

Innovatives Holz-Holz- Verbindungssystem für Brettsperrholz

Innovative wood-to-wood connection systems for
Cross-Laminated-Timber

Système d'assemblage innovant bois-bois pour
panneaux CLT

Gregor Silly
holz.bau forschungs gmbh
AT-Graz



Innovatives Holz-Holz-Verbindungssystem für Brettsperrholz

1. Einleitung

Das Bauen mit massiven Brettsperrholz-Elementen (BSP-Elementen) gewann in den letzten Jahren an großer Bedeutung. Beginnend mit dem Einfamilienhausbau vor mehr als 15 Jahren wurden und werden mittlerweile immer größere Bauvorhaben, insbesondere bis zu 10-geschossige Wohn- und Bürobauten unter Verwendung dieses Produktes angedacht und realisiert. Dabei spielt natürlich auch die möglichst einfache Verbindung und schnelle Montage der einzelnen BSP-Elemente eine große Rolle. Im Falle der Kontaktfuge «Wand-Wand» gibt es dazu mehrere Verbindungsmöglichkeiten (siehe Kapitel 2), welche auf den Einsatz von Schrauben und/oder Stahl- bzw. Stahlformteilen angewiesen sind. Außerdem ist im Rahmen der Montage bei den meisten dieser Verbindungssysteme der Einsatz von Spannvorrichtungen notwendig.

Das von der Firma GREENETHIC building & livingsystems (eine Marke der SCHILCHER Trading & Engineering GmbH und in weiterer Folge als GREENETHIC bezeichnet) entwickelte Verbindungssystem X-Fix für BSP soll völlig ohne Stahlteile und Spannvorrichtungen auskommen. Die vorzugsweise aus Holz bestehenden Koppelleisten in Form eines Doppelschwalbenschwanzes (vgl. Abbildung 3) werden direkt auf der Baustelle in die, mit moderner CNC-Technologie bearbeiteten, BSP-Platten eingeschlagen. Durch dieses bereits früher von Zimmerleuten z. B. im Blockbau verwendete Holz-Holz Verbindungssystem soll eine «selbstspannende» und kraftschlüssige Verbindung über die gesamte Höhe zweier BSP-Wandelemente erreicht werden.

Im Rahmen eines Projektes der Firma GREENETHIC und der holz.bau forschungs gmbh sollte abgeklärt werden, in wie weit dieses System in Bezug auf seine Tragfähigkeit bzw. Herstellbarkeit in der Praxis für die Verbindung von BSP-Wandelementen geeignet ist. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Inhalte und Ergebnisse dieses Projekts zusammenfassend dargestellt.

2. Stand der Technik

2.1. Kontaktfuge «Wand-Wand»

Die bei der Verwendung von BSP herzustellende Kontaktfuge (KF) Wand-Wand lässt sich in die Varianten

- Kontaktfuge «ebener Wand-Wand-Stoß» (WW)
- Kontaktfuge «Wand-Wand-T» (WWT) und
- Kontaktfuge «Wand-Wand-Eck» (WWE)

gliedern. Nachfolgend wird der Stand der Technik zur Ausbildung dieser Anschlussfuge beschrieben. Wie auch bei anderen Kontaktfugen ist bei allen erwähnten Varianten der Kontaktfuge Wand-Wand darauf zu achten, dass eine kraftschlüssige und nach Möglichkeit luftdichte Verbindung erreicht wird.

2.1.1. Kontaktfuge ebener Wand-Wand-Stoß (WW)

In der Praxis kommen bei der Verbindung von BSP-Wandelementen in Längsrichtung (ebene Verbindung) hauptsächlich die Varianten «Stufenfalz» bzw. «stumpfer Stoß mit Schrägverschraubung» zur Anwendung (siehe Abbildung 1, links oben). Der Wandlängsstoß kann aber beispielsweise auch mit einem Systemverbinder mit eingelassener Stahlhülse erfolgen (vgl. Abbildung 1, rechts oben). Die Verbindung erfolgt hier über werkseitig eingeklebte Gewindestangen oder Holzbauschrauben, welche bei der Montage über die erwähnte eingelassene Stahlhülse verspannt werden.

2.1.2. Kontaktfuge Wand-Wand-Eck (WWE)

Die Ausführung des Eckstoßes kann unter Verwendung selbstbohrender Holzbauschrauben erfolgen. Diese können entsprechend der Abbildung 1 (unten) normal, aber auch im Winkel zur Elementmittelfläche eingebracht werden. Zu beachten ist dabei, dass normal zur Elementmittelfläche eingebrachte Holzschrauben in der BSP-Schmalseite zu liegen kommen. Hirnholzverschraubungen (Orientierung der Holzfaser parallel zur Schraubenchse) sind zu vermeiden. Zudem sollte darauf geachtet werden, dass die beiden BSP-Wandelemente über die Verschraubung aneinander gepresst werden, damit die dazwischenliegenden Abdichtungsbänder (siehe Abbildung 1, rechts unten) ihre Dichtungsfunktion erfüllen können. Um das Zusammenziehen der Wandelemente gewährleisten zu können, empfiehlt es sich, Teilgewindeschrauben mit Scheibenkopf oder Unterlegscheiben zu verwenden.

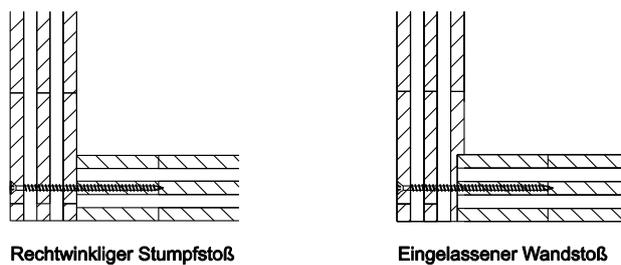
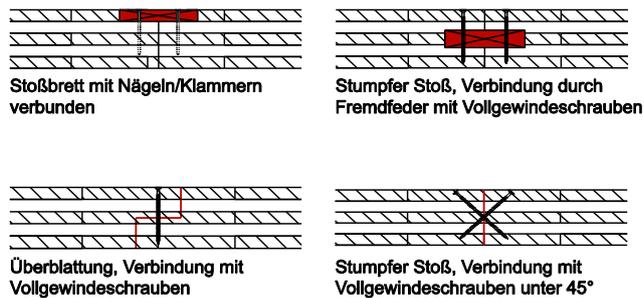


Abbildung 1: Oben: Ebener Wand-Stoß; Unten: Eck-Stoß (vgl. DERIX X-LAM [1] und BSPhandbuch [2])

2.1.3. Kontaktfuge Wand-Wand-T (WWT)

Ein T-Stoß wird erforderlich, wenn eine Wand senkrecht an eine durchgehende anschließt. Dieser Stoß kann analog zum Eckstoß (siehe Abschnitt 2.1.2) als eingelassener Wand- bzw. rechtwinkliger Stumpfstoß ausgebildet werden. Eine weitere Möglichkeit stellt die Verwendung von sogenannten Systemverbindern dar, die sowohl eine selbstzentrierende Montage als auch eine dichte Fügung erlauben (vgl. Abbildung 2, rechts).

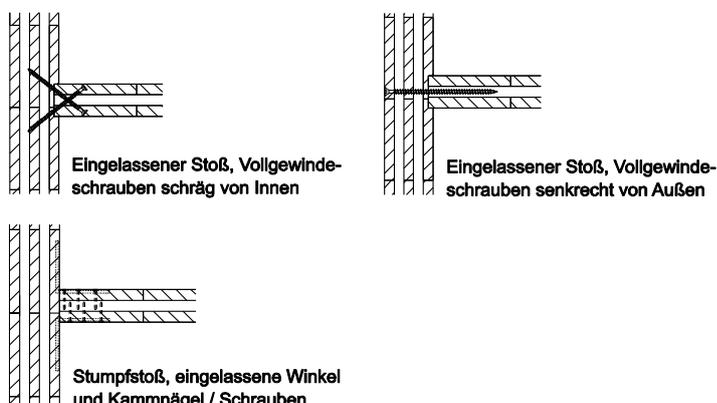


Abbildung 2: Wand-Wand-T (vgl. DERIX X-LAM [1] und BSPhandbuch [2])

3. GREENETHIC X-FIX VERBINDUNGSSYSTEM FÜR BSP

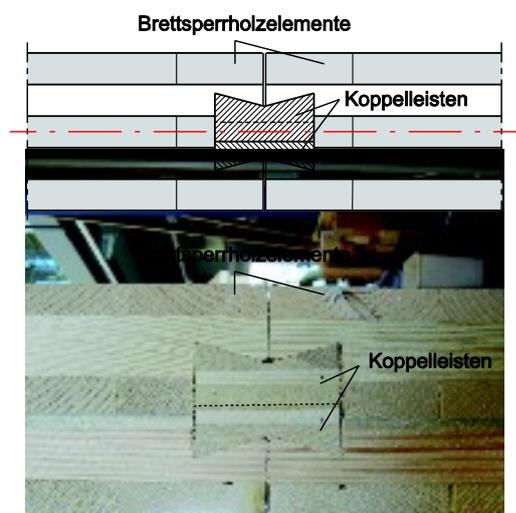
3.1. Allgemeine Erläuterungen zum Verbindungssystem

Für die Verbindungen ebener Wand-Wand-Stoß, Wand-Wand-Eck sowie den Anschluss von Quer- an Längswände (Wand-Wand-T) kann mit dem GREENETHIC X-Fix Verbindungssystem eine einfache und kostengünstige Verbindungsmethode für Brettsperrholzelemente zur Anwendung kommen. Nachfolgend wird näher auf die Funktionsweise und Herstellung dieses Systems eingegangen.

3.1.1. Beschreibung des X-Fix Verbindungssystems

Für eine einfache und im Vergleich zu ähnlichen Systemen schnelle Montage von BSP-Elementen vor Ort, kann das GREENETHIC X-Fix Verbindungssystem, welches als Doppelschwalbenschwanz-System («selbstspannendes Holz-Holz-Verbindungssystem») wirkt, eingesetzt werden. Die Verbindung der beiden BSP-Bauteile erfolgt durch ein Doppelschwalbenschwanz-Profil aus Holz bzw. einem Holzwerkstoff, dessen Länge gleich der Höhe der zu verbindenden Brettsperrholzplatten ist. Dieses Doppelschwalbenschwanz-Profil wird, mit einem in Längsrichtung konisch verlaufenden Schaftschnitt, in zwei Koppelleisten aufgetrennt (siehe Abbildung 3). Bei der Montage vor Ort werden diese gegenläufig in die Schwalbenschwanznuten der bereits positionierten BSP-Elemente eingeführt und mit einem Handhammer oder vergleichbarem Werkzeug eingeschlagen. Durch den konischen Längsschnitt und das gegenläufige Einbringen der Verbindungskeile wird ein «Selbstspannungseffekt» erreicht, der in Folge eine kraftschlüssige Verbindung der BSP-Elemente bewirkt.

GREENETHIC X-Fix Verbindungssystem für BSP
Grundriss



Koppelleisten
Schrägriss

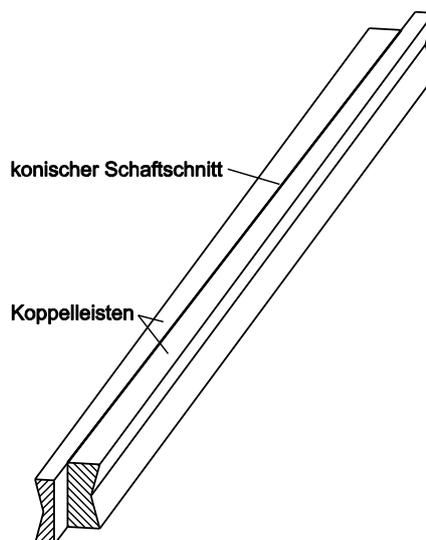


Abbildung 3: GREENETHIC X-Fix Verbindungssystem für BSP: Kopplung der BSP-Elemente durch konisch aufgetrennte Doppelschwalbenschwanzprofile (Koppelleisten).

Das Doppelschwalbenschwanz-Verbindungselement wird durch CNC-Bearbeitung mit einer Genauigkeit von rund 1/10 mm hergestellt und kann für Standardaufbauten von Brettsperrholz industriell vorgefertigt werden. Eine Anpassung an Brettsperrholz mit Sonderaufbauten ist ebenfalls möglich.

4. Keilmaterial und Keilgeometrie

4.1. Auswahl des Keilmaterials

Eine der Besonderheiten des X-Fix Verbindungssystems für Brettsperrholz ist, dass es komplett ohne den Einsatz von Stahlteilen (z. B. Winkel, Schrauben) auskommt. Die Verbindung der BSP-Elemente wird lediglich über die schwalbenschwanzförmigen Koppelleisten hergestellt. Aus diesem Grund sollte das Keilmaterial die folgenden Anforderungen erfüllen:

- mechanische Tragfähigkeit: Das verwendete Material sollte in der Lage sein, die auftretenden Kräfte zu übertragen.
- Formstabilität: Das Material muss trotz unterschiedlicher klimatischer Verhältnisse formstabil bleiben.
- Montage: Um das Einbringen der Koppelleisten zu erleichtern, sollten diese möglichst eben sein und eine glatte Oberfläche aufweisen.

Nachfolgend werden verschiedene Holzwerkstoffe sowie ihre Vor- und Nachteile in Bezug auf die Verwendung als Keilmaterial aufgelistet. Keile aus Vollholz wurden aufgrund ihrer schwer einzuhaltenden Maßhaltigkeit in dieser Studie nicht behandelt.

4.1.1. Fichtensperrholz

Bei den vom Auftraggeber gelieferten Testelementen wurden Verbindungskeile aus Dreischichtplatten (Fichte) eingesetzt (siehe Abbildung 4, links). Um die Tragfähigkeit des Keiles zu gewährleisten müssen die Schichten, bei denen die Faserrichtung parallel zur Belastung verläuft, in ausreichender Dicke dimensioniert sein. Dies gilt auch bei einer Variation der Keilgeometrie. Die gesperrte Struktur hat einen positiven Einfluss auf das Quell- und Schwindverhalten von Fichtenholz. Nichts desto trotz darf sich der Feuchtegehalt des Holzes von der Herstellung im Werk bis zum Einbau auf der Baustelle nicht maßgeblich ändern. Kommt es nämlich nach der passgenauen Fertigung der Keile zu einer Feuchtigkeitszunahme und einer damit verbundenen Änderung der Querschnittsabmessungen (Quellen), so ist der Einbau der Keile unter Umständen nicht mehr vollständig möglich. Im umgekehrten Fall (Schwinden) kommt es zu einem Abfall der «Spannung» und auch zu einer eventuellen Erhöhung der Luftdurchlässigkeit.

4.1.2. Furnierschichtholz

Aus der Familie der Furnierschichthölzer könnte «KERTO-Q» der FH Finnholz GmbH ein für die Herstellung der Verbindungskeile geeignetes Material sein. Je nach Plattenstärke verlaufen hier zwischen zwei und fünf Furnierschichten normal zur Haupttragrichtung. Aufgrund der beschränkten Plattenbreite von maximal 2,5 m, können zur Aufnahme der Zugbeanspruchung nur die quer orientierten Schichten herangezogen werden. Am Beispiel der 51 mm starken KERTO-Q Streifen würde nach der Fräsung nur mehr eine Furnierschicht zur Übertragung der Lasten zur Verfügung stehen (siehe Abbildung 4, mitte). Aus diesem Grund scheidet Furnierschichtholz in Form von KERTO-Q Streifen als Keilmaterial aus.

4.1.3. Furniersperrholz

Laut dem Auftraggeber war es geplant, die Koppelleisten aus dem Produkt BauBuche der Firma Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG herzustellen. Aufgrund der sich zum damaligen Zeitpunkt erst im Aufbau befindlichen Produktionsanlage wurden die Keile für die Hauptprüfungen (vgl. Kapitel 5) aus handelsüblichem Buchenfurniersperrholz hergestellt (siehe Abbildung 4, rechts). Bei Furniersperrholz kommt es aufgrund der Verklebung von sehr dünnen Schichten (i.d.R. 2-3 mm) zu einer Homogenisierung der Materialeigenschaften und somit zu einer Festigkeitszunahme. Durch die Verwendung von Laubholz (in diesem Fall Buche) wird dieser Effekt zusätzlich verstärkt. Außerdem weist Furniersperrholz, im Vergleich zu Vollholz, ein gleichmäßigeres Quell- und Schwindverhalten auf. Weiters stehen aufgrund der schichtweisen orthogonal gedrehten Orientierung der Furniere in den beiden Richtungen längs und quer eine ausreichende Anzahl an lasttragenden Lagen zur Verfügung.



Abbildung 4: Keilmaterialien. Links: Fichtensperrholz; Mitte: Furnierschichtholz KERTO-Q; Rechts: Buchenfurniersperrholz.

4.2. Optimierung der Keilgeometrie

Das beschriebene GREENETHIC X-FIX System zur Verbindung von Brettsperrholz-Wand-Elementen wurde im Zuge der Projektbearbeitung mithilfe von Finiten-Elementen-Berechnungen analysiert. Im Detail wurde die Geometrie der Koppelleisten (Keile) in Bezug auf den Flankenwinkel, die Keilhöhe sowie die Keilbreite optimiert und der Einfluss des Plattenaufbaues näher untersucht. Sämtliche FE-Modellierungen erfolgten mit der Software ABAQUS/Standard in der Version 6.11. Die Verbindungen wurden dabei als rein elastische 2D-Scheibenberechnung mit Kontaktflächen unter Berücksichtigung der Reibung erstellt. Somit wurde eine Spannungsumlagerung durch plastische Verformungen nicht in die Berechnung miteinbezogen.

Das FE-Modell wurde auf Basis eines Ausschnittes der Verbindung «ebener Wand-Wand-Stoß» erstellt. Aufgrund der Symmetriebedingungen in der Mitte des Keils wurde nur eine Hälfte der Verbindung betrachtet (siehe Abbildung 5, rechts). Der BSP-Plattenaufbau (5-schichtig) sowie die Keilgeometrie wurden analog zu den vom Auftraggeber vorgefertigten Testelementen angenommen und sind in Abbildung 5 ersichtlich. Aus diesen Elementen wurden Prüfkörper gefertigt und in weiterer Folge Vorprüfungen im Labor durchgeführt. Um die Prüfbedingungen möglichst real zu erfassen erfolgte die Modellierung der Flächen zwischen den Koppelleisten und der BSP-Platte auf Kontakt. Dazu wurden in der FE-Analyse Kontaktflächen modelliert und Reibungskoeffizienten von $\mu = 0,2$ und $\mu = 0,6$ untersucht.

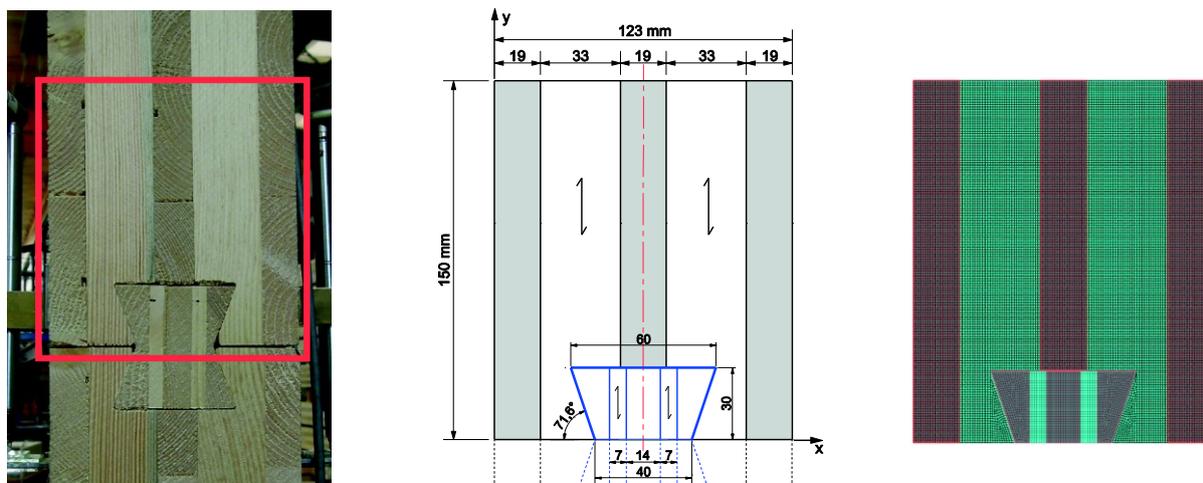


Abbildung 5: Links: BSP-Verbindung «ebener Wand-Wand-Stoß» mit Ausschnitt für die FE-Modellierung; Mitte: Maße des Plattenaufbaus und der Keilgeometrie; Rechts: FE-Modell

4.2.1. Ergebnisse der FE-Analyse

Aus den Ergebnissen der elastischen 2D-FE-Berechnungen konnten die folgenden Schlüsse für die Wahl der geeigneten Verbindungsgeometrie abgeleitet werden:

Ausführung der Koppelkeile mit

- möglichst geringem Flankenwinkel
Anmerkung: Bei kleiner werdender Flankenneigung verkleinern sich auch die durch Reibung auftretenden horizontalen Kräfte und somit die Querzugspannungen in der Ecke der Keilnut.
- möglichst großem Abstand zwischen der Ecke der Keilnut und der Klebefuge zwischen erster und zweiter Schicht des BSP-Elements (vgl. Abbildung 6, «x»)
Anmerkung: Der Widerstand gegen die horizontal wirkende Reibungskomponente hängt von der Steifigkeit des Restquerschnittes zwischen der Ecke der Keilnut und der BSP Oberfläche (vgl. Abbildung 6, «y») ab. Aufgrund der Brettorientierungen wird die Größe der Steifigkeit überwiegend vom Abstand «x» bestimmt.

x ... Abstand zwischen der Ecke der Keilnut und der Klebefuge zwischen erster und zweiter Schicht des BSP-Elements

y ... Abstand zwischen der Ecke der Keilnut und der BSP Oberfläche

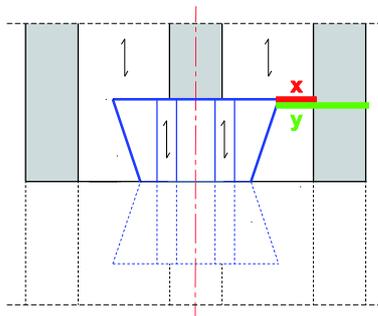
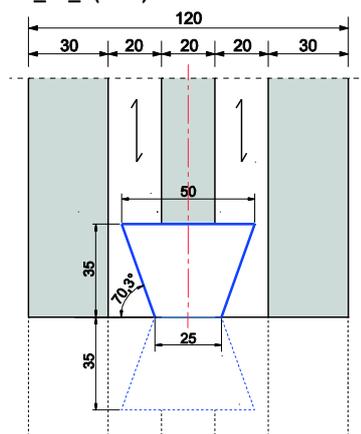


Abbildung 6: Abstände zur Beurteilung des Widerstandes gegen die Querzugbeanspruchung.

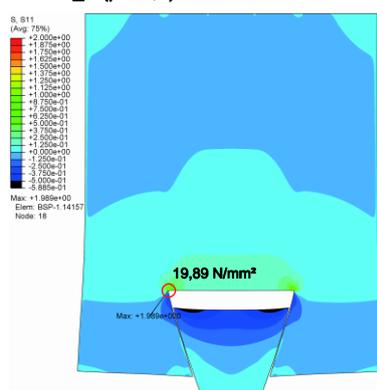
In Abbildung 7 sind die optimierte Keilgeometrie sowie die zugehörigen Spannungen in x-Richtung (Querzugspannungen) bei einem Reibbeiwert μ von 0,2 sowie 0,6 dargestellt. Die in den Ecken der Keilnuten auftretenden maximalen Spannungen dienen aufgrund der rein elastischen FE-Berechnung nur zum qualitativen Vergleich der einzelnen Varianten (siehe Anmerkung).

In Bezug auf die Ausgangsgeometrie wurde die maximale Keilbreite von 60 mm auf 50 mm und die minimale Breite in der Mitte des Keiles von 40 mm auf 25 mm reduziert. Die Keilhöhe wurde von 60 mm auf 70 mm vergrößert (vgl. Abbildung 5). Diese optimierten Keilabmessungen kamen in weiterer Folge bei den Prüfungen im Labor (Hauptprüfungen) zum Einsatz.

FE_V1_B(uche)



S11 V1_B ($\mu = 0,2$)



S11 V1_B ($\mu = 0,6$)

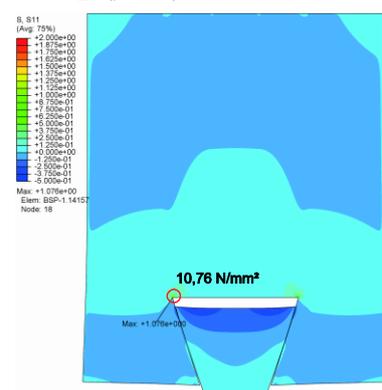


Abbildung 7: Optimierte Keilgeometrie und Ergebnisse der FE-Berechnung mit einem Reibbeiwert von $\mu = 0,2$ und $\mu = 0,6$.

Anmerkung: Da es sich um eine rein elastische Berechnung handelt, wurden weder plastische Spannungsumlagerungen noch ein Aufreißen der querzugbeanspruchten Teile berücksichtigt. Somit konnte eine realitätsnahe Spannungsumlagerung durch das numerische Modell nicht erfasst werden. Dies ist, neben der scharf einspringenden Ecke der Keilnut, auch der Grund für die hohen Querzugspannungen, welche in der Realität nicht auftreten und zumindest zum Teil durch Kräfteumlagerungen abgebaut werden können.

5. Prüftechnische Untersuchung der Verbindung

Im Rahmen dieses Projektes wurde, neben der ingenieurmäßigen Abschätzung und numerischen Berechnung bzw. Optimierung der Keilgeometrie, auch eine prüftechnische Untersuchung des Verbindungssystems durchgeführt. Im Detail wurden verschiedene Keilmaterialien (Fichtensperrholz und Buchenfurniersperrholz) sowie unterschiedliche Keilgeometrien und Plattenaufbauten untersucht. Dazu wurden, wie bereits angemerkt, Vor- und Hauptprüfungen durchgeführt. Nachfolgend wird nur auf die Ergebnisse der Hauptprüfungen eingegangen. Der Plattenaufbau des 5-schichtigen BSP-Elements mit einer Gesamtdicke $t_{\text{clt}} = 120 \text{ mm}$ sowie die optimierte Keilgeometrie sind in Abbildung 8 dargestellt. Die Keile dieser Verbindungen wurden aus Buchenfurniersperrholz hergestellt. Die Holzfeuchte lag bei allen Prüfkörpern (BSP und Keile) der Hauptprüfungen bei $u = 12 \pm 1 \%$.

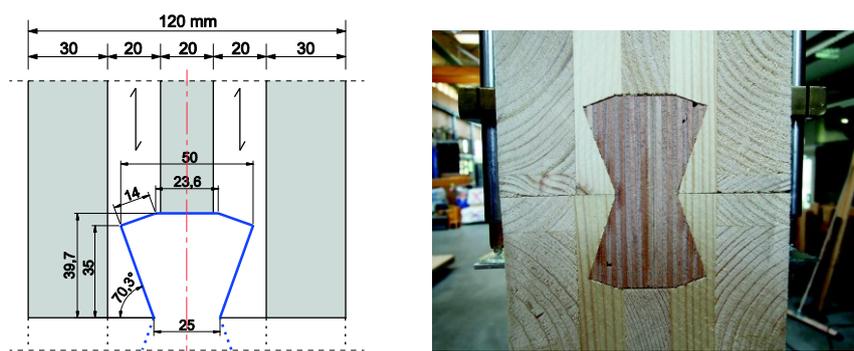


Abbildung 8: BSP-Plattenaufbau und Abmessungen des Schwalbenschwanzkeiles aus Buchenfurniersperrholz bei den Hauptprüfungen

5.1. Prüfkfigurationen

Um die Versagensart der Schwalbenschwanzverbindungen besser einschätzen zu können und um die Tragfähigkeit bzw. Steifigkeit des Verbindungssystems zu ermitteln, wurden Zug- und Schubprüfungen durchgeführt. Insgesamt wurden bei den Zugprüfungen je 6 Stück und bei den Schubprüfungen je 5 Prüfkörper geprüft. Nachfolgend werden diese Prüfkfigurationen kurz beschrieben.

5.1.1. Zugprüfung ebener Wand-Wand-Stoß (ZWW)

Für die Zugprüfungen der Konfiguration ebener Wand-Wand-Stoß wurden zwei BSP-Plattenteile mit einer Breite von 480 mm und einer Länge von 500 mm mithilfe der zweiteiligen, schwalbenschwanzförmigen Koppelleisten in einer Ebene kraftschlüssig verbunden. Die Lasteinleitung erfolgte über zwei Stahlteile (oben und unten), welche durch je sechs Vollgewindeschrauben $\text{Ø } 12,0 \times 120 \text{ mm}$ mit dem Prüfkörper verschraubt wurden (vgl. Abbildung 9, links).

5.1.2. Zugprüfung Wand-Wand-T (ZWWT)

Bei der Konfiguration Wand-Wand-T wurden zwei BSP-Plattenteile mit Längen von 580 mm und 415 mm T-förmig mit den Koppelleisten verbunden. Der kürzere Teil wurde dabei mittig auf dem Längeren fixiert. Die Breite beider Elemente betrug 480 mm. Die Abmessungen des längeren Teiles wurden, entsprechend des Lochrasters der Prüfmaschine, so gewählt, dass beide Ränder mit einem Doppel-U-Profil und Gewindestangen gegen den Auflagerbalken verspannt werden konnten. Zur Lasteinleitung diente wieder der bereits oben genannte Stahlwinkel mit sechs Holzbauschrauben $\text{Ø } 12,0 \times 120 \text{ mm}$ (vgl. Abbildung 9, oben mitte).

5.1.3. Zugprüfung Wand-Wand-Eck (ZWWE)

Die Konfiguration Wand-Wand-Eck unterscheidet sich von der Konfiguration Wand-Wand-T durch die Position des kürzeren Teiles. Dieser wurde nun am Rand (anstatt mittig) des längeren Elements angebracht. Um die Momentenbeanspruchung und somit

das Abheben bzw. die Schiefstellung des liegenden Teiles zu minimieren, wurde das Doppel-U-Profil weiter nach innen versetzt. Die Prüfkörperabmessungen und die Lasteinleitung über den Stahlwinkel blieben im Vergleich zur Konfiguration Wand-Wand-T unverändert (vgl. Abbildung 9, oben rechts)

5.1.4. Schubprüfung Wand-Wand-T (SWWT)

Für die Schubprüfungen der Konfiguration Wand-Wand-T wurden zwei stehende BSP-Plattenteile mit einer Höhe von 33 mm mit einem 600 mm langen liegenden BSP-Element verbunden. Die Koppelleisten wurden dabei in der Mitte der stehenden Teile angeordnet. Alle Elemente wiesen eine Breite von 480 mm auf. Aufgrund der einfacheren Umsetzbarkeit wurden die Prüfungen mit einer Druckbelastung durchgeführt. Die Lasteinleitung erfolgte dabei über ein, am liegenden Teil mittig positioniertes Stahlblech. Um ein Verdrehen der stehenden Elemente zu verhindern, wurden diese mittels Gewindestangen und Sicherungsscheiben an beidseitig angebrachten Stahlwinkeln fixiert (vgl. Abbildung 9, unten mitte).

5.1.5. Schubprüfung Wand-Wand-Eck (SWWE)

Die Schubkonfiguration Wand-Wand-Eck unterscheidet sich von der Schubkonfiguration Wand-Wand-T durch die Position des liegenden Teiles. Dieser wurde nun am oberen Rand (anstatt mittig) der stehenden Elemente angebracht.

Da eine Druckbeanspruchung bei dieser Konfiguration nicht zum gewünschten Ergebnis geführt hätte, musste der liegende Teil auf Zug belastet werden. Die Lasteinleitung wurde mit dem bereits bei den Zugprüfungen verwendeten Stahlwinkel in Verbindung mit sechs Vollgewindeschrauben $\varnothing 12,0 \times 120$ mm umgesetzt. Um ein Abheben zu verhindern, wurde der gesamte Prüfkörper über die stehenden BSP-Teile mit je vier Teilgewindeschrauben an einem Brettschichtholzträger fixiert und dieser wiederum mit zwei Doppel-U-Profilen und Gewindestangen an der Prüfmaschine niedergespannt (vgl. Abbildung 9, unten rechts).



Abbildung 9: Übersicht der Prüfkongfigurationen. Links: ZWW; Oben mitte: ZWWT; Unten mitte: SWWT; Oben rechts: ZWWE; Unten rechts: SWWE

5.2. Ergebniszusammenfassung der Hauptprüfungen

In Tabelle 1 sind die mittleren (F_{max}) und charakteristischen Bruchlasten (R_k), die Verbindungssteifigkeiten und die zugehörigen Variationskoeffizienten der Vor- sowie Hauptprüfungen angeführt. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die erreichbare Tragfähigkeit der Verbindung sehr stark vom Plattenaufbau und der Keilgeometrie abhängt.

Die Zugprüfungen der Konfigurationen ebener Wand-Wand-Stoß und Wand-Wand-T liefern in etwa die gleichen Ergebnisse. Bei den Zugprüfungen Wand-Wand-Eck kann ein Lastabfall von rund 20 % bis 30 % beobachtet werden. Der Wert bei den Eckverbindungen ist dabei besonders stark von der Geometrie und somit vom verbleibenden Querschnitt zur Lastaufnahme abhängig. Bei den Schubprüfungen (SWWT und SWWE) fällt der Lastabfall der Prüfkonfigurationen «T» zu «Eck» mit 15 % etwas geringer aus.

Bei den Verbindungsmittelsteifigkeiten ergibt sich zwischen den Vor- und Hauptprüfungen nur ein geringer Unterschied. Innerhalb des für die Auswertung der Steifigkeiten relevanten Bereichs zwischen $0,1 \cdot F_{est}$ und $0,4 \cdot F_{est}$ ist kein Einfluss des Koppelleistenmaterials feststellbar.

Der Einsatz von Buchenfurniersperrholz als Keilmaterial hat sich bewährt. Dadurch konnte ein Aufreißen der Keile verhindert und somit auch die Gesamtverformung der Verbindung deutlich reduziert werden. Buchenfurniersperrholz ist in der Lage, die auftretenden Kräfte ohne Rissbildung zu übertragen und deshalb als Keilmaterial besonders geeignet.

Tabelle 1: Mittelwerte der maximalen Bruchlasten F_{max} sowie der Verbindungssteifigkeiten

| Prüfkonfiguration | Keilmaterial | Mittelwert F_{max} bzw. F_{erst} | COV | R_k | Mittelwert Verbindungssteifigkeit | COV |
|-------------------|--------------|---|------|-------|-----------------------------------|-------|
| [-] | [-] | [kN] | [%] | [kN] | [N/mm] | [%] |
| ZWW | Fichte | 17,9 | 4,4 | 16,1 | 4900 | 4,7 |
| ZWWT | | 17,3 | 8,6 | 14,1 | 4800 | 20,0 |
| ZWWE | | 14,6 | 9,1 | 11,8 | 3750 | 10,1 |
| ZWW-B | Buche | 14,6 | 11,1 | 10,8 | 7000 | 37,9 |
| ZWWT-B | | 13,4 | 8,6 | 11,0 | 4500 | 8,87 |
| ZWWE-B | | 10,4 | 13,9 | 7,48 | 3700 | 32,8 |
| SWWT-B | | 15,8 (je Seite 7,90) | 18,8 | ~13,1 | ~10000 | ~29,3 |
| SWWE-B | | 13,8 (je Seite 6,90) | 11,5 | 10,5 | ~9800 | ~19,8 |

5.2.1. Ergebnisvergleich der Vor- und Hauptprüfungen (Zug)

Beim Vergleich der Vor- und Hauptprüfungen unter einer Zugbeanspruchung fällt auf, dass die Lasten der Vorprüfungen im Mittel rund 30 % über den Lasten der Hauptprüfungen liegen. Diese Tatsache kann auf den unterschiedlichen BSP-Elementaufbau der Prüfkörper zurückgeführt werden. Um die Leistungsfähigkeit der optimierten Keilgeometrie einschätzen zu können, wurden zwei Testprüfungen der Verbindung ZWW mit dem BSP-Aufbau der Vorprüfungen und den Buchenkoppelleisten der Hauptprüfungen durchgeführt. Der Mittelwert aus den beiden Prüfungen beträgt 28,2 kN (28,6 kN und 27,8 kN) und liegt deutlich über jenem der Vorprüfungen (17,9 kN, vgl. Tabelle 1).

Durch die Optimierung der Keilgeometrie sowie des Keilmaterials konnte die maximale Last der Verbindung ZWW um rund 57 % gesteigert werden.

5.3. Versagensformen und Ergebnisinterpretation

Nachfolgend werden die Versagensformen der einzelnen Verbindungstypen näher erläutert. Abbildung 10 zeigt die Versagensarten der verschiedenen Prüfkörper. In Abbildung 11 sind exemplarisch die Kraft-Weg Diagramme der Verbindungen ZWWT und ZWWE dargestellt.

5.3.1. Zugprüfung ebener Wand-Wand-Stoß (ZWW)

Wie bei den Vorprüfungen kam es auch bei den Hauptprüfungen bei allen Prüfkörpern zu einem Versagen der BSP-Elemente auf Querzug. Die Ausgangspunkte der Rissbildung waren die äußeren Ecken der Koppelleisten.

5.3.2. Zugprüfung Wand-Wand-T (ZWWT)

Bei allen Prüfkörpern konnte ein Querzugversagen der stehenden BSP-Elemente festgestellt werden. Die verwendeten Koppelleisten aus Buchenfurniersperrholz wurden nicht deformiert und es kam auch zu keiner Rissbildung.

5.3.3. Zugprüfung Wand-Wand-Eck (ZWWE)

Bei allen Prüfkörpern der Konfiguration ZWWE war ein sehr sprödes Bruchverhalten zu beobachten (vgl. Abbildung 11, rechts). Das Querzugversagen trat dabei im liegenden BSP-Element über die gesamte Prüfkörperbreite auf. Die Koppelleisten kamen im Zuge der Prüfungen nicht zu Schaden.

5.3.4. Schubprüfung Wand-Wand-T (SWWT)

Die Schubbeanspruchung verursachte bei allen fünf Prüfkörpern ein Querzugversagen im liegenden Teil. Bei weiterer Laststeigerung wächst die Durchbiegung des liegenden BSP-Elementes und führt zu einem Einhängeeffekt aufgrund der auftretenden Reibungskräfte. Dabei konnte ein gegenseitiges horizontales Verschieben der Koppelleisten beobachtet werden. Da sich die maximale Last bei dieser Konfiguration je zur Hälfte auf die beiden Seiten des Prüfkörpers aufteilt, war die Schubbeanspruchung der Verbindungskeile gering. Ein Versagen der Koppelleisten konnte daher nicht beobachtet werden.

5.3.5. Schubprüfung Wand-Wand-Eck (SWWE)

Bei zwei der fünf Prüfkörper kam es zu einem Aufreißen in den stehenden BSP-Teilen und in weiterer Folge zu einem spröden Querzugversagen über die gesamte Prüfkörperbreite. Die weiteren drei Prüfkörper versagten ebenfalls auf Querzug. Die Risse traten nun allerdings in den liegenden BSP-Elementen auf, was zu einem duktilen Versagen der Verbindung führte. Auch im Zuge dieser Prüfserie nahmen die Koppelleisten keinen Schaden.

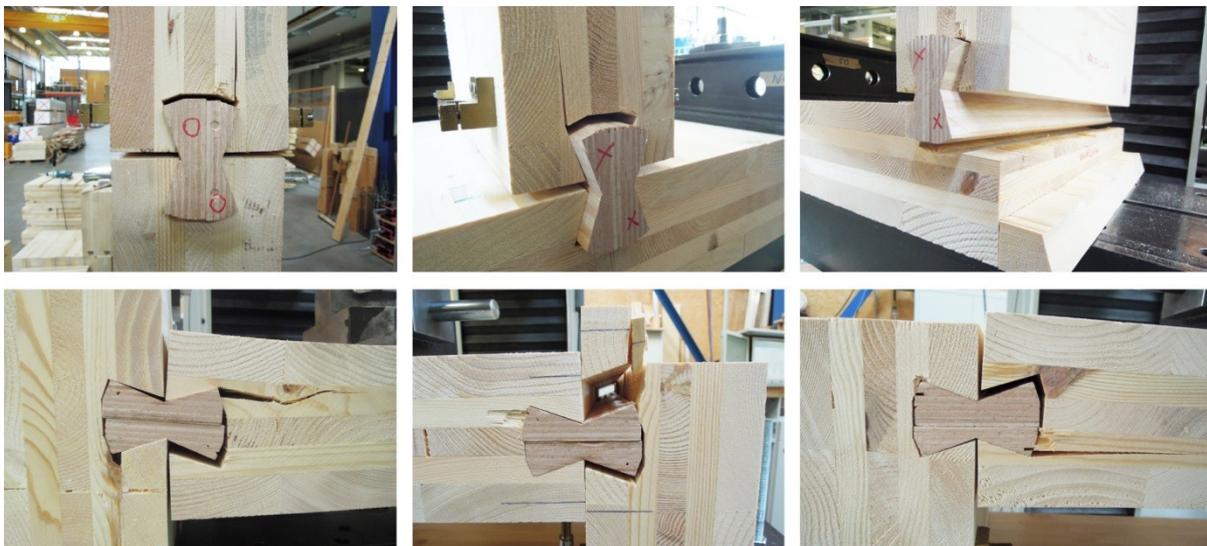


Abbildung 10: Übersicht der Versagensarten an den verschiedenen Prüfkörpern.

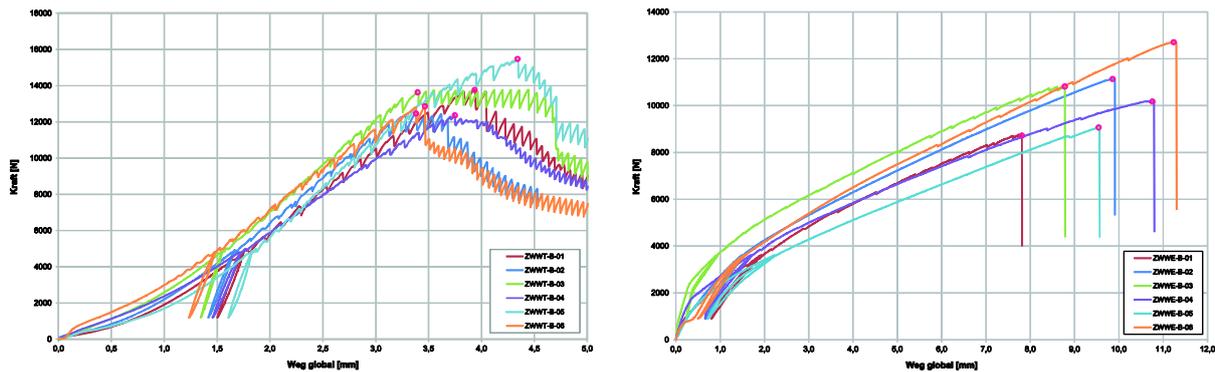


Abbildung 11: Kraft-Weg-Diagramme und maximale Bruchlasten F_{max} der Verbindungen ZWWT und ZWWE.

6. Bauphysikalische Untersuchungen

Um eine Aussage über die «Dichtheit» des GREENETHIC X-FIX Verbindungssystems für Brettsperrholz zu erhalten, wurde das Institut für Hochbau an der TU Graz mit angeschlossenen Labor für Bauphysik (notifizierte und akkreditierte Prüf- und Überwachungsstelle) mit Luftdurchlässigkeitsprüfungen gemäß ÖNORM EN 1026 beauftragt. Zur Herstellung der Prüfkörper wurden zwei 1000 mm breite und 1800 mm hohe BSP-Elemente durch Koppelleisten aus Buchenfurniersperrholz verbunden. Die Prüfkörper wiesen somit eine Gesamtbreite von 2000 mm und eine Gesamthöhe von 1800 mm auf. Die Prüfkörperhöhe entsprach zugleich der geprüften Fugenlänge. Der BSP-Plattenaufbau sowie die Keilgeometrie waren ident zu jenen der Hauptprüfungen (vgl. Abbildung 8) ausgebildet.

Insgesamt wurden die drei folgenden Konfigurationen untersucht:

- Prüfkörper 1: Auftreten einer 1 mm breiten Fuge zwischen den Koppelleisten und den Fräsungen in den BSP-Elementen. Dies soll ein mögliches Schwindverhalten des Keiles, wie es in der Praxis bei zu hoher Holzfeuchte zum Zeitpunkt des Einbaues auftreten kann, simulieren.
- Prüfkörper 2: passgenaue Fertigung der Koppelleisten, d. h. es ist kein Luftzwischenraum zwischen den Keilen und der Fräsung (Keilnut) vorhanden.
- Prüfkörper 3: Prüfkörper 3 basiert auf Prüfkörper 1. Dazu wurde dieser zerlegt und auf der linken sowie rechten Seite des Keiles je zwei unkomprimierte Fugendichtbänder mit den Abmessungen 9 x 4 mm angebracht (siehe Abbildung 12, mitte). Damit sollte festgestellt werden, ob trotz des Luftzwischenraumes (1 mm) zwischen der Keilnut und den Koppelleisten mithilfe der Dichtbänder eine Luftdichtheit der Verbindung erreicht werden kann.

Nachfolgend sind einige exemplarische Fotos der Luftdurchlässigkeitsprüfungen eingefügt (Abbildung 12).



Abbildung 12: Links: Verbindung mit einem Einbauspiel von 1 mm; Mitte: Anordnung der Fugendichtbänder am Prüfkörper mit einem Luftzwischenraum zwischen den Koppelleisten und der Keilnut; Rechts: im Prüfstand eingebauter Prüfkörper.

6.1. Zusammenfassung der Prüfergebnisse

Die Prüfungen zeigten, dass die Luftdurchlässigkeit bei vorhandenem Einbauspiel zwischen den Koppelleisten und den BSP-Elementen etwas größer ist als bei den Prüfkörpern mit passgenauer Verbindung. Nach dem Einkleben von Fugendichtbändern ist jedoch auch der Prüfkörper mit planmäßigem Einbauspiel als «dicht» anzusehen. Das Gleiche gilt auch für die Prüfkörper mit passgenauer Koppelleiste. Hier ist die Durchströmung auch ohne Dichtband sehr klein und somit praktisch keine Luftdurchlässigkeit gegeben. Um die Luftdichtheit trotz eventueller Ungenauigkeiten bei der Produktion sowie möglicher Zwischenräume aufgrund von Schwinden des Keiles sicherzustellen, wird die Anordnung von Fugendichtbändern für die Ausführungspraxis empfohlen.

7. Resümee und Ausblick

Mit dem X-Fix Verbindungssystem für BSP wurde von der Firma GREENETHIC eine neue Möglichkeit zur Verbindung von BSP-Wand-Wand-Elementen entwickelt. Dieses wurde im Rahmen der Ergebnisse des vorgestellten Forschungsprojektes optimiert und auf ihre Verbindungstragfähigkeit bzw. –Steifigkeit sowie die Luftdichtheit geprüft.

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die Tragfähigkeit des X-Fix Verbindungssystems für BSP-Elemente zur Verbindung üblicher Wand-Wand-Elemente des Hochbaus geeignet ist. Die tatsächliche Tragfähigkeit hängt jedoch sehr stark vom Querschnittsaufbau des eingesetzten BSP-Elements sowie der Keilgeometrie ab.

Weiters zeigten die durchgeführten FEM-Untersuchungen, dass die auftretenden Querspannungen in den Ecken der Keilnut mit steigendem Reibungskoeffizienten μ deutlich abnehmen. Eine zackenförmige Profilierung der Koppelleisten in Längsrichtung könnte die Tragfähigkeit der Verbindung weiter erhöhen. Wie einzelne Testprüfungen im Labor zeigten, ist der Einsatz in 3-schichtigen BSP-Aufbauten aufgrund der zu geringen Tragfähigkeit nicht möglich.

Die Prüfungen im Labor zeigten, dass die Verbindung Wand-Wand-Eck (ZWWE-B) unter einer Zugbeanspruchung die geringste Bruchlast aufweist. Der Abfall um rund 30 % im Vergleich zur Konfiguration Wand-Wand-T war, aufgrund der bei der Eckverbindung fehlenden Querschnittsfläche, zu erwarten. Als Lösungsansatz zur Optimierung wäre z. B. die Verwendung von Verbindungselementen mit höheren Festigkeitseigenschaften in Kombination mit zusätzlich ausgerundeten Ecken der Keilnuten denkbar (vgl. Abbildung 13, links oben). Ein solches Verbindungselement wäre auch für die Tragfähigkeiten der Verbindung unter einer Schubbeanspruchung von Vorteil.

Die Reduzierung der Leistungsfähigkeit der Eckverbindung könnte auch durch einen Überstand der anschließenden Wand gelöst werden. Dadurch würde sich das Tragverhalten an das der Verbindung Wand-Wand-T annähern und sich die Tragfähigkeit erhöhen. Der Überstand des BSP-Elements kann dabei in die Fassadenkonstruktion integriert werden, sodass keine Einbußen am optischen Erscheinungsbild zu befürchten sind (siehe Abbildung 13, rechts). Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Tragfähigkeit ist die Verstärkung der BSP-Elemente mittels Holzdübeln bzw. Holzschrauben. Durch Einschlagen bzw. Einschrauben vor den Keilnuten werden die BSP-Elemente in Bezug auf das maßgebende Querschnittsaufreißen der Lamelle verstärkt (vgl. Abbildung 13, links unten).

Die Tragfähigkeiten und vor allem auch die Luftdichtheit des Systems sind nur dann gegeben, wenn eine passgenaue Fertigung der Koppelleisten und der Keilnuten gewährleistet werden kann. Ein Spiel zwischen den Verbindungsleisten und der Keilnut (z. B. durch Schwinden des Keilmaterials) ist zu vermeiden. Besonderes Augenmerk muss deshalb auf die Holzfeuchte bei der Herstellung bzw. auf die spätere Ausgleichsfeuchte im Bauwerk gerichtet werden.

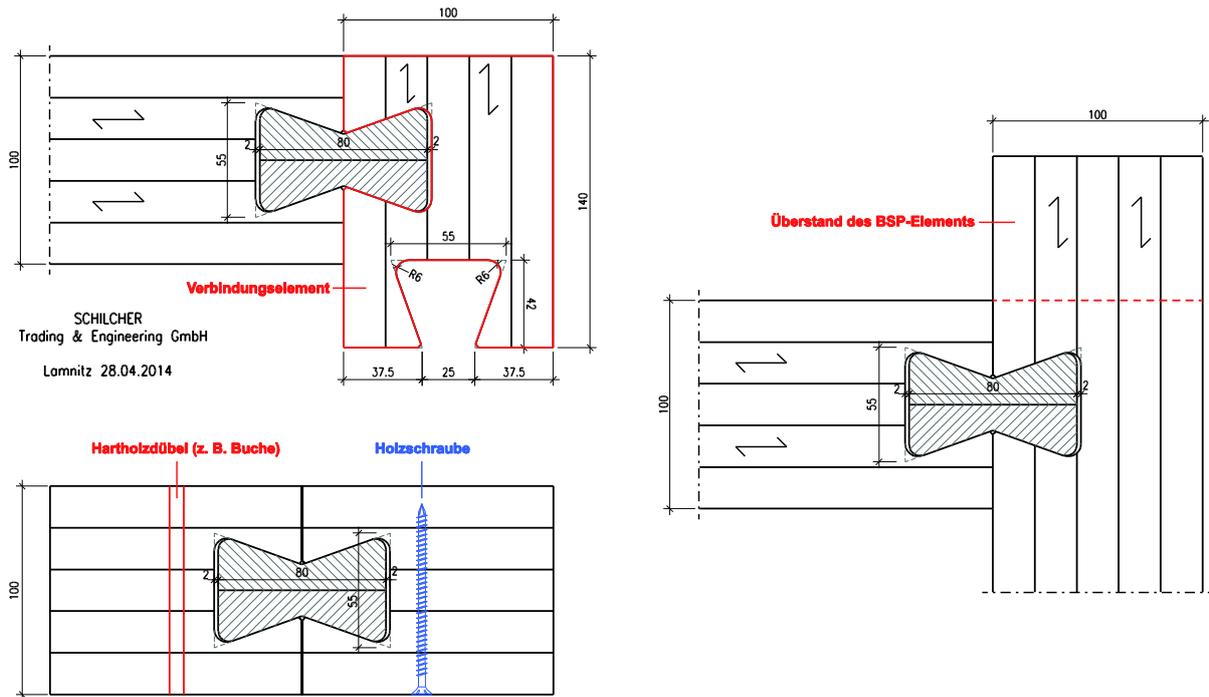


Abbildung 13: Links oben: Verbindungselement höherer Festigkeit zur Tragfähigkeitssteigerung der Eckverbindung; Links unten: Querzugverstärkung der BSP-Elemente durch Hartholzdübel oder Holzschrauben; Rechts: mögliche Variante zur Erhöhung der Tragfähigkeit der Verbindung Wand-Wand-Eck durch Überstand des BSP-Elements.

8. Literaturquellen

- [1] DERIX Holzleimbau: *X-LAM Brettsperrholz – Großformatige Bauelemente für Dach, Decke und Wand XXL* [http://www.derix.de/data/X_LAM_Derix_DE.pdf]
- [2] SCHICKHOFER, G. ; BOGENSPERGER, T. ; MOOSBRUGGER, T. (Hrsg.): *BSP-Handbuch : Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz*. 2. Aufl. Graz : Verlag der technischen Universität Graz, 2010. – ISBN 978-3-85125-109-8.
- [3] NORM ÖNORM EN 338: *Bauholz für tragende Zwecke : Festigkeitsklassen*, 1. Juli 2003
- [4] NORM DIN 1052: *Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken*, Dezember 2008
- [5] NORM ÖNORM EN 26891: *Holzbauwerke – Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln, Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens*, Februar 1991
- [6] NORM ÖNORM EN 14358: *Holzbauwerke – Berechnung der 5%-Quantile für charakteristische Werte und Annahmekriterien für Proben*, April 2007