klar, dass die Geometrie der AHBSP-Elemente und die Platzierung des VBM einen entscheidenden Einfluss auf die Tragfähigkeit hat. Außerdem spielt der Holzanteil der einzelnen im CLT-Connector verbauten Schrauben eine große Rolle in Bezug auf den Versagensmechanismus.

Die Versuchskörper, bei denen die Buchenholzlamelle verbaut wurde, weisen im Vergleich zu allen anderen Versuchsreihen im Mittel die geringste Bruchlast auf. Außerdem ist der Variationskoeffizient, aufgrund der unterschiedlich hohen Versuchsergebnisse, am größten.

Bei den Versuchsreihen mit dem Sherpa CLT-Connector konnte die Tragfähigkeit der Prüfkörper, durch die Verwendung der längeren Schrauben gesteigert werden. Die Steigerung ist jedoch kleiner als von der Fa. Sherpa für herkömmliches BSP angegeben. Die Bruchlasten aller Versuchsreihen mit gleich langen Schrauben weisen trotz unterschiedlicher BSP Geometrie fast identische Werte auf.

Um in Zukunft eine Bemessung des Sherpa CLT-Connectors in AHBSP zu ermöglichen, müssen noch zusätzliche Analysen durchgeführt werden. Diese Masterarbeit bildet die Basis für weitere Untersuchungen. Außerdem sollte die Firma Sherpa eine Zulassung ihres Produktes für AHBSP anstreben.

Abstract

Due to the ongoing climate change and the associated more difficult growing conditions for spruce trees, a shortage of this material is to be expected in the future. To counteract this development, the “LaNaSys” research project at the Technical University of Munich is working on the development of dissolved hybrid cross-laminated timber ceiling elements. However, due to the manufacturing process and the transportation conditions of the wooden ceiling elements, it is necessary to consider the friction-locked connection of the individual elements during installation.

The CLT-Connector from Sherpa already has approval for conventional cross-laminated timber. The aim of this master's thesis is to check whether the use of this connector is also possible with dissolved hybrid cross-laminated timber ceiling elements. In addition, initial characteristic values for the design are to be determined analogous to the Sherpa data sheet.

Experimental investigations were carried out to clarify the research question. In addition to the geometries of the dissolved hybrid cross-laminated timber ceiling elements, the length of the screws used in the Sherpa CLT connector was also varied in the series of tests. In order to obtain comparative values, a test series was also tested in which a beech wood lamella served as the fastener.

When evaluating the test results, it becomes clear that the geometry of the dissolved hybrid cross-laminated timber ceiling elements and the placement of the fastener have a decisive influence on the load-bearing capacity. In addition, the proportion of wood in the individual screws used in the CLT connector plays a major role in relation to the failure mechanism.

The test specimens in which the beech wood lamella was installed had the lowest average breaking load compared to all other test series. In addition, the coefficient of variation is highest due to the different test results.

In the test series with the Sherpa CLT connector, the load-bearing capacity of the test specimens was increased by using the longer screws. However, the increase is smaller than that stated by Sherpa für conventional CLT. The breaking loads of all test series with screws of the same length show almost identical values despite the different CLT geometry.

In order to be able to design the Sherpa CLT connector in dissolved hybrid cross-laminated timber ceiling elements in the future, additional analyses must be carried out. This master's thesis aims to form the basis for further investigations. Sherpa should also strive for approval of its product for dissolved hybrid cross-laminated timber ceiling elements.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	II
Inhaltsverzeichnis	III
Symbole und Abkürzungen	VI
1 Einführung	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Ziel der Arbeit.....	1
1.3 Aufbau der Arbeit	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Allgemeines.....	3
2.1.1 Lochleibungsfestigkeit	3
2.1.2 Ausziehwiderstand.....	4
2.1.3 Mindestabstände	5
2.2 Gelenkige Stöße.....	6
2.2.1 Fugen mit Stoßdeckungsleiste.....	7
2.2.2 Fugen mit Stufenfalz.....	8
2.2.3 Fugen mit gekreuztem Schraubenpaar	8
2.3 Biegesteife Stöße	10
2.4 Sherpa CLT-Connector	10
3 Material und Methoden	13
3.1 Allgemeines.....	13
3.2 Materialien und Geräte	13
3.2.1 Holz	13
3.2.2 Klebstoff	14
3.2.3 Verbindungsmittel.....	14
3.2.4 Prüfmaschine.....	14
3.2.5 Wegaufnehmer	15
3.3 Prüfkörperkonfiguration	15

3.4	Nomenklatur	18
3.5	Prüfdurchführung.....	18
3.6	Vorabschätzung der Bruchlast.....	19
4	Versuchsergebnisse und Auswertung.....	23
4.1	Allgemeines.....	23
4.2	Prüfreihe SV-BUCHE	25
4.3	Prüfreihe 60-100.....	27
4.4	Prüfreihe 120-100.....	29
4.5	Prüfreihe 60-140.....	32
4.6	Prüfreihe 120-140.....	34
4.7	Prüfreihe XX-140.....	35
4.8	Vergleiche	37
4.8.1	Verformungsverhalten	37
4.8.2	Bruchlast	39
4.9	Ermittlung von Bemessungswerten	41
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	43
6	Literaturverzeichnis.....	45
	Abbildungsverzeichnis.....	46
	Tabellenverzeichnis.....	48
	Anhang	49
A.1	Buchenlamellen der Prüfreihe SV-BUCHE	49
A.1.1	SV-BUCHE-1.....	49
A.1.2	SV-BUCHE-2.....	50
A.1.3	SV-BUCHE-3.....	51
A.2	Schraubenanteil je Lage.....	52
A.2.1	Prüfkörper 60-100.....	52
A.2.2	Prüfkörper 120-100.....	53
A.2.3	Prüfkörper 60-140.....	53
A.2.4	Prüfkörper 120-140.....	54

A.2.5	Prüfkörper XX-140.....	54
A.2.6	BSP-100.....	55
A.2.7	BSP-140.....	55
A.3	Prüfkörper	56
A.3.1	Prüfkörper SV-BUCHE	56
A.3.2	Prüfkörper 60-100.....	57
A.3.3	Prüfkörper 120-100.....	58
A.3.4	Prüfkörper 60-140.....	59
A.3.5	Prüfkörper 120-140.....	60
A.3.6	Prüfkörper XX-140.....	61

Symbole und Abkürzungen

Abkürzungen

AHBSP	aufgelöstes hybrides Brettsperrholz
BSP	Brettsperrholz
CAD	Computer-Aided-Design
CLT	cross laminated timber
COV	Variationskoeffizient
LND	logarithmisch Normalverteilt
ND	Normalverteilt
RS	Rückseite
TUM	Technische Universität München
VS	Verbindungsmittelseite
VBM	Verbindungsmittel

1 Einführung

1.1 Hintergrund

Herkömmliches Brettsperrholz (BSP) wird in der Regel aus qualitativ hochwertigem Nadelholz (Fichte) gefertigt. Diese Wahl ist auf die Eigenschaften und die Verfügbarkeit des Materials zurückzuführen. Aufgrund des anhaltenden Klimawandels und den damit erschwerten Wachstumsbedingungen für Fichtenbäume ist in Zukunft mit einer Ressourcenknappheit und Preissteigerungen zu rechnen.

Vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeit beschäftigt sich das Forschungsprojekt „LaNaSys“ der Technischen Universität München (TUM) mit der Entwicklung eines material- und energieeffizienten Holzbausystems aus Laub- und Nadelholz. Dabei wird versucht herkömmliches BSP weiterzuentwickeln. Die Absicht ist es, Schad- und Resthölzer, welche unter anderem bei der Schnittholz- und Furnierherstellung entstehen und bis dato nur thermisch oder zur Zelluloseherstellung verwendet werden, in tragenden Konstruktionen einzusetzen. BSP eignet sich aufgrund des großen Produktionsvolumens in seinen Mittellagen besonders gut dafür. Da Laubholz grundsätzlich größere Biege- und Zugfestigkeiten als Nadelholz aufweist, ist weniger Material nötig um vergleichbare Festigkeiten zu erzielen. Die Idee ist also zusätzliche Rohstoffe einzusparen, indem man die Querlagen bzw. die Mittellage aufgelöst ausbildet. Das übergeordnete Ziel des Forschungsprojektes ist es, das Produkt bis zur Marktreife zu entwickeln (TUM 2024).

Aufgrund des Herstellungsprozesses und der Transportgegebenheiten von Holzdeckenelementen müssen sich jedoch Gedanken zur kraftschlüssigen Verbindung der einzelnen Deckenelemente beim Einbau gemacht werden.

1.2 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Masterarbeit ist es verschiedene Lösungen für die kraftschlüssige Verbindung von unterschiedlichen Konfigurationen von aufgelösten hybriden Brettsperrholzdeckenelementen (AHBS) zu untersuchen. Genauer Augenmerk wird hierzu auf ein bereits existierendes Verbindungsmittel (Sherpa CLT-Connector), welches über eine Zulassung für herkömmliches BSP verfügt, gelegt.

Analog zum Datenblatt der Firma Sherpa sollen erste Kennwerte für die Verwendung des Sherpa CLT-Connectors in AHBS ermittelt werden. Die in den Versuchen ermittelten Werte sollen als erste Anhaltspunkte für eine spätere Bemessung dienen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zunächst wird ein Überblick über den Stand der Technik von Verbindungsmitteln für herkömmliches BSP gegeben. Dazu wird anfangs die Bemessung von Schrauben genauer betrachtet. Im Anschluss werden die gängigen Ausbildungen von BSP-Elementstößen vorgestellt.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit der Konfiguration der Prüfkörper und der Versuchsdurchführung, die angewendet wurde, um die oben genannten Ziele zu erreichen. Dafür werden zunächst alle verwendeten Materialien und Geräte vorgestellt. Im Anschluss werden die einzelnen Prüfkörperkonfigurationen genauer diskutiert. Abschließend werden noch die erwarteten Bruchlasten für jede Versuchsreihe ermittelt.

Im darauffolgenden Kapitel werden die Ergebnisse der einzelnen Prüfreihe genauer analysiert und im Anschluss miteinander verglichen. Des Weiteren werden erste Kennwerte für die Bemessung eines Sherpa CLT-Connectors in AHBSP ermittelt.

Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick zu weiteren möglichen Fragestellungen gegeben.

2 Stand der Technik

2.1 Allgemeines

Um eine kraftschlüssige Verbindung zwischen herkömmlichen Brettsperrholzelementen herzustellen, wird in der Praxis auf unterschiedliche Verbindungstechniken zurückgegriffen. Zur Erzeugung einer aussteifenden Wirkung müssen in den Stößen neben Fugenquerkräften aus den vertikalen Einwirkungen auch Fugennormalkräfte und Fugenschubkräfte von der Verbindung aufgenommen werden (vgl. Abbildung 2-1). Bei der Wahl der Fugenausbildung spielt das Lastniveau eine entscheidende Rolle (Wallner-Novak et al. 2018).

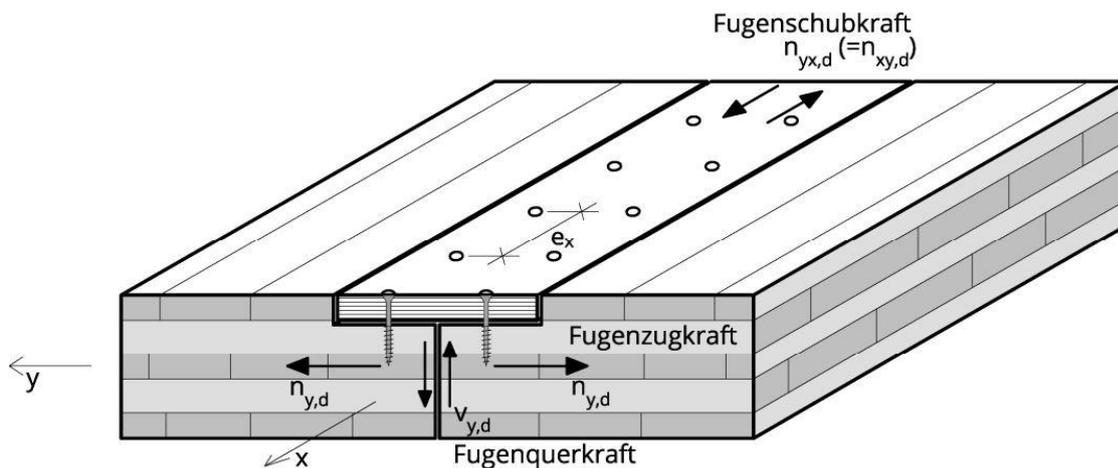


Abbildung 2-1: Fugenkräfte aus Scheibenwirkung (Wallner-Novak et al. 2018)

Beinahe alle gängigen Verbindungsvarianten setzen selbstbohrende Holzschrauben ein. Ihre Tragfähigkeit hängt sowohl von der Lochleibungsfestigkeit des Holzes als auch von der Materialgüte und dem Auszieh Widerstand der Schrauben ab. Außerdem müssen Mindestabstände zwischen den Schrauben sowie deren Abstände zum Bauteilrand eingehalten werden. Im Folgenden wird unter anderem auf Formeln aus der neuesten Fassung des Eurocode 5 (E DIN EN 1995-1-1:2023-10) zurückgegriffen, da hier erstmalig Formeln für Holzbauprodukte mit Querlagen aufgeführt werden. Es handelt sich zum jetzigen Zeitpunkt zwar nur um einen Entwurf, welcher der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt wurde, jedoch den aktuellen Stand der Technik am genauesten beschreibt.

2.1.1 Lochleibungsfestigkeit

Wird ein stiftförmiges Verbindungsmittel rechtwinklig zu seiner Achse in ein Holzbauteil eingedrückt, so erfährt es einen Widerstand, welcher auch Lochleibungsfestigkeit genannt wird (Blaß et al. 2006).

Aufgrund der kreuzweise verklebten Brettlagen liegen bei Brettspertholzelementen abschnittsweise unterschiedlich hohe Lochleibungsfestigkeiten entlang der Stiffachse vor (Blaß und Uibel 2009). Sie sind neben der Rohdichte des Holzes auch von den Abmessungen des stiftförmigen Verbindungsmittels abhängig. Außerdem darf der Winkel zwischen der Faserrichtung und dem Befestigungselement nicht vernachlässigt werden. Nach Eurocode 5 (E DIN EN 1995-1-1:2023-10) ergibt sich folgende Formel für die charakteristische Lochleibungsfestigkeit von Schrauben in Holzprodukten mit Querlagen:

$$f_{h,\varepsilon,k} = \frac{0.019 \cdot \rho_k^{1,24} \cdot d^{-0,3}}{2,5 \cdot \cos^2 \varepsilon + \sin^2 \varepsilon} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (2.1)$$

$f_{h,\varepsilon,k}$	[N/mm ²]	Charakteristische Lochleibungsfestigkeit
ρ_k	[kg/m ³]	Charakteristische Dichte
d	[mm]	Durchmesser
ε	[°]	Winkel zwischen Befestigungselement und der Faserrichtung

2.1.2 Auszieh Widerstand

Um den Auszieh Widerstand eines Verbindungsmittels zu ermitteln, muss zunächst die charakteristische Ausziehfestigkeit bestimmt werden. Für Schrauben in Holzbauprodukten mit Querlagen müssen einige Bedingungen eingehalten werden. So muss die Ausziehlänge mindestens das Fünffache des Durchmessers betragen und die charakteristische Dichte des Holzes darf 700 kg/m³ nicht überschreiten. Der Durchmesser muss außerdem in einem Bereich zwischen 8 mm und 22 mm liegen. Zudem darf der Innendurchmesser des Gewindes nicht kleiner als das 0,55-fache und größer als das 0,76-fache des Durchmessers sein. Sind alle Voraussetzungen erfüllt, so kann die charakteristische Ausziehfestigkeit nach Eurocode 5 (E DIN EN 1995-1-1:2023-10) wie folgt berechnet werden:

$$f_{w,k} = k_{screw} \cdot k_w \cdot k_{mat} \cdot d^{-0,33} \cdot \left(\frac{\rho_k}{350}\right)^{k_\rho} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (2.2)$$

$f_{w,k}$	[N/mm ²]	Charakteristische Ausziehfestigkeit
-----------	----------------------	-------------------------------------

Für nicht spezifisch erwähnte Materialien $k_w = k_{mat} = 1,0$.

$$k_{screw} = 7,5 \quad [-] \quad \text{Schraubenbezogener Faktor}$$

$$k_w = \begin{cases} 1,0 & \text{für } 30^\circ \leq \varepsilon \leq 90^\circ \\ 1 - 0,01 \cdot (30 - \varepsilon) & \text{für } 0^\circ \leq \varepsilon \leq 30^\circ \end{cases} \quad [-] \quad \text{Anpassungsfaktor}$$

$$k_{mat} = 1 + \frac{\ln(n_p)}{12} \leq 1,15 \quad [-] \quad \text{Materialparameter für die Anzahl der Lamellen}$$

n_p : Anzahl der penetrierten Lagen

$$k_\rho = \begin{cases} 1,10 & \text{für Nadelholz und } 15^\circ \leq \varepsilon \leq 90^\circ \\ 1,25 - 0,05d & \text{für Nadelholz und } 0^\circ \leq \varepsilon \leq 15^\circ \\ 1,6 & \text{für Laubholz und } 0^\circ \leq \varepsilon \leq 90^\circ \end{cases} \quad [-] \quad \text{Dichtebezogener Faktor}$$

Zur Ermittlung des charakteristischen Ausziehwiderstandes kommt nun die nachfolgende Formel zum Einsatz:

$$F_{w,k} = \pi \cdot d \cdot l_w \cdot f_{w,k} \quad [\text{N}] \quad (2.3)$$

$$F_{w,k} \quad [\text{N}] \quad \text{Charakteristischer Ausziehwiderstand}$$

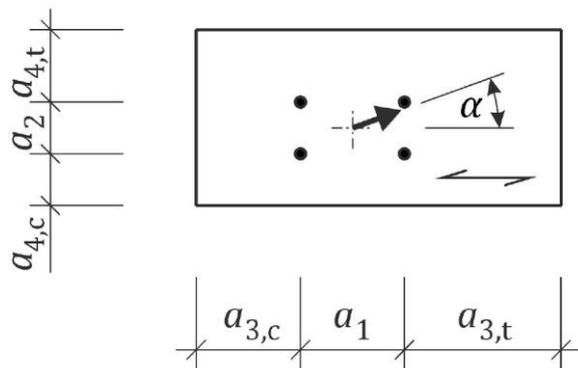
$$f_{w,k} \quad [\text{N/mm}^2] \quad \text{Charakteristische Ausziehfestigkeit}$$

$$l_w \quad [\text{mm}] \quad \text{Ausziehlänge}$$

$$d \quad [\text{mm}] \quad \text{Durchmesser}$$

2.1.3 Mindestabstände

Das Einbringen von stiftförmigen Verbindungsmitteln ohne vorheriges Vorbohren in Holzbauteilen birgt das Risiko von Aufspaltung und Rissbildung. Die entstehenden Risse haben einen direkten Einfluss auf die Tragfähigkeit des Bauteils unter Belastung. Nicht nur können sie weiteres Risswachstum initiieren, sondern auch zu einem Versagen durch Aufspalten führen. Um solchen Versagensformen vorzubeugen, sind Mindestabstände einzuhalten, um eine nachhaltige und belastbare Bauweise sicherzustellen (Blaß et al. 2006). Die einzuhaltenden Mindestabstände werden mit Hilfe von Abbildung 2-2 definiert.



Legende

$a_{1/2}$: Abstand von stiftförmigen Verbindungsmitteln parallel/senkrecht zur Faser

$a_{3,t/c}$: belasteter/unbelasteter Endabstand parallel zur Faser

$a_{4,t/c}$: belasteter/unbelasteter Kantenabstand senkrecht zur Faser

α : Winkel zwischen Last und Faser

Abbildung 2-2: Definition von Abstandsparametern (E DIN EN 1995-1-1:2023-10)

Für Befestigungselemente in BSP muss außerdem unterschieden werden, ob das Verbindungsmittel in die schmale oder breite Seite eingebracht wird. Die jeweiligen Werte können Tabelle 2-1 entnommen werden.

Tabelle 2-1: Mindestabstände, Kantenabstände und Endabstände für Holzschrauben in BSP

	a_1	a_2	$a_{3,t}$	$a_{3,c}$	$a_{4,t}$	$a_{4,c}$
Breite Seite	4d	2,5d	6d	6d	6d	2,5d
Schmale Seite	10d	3d	12d	7d	5d	5d

2.2 Gelenkige Stöße

Im folgenden Abschnitt werden einige Möglichkeiten zur Ausbildung von gelenkigen Stößen zwischen einzelnen BSP-Deckenelementen vorgestellt. Häufig ausgeführte Konstruktionen sind in Abbildung 2-3 abgebildet. In der Praxis orientiert sich die Wahl der Ausführungsvariante an der vorliegenden Lastsituation (vgl. Abbildung 2-1). Bei Fugen mit Stoßdeckungsleiste werden die Schrauben durch Fugenquerkräfte $V_{y,d}$ auf Ausziehen beansprucht. Fugenzugkräfte $N_{y,d}$ und Fugenschub $N_{yx,d}$ führen hingegen vorwiegend zu einer Beanspruchung auf Abscheren. Liegen höhere Fugenquerkräfte vor, empfiehlt sich die Konstruktion einer Stufenfalz. Sie ermöglicht eine effektivere Übertragung der vertikalen Kräfte. Bei erhöhten Normalkräften können Ausführungen mit gekreuzten Schraubenpaaren eine effizientere Lösung darstellen (Wallner-Novak et al. 2018).

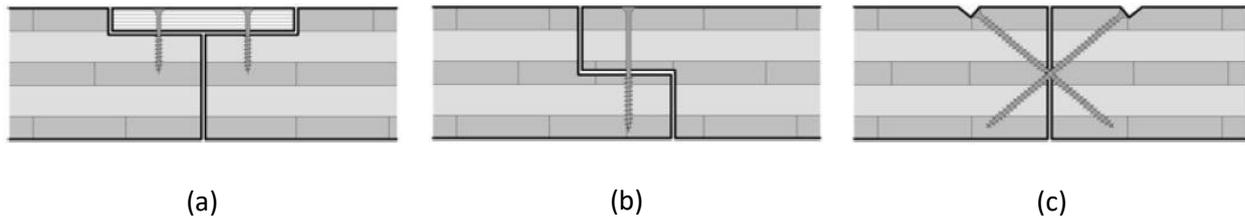


Abbildung 2-3: (a) eingefräste Stoßdeckungsleiste; (b) Stufenfalz); (c) gekreuztes Schraubenpaar (Wallner-Novak et al. 2013)

2.2.1 Fugen mit Stoßdeckungsleiste

Bei der Ausbildung mit einer Stoßdeckungsleiste werden zunächst beide BSP-Deckenelemente ausgefräst. Anschließend wird eine Decklage aus Holzwerkstoffen eingelassen und durch Holzschrauben kraftschlüssig mit den Deckenplatten verbunden (Wallner-Novak et al. 2018).

Wallner-Novak et al. (2018) leiten die Formel zur Ermittlung der erforderlichen Schraubenabstände in Richtung der Fuge für eine einwirkende Fugenquerkraft und gegebener Schraubenzugtragfähigkeit mit folgenden statischen Systemen her:

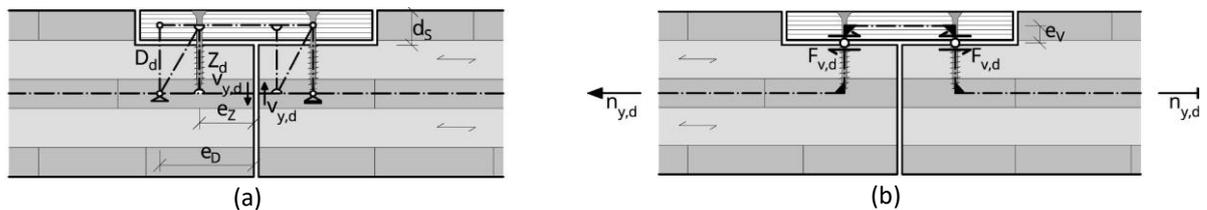


Abbildung 2-4: statisches Modell für die Übertragung von (a) Fugenquerkräften und (b) Fugenzugkräften (Wallner-Novak et al. 2018)

Die Zugkraft je Schraube aus Fugenquerkräften ergibt sich zu:

$$Z_d = v_{y,d} \cdot e_x \cdot \frac{e_D}{e_D - e_Z} \quad [\text{N}] \quad (2.4)$$

Z_d	[N]	Zugkraft je Schraube aus Fugenquerkräften
$v_{y,d}$	[N/mm]	Fugenquerkraft
e_x	[mm]	Abstand der Schraube in Fugenlängsrichtung
e_Z	[mm]	Abstand der Schraube vom Fugenrand
e_D	[mm]	Abstand der resultierenden Druckkraft vom Fugenrand

Die Abscherkraft je Schraube aus Fugenzugkräften und Fugenscherkräften kann mit Formel (2.5) ermittelt werden:

$$F_{v,d} = \sqrt{n_{y,d}^2 + n_{xy,d}^2} \cdot e_x \quad [\text{N}] \quad (2.5)$$

$F_{v,d}$	[N]	Abscherkraft je Schraube aus Fugenzugkräften und Fugenschubkräften
$n_{y,d}$	[N/mm]	Fugenzugkraft
$n_{xy,d}$	[N/mm]	Fugenschubkraft
e_x	[mm]	Abstand der Schraube in Fugenlängsrichtung

2.2.2 Fugen mit Stufenfalz

Treten höhere Fugenquerkräfte auf, ist die Konstruktion einer Stufenfalz ratsam. Die vertikalen Kräfte können hier mit Hilfe der Auflagerpressung abgetragen werden. Die nachträglich eingebrachten, stiftförmigen Verbindungsmittel dienen der Lagesicherung und nehmen außerdem die horizontal vorliegenden Fugenkräfte auf.

Bei der Konstruktion ist darauf zu achten, dass BSP-Deckenelemente mit dem Falzgrund in der Mitte der Bauteildicke zu stoßen sind (Deutsches Institut für Bautechnik 2022). Außerdem sollte bei der Planung stets genug Einbauluft eingeplant werden, um eine problemfreie Montage gewährleisten zu können. Des Weiteren kann je nach Anforderung an die Fugen durch das Einlegen von Dichtbändern eine luftdichte Verbindung hergestellt werden (Stora Enso 2021).

2.2.3 Fugen mit gekreuztem Schraubenpaar

In der Regel werden Schrauben senkrecht in Holzbauteile eingebracht und somit rechtwinklig zu ihrer Achse auf Abscheren beansprucht. Da profilierte Verbindungsmittel aber zudem über eine hohe Tragfähigkeit bei Beanspruchung auf Herausziehen verfügen, kann es Sinn machen Schrauben geneigt und somit eher in Kraftrichtung anzuordnen. So können sie sowohl auf Herausziehen wie auch auf Abscheren beansprucht werden (Blaß et al. 2006).

Werden die Schrauben in einem Winkel von 45° eingeschraubt, ergibt sich folgender Kräfteplan:



Abbildung 2-5: Widerstände des Schraubenkreuzes bei vertikaler Last (Wallner-Novak et al. 2018)

Zur Widerstandsermittlung eines Schraubenkreuzes muss zunächst der Bemessungswiderstand einer Schraube bei Axialbeanspruchung ermittelt werden:

$$F_{ax,R,d} = k_{mod} \cdot \frac{F_{t,R,k}}{\gamma_m} \quad [N] \quad (2.6)$$

$F_{ax,R,d}$	[N]	Widerstand einer Schraube bei Axialbelastung
k_{mod}	[]	Modifikationsbeiwert
$F_{t,R,k}$	[N]	Charakteristische Tragfähigkeit einer Schraube für axiale Beanspruchung
γ_m	[]	Teilsicherheitsbeiwert

Der Gesamtwiderstand des Schraubenkreuzes bei vertikaler Last ergibt sich dann zu:

$$F_{z,R,d} = \sqrt{2} F_{ax,R,d} \quad [N] \quad (2.7)$$

$F_{z,R,d}$	[N]	Gesamtwiderstand des Schraubenkreuzes bei Axialbelastung
$F_{ax,R,d}$	[N]	Widerstand einer Schraube bei Axialbelastung

Zur Ermittlung des Gesamtwiderstandes des Schraubenkreuzes bei Abscheren aus der Schraubenebene muss der design Widerstand einer Schraube lediglich mit dem Faktor zwei multipliziert werden:

$$F_{v,R,d} = k_{mod} \cdot \frac{2 F_{v,R,k}}{\gamma_m} \quad [N] \quad (2.8)$$

$F_{v,R,d}$	[N]	Gesamtwiderstand des Schraubenkreuzes auf Abscheren
$F_{v,R,k}$	[N]	Charakteristische Tragfähigkeit einer Schraube auf Abscheren
k_{mod}	[]	Modifikationsbeiwert
γ_m	[]	Teilsicherheitsbeiwert

2.3 Biegesteife Stöße

Liegen erhöhte Biegebeanspruchungen vor, die in der Fuge übertragen werden müssen, gibt es auch die Möglichkeit der Ausbildung eines biegesteifen Stoßes. Hierbei gilt es zu unterscheiden, ob in der Haupttragrichtung oder der Nebentragrichtung gestoßen wird. Die gängigsten Varianten sind in Abbildung 2-6 dargestellt.

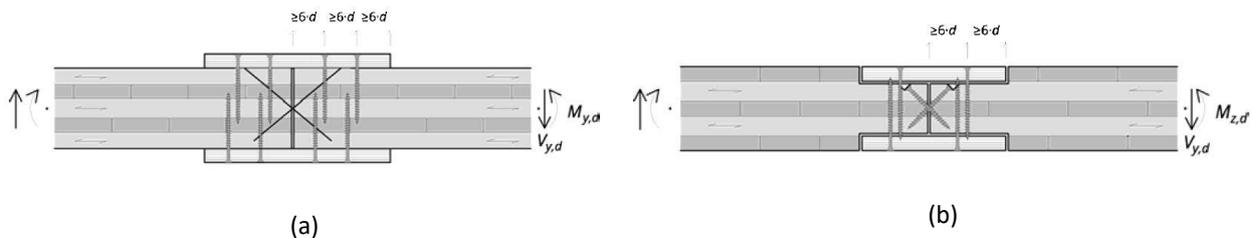


Abbildung 2-6: Biegesteifer Stoß in: (a) Haupttragrichtung; (b) Nebentragrichtung (Wallner-Novak et al. 2013)

Um die Biegemomente zu übertragen, können neben flächig angeordneten Kanthölzern und Holzwerkstoffen auch Stahlbleche zum Einsatz kommen. Liegt der Stoß in der Haupttragrichtung, wird in der Regel auf außen liegende Laschen zurückgegriffen (vgl. Abbildung 2-6 (a)). Bei einem Stoß in der Nebentragrichtung werden meist eingelassene Laschen ausgeführt (vgl. Abbildung 2-6 (b)). Die Oberflächen werden üblicherweise mit Hilfe der Schraubenpressverklebung gefügt. Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von unten und oben liegenden Lochblechen mit Rillennägeln. Der Fräsaufwand wird hierbei minimiert, was eine erhebliche Zeitersparnis mit sich bringen kann. Außerdem können relativ hohe Scherkräfte übertragen werden (Wallner-Novak et al. 2013).

2.4 Sherpa CLT-Connector

Mit dem CLT-Connector hat die Firma Sherpa erstmalig einen standardisierten Verbinder für Brettsperrholz entwickelt (vgl. Abbildung 2-7). Die Geometrie wurde speziell auf automatisierte Portalanlagen der Industrie optimiert (Sherpa 2024).

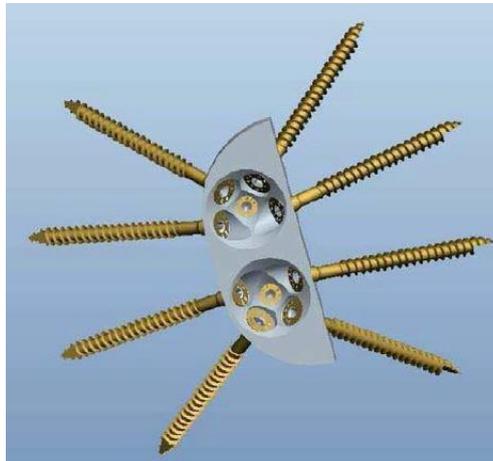


Abbildung 2-7: Sherpa CLT-Connector (Österreichisches Institut für Bautechnik 2018)

Das aus Aluminium (EN AW – 6082) bestehende Verbindungsmittel wird in die Seitenflächen von Holz oder Holzwerkstoffen eingebracht und kann neben Wand-Wand und Decke-Wand-Stößen auch in Decke-Decke-Stößen zum Einsatz kommen. Die Einfräsung kann unter Verwendung einer Schablone mit Hilfe einer Handoberfräse erfolgen. Nach kanten- und flächenbündiger Einfräsung in die Trägerplatte kann der Verbinder mit zwei vertikalen Positionierungsschrauben (6,5 x 65 mm) fixiert werden. Anschließend werden vier geneigte Sherpa Spezialschrauben mit Durchmesser 8 mm installiert. Diese sind in den Längen 100, 120 und 140 mm erhältlich (Sherpa 2024; Österreichisches Institut für Bautechnik 2018).

Dieser Prozess ist Teil der Vorfertigungsphase und erfolgt bereits im Werk. Die BSP-Elemente können somit montagefertig auf die Baustelle geliefert werden. Dort müssen nur noch die verbleibenden vier Sherpa Spezialschrauben installiert werden, was eine erhebliche Zeitersparnis bei der Montage mit sich bringt. Nach vollständiger Ausschraubung ist die ordnungsgemäße Verarbeitung für das Qualitätsmanagement leicht nachvollziehbar (Sherpa 2024).

Ein weiterer Vorteil des CLT-Connectors ist, dass die Richtungen für die Spezialschrauben fest vorgegeben sind. Somit muss auf der Baustelle nicht, wie beispielsweise bei gekreuzten Schraubenpaaren, auf den Einschraubwinkel geachtet werden. Des Weiteren können in den Fugen Zwischenlagen für die Abdichtung und den Schallschutz eingebracht werden. Hier dürfen Kompribänder jedoch nicht dicker als 2 mm sein. Die maximal zulässige Dicke eines Schalldämmers beträgt 12 mm (Österreichisches Institut für Bautechnik 2018).

Aus der ETA-18/0083 (Österreichisches Institut für Bautechnik 2018) lassen sich für die charakteristischen Widerstände folgende Werte entnehmen. Die Definition der Belastungen ist in Abbildung 2-8 ersichtlich.

Tabelle 2-2: charakteristische Tragfähigkeit des SHERPA CLT-Connectors für Schraubenlänge $l = 100 \text{ mm}$

Belastung	Fuge	Char. Tragfähigkeit [kN]	Steifigkeiten k_{ser} [N/mm]
(1) Normalkraft, Längsstoß		18,80*	9750
(2) Querkraft, Längsstoß	Komprimband $\leq 2 \text{ mm}$	10,00*	3300
(3+) Querkraft, aus der Ebene, „pos“		16,50*	3600
(3-) Querkraft, aus der Ebene, „neg“		7,00	1000
(3+) Querkraft, aus der Ebene, „pos“	Schalldämmmlager $\leq 12 \text{ mm}$	16,00*	3600
(3-) Querkraft, aus der Ebene, „neg“		5,30	870

*Die char. Tragfähigkeit darf mit dem Schraubenlängenfaktor $n_s = 1,22$ für Schraubenlängen $l = 120 \text{ mm}$ oder mit Schraubenlängenfaktor $n_s = 1,44$ für Schraubenlängen $l = 140 \text{ mm}$ multipliziert werden.

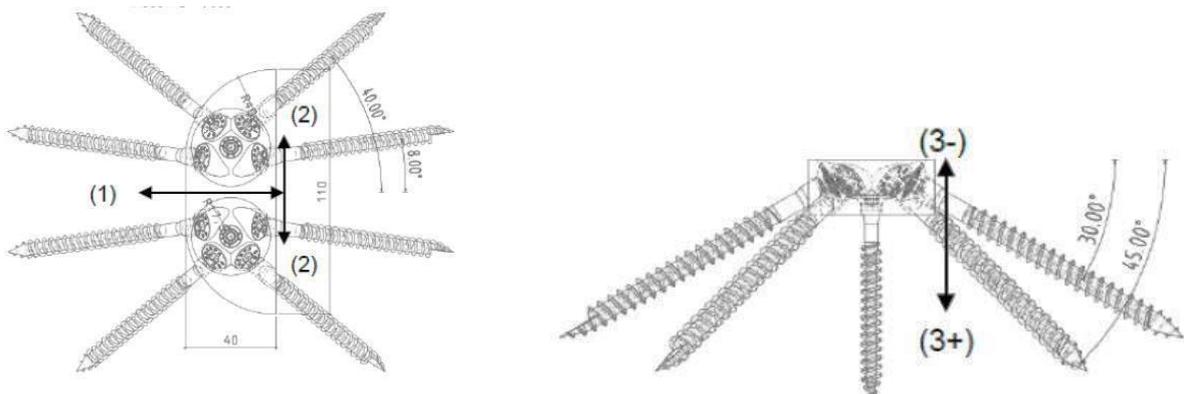


Abbildung 2-8: Definition der Belastungsrichtung (Österreichisches Institut für Bautechnik 2018)

3 Material und Methoden

3.1 Allgemeines

Im Rahmen des Forschungsprojekts LaNaSys werden fünfschichtige, einachsig tragende, hybride Brettsperrholzelemente entwickelt. Die einzelnen Elemente setzen sich also aus einer Kombination von Lamellen aus Nadelholz und Laubholz zusammen. Im Rahmen dieser Masterarbeit wird das Schubverhalten zwischen benachbarten Brettsperrholzelementen (Decke-Decke-Stoß) anhand von zwei vielversprechenden Aufbauten genauer betrachtet. Bei der ersten Variante besteht neben der oberen und der unteren Längslage auch die mittlere Längslage aus Nadelholz. Lediglich die beiden Querlagen setzen sich aus aufgelösten Laubholzlamellen zusammen. Bei der zweiten Variante wird zudem die mittlere Längslage mit auf Lücke gelegten Laubholzlamellen ausgebildet. Es bestehen somit nur obere und untere Längslage aus Nadelholz. Kennwerte wie Durchbiegung, Verformung, Schwingung und Tragfähigkeit sollen bei beiden Varianten mit einem herkömmlichen BSP vergleichbar sein.

3.2 Materialien und Geräte

3.2.1 Holz

Die verwendeten Fichtenlamellen können gemäß EN 338:2016 der Festigkeitsklasse C24 zugeordnet werden. Sie sind zwischen 20 und 40 mm hoch und weisen eine Breite zwischen 50 und 120 mm auf.

Das Besondere an den eingesetzten Buchenlamellen ist, dass sie unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit aus Restprodukten bestehen, welches bei der Schnittholz- und Furnierherstellung entsteht. Sie weisen unter anderem Risse, Ästigkeiten sowie teilweise auch morsche Einschlüsse auf (vgl. Abbildung 3-1). Die einheitliche Zuweisung einer Festigkeitsklasse ist also nicht möglich.

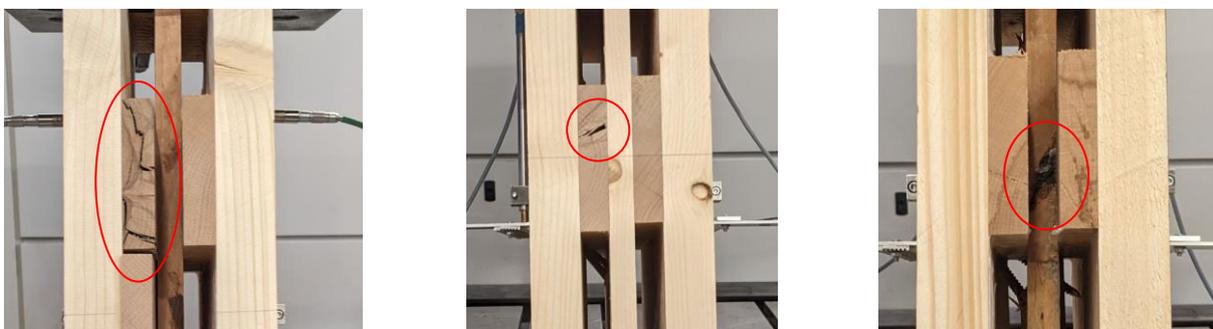


Abbildung 3-1: Mangelhaftigkeit der Buchenlamellen

In einer Versuchsreihe wurde außerdem eine Buchenholzlamelle in der Lücke der oberen Querlage eingebaut, um Vergleichswerte zu erzielen. Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Lamellen wurde hier auf die Makellosigkeit der Leisten geachtet (vgl. Anhang A.1)

Sämtliches Holz war zum Versuchszeitpunkt technisch getrocknet. Es kann also davon ausgegangen werden, dass der Feuchtegehalt bei ca. 12% lag.

3.2.2 Klebstoff

Zur Verklebung der einzelnen Holzlamellen wurde der Klebstoff „*GripPro™ Plus*“ der Firma AkzoNobel maschinell aufgetragen. Der Zweikomponenten-Klebstoff aus flüssigem Melamin-Lein und flüssigem Härter wurde durch Prüfung nach EN 301:2013 dem Klebstofftyp I zugewiesen. Genaueres kann dem Datenblatt von AkzoNobel (2013) entnommen werden.

3.2.3 Verbindungsmittel

In 5 von 6 Versuchsreihen kam der bereits in Kapitel 2.4 vorgestellte Sherpa CLT-Connector zum Einsatz. Der aus Aluminium bestehende Verbinder wurde in diesen Versuchsreihen mit den zwei Positionierungsschrauben (6,5 x 65 mm) sowie acht Sherpa Spezialschrauben ausgeschraubt, welche jeweils einen Durchmesser von 8 mm besitzen. In zwei Versuchsreihen wurden die Schrauben mit der Länge 100 mm verwendet. Bei den Restlichen wurden Schrauben mit einer Länge von 140 mm eingesetzt. Genauere Materialkennwerte lassen sich der Zulassung der Fa. Sherpa (ETA-18/0083) entnehmen.

In der sechsten Versuchsreihe wurden, wie bereits erwähnt, Buchenholzlamellen in der Lücke der oberen Querlage eingebaut. Diese wurden mit *ASSY® 4 CSMP-Universalschrauben* der Firma Würth in beiden BSP-Elementen des Versuchskörpers befestigt. Die verzinkten Schrauben, mit Vollgewinde und Senkfräskopfen, weisen einen Durchmesser von 5 mm und eine Länge von 80 mm auf. Das verwendete Schraubenbild ist in Anhang A.3.1 abgebildet.

3.2.4 Prüfmaschine

Zum Abdrücken der Prüfkörper wurde die elektromechanische Prüfmaschine Z600E der Fa. Zwick/Roell verwendet. Die Maschine kann sowohl in Zug- als auch Druckrichtung eine maximale Kraft von 600 kN aufbringen (Zwick/Roell 2024). Die Belastungsgeschwindigkeit kann weg- oder lastgesteuert erfolgen. Neben aufgebrachtener Kraft und Versuchsdauer wird auch der Weg aufgezeichnet und als Excel-Datei gespeichert. Um eine gleichmäßige Krafteinleitung zu gewährleisten, wurden unter und hinter dem Prüfkörper Stahlplatten montiert (vgl. Abbildung 3-2).



Abbildung 3-2: In Prüfmaschine eingebauter Prüfkörper

3.2.5 Wegaufnehmer

Um die Schubverformung bei Belastung aufzeichnen zu können, wurden auf der Vorderseite und der Rückseite des Prüfkörpers induktive Wegaufnehmer angebracht (vgl. Abbildung 3-2). Mit dem Wegaufnehmer WA40 der Fa. HBM können Messwege bis zu 40 mm registriert werden. Da die Versuche weggesteuert durchgeführt wurden, bildeten die aufgezeichneten Werte die Basis für die Versuchsdurchführung.

3.3 Prüfkörperkonfiguration

Aufgrund der aufgelösten Struktur der BSP-Elemente mussten zunächst die Konfigurationen mit der maximal und minimal zu erwartenden Tragfähigkeit ermittelt werden. Die verschiedenen Geometrien wurden zunächst mit Hilfe eines CAD-Programms gezeichnet. Anschließend wurden 3D-Linien in der Befestigungsmittelachse konstruiert und deren Durchstoßpunkte mit den einzelnen Lagen markiert. Daraufhin konnten die einzelnen Einbindungstiefen der Schrauben in jede Lage gemessen werden. Die einzelnen Ergebnisse für jede Prüfserie können Anhang A.2 entnommen werden.

Der maximale Schraubenanteil im Holz ermittelte sich bei BSP-Elementen der Variante 2 (Mittellage mit aufgelösten Buchenholzlamellen) bei Positionierung des CLT-Connectors über der Buchenlamelle in Querrichtung. Außerdem musste die Buchenholzlamelle in der Mittellage ihre maximale Breite, also 120 mm, am Anschnitt aufweisen. Ein Prüfkörper dieser Serie ist beispielhaft in Abbildung 3-3 abgebildet.

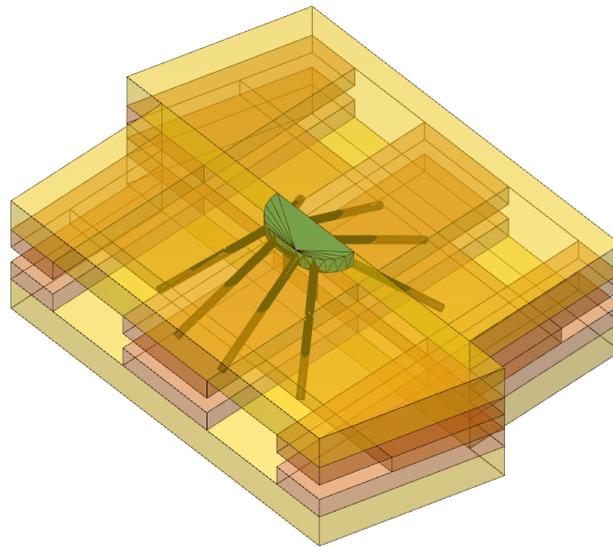


Abbildung 3-3: Prüfkörper der Serie 120-140

Der geringste Schraubenanteil im Holz stellte sich bei Positionierung des CLT-Connectors über der Lücke in der Querlage ein. Außerdem weisen die Schrauben ihren größten Anteil in der Luft auf, wenn die Buchenlamelle der Mittellage am Stoß in der Mitte halbiert wird. Die Lamelle ist am Anschnitt also 60 mm breit (vgl. Abbildung 3-4).

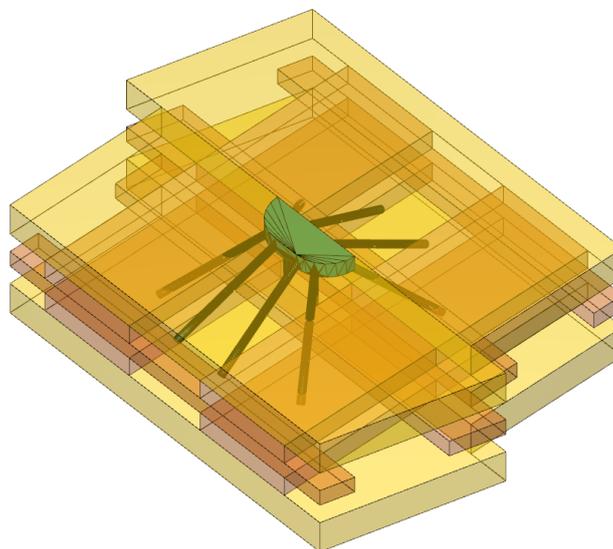


Abbildung 3-4: Prüfkörper der Serie 60-140

Von den BSP-Elementen der Variante 1 (Mittellage mit durchgängigen Fichtenlamellen) standen nur noch genug Exemplare für die Fertigung einer Prüfserie zur Verfügung. Um die maximale

Tragfähigkeit dieser Variante auszuloten, wurde entschieden den CLT-Connector, analog zu den Prüfserien 120-100 und 120-140, über der Buchenlamelle in Querrichtung zu platzieren (vgl. Abbildung 3-5).

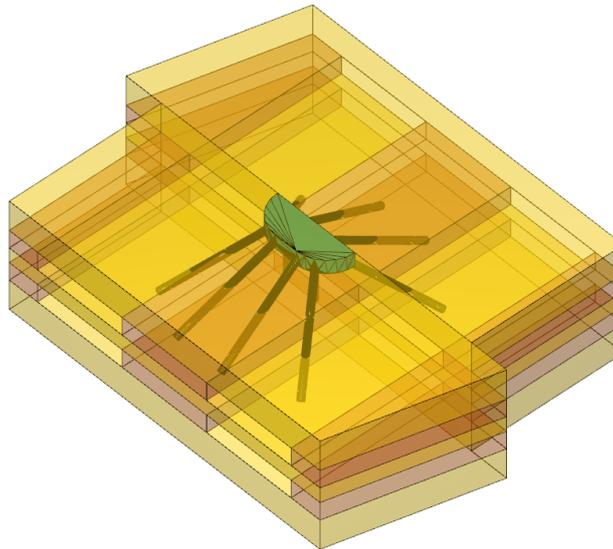


Abbildung 3-5: Prüfkörper der Serie XX-140

Um zusätzliche Vergleichswerte zwischen verschiedenen Verbindungsvarianten zu erzielen, wurde bei einer Prüfserie eine Buchenholzlamelle in der Lücke der oberen Querlage eingebaut (vgl. Abbildung 3-6). Die Stärke der Buchenholzlamelle in der Mittellage im Stoß betrug hier ebenfalls 120 mm. Das Schraubenbild mit der die Lamelle befestigt wurde, kann Anhang A.3.1 entnommen werden.

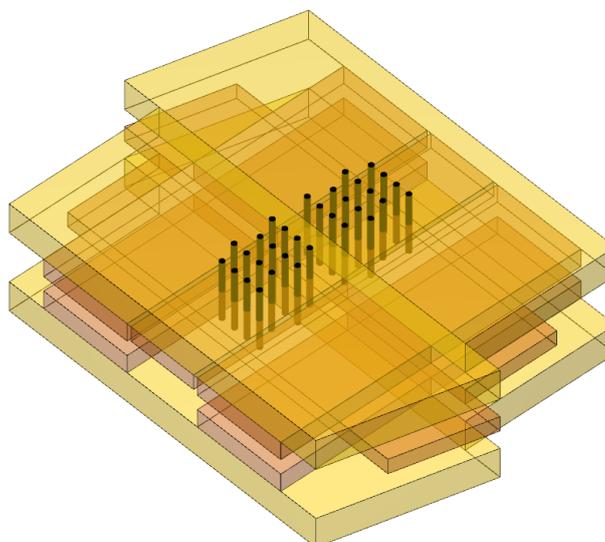


Abbildung 3-6: Prüfkörper der Serie SV-Buche

Alle Prüfkörper waren 14,8 cm hoch. Die Höhe der Fichtenlamellen der oberen und der unteren Lage betrug jeweils 4 cm. Die Höhe der Mittellage belief sich bei beiden Variationen auf 2 cm. Die restlichen 4,8 cm verteilten sich jeweils mit 2,4 cm auf die Querlagen. Die beiden BSP-Elemente, aus denen sich der Prüfkörper zusammensetzte, wiesen jeweils eine Breite von 19,7 cm auf.

Die Prüfkörper wurden außerdem in Anlehnung an EN 1193:197 um 14° abgeschrägt damit die Wirkungslinie der eingeleiteten Kraft durch den Schwerpunkt des Prüfkörpers verläuft. Die lichte Höhe eines in die Prüfmaschine eingebauten Prüfkörpers betrug 52,4 cm. Alle genaueren Abmessungen können Anhang A.3 entnommen werden.

3.4 Nomenklatur

Die Bezeichnung der Prüfkörper, bei denen der Sherpa CLT-Connector verbaut wurde, setzt sich aus der Breite der Buchenholzlamelle am Anschnitt sowie der Länge der im CLT-Connector verschraubten Verbindungsmittel zusammen. Bei Prüfkörpern der Variante 1 wird die erste Zahl mit dem Kürzel XX ersetzt, da mit Mittellage aus durchgehenden Fichtenlamellen besteht. Die Versuchsreihe mit der eingebauten Buchenlamelle wurde SV-Buche genannt, um den Unterschied zu den Prüfkörpern mit Connector hervorzuheben. Die Zahl nach dem zweiten Bindestrich beschreibt die Prüfkörpernummer.

120-140-1

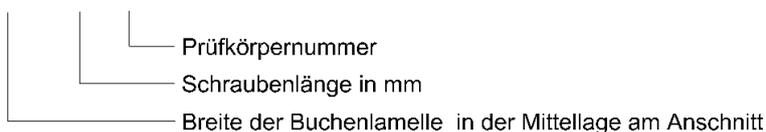


Abbildung 3-7: Beispiel für Nomenklatur eines Prüfkörpers

3.5 Prüfdurchführung

Die Versuche wurden nach DIN EN 26891:1991-07 durchgeführt (vgl. Abbildung 3-8). Zunächst muss für das Belastungsverfahren eine Höchstlast F_{est} ermittelt werden. Die Firma Sherpa gibt an, dass ein CLT-Connector, der mit 100 mm langen Schrauben in herkömmliches BSP eingebaut ist, eine Tragfähigkeit in der Ebene von 10 kN aufweist. Es kann davon ausgegangen werden, dass Firmen in der Regel für die Tragfähigkeiten ihrer Produkte ungefähr die Hälfte des tatsächlich Möglichen angeben. Die Höchstlast F_{est} wurde also mit 20 kN abgeschätzt.

Zwar gibt Sherpa für Verbinder mit 140 mm langen Schrauben eine höhere Tragfähigkeit an, aus Gründen der Einheitlichkeit und Vergleichbarkeit wurde jedoch entschieden für alle Versuche die gleichen Belastungsstufen einzuhalten.

Die Prüfungen wurden, wie bereits erwähnt, weggesteuert durchgeführt. Zunächst wurde eine Belastung mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/min aufgebracht, bis 40% der geschätzten Höchstlast erreicht wurden. Dort wurde die Belastung dann 30 Sekunden konstant auf 8 kN gehalten.

Im nächsten Belastungsintervall wurde die Kraft ebenfalls mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/min auf 10 % der geschätzten Höchstlast verringert. Auch hier wurde die Belastung für 30 Sekunden konstant auf 2 kN gehalten. Danach wurde die Last mit einer Geschwindigkeit von 3 mm/min gesteigert, bis die Bruchlast oder auf der Vorderseite des Prüfkörpers eine Verschiebung von 15 mm erreicht war.

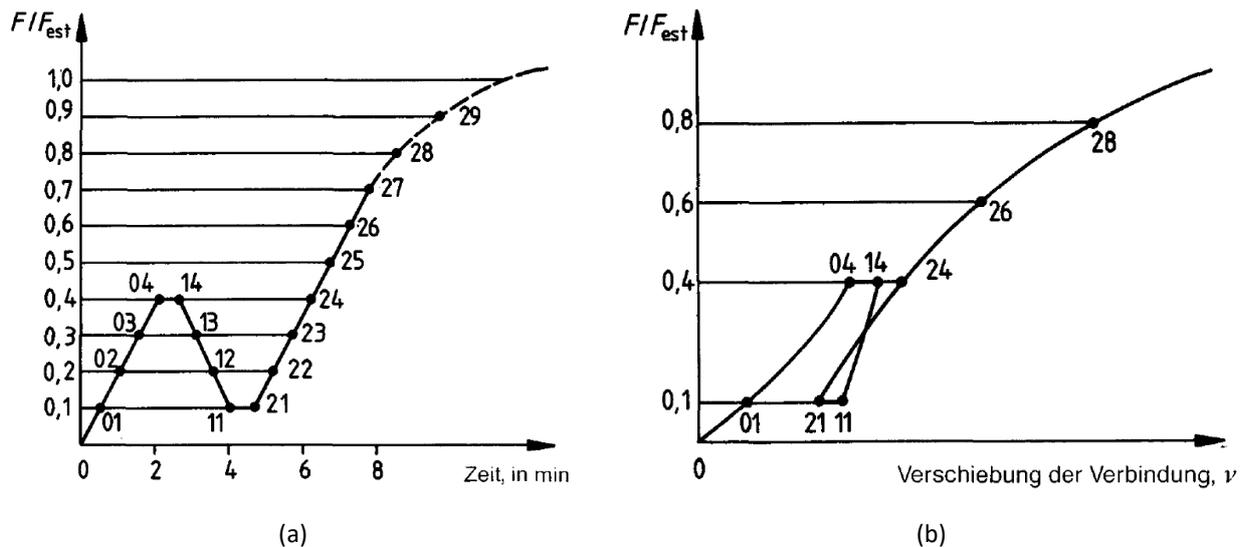


Abbildung 3-8: (a) Belastungsverfahren und (b) idealisierte Last-Verschiebungskurve (DIN EN 26891:1991-07)

3.6 Vorabschätzung der Bruchlast

Um besser zu differenzieren und die Bruchlast möglichst genau abschätzen zu können, wurden zunächst die einzelnen, im Sherpa CLT-Connector verbauten Schrauben nummeriert (vgl. Abbildung 3-9).

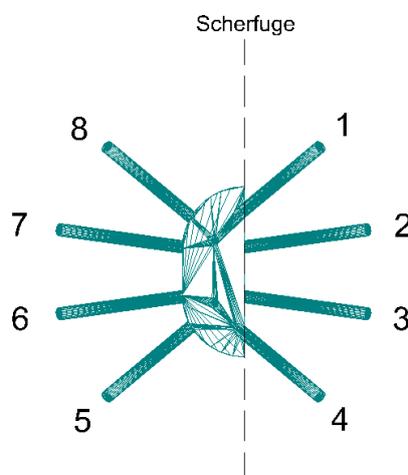


Abbildung 3-9: Nummerierung der einzelnen Schrauben

Auf der Seite in die der Connector eingefräst wurde sind neben den Schrauben 5-8, die beiden Positionierungsschrauben vorhanden. Außerdem kann sich der Connector auf dieser Seite, bei Scherbeanspruchung in die obere Lage des BSP-Elementes pressen. Dies resultiert in einer höheren Steifigkeit auf der linken Seite. Es wird also erwartet, dass die Verbindung auf der rechten Seite, in die Schraube 1-4 eingebracht sind, versagt.

Zur Ermittlung der Lochleibungsfestigkeit kommt die in Kapitel 2.1.1 vorgestellte Formel 2.1 zum Einsatz. Um genaue Ergebnisse zu erzielen, wird jede Schraube und jede Schicht einzeln betrachtet. Die Rohdichte der Nadelholzlamellen wird nach DIN EN 350:2016-12 mit 450 kg/m^3 abgeschätzt. Die Rohdichte der Buchenholzlamellen wurde im Zuge des LaNaSys Projektes zu 730 kg/m^3 bestimmt.

Der Winkel ε zwischen dem Befestigungselement und der Faserrichtung unterscheidet sich für jede Schraube und jede Lage. Die genauen Werte lassen sich mit Hilfe von Abbildung 2-8 ermitteln und sind in Tabelle 3-1 aufgeführt.

Tabelle 3-1: Winkel ε zwischen dem Befestigungselement und der Faserrichtung in [°]

	Schraube 1	Schraube 2	Schraube 3	Schraube 4
obere Lage	50	82	82	50
1. Querlage	40	8	8	40
Mittellage	50	82	82	50
2.Querlage	40	8	8	40
untere Lage	50	82	82	50

Mit Hilfe des Schraubendurchmessers $d = 8 \text{ mm}$ lässt sich nun die charakteristische Lochleibungsfestigkeit $f_{h,\varepsilon,k}$ für jede Schicht ermitteln. In der nachfolgenden Tabelle sind beispielhaft die Ergebnisse für einen Prüfkörper der Reihe 60-100 dargestellt.

Tabelle 3-2: charakteristische Lochleibungsfestigkeit $f_{h,\varepsilon,k}$ eines Prüfkörpers der Reihe 60-100 in $[\text{N/mm}^2]$

	Schraube 1	Schraube 2	Schraube 3	Schraube 4
obere Lage	12,3	19,3	19,3	12,3
1. Querlage	19,2	14,6	14,6	19,2
Mittellage	22,3	35,1	35,1	22,3
2.Querlage	19,2	14,6	14,6	19,2
untere Lage	12,3	19,3	19,3	12,3

Um die Tragfähigkeit jedes einzelnen Abschnittes zu ermitteln, wird die von den Schrauben eingedrückte Fläche, ermittelt. Dafür wird der Schraubendurchmesser mit dem in Anhang A.2 ermittelten Holzanteil des jeweiligen Abschnittes multipliziert.

Tabelle 3-3: Eingedrückte Fläche A je Abschnitt in [mm²]

	Schraube 1	Schraube 2	Schraube 3	Schraube 4
obere Lage	232	408	408	232
1. Querlage	256	0	0	256
Mittellage	40	0	0	40
2.Querlage	0	0	0	0
untere Lage	0	0	0	0

Multipliziert man die Ergebnisse für die charakteristische Lochleibungsfestigkeit mit den Ergebnissen für die Fläche, erhält man den charakteristischen Widerstand jeder Schraube für jede Lage. Die Ergebnisse für die Prüfsreihe 60-100 sind beispielhaft in Tabelle 3-4 dargestellt.

Tabelle 3-4: Widerstand F_{Rk} je Schraube je Lage in [N]

	Schraube 1	Schraube 2	Schraube 3	Schraube 4
obere Lage	2843,5	7871,0	7871,0	2843,5
1. Querlage	4924,6	0	0	4924,6
Mittellage	893,2	0	0	893,2
2.Querlage	0	0	0	0
untere Lage	0	0	0	0

Addiert man nun die einzelnen Werte aus Tabelle 3-4 miteinander, ergibt sich ein Gesamtwert für den Widerstand $F_{Rk,60-100} = 33064$ N bzw. gerundet $F_{Rk,60-100} = 33,1$ kN. Die Widerstände für die anderen Prüfreiheiten, in denen der Sherpa CLT-Connector verbaut wurde, ermitteln sich analog.

Um einen Vergleich mit herkömmlichem BSP anstellen zu können, sind in Anhang A.2.6 und A.2.7 zusätzlich die theoretischen Einbindetiefen der Schrauben in BSP mit durchgängig verlegten Lamellen aufgeführt. Es wird davon ausgegangen, dass alle Schichten aus Nadelholz mit einer Rohdichte von 450 kg/m^3 bestehen. Mit Hilfe dieser Werte können zusätzlich die erwarteten Bruchlasten für CLT-Connectoren ermittelt werden, welche mit 100 mm bzw. 140 mm langen Schrauben in herkömmlichem BSP verbaut sind.

Die Scherfestigkeit von Buchenholz wird in der Regel zwischen 6 N/mm^2 und 12 N/mm^2 abgeschätzt. Bei den Prüfkörpern mit eingebauter Buchenholzlamelle wird aufgrund der bereits in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Makellosigkeit des Materials von einer Scherfestigkeit von 12 N/mm^2 ausgegangen. Die Querschnittsfläche A der eingeschobenen Lamelle ergibt sich aus den Abmessungen zu 1800 mm^2 . Die erwartete Tragfähigkeit eines Prüfkörpers der Reihe SV-BUCHE ergibt sich also zu $F_{Rk,SV-BUCHE} = 21600$ N bzw. $F_{Rk,SV-BUCHE} = 21,6$ kN.

Die erwarteten Bruchlasten für alle Prüfreiheiten sowie für CLT-Connectoren in herkömmlichem BSP können Tabelle 3-5 entnommen werden.

Tabelle 3-5: Erwartete Bruchlast in [kN]

	SV- BUCHE	60-100	120-100	BSP-100	60-140	120-140	XX-140	BSP-140
F_{Rk}	21,6	33,1	31,5	31,5	41,5	54,8	44,9	46,0

Es lässt sich erkennen, dass die erwarteten Bruchlasten für Versuchskörper mit 100 mm langen Schrauben in AHBSP fast identisch zur Bruchlast in herkömmlichem BSP sind. Die Lücken in den Mittelschichten können also noch durch die höhere Rohdichte der Buchenholzlamellen kompensiert werden.

Bei Prüfreihe 60-140 und XX-140 werden aufgrund des hohen Luftanteils der Schrauben kleinere Bruchlasten als bei herkömmlichem BSP erwartet. Nur die geschätzte Versagenslast für Prüfreihe 120-140 ist größer. Dies liegt neben den geringen Luftanteilen der Schrauben vor allem an der höheren Rohdichte der Mittellagen.

4 Versuchsergebnisse und Auswertung

4.1 Allgemeines

Um die erwartete Bruchlast mit den Versuchsergebnissen vergleichen zu können, muss berücksichtigt werden, dass die Prüfkörper um 14° geneigt eingebaut wurden und die Kraft senkrecht eingeleitet wurde. Die von der Prüfmaschine gemessene Kraft muss also in einen Anteil parallel zu Scherfuge und einen Anteil senkrecht zur Scherfuge aufgeteilt werden. Die folgenden Graphen zeigen also Verläufe, bei denen die gemessene Kraft mit $\cos(14^\circ)$ multipliziert wurde.

Die Wegaufnehmer wurden bereits geneigt eingebaut (vgl. Abbildung 3-2). Die aufgezeichneten Verschiebungen müssen also nicht mehr abgemindert werden.

In allen Versuchsreihen, bei denen der Versuch nach Erreichen einer Verschiebung von 15 mm auf der Connector-Seite abgebrochen wurde, wird die Kraft, die bei 10 mm Verschiebung vorlag als F_{max} definiert. Bei allen anderen beschreibt F_{max} die Bruchlast.

Die Ermittlung von charakteristischen Werten aus den Versuchsergebnissen erfolgt gemäß DIN EN 14358:2016. In dieser Norm wird ein statistisches Verfahren zur Bestimmung charakteristischer Werte einer Grundgesamtheit von Vollholz bzw. Holzwerkstoffen festgelegt. Für die Bestimmung der 5%-Quantile wird eine parametrische Berechnung verwendet. Die einzelnen Prüfergebnisse jeder Versuchsreihe werden als m_1 , m_2 und m_3 bezeichnet. Der Probenumfang wird mit n definiert.

Der Mittelwert \bar{y} der Normalverteilung bzw. der logarithmischen Normalverteilung ist als Durchschnittswert der Prüfergebnisse definiert und berechnet sich nach Gleichung (4.1) bzw. (4.2).

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \quad [\text{N}] \quad \text{Mittelwert (normalverteilt)} \quad (4.1)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(m_i) \quad [\text{N}] \quad \text{Mittelwert (lognormalverteilt)} \quad (4.2)$$

Die Standardabweichung s_y ist ein Maß für die Streuung und gibt an wie weit die einzelnen Werte einer Datenreihe typischerweise vom arithmetischen Mittel abweichen. Sie berechnet sich für die Normalverteilung nach Gleichung (4.3) bzw. für die logarithmische Normalverteilung nach Gleichung (4.4).

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{y})^2} \quad [\text{N}] \quad \text{Standardabweichung (normalverteilt)} \quad (4.3)$$

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(m_i) - \bar{y})^2} \quad [\text{N}] \quad \text{Standardabweichung (lognormalverteilt)} \quad (4.4)$$

Der Variationskoeffizient COV beschreibt ein relatives Streuungsmaß und ermittelt sich nach Formel (4.5)

$$COV = \frac{s_y}{\bar{y}} \quad [\%] \quad \text{Variationskoeffizient} \quad (4.5)$$

Um das 5%-Quantil berechnen zu können muss zunächst der Beiwert $k_s(n)$ bestimmt werden. Aufgrund der geringen Stichprobenanzahl je Versuchsreihe ($n = 3$) fällt dieser groß aus.

$$k_s(n) = \frac{6,5n + 6}{3,7n - 3} \quad [] \quad \text{Beiwert} \quad (4.6)$$

Das charakteristische 5%-Quantil kann nun entweder mit der Normalverteilung oder mit der logarithmischen Normalverteilung ermittelt werden.

$$m_{0,05} = \bar{y} - k_s(n)s_y \quad [\text{N}] \quad \text{5\%-Quantilwert (normalverteilt)} \quad (4.7)$$

$$m_{0,05} = e^{\bar{y} - k_s(n)s_y} \quad [\text{N}] \quad \text{5\%-Quantilwert (lognormalverteilt)} \quad (4.8)$$

4.2 Prüfreihe SV-BUCHE

Die Prüfreihe SV-Buche ist die einzige Prüfserie, bei der kein Sherpa CLT-Connector verwendet und stattdessen eine Buchenholzlamelle in der oberen Querlage eingebaut wurde. Die Kraft-Zeit-Verläufe der einzelnen Versuche sind in Abbildung 4-1 dargestellt.

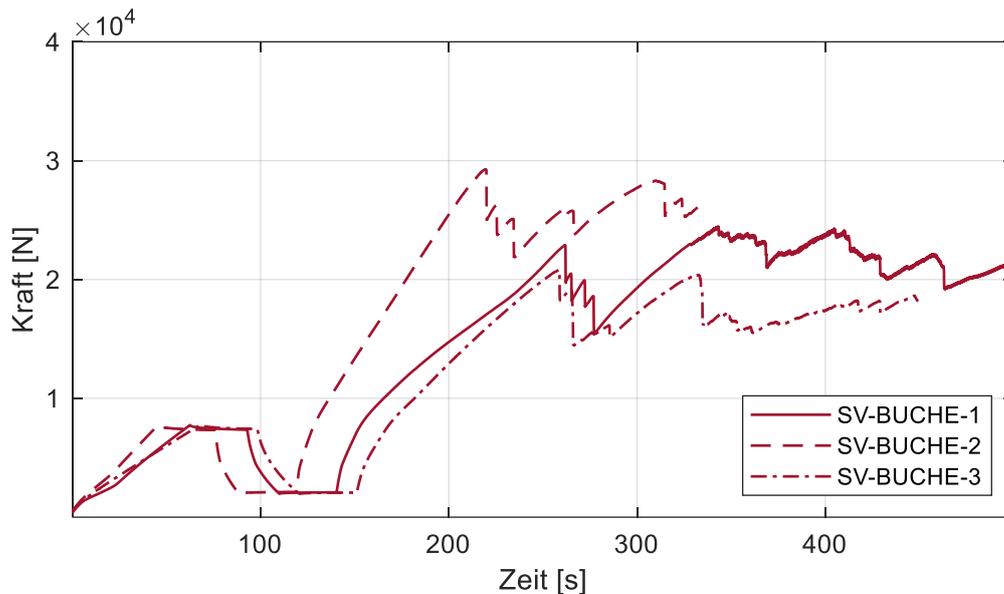


Abbildung 4-1: Kraft-Zeit-Verläufe aller SV-BUCHE Versuche

Es ist zu erkennen, dass alle Kurven bis zum Erreichen des ersten Lastplateaus bei 8 kN einen annähernd linearen Verlauf aufweisen. Nach Erreichen der ersten Bruchlast stellt sich bei allen Verläufen zunächst ein „Zick-Zack“ Muster mit jeweils 4 Sprüngen ein, bevor erneut eine kurze Laststeigerung möglich ist. Dies spricht dafür, dass die eingebauten Buchenlamellen vermutlich auf Biegezug versagt haben und jeder Sprung einer Rissbildung entlang der Faserrichtung zwischen den Schrauben der jeweils am nächsten an der Scherfuge verbauten Schraubenreihen gleichkommt. Die eingebauten Lamellen drücken sich jetzt gegen die Buchenholzlamellen der Querlagen der BSP-Elemente, womit sich die erneute Laststeigerung bis in die Nähe der ersten Bruchlast erklären lässt. Dort angekommen reißen die Bretter vermutlich erneut zwischen der ersten und der zweiten bzw. der ersten und der dritten Schraubenreihe. Alle Bruchbilder sind in Anhang A.1 abgebildet.

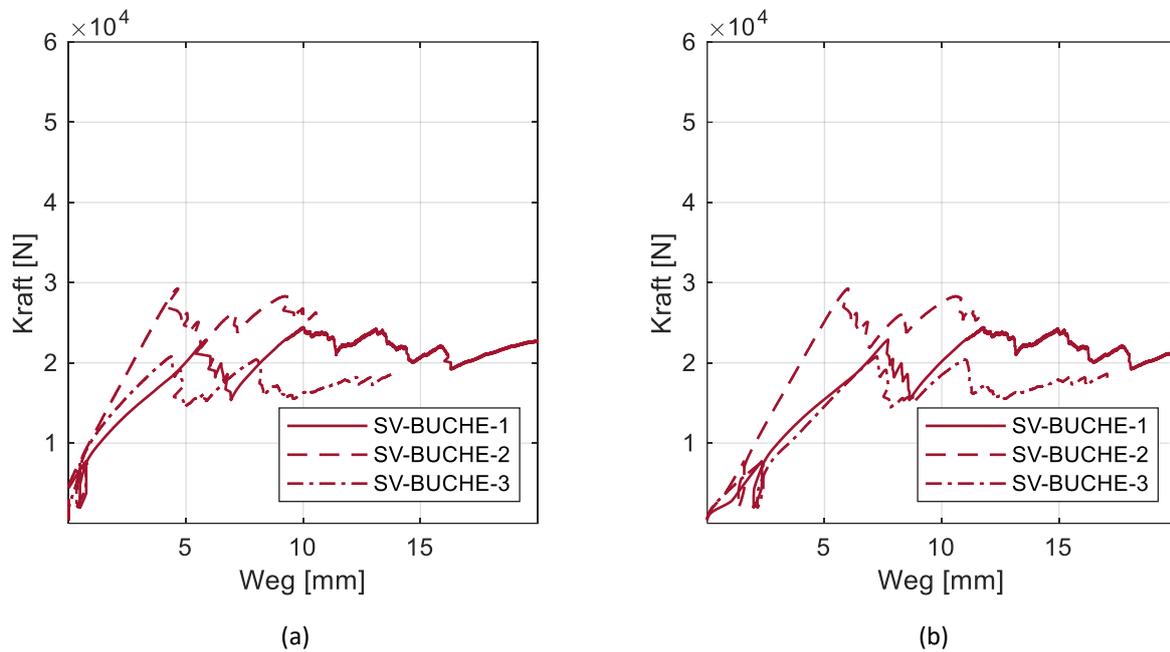


Abbildung 4-2: Kraft-Weg-Verläufe aller SV-BUCHE Versuche auf der (a) Verbindungsmittelseite und der (b) Rückseite

In Abbildung 4-2 sind die Kraft-Weg-Verläufe aller SV-BUCHE Versuche für sowohl die Verbindungsmittelseite (VS) als auch die Rückseite (RS) dargestellt. Der auffälligste Unterschied der beiden Verläufe ist, dass auf der RS größere Verformungen als auf der VS auftreten. Dies lässt sich damit begründen, dass das Buchenbrett in der oberen Querlage eingebaut wurde und sich damit eine Exzentrizität ergibt. Die einzelnen BSP-Elemente des Versuchskörpers tordieren also minimal. Außerdem lässt sich erkennen, dass sich der Prüfkörper im ersten Belastungsabschnitt im Mittel um 0,65 mm auf der VS und um 2,10 mm auf der RS verformt. Des Weiteren lässt sich erkennen, dass im Durchschnitt eine Verformung von ca. 5 mm auf der VS möglich ist, bevor die Lamelle zum ersten Mal aufreißt.

n	3
$F_{max,mean,ND}$ [N]	24840
$s_{y,ND}$ [N]	4243
COV [%]	17,1
$k_s(n)$	3,15
05ND [N]	11481
05LND [N]	14371

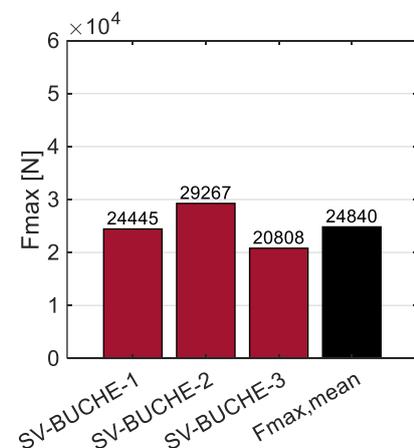


Abbildung 4-3: statistische Auswertung und F_{max} Prüfreihe SV-BUCHE

Die genauen Bruchlasten der einzelnen Prüfkörper können Abbildung 4-3 entnommen werden. Mit Hilfe dieser Ergebnisse lassen sich die in Kapitel 4.1 vorgestellten Kennwerte wie Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient und 5%-Quantil ermitteln. Die Ergebnisse für die Normalverteilung sind ebenfalls in Abbildung 4-3 dargestellt. Zusätzlich ist der 5%-Quantil Wert für die logarithmische Normalverteilung angegeben.

Vergleicht man die Bruchlasten von SV-BUCHE-3 und SV-BUCHE-2, fällt auf, dass F_{max} von SV-BUCHE-3 ungefähr den 1,4-fachen Wert von SV-BUCHE-2 aufweist. Dieser große Unterschied spiegelt sich auch im Variationskoeffizienten der Prüfreihe wider. Mit 17,1% verfügt sie, verglichen mit allen anderen Prüferien, über den größten Wert. Aufgrund der Tatsache, dass dies jedoch die einzige Prüfreihe ist, bei der ein Holzwerkstoff als Verbindungselement dient, erscheinen die Ergebnisse, aufgrund der Inhomogenität von Holz, realistisch.

4.3 Prüfreihe 60-100

In Prüfreihe 60-100 kommt nun erstmalig der Sherpa CLT-Connector zum Einsatz. Der Kraft-Zeit-Verlauf für alle Prüfkörper dieser Versuchsreihe ist in Abbildung 4-4 dargestellt.

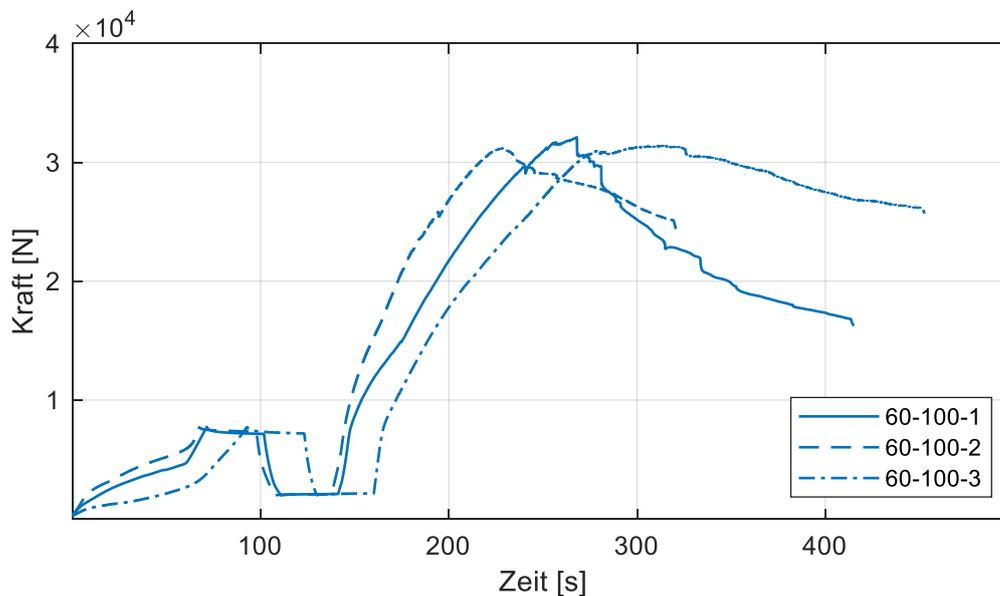


Abbildung 4-4: Kraft-Zeit-Verläufe aller 60-100 Versuche

Im Gegensatz zu den SV-BUCHE Kurven verläuft die Laststeigerung im ersten Belastungsabschnitt nicht linear. Stattdessen scheint es so, als würde sich dieser Bereich in jeweils zwei Geraden mit unterschiedlicher Steigung unterteilen. Dies lässt sich damit begründen, dass sich die Schrauben des Connectors bei Belastungsbeginn zunächst leicht in das Holz eindrücken lassen und sich beim Steigungswechsel komplett „eingehängt“ haben. Die Tatsache, dass die Graphen bei Wiederbelastung eine annähernd gleiche Steigung wie vor Erreichen des ersten Lastplateaus

aufweisen, unterstreicht diese These. Dieses Phänomen lässt sich bei allen Versuchsreihen mit dem Sherpa CLT-Connector beobachten.

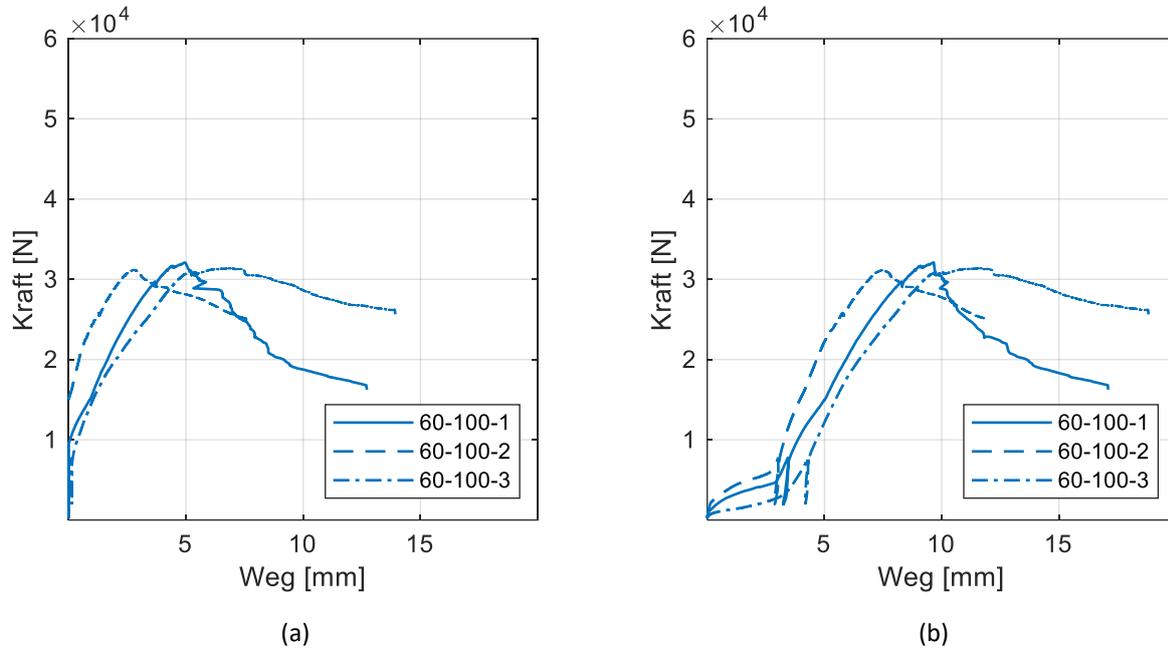


Abbildung 4-5: Kraft-Weg-Verläufe aller 60-100 Versuche auf der (a) Verbindungsmittelseite und der (b) Rückseite

Bei Betrachtung der Kraft-Weg Verläufe fällt auf, dass die ersten Verformungen auf der VS erst bei einer durchschnittlichen Last von 9,3 kN auftreten. Die RS verschiebt sich im ersten Belastungsintervall jedoch bereits um 3,59 mm. Diese Torsion tritt bei allen Versuchskörpern mit Sherpa CLT-Connector auf und ist sowohl der hohen Steifigkeit als auch dem exzentrischen Einbau des VBM geschuldet.

Die Bruchlast tritt im Mittel bei 4,34 mm Verschiebung auf der VS auf. Die obere Fichtenlamelle versagt auf Lochleibung und Schraube 2 und 3 werden im Laufe der weiteren Belastung immer weiter zusammengedrückt (vgl. Abbildung 4-6).

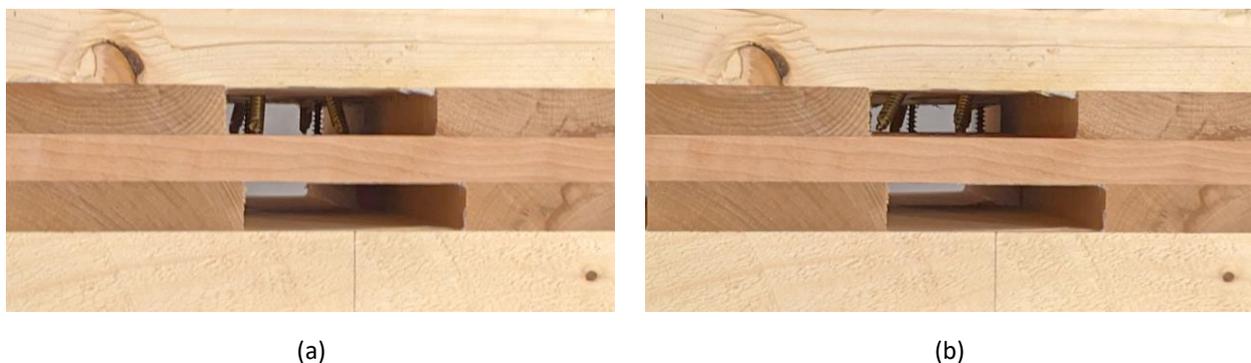


Abbildung 4-6: Prüfkörper 60-100-3 (a) vor und (b) nach dem Versuch

n	3
F_{max,mean,ND} [N]	31577
s_{y,ND} [N]	475
COV [%]	1,5
k_s(n)	3,15
05ND [N]	30082
05LND [N]	30118

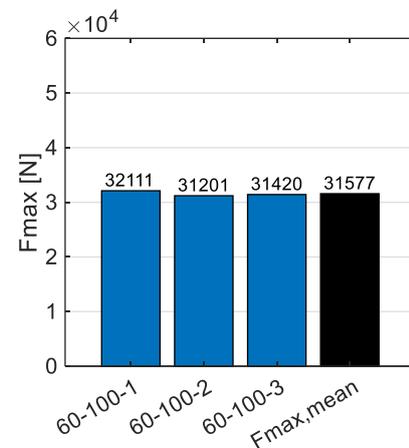


Abbildung 4-7: statistische Auswertung und F_{max} Prüfreihe 60-100

Die Prüfreihe 60-100 hebt sich durch die fast identischen Ergebnisse aller Prüfkörper von den anderen Versuchsreihen ab. Die minimalen Unterschiede spiegeln sich auch im 5%-Quantil Wert wider. Ein Unterschied von ca. 1,5 kN zum Mittelwert erscheint unter Betrachtung der geringen Stichprobenanzahl fast unrealistisch. Ein möglicher Grund dafür könnte sein, dass die maximal auf Abscheren beanspruchten Schrauben 2 und 3 in der ersten Querlage keinen Holzanteil haben, weshalb die Lochleibungsfestigkeit größtenteils von der Fichtenlage abhängig ist. Schraube 1 und 4 dringen außerdem nur minimal in die Mittellage ein, weshalb der Einfluss aus den Imperfektionen der Buchenholzlamellen minimiert ist.

4.4 Prüfreihe 120-100

In Prüfreihe 120-100 kamen ebenfalls 100 cm lange Schrauben zum Einsatz. Der Connector wurde hier jedoch über der Buchenholzlamelle der ersten Querlage platziert. Außerdem war die Buchenholzlamelle der Mittellage an der Scherfuge 120 mm breit. Bei der Betrachtung der Kraft-Weg Graphen (vgl. Abbildung 4-8) kann man erkennen, dass keine klare Bruchlast auftritt und die Versuche abgebrochen wurden, sobald sich eine Verschiebung von 15 mm auf der VS eingestellt hat.

Außerdem fällt auf, dass sich hier bereits im ersten Belastungsintervall eine kleine Verformung von durchschnittlich 0,56 mm auf der VS einstellt. Ein Grund hierfür könnte sein, dass Schraube 1 und 4 die Mittellage nur mit der Spitze streifen und auch in der ersten Querlage so gut wie kein Holzanteil vorhanden ist. Beim Abdrücken wird bei diesen beiden Schrauben also nur die weichere Fichtenlage auf Lochleibung und Herausziehen beansprucht. Auf der RS stellt sich im ersten Belastungsabschnitt eine Verschiebung von 2,88 mm ein.

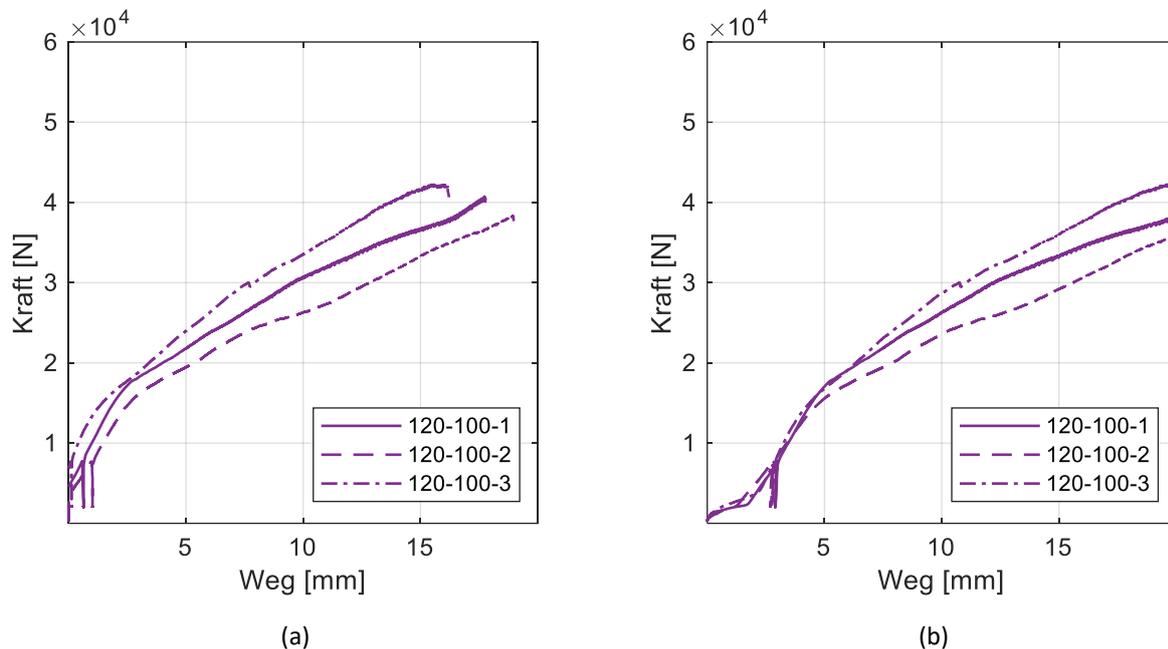


Abbildung 4-8: Kraft-Weg-Verläufe aller 120-100 Versuche auf der (a) Verbindungsmittelseite und der (b) Rückseite

Bei genauerer Betrachtung der Kraft-Verschiebungskurven kann man beobachten, dass die Verläufe ab einem bestimmten Punkt einen „Zick-Zack“ Verlauf annehmen. Das heißt, dass die Messwerte für die aufgebrachte Kraft nicht mehr kontinuierlich ansteigen, sondern zwischen höheren und niedrigeren Messwerten hin und her springen. Im Großen und Ganzen ist jedoch noch eine Steigerung möglich. Dieses Muster stellte sich bei allen Serien ein, bei denen der CLT-Connector über der Buchenholzlamelle in der ersten Querlage, eingebaut wurde. Dies könnte ein Indiz dafür sein, dass in der oberen Fichtenlage erste Lochleibungsversagen auftreten, die Lamellen jedoch durch die Buchenlamellen mit ihrer höheren Steifigkeit am Aufreißen gehindert werden.

Vergleicht man die Prüfkörper der Reihe 120-100 vor und nach dem Versuch, so fällt auf, dass Schraube 4 bei allen Versuchskörpern (exemplarisch 120-100-2 in Abbildung 4-9) nach der Belastung eine flachere Neigung als davor aufweist. Des Weiteren stellt sich in der Mittellage eine Mischung aus Lochleibungs- und Herausziehversagen ein.



(a)

(b)

Abbildung 4-9: Prüfkörper 120-100-2 (a) vor und (b) nach dem Versuch

Da sich bis zur Verschiebung von 15 mm auf der VS kein charakteristisches Versagen einstellte, wurden die Prüfkörper im Anschluss an die Prüfung noch weiter abgedrückt (vgl. Abbildung 4-10). Hierbei scherten die Köpfe von Schraube 2,3 und 4 ab. Schraube 1 drückte sich aus dem Connector. An der Unterseite ließ sich außerdem ein Druckversagen der Fichtenlamelle beobachten. Beim Blick in die Scherfuge wird deutlich, dass ein Mischversagen aus Abscheren und Lochleibung vorliegt.



Abbildung 4-10: CLT-Connector nach Abdrücken

n	3
$F_{max,mean,ND}$ [N]	30134
$s_{y,ND}$ [N]	3644
COV [%]	12,1
$k_s(n)$	3,15
05ND [N]	18662
05LND [N]	20359

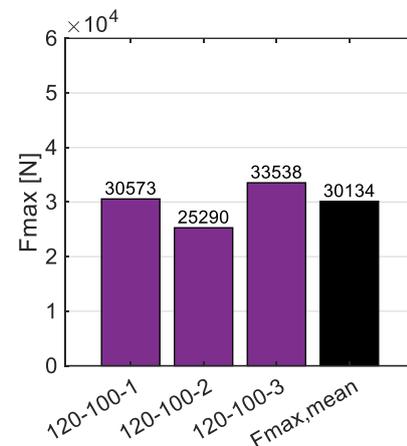


Abbildung 4-11: statistische Auswertung und F_{max} Prüfreihe 120-100

Bei Betrachtung der Maximallasten der einzelnen Prüfkörper fallen große Unterschiede auf. Prüfkörper 120-100-2 beispielsweise verfügt lediglich über ca. 75% der Tragfähigkeit von Prüfkörper 120-100-3. Schaut man sich jedoch die Lamellen der oberen Querlage von Prüfkörper 120-100-2 genauer an (vgl. Abbildung 4-9), so fällt auf, dass diese bereits vor der Prüfung gerissen war. Dies impliziert, dass diese Imperfektion der Buchenholzlamelle einen negativen Einfluss auf die Tragfähigkeit hatte.

4.5 Prüfreihe 60-140

In Prüfreihe 60-140 kommen zum ersten Mal 140 mm lange Schrauben zum Einsatz. Die Buchenlamelle der Mittellage ist am Anschnitt, analog zu Prüfreihe 60-100, 60 mm breit. Der Connector wurde auch hier über der Lücke eingebaut.

Auch bei dieser Prüfserie können genaue Bruchlasten für die einzelnen Versuchskörper ermittelt werden (vgl. Abbildung 4-12). Eine Verformung stellt sich auf der VS erst bei einer Last von gemittelt 8,8 kN ein. Die RS verformt sich auch hier schon früher und weist im ersten Belastungsabschnitt bereits eine Verschiebung von durchschnittlich 2,93 mm auf. Beim Bruch der Prüfkörper lag der Versatz der einzelnen Prüfkörpererelemente auf der VS im Mittel bei 5,7 mm.

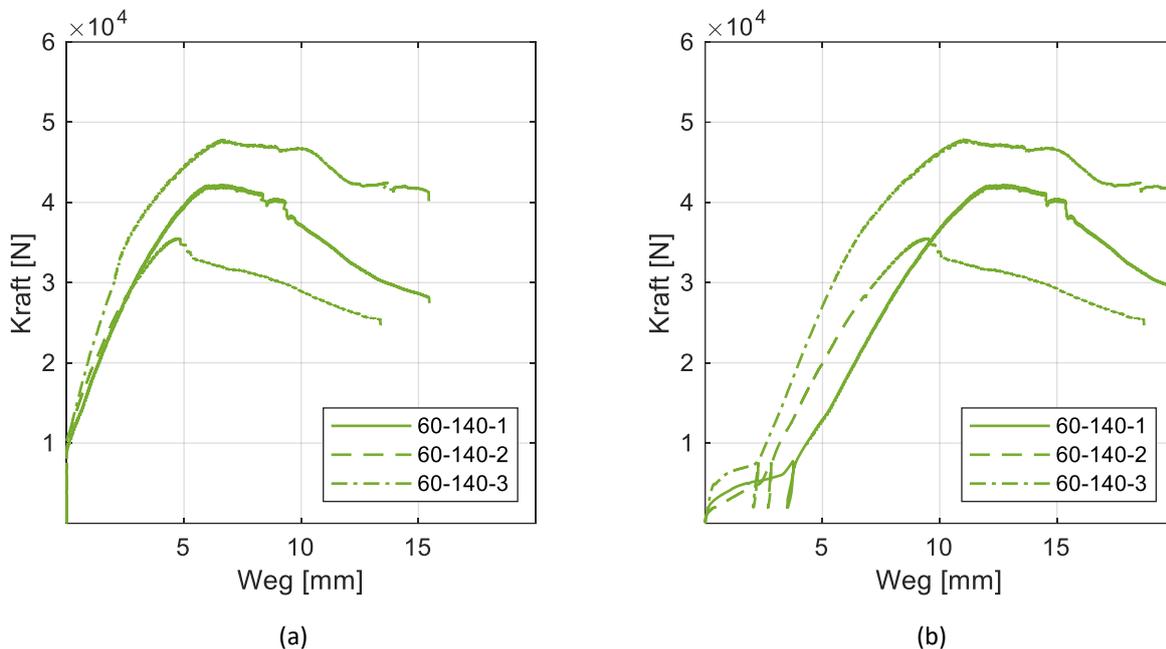


Abbildung 4-12: Kraft-Weg-Verläufe aller 60-140 Versuche auf der (a) Verbindungsmittelseite und der (b) Rückseite

Betrachtet man den vorher-nachher Vergleich des Prüfkörpers 60-140-2 (vgl. Abbildung 4-13), erkennt man den gleichen Versagensmechanismus wie bei den Prüfkörpern der Serie 60-100. Die obere Fichtenlamelle versagt auf Lochleibung und reißt im Bereich von Schraube 2 und 3 auf.



Abbildung 4-13: Prüfkörper 60-140-2 (a) vor und (b) nach dem Versuch

Bei Vergleich der Bruchlasten fallen auch hier große Unterschiede zwischen den einzelnen Prüfkörpern auf. Die Tragfähigkeit von 60-140-2 beträgt lediglich 74% der Tragfähigkeit von 60-140-3. Diese Differenz wird auch durch den hohen Variationskoeffizienten verdeutlicht. Eine mögliche Erklärung für diese Abweichungen ist die Länge der verwendeten Schrauben. In Abbildung 4-16 ist beispielsweise gut zu erkennen, dass die Schrauben trotz vorgegebener Richtung nicht immer über den vordefinierten Einschraubwinkel verfügen. Da die Schrauben 1 und 4 im Idealfall über einen Holzanteil in allen drei Buchenholzlagen verfügen sollten (vgl. Anhang A.2.3), ergeben sich entlang der Schraubenachse viele Zufallsfaktoren, die Einfluss auf die Tragfähigkeit haben.

n	3
$F_{max,mean,ND}$ [N]	41919
$s_{y,ND}$ [N]	6163
COV [%]	14,7
$k_s(n)$	3,15
05ND [N]	22515
05LND [N]	26023

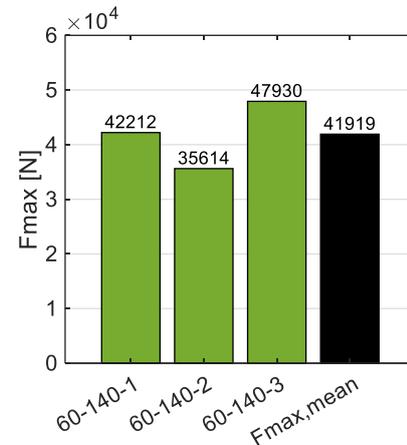


Abbildung 4-14: statistische Auswertung und F_{max} Prüfreihe 60-140

4.6 Prüfreihe 120-140

In Prüfreihe 120-140 wird nun wieder die Konfiguration aus Serie 120-100 verwendet. Der einzige Unterschied ist, dass die eingebauten Schrauben 140 mm lang sind.

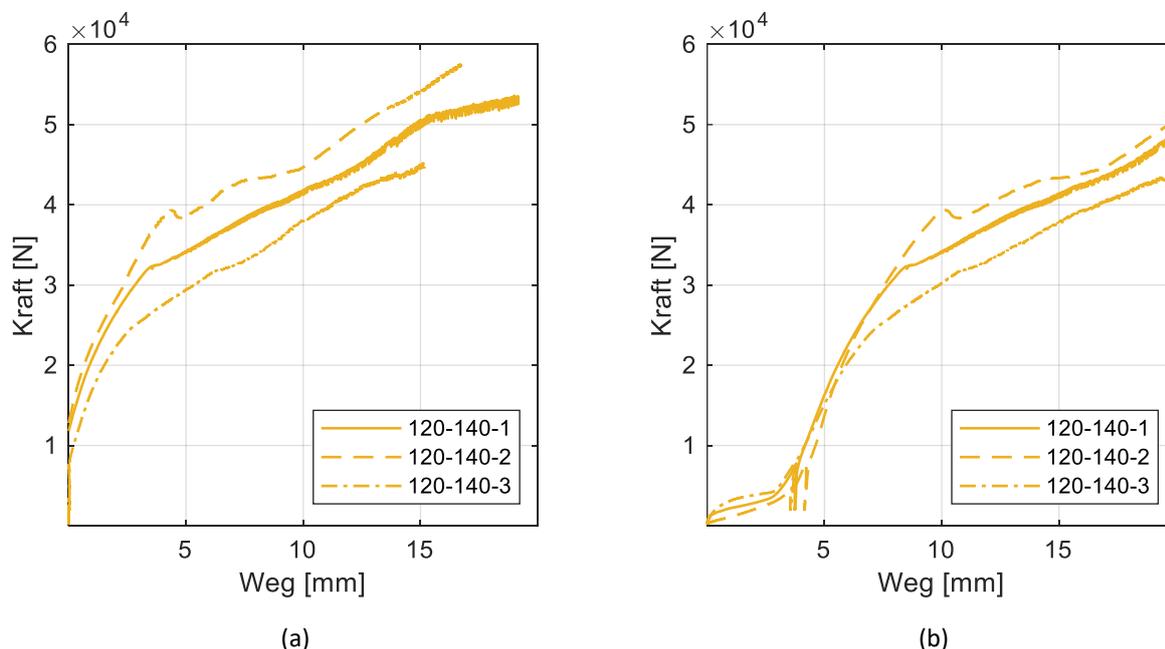
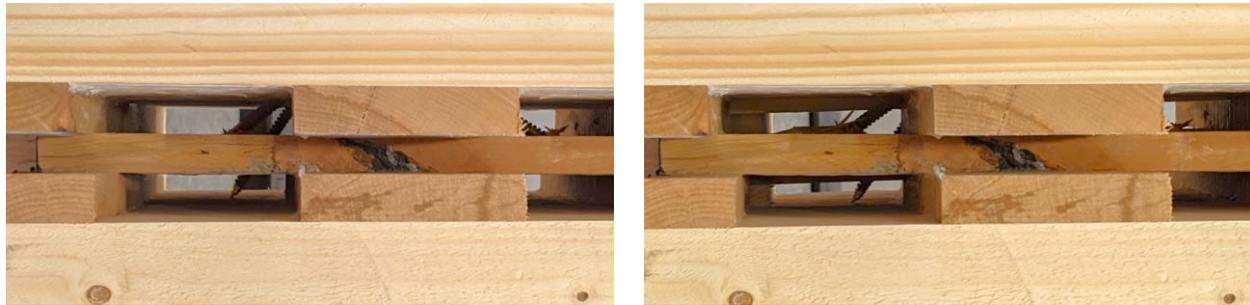


Abbildung 4-15: Kraft-Weg-Verläufe aller 120-140 Versuche auf der (a) Verbindungsmittelseite und der (b) Rückseite

In Abbildung 4-15 wird deutlich, dass die Verschiebung auf der VS erst bei einer mittleren Kraft von 9,2 kN einsetzt. Auf der RS wurde jedoch erneut eine Verformung von durchschnittlich 3,91 mm im ersten Belastungsabschnitt gemessen. Außerdem stellt sich ab einem bestimmten Zeitpunkt der bereits in Prüfreihe 120-100 diskutierte „Zick-Zack“ Verlauf ein. Auch hier wurden die Versuche nach Erreichen einer Verschiebung von 15 mm auf der VS abgebrochen.



(a)

(b)

Abbildung 4-16: Prüfkörper 120-140-2 (a) vor und (b) nach dem Versuch

Analog zu Versuchsreihe 120-100 weist Schraube 4 nach dem Versuch eine flachere Neigung als zuvor auf. Auch hier stellt sich an der Schraubenspitze von Schraube 4 eine Mischung aus Lochleibungs- und Herausziehversagen ein. Nach komplettem Abdrücken stellt sich für den Connector das gleiche Versagensbild wie bei Prüfreihe 120-100 ein (vgl. Abbildung 4-10)

n	3
$F_{max,mean,ND}$ [N]	41486
$s_{y,ND}$ [N]	3383
COV [%]	8,2
$k_s(n)$	3,15
05ND [N]	30837
05LND [N]	31948

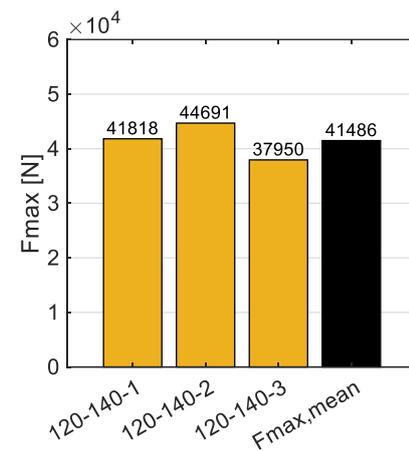


Abbildung 4-17: statistische Auswertung und F_{max} Prüfreihe 120-140

Bei Betrachtung der Versuchsergebnisse für F_{max} fällt auf, dass diese für die Prüfkörper der Reihe 120-140 vergleichsweise nah beieinander liegen. Dies zeigt sich auch im Variationskoeffizienten von 8,2%, welcher den zweit kleinsten Wert für alle Prüfreihe aufweist.

4.7 Prüfreihe XX-140

Als Prüfserie der Variante 1 besteht die Mittellage der Versuchsreihe XX-140 neben der oberen und der unteren Längslage auch aus einer durchgängigen Schicht Fichtenlamellen. Auch hier werden 140 mm lange Schrauben im CLT-Connector verbaut.

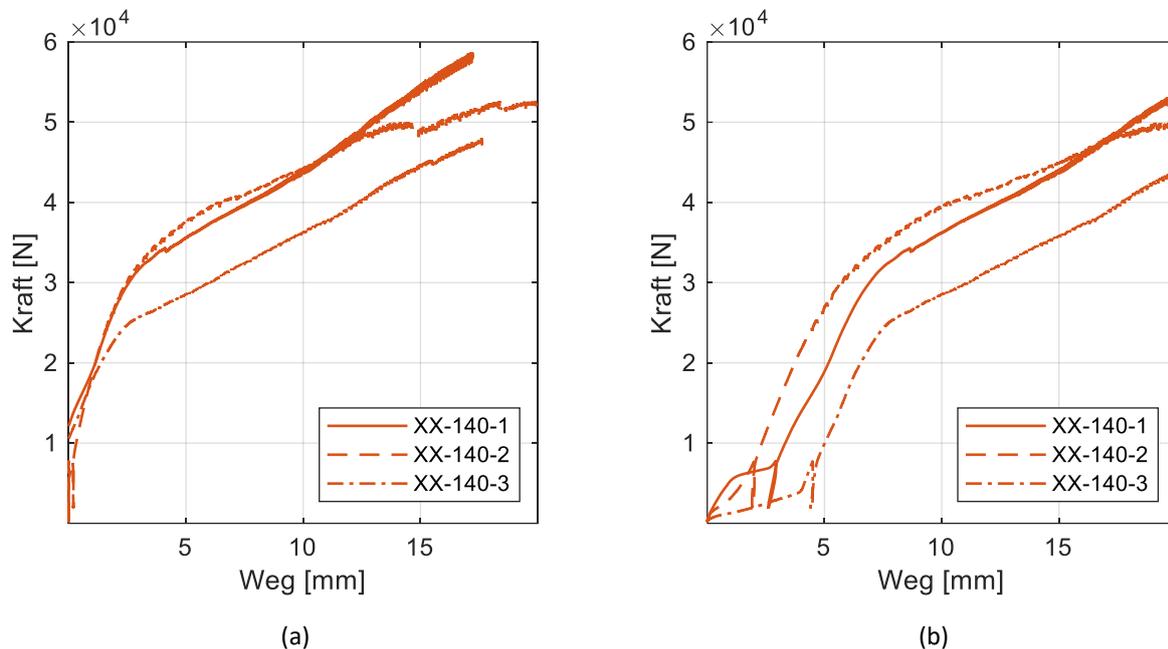


Abbildung 4-18: Kraft-Weg-Verläufe aller XX-140 Versuche auf der (a) Verbindungsmittelseite und der (b) Rückseite

Die ersten Verschiebungen auf der VS stellten sich bei dieser Versuchsreihe bei einer durchschnittlichen Belastung von 8,9 kN ein. Auf der RS wiesen die Prüfkörper beim Erreichen des ersten Lastplateaus im Mittel eine Verformung von 3,15 mm auf. Wie schon in Prüfreiien 120-100 und 120-140 ist auch in Serie XX-140 das „Zick-Zack“ Muster erkennbar. Der Versuchsabbruch erfolgt auch hier nach Erreichen einer Verschiebung von 15 mm auf der VS.

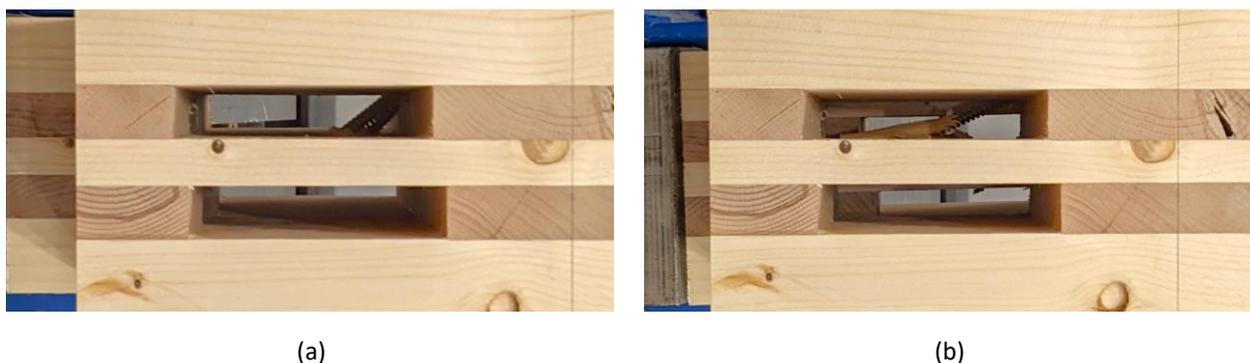


Abbildung 4-19: Prüfkörper XX-140-2 (a) vor und (b) nach dem Versuch

Genau wie bei Versuchsreihe 120-100 und Versuchsreihe 120-140 weist Schraube 4 nach dem Versuch eine flachere Neigung also zuvor auf. Auch hier stellt sich in der Mittellage eine Mischung aus Lochleibungs- und Herausziehversagen ein. Neben den Prüfreiien 120-100 und 120-140 stellte sich auch bei Serie XX-140 nach komplettem Abdrücken des Prüfkörpers das gleiche Versagensbild ein (vgl. Abbildung 4-10).

n	3
$F_{max,mean,ND}$ [N]	41462
$s_{y,ND}$ [N]	4507
COV [%]	10,9
$k_s(n)$	3,15
05ND [N]	27275
05LND [N]	28966

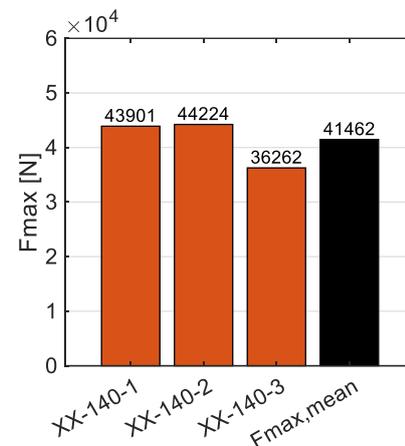


Abbildung 4-20: statistische Auswertung und F_{max} Prüfreihe XX-140

In dieser Prüfreihe wird eine geringe Differenz zwischen den Versuchsergebnissen durch den drittkleinsten Variationskoeffizienten verdeutlicht. Dies hängt vermutlich damit zusammen, dass die maximal auf Abscheren beanspruchten Schrauben 2 und 3 auch hier in den Lamellen in Querrichtung verschraubt sind. Außerdem sind $F_{max,mean}$ dieser Versuchsreihe und $F_{max,mean,120-140}$ beinahe identisch. Diese Beobachtung erscheint realistisch, da die Schrauben bei beiden Versuchsreihen in der Theorie auf der schwächeren Seite (Schraube 1-4) den gleichen Holzanteil aufweisen (vgl. Anhang A.2.4 und A.2.5). Der einzige Unterschied ist, dass die Mittellage bei XX-140 aus Fichtenholz und bei 120-140 aus Buchenholz besteht. Aufgrund der Tatsache, dass die beiden Mittelwerte so nah beieinander liegen, kann davon ausgegangen werden, dass die unterschiedlichen Rohdichten der Mittellagen so gut wie keinen Einfluss auf das Verformungsverhalten des CLT-Connectors haben.

4.8 Vergleiche

4.8.1 Verformungsverhalten

Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Prüfreiheiten noch einmal miteinander verglichen. Hierzu sind in Abbildung 4-21 die Kraft-Weg Verläufe aller Prüfreiheiten in einem Diagramm abgebildet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde pro Serie jeweils nur die Kurve des Prüfkörpers dargestellt, der dem mittleren Verlauf der Versuchsreihe am nächsten kommt.

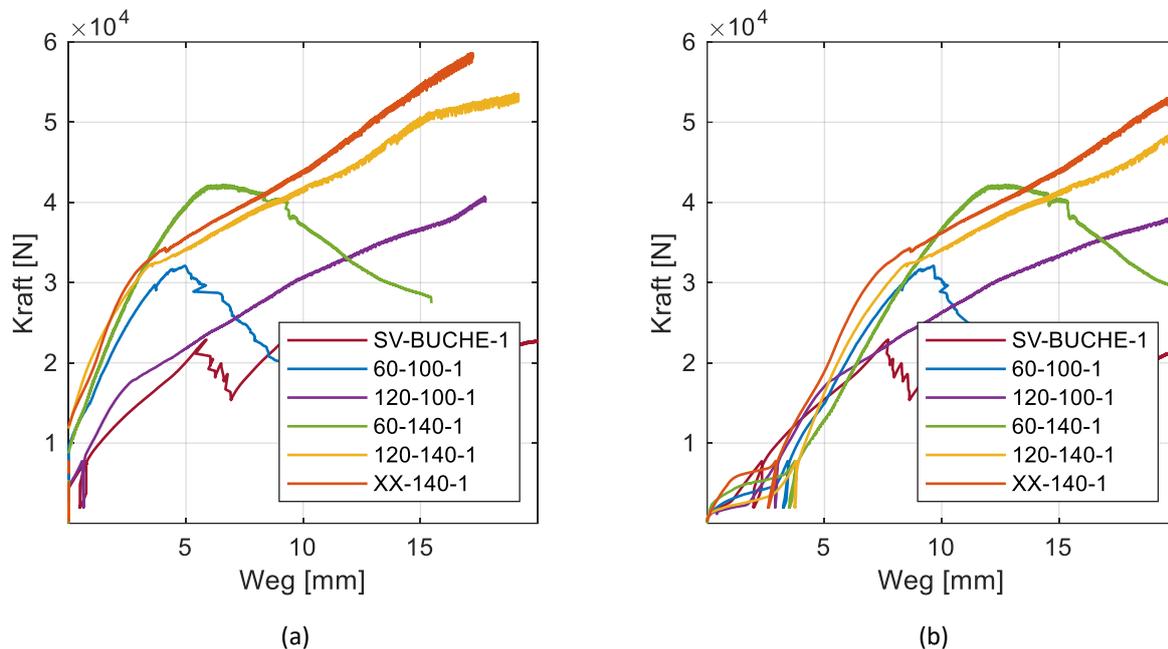


Abbildung 4-21: Kraft-Weg-Verläufe ausgewählter Prüfkörper aller Versuchsreihen auf der (a) Verbindungsmittelseite und der (b) Rückseite

Es wird erneut deutlich, dass bei den Reihen SV-BUCHE, 60-100 und 60-140 eine klare Bruchlast ermittelt werden konnte. Bei den restlichen Versuchsreihen wurden die Versuche nach Erreichen einer Verschiebung von 15 mm auf der VS abgebrochen. Betrachtet man die Verläufe der Serien 120-100, 120-140 und XX-140 genauer, so fällt auf, dass die Kurven ab Eintreten der ersten Verschiebungen in zwei Geraden, unterschiedlicher Steigungen, unterteilt werden können. Außerdem wird deutlich, dass die bereits oben genannten Fluktuationen im Verlauf kurz nach dem Steigungswechsel beginnen und mit zunehmender Kraft bzw. zunehmendem Weg größer werden. In den Versuchsreihen 60-100 und 60-140 ist dieser Steigungswechsel nicht erkennbar. Hier tritt lediglich die erste Steigung, welche annähernd gleich zu den anderen Prüfreiheiten mit CLT-Connector ist, bis zum Versagen auf. Diese Beobachtung bestärkt die in Kapitel 4.4 geäußerte Theorie, dass beim Steigungswechsel erste Versagen in der Fichtenlage auftreten.

Aufgrund der Tatsache, dass der CLT-Connector bei diesen Prüfreiheiten über der Buchenlamelle in Querrichtung eingebaut wurde, zeigt sich, dass die Platzierung des Verbindungsmittels einen signifikanten Einfluss auf das Tragverhalten bzw. auf die Versagensform hat. Außerdem wird die Wichtigkeit von Schraube 2 und 3 für die Querkrafttragfähigkeit in Längsrichtung deutlich. Besitzen sie keinen Holzanteil in der ersten Querlage bzw. Mittellage, versagen die Prüfkörper auf Lochleibung.

Zudem lässt sich beobachten, dass erste Verschiebungen auf der VS bei Prüfkörpern mit CLT-Connector erst bei einer Belastung von ungefähr 10 kN auftreten. Damit wird die erhöhte Steifigkeit des CLT-Connectors im Vergleich zur Ausbaue Variante mit Buchenholzlamelle als VBM erneut verdeutlicht.

4.8.2 Bruchlast

In Abbildung 4-22 sind alle Ergebnisse F_{max} für jeden Prüfkörper dargestellt, um die Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchsreihen zu verdeutlichen. Hier ist erneut ersichtlich, dass sich die größten Unterschiede bei der Prüfreihe SV-Buche eingestellt haben. Bei den Prüfreiheiten mit 100 mm langen Schrauben können geringe Unterschiede der einzelnen Bruchlasten beobachtet werden. Im Vergleich zu den Versuchsreihen mit 100 mm langen Schrauben ist die Tragfähigkeit bei den Prüfreiheiten mit 140 mm langen Schrauben erhöht.

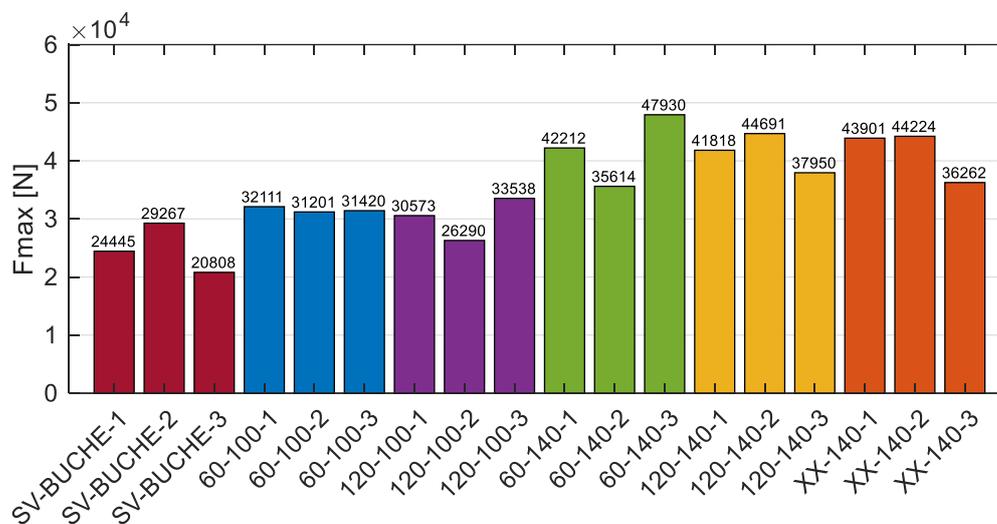


Abbildung 4-22: F_{max} für jeden Prüfkörper

In Abbildung 4-23 sind für alle Versuchsreihen neben dem errechneten Wert für die Bruchlast auch die Mittelwerte der Versuchsreihen abgebildet. Vergleicht man nun die errechnete Bruchlast mit der mittleren Bruchlast aus den Versuchen, fällt auf, dass die Berechnung der Lochleibungsfestigkeit eine adäquate Annäherung für die Ermittlung der Bruchlast beschreibt. Außerdem ist ersichtlich, dass die experimentell ermittelten Werte in der Regel minimal kleiner als die errechneten Werte sind. Ein Grund dafür könnte neben den Imperfektionen der Buchenlamellen auch die Tatsache sein, dass manche Schrauben in den Mittellagen nur über einen minimalen Holzanteil am Rand der Lamelle verfügen, welcher kaum zur Tragfähigkeit beiträgt. Der einzige signifikante Unterschied lässt sich bei Prüfreihe 120-140 feststellen. An dieser Stelle muss jedoch erwähnt werden, dass bei allen Versuchsreihen, bei denen keine klare Bruchlast ermittelt werden konnte, die Last bei einer Verschiebung von 10 mm als F_{max} definiert wird. Blickt man zurück auf Abbildung 4-15, so ist erkenntlich, dass nach dem Erreichen der Verschiebung von 10 mm noch eine Laststeigerung möglich ist, ohne dass ein Versagen eintritt.

Vergleicht man die einzelnen Versuchsreihen mit gleich langen Schrauben miteinander, fällt auf, dass alle Serien mit 140 mm langen Schrauben trotz unterschiedlicher Geometrie fast identische Werte für F_{max} aufweisen. Auch hier muss jedoch wieder darauf geachtet werden, dass bei den Prüfkörpern der Prüfreihe 60-140 eine klare Bruchlast ermittelt werden konnte und die abgebildeten

Werte für Prüferie 120-140 und XX-140 die aufgebrauchte Last bei 10 mm Verschiebung beschreiben. Wie bereits in Kapitel 4.7 erwähnt verfügen die Schrauben dieser beiden Prüferien über identische Holzanteile. Dies lässt schlussfolgern, dass die unterschiedlichen Rohdichten der Mittellagen, zumindest bis zum Erreichen einer Verschiebung von 10 mm, keinen Einfluss auf das Verformungsverhalten des VBM haben.

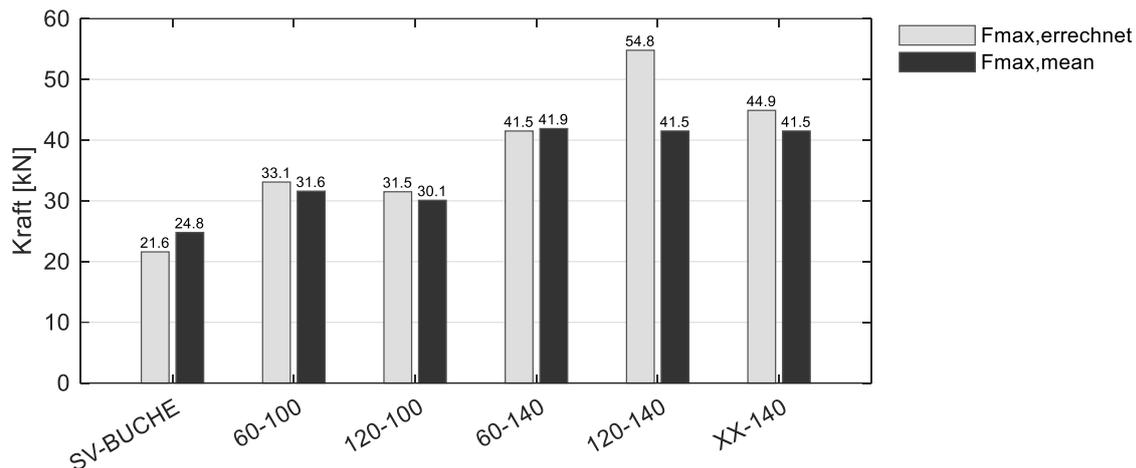


Abbildung 4-23: $F_{max,errechnet}$ und $F_{max,mean}$ für jede Prüferie

Beim Vergleich von Prüfkörpern mit gleicher Geometrie aber unterschiedlicher Schraubenlänge lässt sich eine Steigerung der Tragfähigkeit bei Verwendung von längeren Schrauben beobachten. Prüferie 60-100 weist eine mittlere Tragfähigkeit von 31,6 kN auf. Bei Serie 60-140 konnte dieser Wert durch Verwendung von 140 mm langen Schrauben um 32,5% gesteigert werden. Stellt man nun die Ergebnisse von Prüferie 120-100 und 120-140 gegenüber, kann auch hier eine Erhöhung der Tragfähigkeit um 37,8% beobachtet werden. Die von der Fa. Sherpa ermittelten 44% (vgl. Tabelle 2-2) für herkömmliches BSP können jedoch nicht eingehalten werden.

Bei Gegenüberstellung des 5%-Quantilwertes und der mittleren Bruchlast (vgl. Abbildung 4-24) lassen sich in allen Prüferien, mit Ausnahme von Serie 60-100, sehr große Unterschiede feststellen. Dies ist neben der geringen Stichprobenanzahl auch den teilweise großen Differenzen in den einzelnen Prüfungsergebnissen (vgl. Abbildung 4-22) geschuldet.

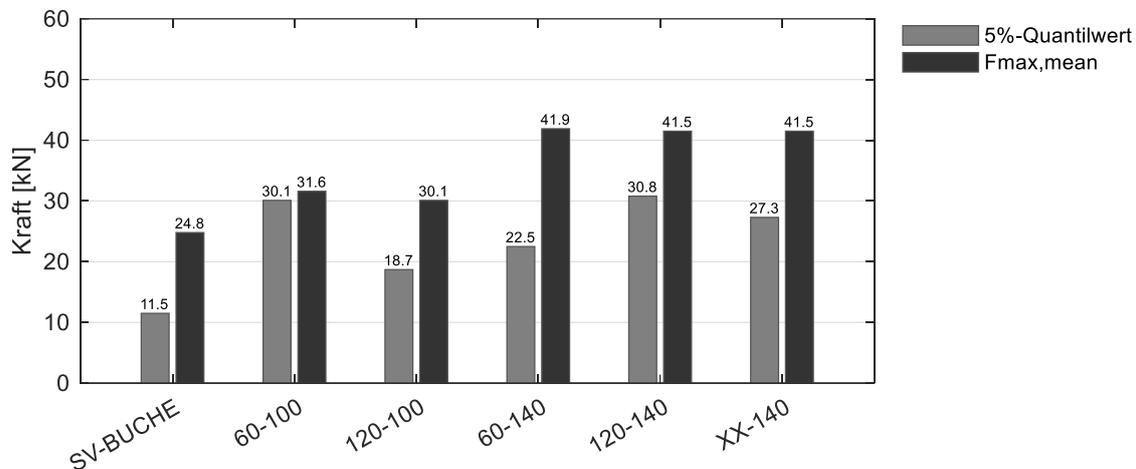


Abbildung 4-24: 5%-Quantilwert und $F_{max,mean}$ für jede Prüfreihe

4.9 Ermittlung von Bemessungswerten

Da die in Kapitel 3.6 dargestellte Berechnung der einzelnen Widerstände zu aufwendig für die Praxis ist, sollen im Folgenden, analog zum Datenblatt der Fa. Sherpa, erste Bemessungswerte für den Sherpa CLT-Connector in AHBSP ermittelt werden. Diese ersten Annäherungen sollen als Grundlage für weitere Untersuchungen dienen.

Da keine Testreihen mit herkömmlichem BSP durchgeführt und von der Firma Sherpa außer den Werten aus dem Datenblatt (vgl. Tabelle 2-2) keine Vergleichswerte zur Verfügung gestellt wurden, muss auf die rechnerisch ermittelten Werte aus Kapitel 3.6 zurückgegriffen werden. Diese sollten jedoch, wie bei den anderen Versuchsreihen ersichtlich (vgl. Abbildung 4-23), eine gute Annäherung an die Realität beschreiben. Für Schrauben mit Länge $l = 100$ mm wurde der Wert für den charakteristischen Widerstand $F_{Rk,BSP-100} = 31,5$ kN errechnet. Für Schrauben der Länge $l = 140$ mm beläuft sich der Wert auf $F_{Rk,BSP-140} = 46$ kN. Setzt man diese beiden Ergebnisse ins Verhältnis $F_{Rk,BSP-140}/F_{Rk,BSP-100}$, erhält man den Faktor $n_s = 1,46$. Dieser entspricht fast dem Schraubenlängenfaktor $n_s = 1,44$ (vgl. Tabelle 2-2), der von der Fa. Sherpa angegeben wird, um den Bemessungswert des CLT-Connectors bei Verwendung von 140 mm langen Schrauben im Vergleich zu 100 mm langen Schrauben zu modifizieren. Dies ist ein weiteres Indiz dafür, dass die theoretisch ermittelten Werte eine realitätsnahe Abschätzung beschreiben.

Die Fa. Sherpa gibt für einen mit 100 mm langen Schrauben eingebauten CLT-Connector einen charakteristischen Widerstand von $F_{Rk,100} = 10$ kN an (vgl. Tabelle 2-2). Dieser beschreibt ungefähr das 0,31-fache vom theoretisch ermittelten Wert $F_{Rk,BSP-100} = 31,5$ kN. Auch bei der Gegenüberstellung von charakteristischem $F_{Rk,140} = 14,4$ kN und theoretisch ermitteltem Wert $F_{Rk,BSP-140} = 46$ kN bei 140 mm langen Schrauben stellt sich der Faktor 0,31 ein. Um Bemessungswerte für CLT-Connectoren in AHBSP zu ermitteln, werden im Folgenden die Versuchsergebnisse mit dem Faktor 0,31 multipliziert.

Tabelle 4-1: Versuchsergebnisse und Bemessungswerte aller Versuchsreihen mit CLT-Connector in [kN]

	60-100	120-100	60-140	120-140	XX-140
Versuchsergebnis	31,5	30,1	41,9	41,5	41,5
Bemessungswert	10,0	9,3	13,0	12,9	12,9

Beim Vergleich der Bemessungswerte mit den 5%-Quantilwerten (vgl. Abbildung 4-24) fällt auf, dass die 5%-Quantile für jede Prüfreihe kleiner sind. Die Sicherheit der Bemessungswerte ist somit gegeben. Da in Prüfreihe 60-100 und 120-100 die gleiche AHBSP Variante untersucht wurde (Mittellage aus aufgelösten Buchenholzlamellen), wird der kleinere Wert für die Bemessung maßgebend. Das gleiche gilt für die Prüfreihe 60-140 und 120-140.

AHBSP der Variante 1 (Mittellage aus durchgängigen Fichtenholzlamellen) kam nur bei der Versuchsreihe XX-140 zum Einsatz. Ein mit 100 mm langen Schrauben ausgeschraubter CLT-Connector wurde für diese AHBSP Variante nicht getestet. Vergleicht man die Versuchsergebnisse aus Prüfreihe 120-140 und XX-140 fällt jedoch auf, dass diese trotz unterschiedlicher Mittellage identisch sind. In Anhang A.2.2 wird außerdem ersichtlich, dass 100 mm lange Schrauben bei AHBSP Variante 1 die Mittellage nur gestreift und somit vermutlich keinen signifikanten Einfluss auf das Tragverhalten gehabt hätten (analog zu Prüfreihe 120-100). Es kann also davon ausgegangen werden, dass sich der Mittelwert für F_{max} für eine Prüfreihe XX-100 auch bei 30,1 kN eingependelt hätte. Außerdem fällt bei Betrachtung von Tabelle 4-1 auf, dass die Versuchsreihen, bei denen der CLT-Connector über der Lamelle in Querrichtung eingebaut wurde, bei der Bestimmung des Bemessungswertes maßgebend sind. Der Bemessungswert für einen CLT-Connector mit 100 mm langen Schrauben in AHBSP der Variante 1 würde sich also analog zu Prüfreihe 120-100 zu 9,3 kN ergeben.

Die vorläufigen Bemessungswerte für den Sherpa CLT-Connector in AHBSP können Tabelle 4-2 entnommen werden.

Tabelle 4-2: vorläufige Bemessungswerte für den Sherpa CLT-Connector in AHBSP in [kN]

	l = 100 mm	l = 140 mm
AHBSP Variante 1	9,3	12,9
AHBSP Variante 2	9,3	12,9

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Masterarbeit wurde das Trag- und Steifigkeitsverhalten des Sherpa CLT-Connectors in aufgelösten, hybriden Brettsperrholzdeckenelementen genauer untersucht. Zur Klärung der Fragestellung, ob eine Verwendung dieses Verbindungsmittels auch bei AHBSP möglich ist, wurden experimentelle und analytische Untersuchungen durchgeführt.

Zu Beginn der Arbeit wurde ein Überblick über die Bemessung von Holzschrauben nach dem neuen Eurocode 5 (E DIN EN 1995-1-1:2023-10) gegeben. Neben Lochleibungsfestigkeit und Herausziehwiderstand müssen auch Mindestabstände zwischen den einzelnen Verbindungsmitteln eingehalten werden. Anschließend werden einige gängige Verbindungsarten von herkömmlichen Brettsperrholzdeckenelementen vorgestellt. In der Regel werden gelenkige Fugen mit Stoßdeckungsleiste ausgeführt. Liegen höhere Fugenquerkräfte vor, empfiehlt sich die Konstruktion einer Stufenfalz. Bei erhöhten Normalkräften können Ausführungen mit gekreuzten Schraubenpaaren eine effizientere Lösung darstellen. Außerdem wird noch auf biegesteife Stöße eingegangen. Abschließend wird der Sherpa CLT-Connector genauer vorgestellt.

Im zweiten Teil werden zunächst neben den verwendeten Materialien auch die für die Versuchsdurchführung relevanten Geräte präsentiert. Außerdem wird der Prozess der Prüfkörperkonfiguration der einzelnen Versuchsreihen erläutert. Bei BSP-Elementen der Variante 2 (Mittellage mit aufgelösten Buchenholzlamellen) ergab sich der maximale Schraubenanteil im Holz, wenn der CLT-Connector über der Buchenlamelle in Querrichtung positioniert wurde. Zusätzlich musste die Buchenholzlamelle in der Mittellage an ihrem Anschnitt die maximale Breite von 120 mm haben. Der geringste Schraubenanteil im Holz wurde festgestellt, wenn der CLT-Connector über der Lücke in der Querlage positioniert wurde. Des Weiteren befindet sich der größte Teil der Schrauben in der Luft, wenn die Buchenlamelle der Mittellage am Stoß in der Mitte halbiert wird. Bei Versuchskörpern der Variante 1 (Mittellage aus durchgängigen Fichtenholzlamellen) wurde der CLT-Connector ebenfalls über der Buchenlamelle in Querrichtung platziert. Um Vergleichswerte zu anderen Verbindungsmöglichkeiten zu erzielen, wurde in der letzten Versuchsreihe eine Buchenholzlamelle in der oberen Querlage eingebaut. Am Ende des Kapitels wurden noch die erwarteten Bruchlasten für jede Versuchsreihe mit Hilfe der Formel für die Lochleibungsfestigkeit von Schrauben ermittelt.

Der letzte Teil befasst sich mit der Auswertung der Versuchsergebnisse. Dafür wurden zunächst alle Prüfserien unabhängig voneinander analysiert. Die Prüfreihe SV-BUCHE weist im Vergleich zu allen anderen Versuchsreihen im Mittel die geringste Bruchlast auf. Außerdem ist der Variationskoeffizient, aufgrund der unterschiedlichen hohen Versuchsergebnisse, am größten. Aufgrund der Tatsache, dass dies jedoch die einzige Serie war, bei der eine Holzlamelle als VBM diente, erscheinen die Ergebnisse realistisch.

Alle Versuchskörper mit CLT-Connector versagten auf der Seite, auf der Schraube 1-4 eingebracht wurden. Bei allen Versuchsreihen bei denen das Verbindungsmittel über der Lamelle in Querrichtung eingebaut wurde (120-100, 120-140, XX-140), wurden die Versuche gemäß (DIN EN 26891:1991-

07) nach dem Erreichen von einer Verschiebung von 15 mm auf der Verbindungsmittelseite abgebrochen. Bei den Prüfserien, bei denen der CLT-Connector über der Lücke in der Querlage eingebracht wurde (60-100, 60-140), konnte eine klare Bruchlast ermittelt werden. Diese Beobachtung verdeutlicht die Wichtigkeit von Schraube 2 und 3 in Bezug auf das Scherverhalten der Verbindung.

Mit Hilfe der Verwendung von 140 mm langen Schrauben, anstatt von 100 mm langen Schrauben konnte die Tragfähigkeit der Prüfkörper gesteigert werden. Die Verbesserung von 44%, welche von der Fa. Sherpa für herkömmliches BSP versprochen wird, konnte jedoch nicht erreicht werden. Bei Vergleich der einzelnen Versuchsreihen mit gleich langen Schrauben fällt auf, dass alle Serien trotz unterschiedlicher Geometrie fast identische Werte für die Bruchlast aufweisen.

Abschließend wurden erste Bemessungswerte für den Sherpa CLT-Connector in AHBSP ermittelt. Für beide getesteten AHBSP Ausbildungsvarianten wurde bei der Verwendung von 100 mm langen Schrauben ein charakteristischer Widerstand für Querkraft in der Ebene von 9,3 kN bestimmt. Der Wert für 140 mm lange Schrauben beläuft sich bei beiden Ausbildungsvarianten auf 12,9 kN.

Aufgrund der Versuchsergebnisse lässt sich also sagen, dass falls das aufgelöste hybride Brettsperrholz des LaNaSys Forschungsprojekts Marktreife erreichen sollte, eine Fügung der einzelnen BSP-Elemente mit dem Sherpa CLT-Connector eine geeignete Verbindungsmöglichkeit wäre. Im Vergleich zu herkömmlichem BSP sind die ermittelten Kennwerte für AHBSP nur minimal kleiner.

Es gilt jedoch noch zu klären, wie sich das Verbindungsmittel in AHBSP in Normalkraftrichtung und in Querkraftrichtung aus der Ebene verhält. Außerdem müssen die Annahmen zur Ermittlung des Bemessungswertes für 100 mm langen Schrauben in AHBSP der Variante 1 überprüft werden. Es wäre also anzuraten, noch eine Versuchsreihe XX-100 durchzuführen. Da das Produkt auch mit Schrauben der Länge $l = 120$ mm zur Verfügung gestellt wird, ist es zudem ratsam Versuchsreihen mit dieser Schraubenlänge zu analysieren.

Wie sich in Kapitel 3.6 gezeigt hat, ist die Berechnung der einzelnen Widerstände sehr aufwendig und somit unbrauchbar für die Praxis. Die Fa. Sherpa sollte also eine Zulassung ihres Verbindungsmittels für AHBSP anstreben, mit deren Hilfe eine schnelle und effiziente Bemessung ermöglicht wird.

6 Literaturverzeichnis

AkzoNobel (2013): Technische Datenblätter zum Klebstoff: AkzoNobel System GripPro™ Plus.

Blaß, Hans Joachim; Bejtka, Ireneusz; Uibel, Thomas (2006): Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde (Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Band 4).

Blaß, Hans Joachim; Uibel, Thomas (2009): Bemessungsvorschläge für Verbindungsmittel in Brettsperrholz.

DIN EN 350:2016-12: Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Prüfung und Klassifizierung der Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten gegen biologischen Angriff.

Deutsches Institut für Bautechnik (2022): Allgemeine Bauartgenehmigung. Nummer: Z-9.1-501. Wand- und Deckenbauteile unter Verwendung von Leno Brettsperrholz.

E DIN EN 1995-1-1:2023-10, 2023: Eurocode 5 - Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.

DIN EN 26891:1991-07: Holzbauwerke - Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln - Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens.

Österreichisches Institut für Bautechnik (2018): Europäische Technische Bewertung. ETA-18/0083. SHERPA CLT-Connector.

Sherpa (2024): Sherpa CLT-Connector. Online verfügbar unter https://www.sherpa-connector.com/de/produkte/montageserie/3376_56812_shop_SHERPA-CLT-Connector.aspx?LNG=de, zuletzt aktualisiert am 27.02.2024.

Stora Enso (2021): CLT by Stora Enso. Konstruktion.

TUM (2024): LaNaSys. Online verfügbar unter <https://www.arc.ed.tum.de/holz/forschung/lanasys/>.

Wallner-Novak, Markus; Augustin, Manfred; Koppelhuber, Josef; Pock, Kurt (2018): Bemessung Brettsperrholz. Band 2 - Anwendungsfälle.

Wallner-Novak, Markus; Koppelhuber, Josef; Pock, Kurt (2013): Brettsperrholz Bemessung. Grundlagen für Statik und Konstruktion nach Eurocode.

Zwick/Roell (2024): Produktionformation. Material-Prüfmaschine Z600E mit testControl II. Online verfügbar unter https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/SharePoint/user_upload/PI_DE/06_963_Z600E_PI_DE.pdf.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Fugenkräfte aus Scheibenwirkung (Wallner-Novak et al. 2018).....	3
Abbildung 2-2:	Definition von Abstandsparametern (E DIN EN 1995-1-1:2023-10)	6
Abbildung 2-3:	(a) eingefräste Stoßdeckungsleiste; (b) Stufenfalz); (c) gekreuztes Schraubenpaar (Wallner-Novak et al. 2013)	7
Abbildung 2-4:	statisches Modell für die Übertragung von (a) Fugenquerkräften und (b) Fugenzugkräften (Wallner-Novak et al. 2018).....	7
Abbildung 2-5:	Widerstände des Schraubenkreuzes bei vertikaler Last (Wallner-Novak et al. 2018)	8
Abbildung 2-6:	Biegesteifer Stoß in: (a) Haupttragrichtung; (b) Nebentragrichtung (Wallner-Novak et al. 2013)	10
Abbildung 2-7:	Sherpa CLT-Connector (Österreichisches Institut für Bautechnik 2018)	11
Abbildung 2-8:	Definition der Belastungsrichtung (Österreichisches Institut für Bautechnik 2018)	12
Abbildung 3-1:	Mangelhaftigkeit der Buchenlamellen	13
Abbildung 3-2:	In Prüfmaschine eingebauter Prüfkörper.....	15
Abbildung 3-3:	Prüfkörper der Serie 120-140	16
Abbildung 3-4:	Prüfkörper der Serie 60-140	16
Abbildung 3-5:	Prüfkörper der Serie XX-140.....	17
Abbildung 3-6:	Prüfkörper der Serie SV-Buche	17
Abbildung 3-7:	Beispiel für Nomenklatur eines Prüfkörpers	18
Abbildung 3-8:	(a) Belastungsverfahren und (b) idealisierte Last-Verschiebungskurve (DIN EN 26891:1991-07)	19
Abbildung 3-9:	Nummerierung der einzelnen Schrauben.....	19
Abbildung 4-1:	Kraft-Zeit-Verläufe aller SV-BUCHE Versuche.....	25
Abbildung 4-2:	Kraft-Weg-Verläufe aller SV-BUCHE Versuche auf der (a) Verbindungsmittelseite und der (b) Rückseite.....	26
Abbildung 4-3:	statistische Auswertung und F_{max} Prüfreihe SV-BUCHE	26
Abbildung 4-4:	Kraft-Zeit-Verläufe aller 60-100 Versuche.....	27
Abbildung 4-5:	Kraft-Weg-Verläufe aller 60-100 Versuche auf der (a) Verbindungsmittelseite und der (b) Rückseite	28
Abbildung 4-6:	Prüfkörper 60-100-3 (a) vor und (b) nach dem Versuch.....	28
Abbildung 4-7:	statistische Auswertung und F_{max} Prüfreihe 60-100.....	29
Abbildung 4-8:	Kraft-Weg-Verläufe aller 120-100 Versuche auf der (a) Verbindungsmittelseite und der (b) Rückseite	30
Abbildung 4-9:	Prüfkörper 120-100-2 (a) vor und (b) nach dem Versuch.....	31
Abbildung 4-10:	CLT-Connector nach Abdrücken.....	31

Abbildung 4-11: statistische Auswertung und F_{max} Prüfreihe 120-100.....	32
Abbildung 4-12: Kraft-Weg-Verläufe aller 60-140 Versuche auf der (a) Verbindungsmittelseite und der (b) Rückseite	33
Abbildung 4-13: Prüfkörper 60-140-2 (a) vor und (b) nach dem Versuch.....	33
Abbildung 4-14: statistische Auswertung und F_{max} Prüfreihe 60-140.....	34
Abbildung 4-15: Kraft-Weg-Verläufe aller 120-140 Versuche auf der (a) Verbindungsmittelseite und der (b) Rückseite	34
Abbildung 4-16: Prüfkörper 120-140-2 (a) vor und (b) nach dem Versuch.....	35
Abbildung 4-17: statistische Auswertung und F_{max} Prüfreihe 120-140.....	35
Abbildung 4-18: Kraft-Weg-Verläufe aller XX-140 Versuche auf der (a) Verbindungsmittelseite und der (b) Rückseite	36
Abbildung 4-19: Prüfkörper XX-140-2 (a) vor und (b) nach dem Versuch	36
Abbildung 4-20: statistische Auswertung und F_{max} Prüfreihe XX-140.....	37
Abbildung 4-21: Kraft-Weg-Verläufe ausgewählter Prüfkörper aller Versuchsreihen auf der (a) Verbindungsmittelseite und der (b) Rückseite.....	38
Abbildung 4-22: F_{max} für jeden Prüfkörper.....	39
Abbildung 4-23: $F_{max,errechnet}$ und $F_{max,mean}$ für jede Prüfreihe.....	40
Abbildung 4-24: 5%-Quantilwert und $F_{max,mean}$ für jede Prüfreihe.....	41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Mindestabstände, Kantenabstände und Endabstände für Holzschrauben in BSP	6
Tabelle 2-2:	charakteristische Tragfähigkeit des SHERPA CLT-Connectors für Schraubenlänge $l = 100$ mm	12
Tabelle 3-1:	Winkel ε zwischen dem Befestigungselement und der Faserrichtung in $[\circ]$	20
Tabelle 3-2:	charakteristische Lochleibungsfestigkeit $f_{h, \varepsilon, k}$ eines Prüfkörpers der Reihe 60-100 in $[\text{N}/\text{mm}^2]$	20
Tabelle 3-3:	Eingedrückte Fläche A je Abschnitt in $[\text{mm}^2]$	21
Tabelle 3-4:	Widerstand F_{Rk} je Schraube je Lage in $[\text{N}]$	21
Tabelle 3-5:	Erwartete Bruchlast in $[\text{kN}]$	22
Tabelle 4-1:	Versuchsergebnisse und Bemessungswerte aller Versuchsreihen mit CLT-Connector in $[\text{kN}]$	42
Tabelle 4-2:	vorläufige Bemessungswerte für den Sherpa CLT-Connector in AHBSP in $[\text{kN}]$	42

Anhang

A.1 Buchenlamellen der Prüfreihe SV-BUCHE

A.1.1 SV-BUCHE-1

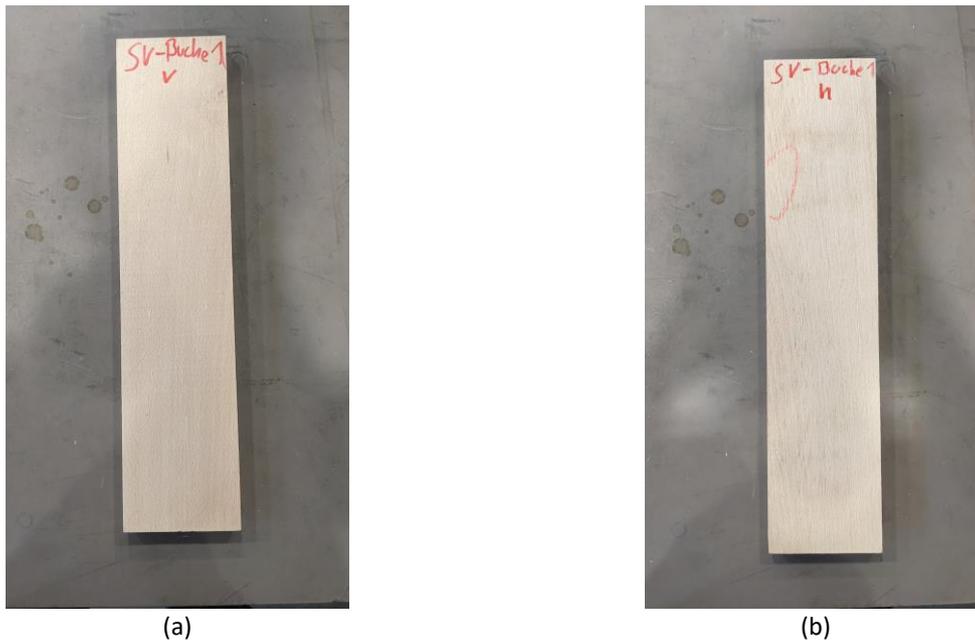


Abbildung A.1-1: (a) Vorderseite und (b) Rückseite der Buchenlamelle vor dem Einbau

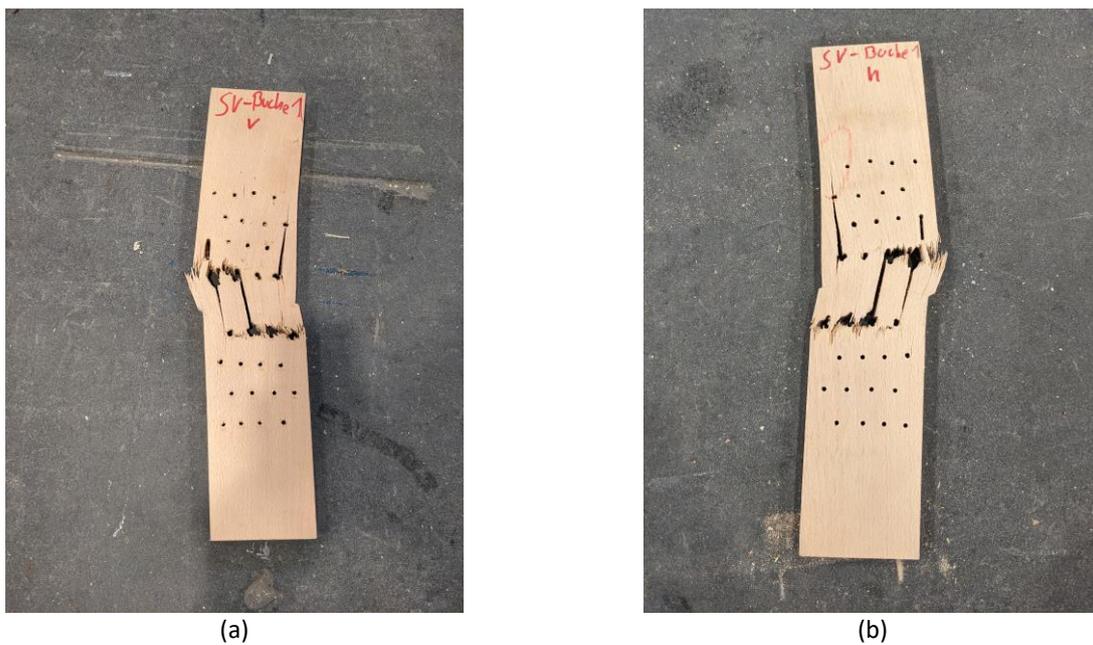


Abbildung A.1-2: (a) Vorderseite und (b) Rückseite der eingebauten Buchenlamelle nach dem Versuch

A.1.2 SV-BUCHE-2

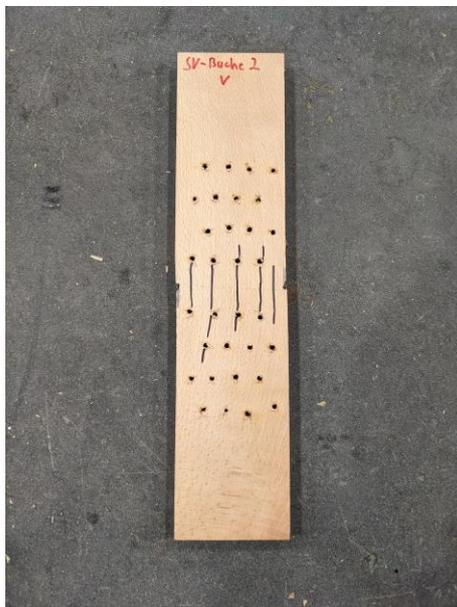


(a)

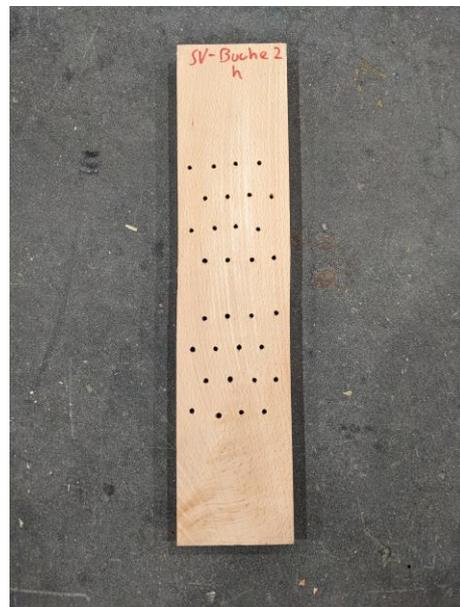


(b)

Abbildung A.1-3: (a) Vorderseite und (b) Rückseite der Buchenlamelle vor dem Einbau



(a)



(b)

Abbildung A.1-4: (a) Vorderseite und (b) Rückseite der eingebauten Buchenlamelle nach dem Versuch

A.1.3 SV-BUCHE-3

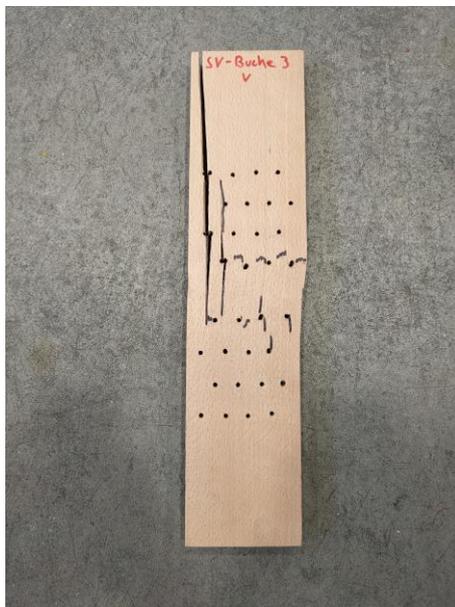


(a)



(b)

Abbildung A.1-5: (a) Vorderseite und (b) Rückseite Buchenlamelle vor dem Einbau



(a)



(b)

Abbildung A.1-6: (a) Vorderseite und (b) Rückseite eingebauten Buchenlamelle nach dem Versuch

A.2 Schraubenanteil je Lage

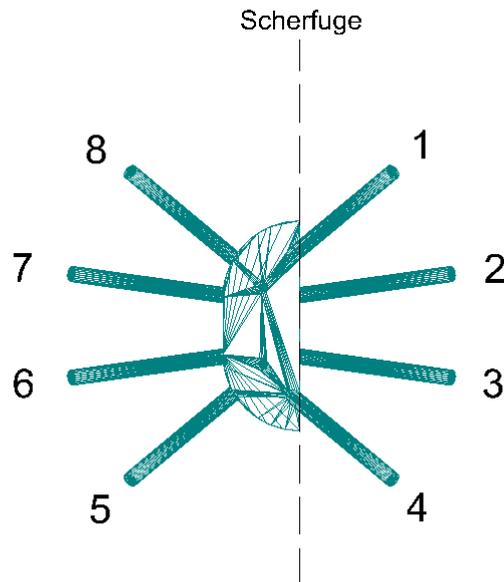


Abbildung A.2-1: Nummerierung der Schrauben

A.2.1 Prüfkörper 60-100

Tabelle A.2-1: Holzanteil je Schraube je Lage für Prüfkörper 60-100 in [mm]

	1	2	3	4	5	6	7	8	Gesamtanteil
obere Lage	29	51	51	29	35	51	51	35	332
1. Querlage	32	0	0	32	31	0	0	31	126
Mittellage	5	0	0	5	0	0	0	0	10
2. Querlage	0	0	0	0	0	0	0	0	0
untere Lage	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamtanteil	66	51	51	66	66	51	51	66	468

A.2.2 Prüfkörper 120-100

Tabelle A.2-2: Holzanteil je Schraube je Lage für Prüfkörper 120-100 in [mm]

	1	2	3	4	5	6	7	8	Gesamtanteil
obere Lage	29	51	51	29	35	51	51	35	332
1. Querlage	5	29	29	5	3	29	29	3	132
Mittellage	5	0	0	5	4	0	0	4	18
2. Querlage	0	0	0	0	0	0	0	0	0
untere Lage	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamtanteil	39	80	80	39	42	80	80	42	482

A.2.3 Prüfkörper 60-140

Tabelle A.2-3: Holzanteil je Schraube je Lage für Prüfkörper 60-140 in [mm]

	1	2	3	4	5	6	7	8	Gesamtanteil
obere Lage	29	51	51	29	35	51	51	35	332
1. Querlage	32	0	0	32	31	0	0	31	126
Mittellage	20	0	0	20	0	0	0	0	40
2. Querlage	10	0	0	10	10	0	0	10	40
untere Lage	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamtanteil	91	51	51	91	76	51	51	76	538

A.2.4 Prüfkörper 120-140

Tabelle A.2-4: Holzanteil je Schraube je Lage für Prüfkörper 120-140 in [mm]

	1	2	3	4	5	6	7	8	Gesamtanteil
obere Lage	29	51	51	29	35	51	51	35	332
1. Querlage	5	42	42	5	3	42	42	3	184
Mittellage	27	22	22	27	26	0	0	26	150
2. Querlage	0	0	0	0	0	0	0	0	0
untere Lage	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamtanteil	61	115	115	61	64	93	93	64	666

A.2.5 Prüfkörper XX-140

Tabelle A.2-5: Holzanteil je Schraube je Lage für Prüfkörper XX-140 in [mm]

	1	2	3	4	5	6	7	8	Gesamtanteil
obere Lage	29	51	51	29	35	51	51	35	332
1. Querlage	5	42	42	5	3	42	42	3	184
Mittellage	27	22	22	27	26	22	22	26	194
2. Querlage	0	0	0	0	0	0	0	0	0
untere Lage	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamtanteil	61	115	115	61	64	115	115	64	710

A.2.6 BSP-100

Tabelle A.2-6: Holzanteil je Schraube je Lage für BSP-100 in [mm]

	1	2	3	4	5	6	7	8	Gesamtanteil
obere Lage	29	51	51	29	35	51	51	35	332
1. Querlage	32	29	29	32	31	29	29	31	242
Mittellage	5	0	0	5	4	0	0	4	18
2. Querlage	0	0	0	0	0	0	0	0	0
untere Lage	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamtanteil	66	80	80	66	70	80	80	70	592

A.2.7 BSP-140

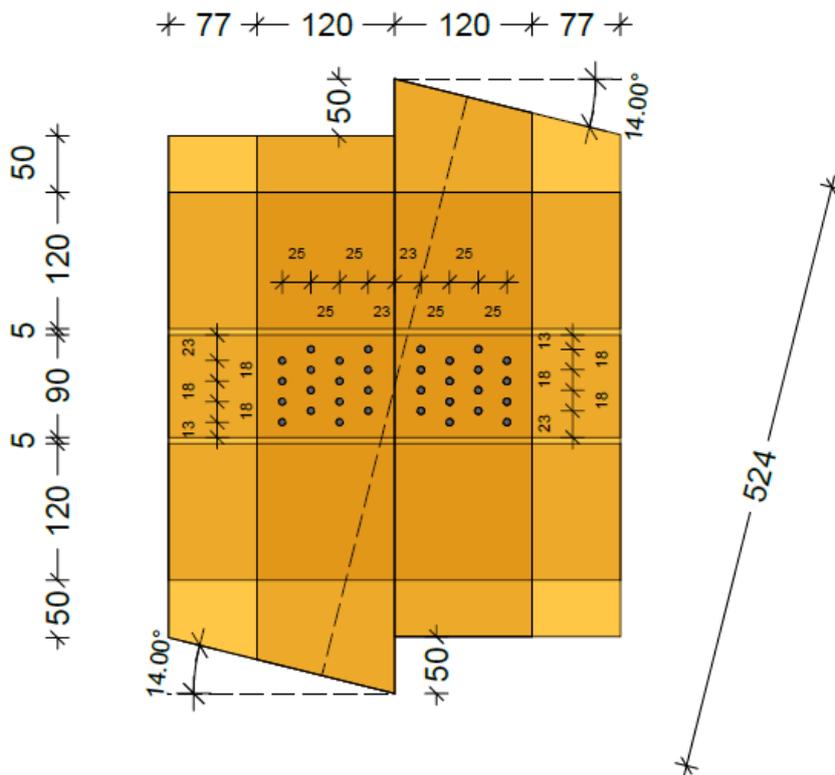
Tabelle A.2-7: Holzanteil je Schraube je Lage für BSP-140 in [mm]

	1	2	3	4	5	6	7	8	Gesamtanteil
obere Lage	29	51	51	29	35	51	51	35	332
1. Querlage	32	42	42	32	31	42	42	31	294
Mittellage	27	22	22	27	26	22	22	26	194
2. Querlage	10	0	0	10	10	0	0	10	40
untere Lage	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamtanteil	98	115	115	98	102	115	115	102	860

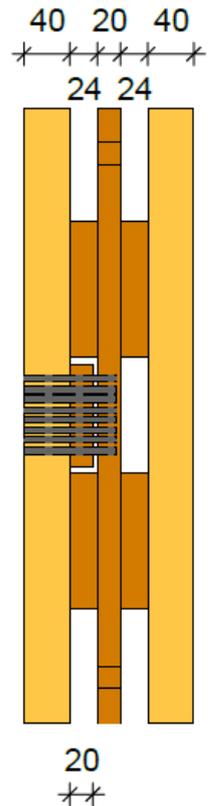
A.3 Prüfkörper

A.3.1 Prüfkörper SV-BUCHE

Draufsicht



Ansicht



Querschnitt

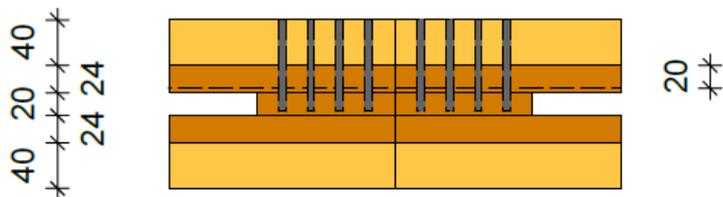
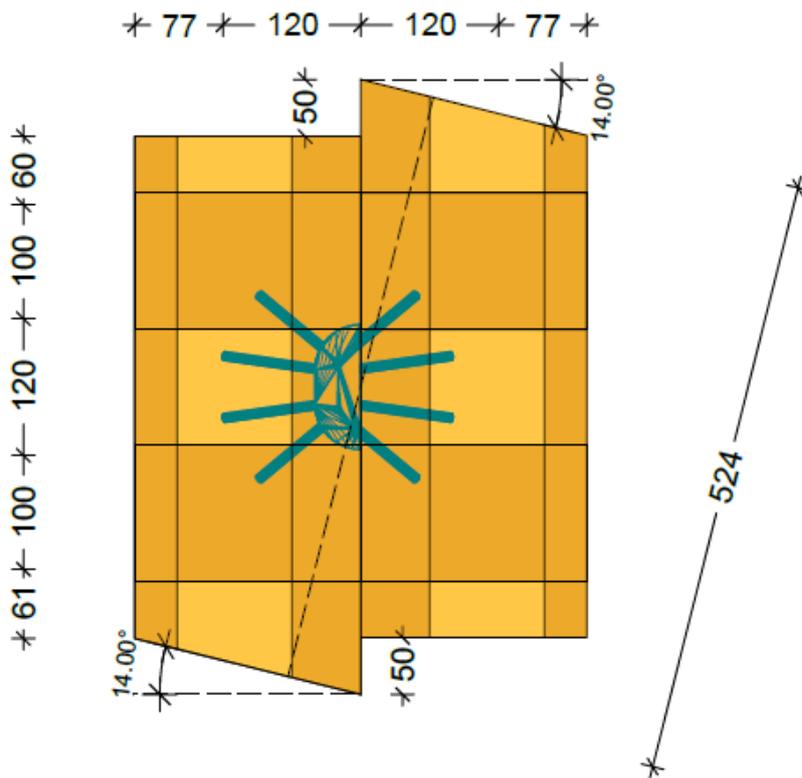


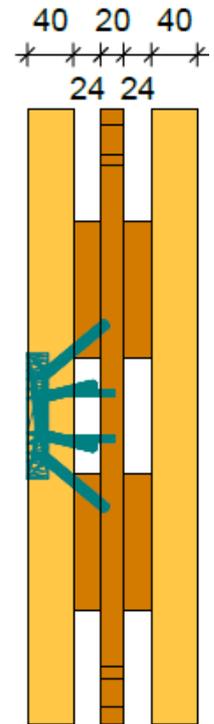
Abbildung A.3-1: Detailzeichnung Prüfkörper SV-BUCHE

A.3.2 Prüfkörper 60-100

Draufsicht



Ansicht



Querschnitt

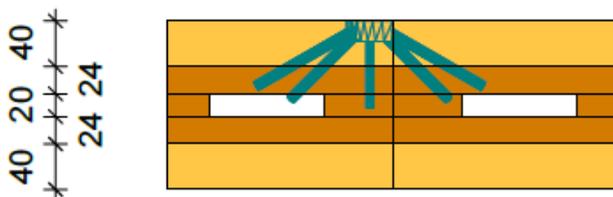
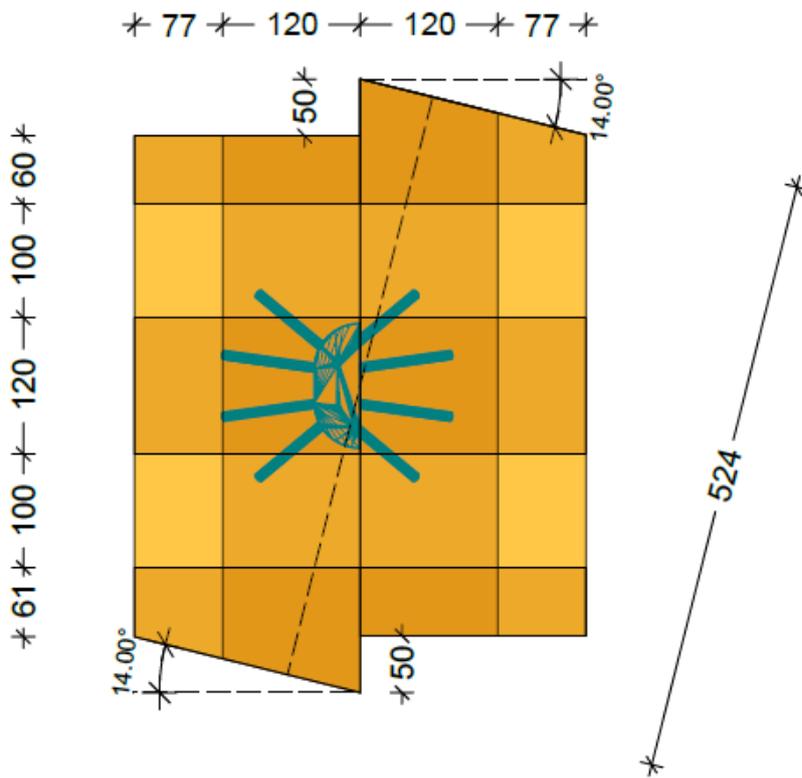


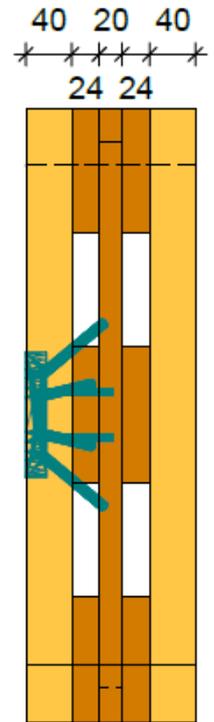
Abbildung A.3-2: Detailzeichnung Prüfkörper 60-100

A.3.3 Prüfkörper 120-100

Draufsicht



Ansicht



Querschnitt

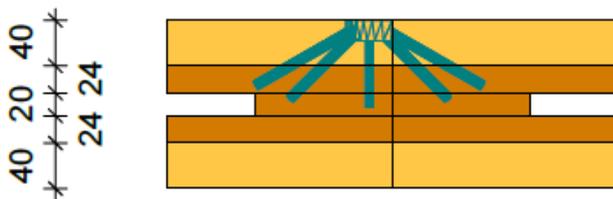
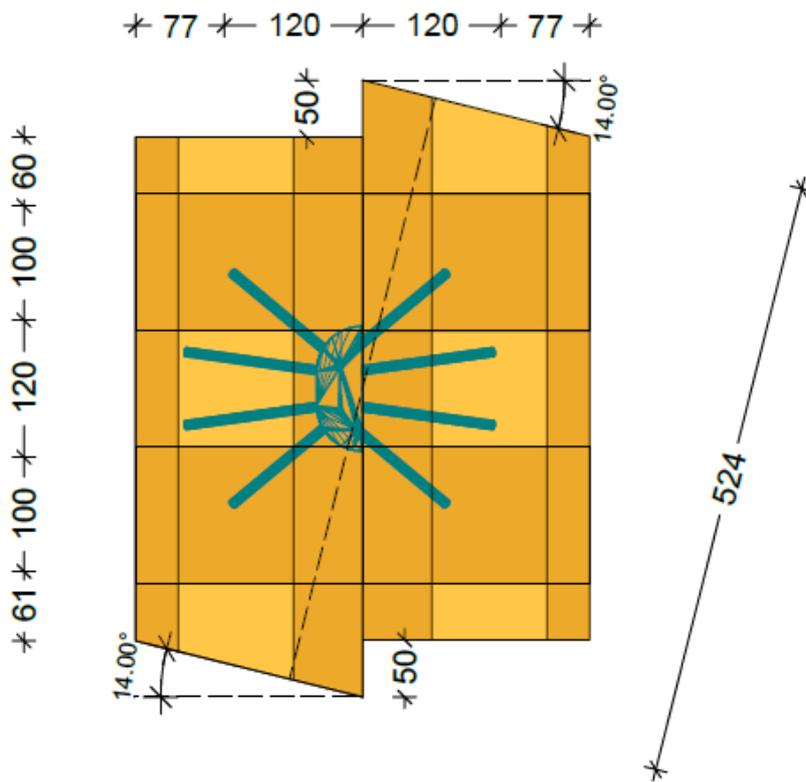


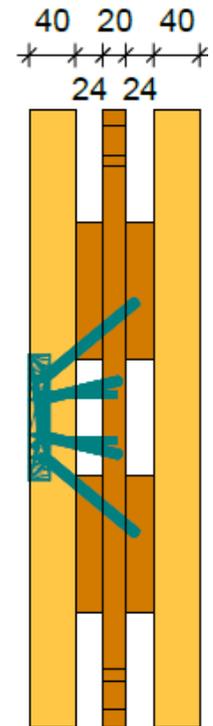
Abbildung A.3-3: Detailzeichnung Prüfkörper 120-100

A.3.4 Prüfkörper 60-140

Draufsicht



Ansicht



Querschnitt

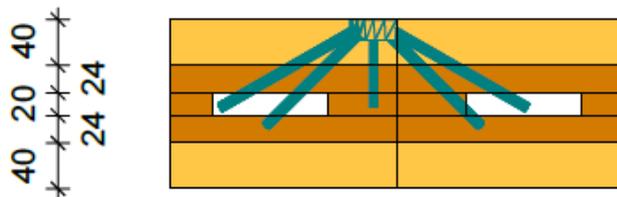
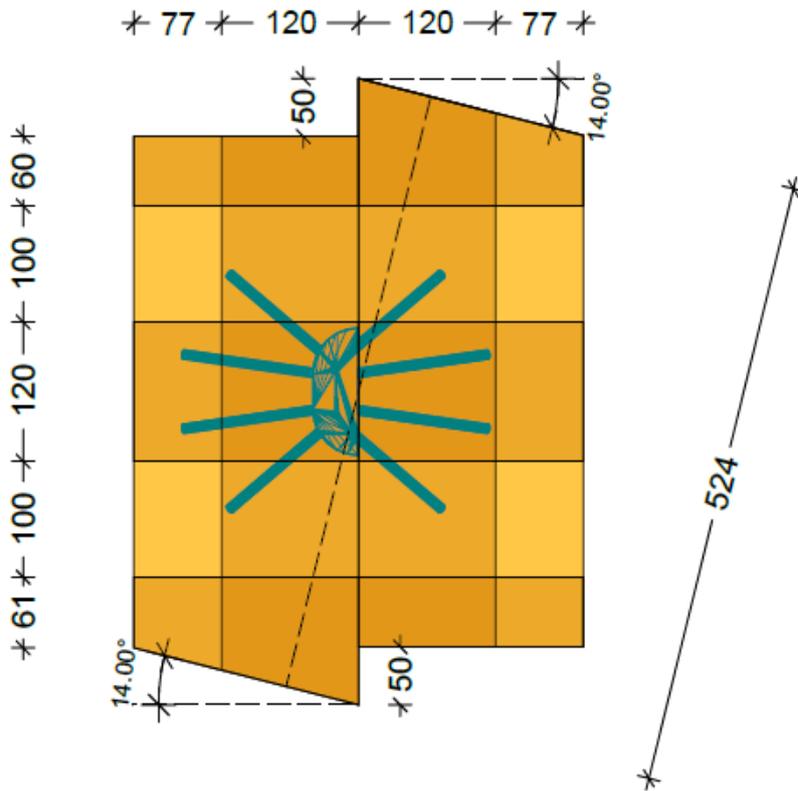


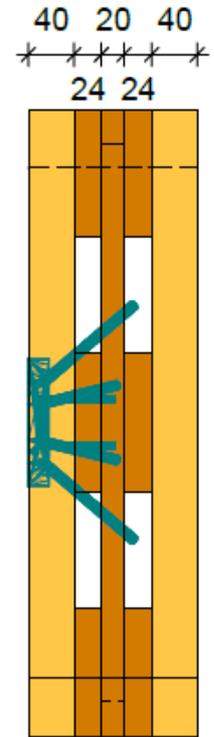
Abbildung A.3-4: Detailzeichnung Prüfkörper 60-140

A.3.5 Prüfkörper 120-140

Draufsicht



Ansicht



Querschnitt

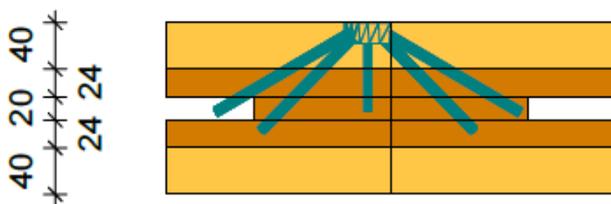
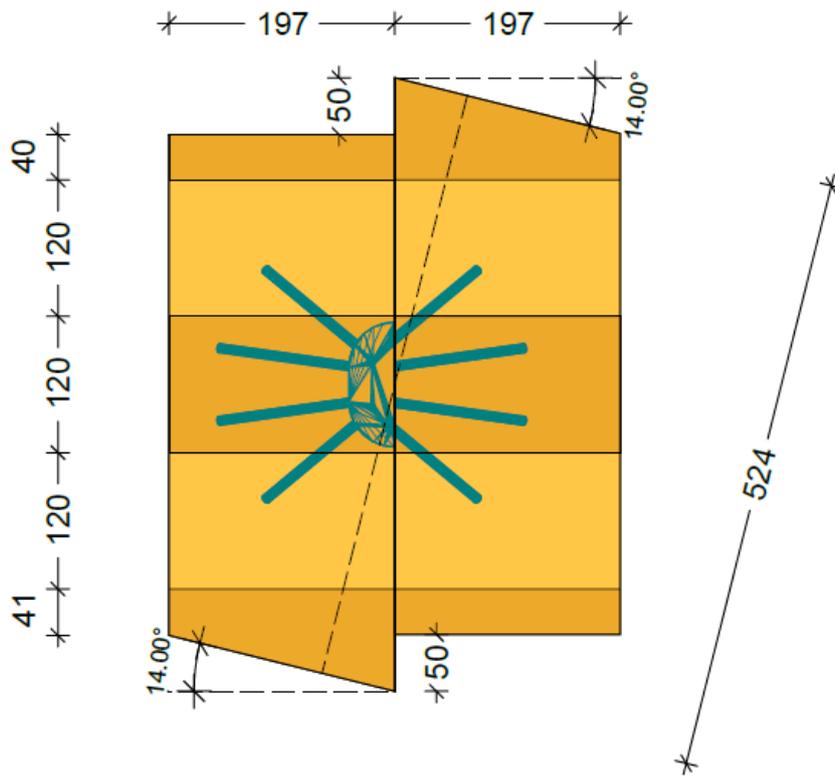


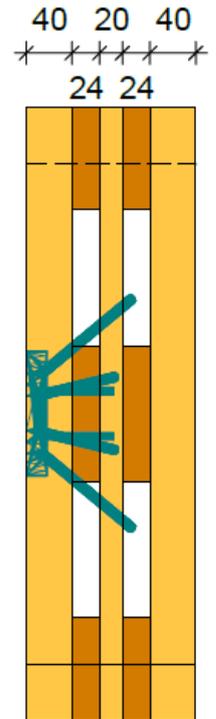
Abbildung A.3-5: Detailzeichnung Prüfkörper 120-140

A.3.6 Prüfkörper XX-140

Draufsicht



Ansicht



Querschnitt

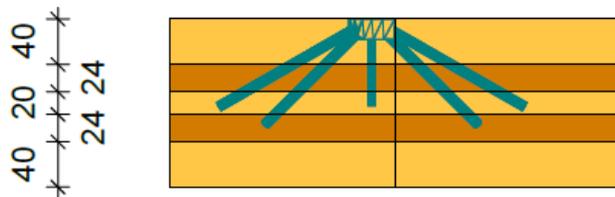


Abbildung A.3-6: Detailzeichnung Prüfkörper XX-140

Selbständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

.....
Florian Brückner

München, 01. Juni 2024

Einverständniserklärung (freiwillig)

Ich bin damit einverstanden, dass meine Abschlussarbeit veröffentlicht sowie wissenschaftlich interessierten Personen oder Institutionen zur Verfügung gestellt und zitiert werden kann. Korrektur- oder Bewertungshinweise in meiner Arbeit dürfen nicht zitiert werden.

.....
Florian Brückner

München, 01. Juni 2024