

Ein Beitrag zur Bestimmung der Scheibenschubfestigkeit von Brettsperrholz

Literaturstudie | Prüfkörperentwicklung | Versuchsdurchführung | Auswertung

M-4-03/2011



Bernhard Hirschmann

Institut für Holzbau und Holztechnologie
Technische Universität Graz

Ein Beitrag zur Bestimmung der Scheibenschubfestigkeit von Brettsperrholz

Masterarbeit von
Bernhard Hirschmann

Eingereicht am
Institut für Holzbau und Holztechnologie



Fakultät für Bauingenieurwissenschaften
Technische Universität Graz

Begutachter
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer

Betreuer
Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bogensperger

Graz, April 2011

Meinen Eltern Alois und Maria,
und meinen Geschwistern
Tamara, Norbert, Viktoria und Andreas
in Dankbarkeit gewidmet.

Eidesstaatliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und/oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ich versichere, dass ich dieses Masterarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einem Beurteiler oder Beurteilerin) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Graz, April 2011

Bernhard Hirschmann

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei jenen Persönlichkeiten bedanken, die mich während des Studiums und bei der Erstellung dieser Masterarbeit unterstützt haben.

Zuerst möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken. Sie haben mich in meinen Entscheidungen immer unterstützt und mir fürsorglichen Rückhalt auch in den nachdenklicheren Zeiten gegeben. Ich bin euch unendlich dankbar dafür.

Besonderer Dank gebührt meinem „Betreuerteam“ unter der Leitung von Thomas Bogensperger, der mich mit Geduld, Verständnis und Engagement durch die letzten Monate geführt hat. Bei Ulrich Hübner bedanke ich mich ganz herzlich für die unermüdliche Unterstützung bei der statistischen Auswertung. Ein herzliches Danke auch an Elisabeth Kastner für die vielen kleinen wertvollen Tipps und Anregungen. Bedanken möchte ich mich auch bei Robert Jöbstl, Bernd Heissenberger und Thomas Kröpfl, die mich bei der Prüfungsvorbereitung und -durchführung tatkräftig unterstützt und mir mit so manchem Praxistipp weitergeholfen haben.

An dieser Stelle möchte ich mich auch bei Thomas Moosbrugger und Harald Krenn ganz herzlich bedanken. Ich durfte bei euch drei Jahre lang als Studienassistent arbeiten und vor allem lernen. Es war in Summe eine sehr intensive Zeit, aber ein ausgesprochen wertvoller Abschnitt meiner Ausbildung.

Schlussendlich möchte ich mich bei Prof. Gerhard Schickhofer und allen weiteren Mitarbeitern des Instituts für Holzbau und Holztechnologie und der holz.bau forschungs gmbh bedanken, für die lehrreiche Zeit am Institut und der Beantwortung der unzähligen Fragen.

Kurzfassung

Das Brettsperrholz wurde in den letzten 15 Jahren zu einem vielseitig einsetzbaren Holzbauprodukt entwickelt und wird in den Herstellerwerken als großformatiges Plattenelement produziert, welches sich durch seinen hohen Vorfertigungsgrad auszeichnet.

Als Teil des Tragsicherheitsnachweises von BSP-Scheibenelementen gilt der Scheibenschubnachweis. Durch die spezielle Struktur von Brettsperrholz setzt sich der Scheibenschubnachweis aus dem Mechanismus I „Schub“ und dem Mechanismus II „Torsion“ zusammen. Der Fokus dieser Masterarbeit konzentriert sich auf die versuchstechnische Ermittlung der Scheibenschubfestigkeitskenngröße für den Mechanismus I.

Zu Beginn dieser Masterarbeit werden die Herstellung und die Einsatzbereiche vom Brettsperrholz zusammenfassend betrachtet und die Theorie zur Scheibenbemessung, Steifigkeitenermittlung und Nachweisführung, sowie ein praktisches Bemessungsbeispiel erläutert.

Eine Literaturstudie betrachtet bereits geleistete Arbeiten zum Thema zusammenfassend und bildet die Grundlage für die folgenden Tätigkeiten.

Auf Basis von Normenwerken und den Ergebnissen vorangegangener Untersuchungen wird eine neue Versuchskonfiguration zur Ermittlung der Scheibenschubfestigkeit entwickelt und deren Tauglichkeit überprüft.

Mit Hilfe einer Parameterstudie werden mögliche Einflussfaktoren auf die Scheibenschubfestigkeit mit zwei verschiedenen Prüfkonfigurationen untersucht und die Ergebnisse miteinander verglichen.

Den Abschluss dieser Masterarbeit bilden ein zusammenfassender Rückblick auf die geleisteten Tätigkeiten, sowie ein Ausblick auf offene Fragen und weiteren Forschungsbedarf.

Abstract

Over the last 15 years Cross Laminated Timber (CLT) has proven to be a multi-purpose timber construction product. It is produced as a large-sized plate element that is characterized by its high level of prefabrication.

One part of ultimate limit state design of CLT plate elements loaded in plane is the verification of shear stresses in plane. Due to the special structure of CLT this verification process is composed of Mechanism I “Shear” and Mechanism II “Torsion”. This master thesis focuses on the experimental determination of shear strength properties of a plate loaded in plane for Mechanism I.

In the beginning the manufacturing and the application ranges of CLT are outlined. Afterwards the theory of design of plates loaded in plane, the determination of stiffness and the verification process as well as a practical design example are illustrated.

A literature study summarizes the existing knowledge concerning this topic and serves as a basis for the following work.

Based on existing standards and the results of previous investigations a new test configuration for the determination of shear strength of CLT plates loaded in plane is developed and tested for its applicability.

Furthermore, a parameter study is carried out with two different test configurations to compare the results and identify factors possibly influencing shear strength of CLT plates loaded in plane.

In the end an overview of the work, carried out in the course of this thesis, is given and open questions as well as future research needs are discussed.

Zielsetzung, Gliederung, Inhalt

Die statische Bemessung von Brettsperrholzbauteilen setzt sich im Allgemeinen aus dem Grenzzustand der Tragsicherheit (ULS) und dem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) zusammen. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Tragsicherheitsnachweis von Brettsperrholzbauteilen, welche unter Einwirkungen in Scheibenebene stehen.

Ein notwendiger Teil dieser ULS-Nachweise für BSP-Bauteile ist der Scheibenschubfestigkeitsnachweis. Dieser setzt sich aus dem Torsions- und Schubfestigkeitsnachweis zusammen.

Ziel dieser Arbeit ist es, für die Ermittlung der Schubfestigkeitskenngrößen eine geeignete Prüfkongfiguration zu finden, welche es erlaubt grundlegende Einflussparameter zu untersuchen. Mit der gefundenen Prüfkongfiguration soll eine Parameterstudie durchgeführt werden.

Aus der abschließenden Betrachtung der Prüfergebnisse soll ein Vorschlag für ein Prüfprogramm zur Ermittlung der charakteristischen Festigkeitskenngröße „Scheibenschub“ erarbeitet werden.

Diese Masterarbeit ist in folgende Kapitel unterteilt:

- Kapitel 1 – Einführung in die Aufgabenstellung
- Kapitel 2 – Prüfkörperentwicklung/Prüfplanung
- Kapitel 3 – Prüfkörperherstellung
- Kapitel 4 – Prüfdurchführung
- Kapitel 5 – Auswertung der Prüfergebnisse
- Kapitel 6 – Resümee und Ausblick
- Kapitel 7 – Literaturverzeichnis
- Anhang

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung in die Aufgabenstellung	5
1.1	Brettspertholz – Herstellung und Einsatzbereiche	5
1.1.1	Herstellung	5
1.1.2	Einsatzbereiche	8
1.2	Grundlagen der Scheibentheorie und Tragfähigkeitsnachweis für BSP-Strukturen [15]	9
1.2.1	Einleitung.	9
1.2.2	Scheibensteifigkeiten eines BSP-Elementes – Grundlagen.	10
1.2.3	Dehnsteifigkeiten D_x und D_y für ein BSP-Element.	11
1.2.4	Schubsteifigkeit D_{xy} für ein gedanklich unendlich dickes BSP-Element mit konstanten Schichtdicken.	12
1.2.5	Schubsteifigkeit D_{xy} für Elemente mit endlicher Schichtanzahl und variablen Schichtdicken (t_i)	16
1.2.6	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) – Scheibenverformung.	18
1.2.7	Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) – Normalkraftnachweise für Elemente mit variablen Einzelschichtdicken (t_i)	18
1.2.8	Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) – Schubfestigkeitsnachweis in einer gedanklich unendlich dicken BSP-Scheibe mit gleichen Schichtdicken $t_i = t$	19
1.2.9	Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) – Schubfestigkeitsnachweis bei endlicher Schichtanzahl und variablen Einzelschichtdicken (t_i)	22
1.2.10	ULS-Scheibenschubnachweis gemäß Zulassungen	25
1.2.11	Ansetzbare Scheibenschubfestigkeit für Mechanismus I.	27
1.2.12	Ansetzbare Torsionsfestigkeit in der Klebefläche für Mechanismus II.	28
1.2.13	Vergleich der beiden Mechanismen I+II in einer BSP-Scheibe	28
1.3	Scheibenbeispiel	30
1.3.1	Geometrie und maßgebende Lastfallkombination.	30
1.3.2	ULS – Schubfestigkeitsnachweis	31
1.4	Literaturstudie – Ausgewählte Arbeiten zum Thema	36
1.4.1	Dissertation von R. Bosl [5].	36
1.4.2	Diplomarbeit von G. Wallner [19]	37
1.4.3	Zulassungsprüfungen nach dem CUAP-Verfahren [21].	39
1.4.4	Forschungsbericht von G. Traetta [17]	41
1.4.5	Vergleich der technischen Schubfestigkeiten im CIB-paper von Th. Bogensperger [4]	44
1.4.6	CIB-paper von R. Jöbstl [10]	44
1.5	Stand der Normung	47
1.5.1	Eurocode 5	47
1.5.2	DIN 1052:2008-12 [22]	47
1.5.3	Fazit.	49

2	Prüfkörperentwicklung/Prüfplanung	51
2.1	Entwicklung der Prüfkonfiguration „EN“	51
2.2	Prüfkonfiguration „CIB“	55
2.3	Tastversuche	56
2.3.1	Drucktastversuche	56
2.3.2	Zugtastversuche	58
2.4	Prüfplanung	60
2.4.1	Statische Überprüfung der Prüfkonfigurationen	60
2.4.2	Untersuchte Parameter	64
2.4.3	Konstante Parameter	65
2.4.4	Prüfplan	67
3	Prüfkörperherstellung	69
3.1	Ausgangsmaterial	69
3.1.1	Vorsortierung	69
3.2	Zuschnitt	70
3.2.1	Feuchtigkeitskontrolle	71
3.2.2	Sortierung nach der Rohdichte	72
3.3	Holztrocknung	73
3.4	Klebeprozess	75
3.4.1	Hobeln	75
3.4.2	Rohdichtebestimmung	75
3.4.3	Klebevorgang	76
3.4.4	Pressen	77
3.5	Formatieren/Finish	78
4	Prüfdurchführung	81
4.1	Prüfaufbau	81
4.1.1	Prüfkonfiguration „CIB“	82
4.1.2	Prüfkonfiguration „EN“	82
4.2	Prüfungsparameter	83
4.3	Genereller Ablauf eines Prüfvorganges	84
4.4	Bestimmung der Holzfeuchtigkeit	84
5	Auswertung der Prüfergebnisse	85
5.1	Einzelauswertung	85
5.1.1	Einleitung	85
5.1.2	Holzfeuchtigkeit	86
5.1.3	Rohdichte	86
5.1.4	Schubfestigkeit	88
5.1.5	Verschiebemodul	89
5.2	Vergleich der Prüfserien	90

5.2.1	Einleitung	90
5.2.2	Bemerkungen zur statistischen Auswertung	91
5.2.3	Holzfeuchtigkeit	92
5.2.4	Rohdichte	92
5.2.5	Kraft-Weg-Diagramme	93
5.2.6	Parameter Brettbreite	96
5.2.7	Parameter Brettstärke	97
5.2.8	Parameter Stamm- und Jahrringlage	99
5.2.9	Parameter Fugenbreite	101
5.2.10	Multiple Mittelwertmodelle für die Schubfestigkeit	103
6	Resümee und Ausblick	113
6.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	113
6.2	Weiterer Forschungsbedarf	114
6.2.1	Scheibenschubfestigkeit	114
6.2.2	Vorschlag einer international anerkannten Prüfkongfiguration	114
6.2.3	Untersuchungen in Bauteilgröße	115
7	Literaturverzeichnis	117
Anhang A	– Konstruktionspläne	121
A.1	– Konstruktionsplan für einen typischen „CIB“-Probekörper	121
A.2	– Konstruktionsplan für einen typischen „EN“ Probekörper	122
A.3	– Konstruktionsplan Zugtestversuch	123
A.4	– Konstruktionsplan Schlitzblech-Koppelteil	124
A.5	– Stabdübelbemessung für die Zugtestversuche	125
Anhang B	– Statische Überprüfung der Probekörper	126
B.1	– Probekörper „EN“	126
B.2	– Probekörper „CIB“	127
Anhang C	– Prüfkörperherstellung	128
C.1	– Massenermittlung „CIB“	128
C.2	– Massenermittlung „EN“	129
C.3	– Feuchtigkeitskontrolle	130
C.4	– Klebstoffdatenblatt	131
Anhang D	– Zusammenfassung der Prüfergebnisse	133

1 Einführung in die Aufgabenstellung

Einleitung

Kapitel 1 beschäftigt sich mit der Herstellung von Brettsper Holz (BSP), sowie dessen Einsatzbereichen. Des Weiteren werden die theoretischen Grundlagen der Modellbildung und Nachweisverfahren für die Scheibenbemessung erläutert und an einem Beispiel aus der Praxis gezeigt. Abschließend werden anhand einer Literaturstudie Arbeiten zum Thema zusammenfassend betrachtet.

1.1 Brettsper Holz – Herstellung und Einsatzbereiche

Vgl. [15]

1.1.1 Herstellung

Die Entwicklung von Brettsper Holz (BSP) geschah in einer Zeit, in der die schlecht vermarktbare Seitenware einer neuen Verwendung zukommen sollte. Mit diesem ersten Ausgangsmaterial sollte einerseits die Wertschöpfung der Seitenware erhöht werden und andererseits ein großformatiges flächiges Holzbauprodukt als alternatives Bauelement angeboten werden.

Die Nachfrage an BSP überstieg schon bald nach Einführung die Verfügbarkeit von Seitenware als Ausgangsmaterial. Als neues Ausgangsmaterial wurde jetzt auch auf das Grundmaterial zur Brettschichtholzproduktion zurückgegriffen.

Ausgangsmaterial Brett:

Eine Brettsper Holzplatte besteht aus einzelnen Brettern, die kreuzweise miteinander verklebt werden. Das Tragverhalten einer BSP-Platte (Steifigkeit und Festigkeit) wird maßgeblich durch die Eigenschaften der Einzelbretter beeinflusst. Aus diesem Grund müssen die Bretter einer definierten Festigkeitsklasse angehören. In den Europäischen Technischen Zulassungen für BSP werden die Festigkeitsklassen der Ausgangsbretter festgesetzt, welche den Anforderungen nach der EN 338 „Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen“ entsprechen müssen. Es wird hauptsächlich die Festigkeitsklasse C24 nach EN 338 eingesetzt. Für Querlagen kann auch C16 oder C18 verwendet werden. Als Holzarten werden vorwiegend Fichte, Tanne und Kiefer verwendet. Aus ästhetischen oder mechanischen Gründen könnten auch Lärche und Douglasie oder Laubholzarten wie Esche, Buche, Eiche, Pappel oder Robinie zum Einsatz kommen.

Herstellungsprozess:

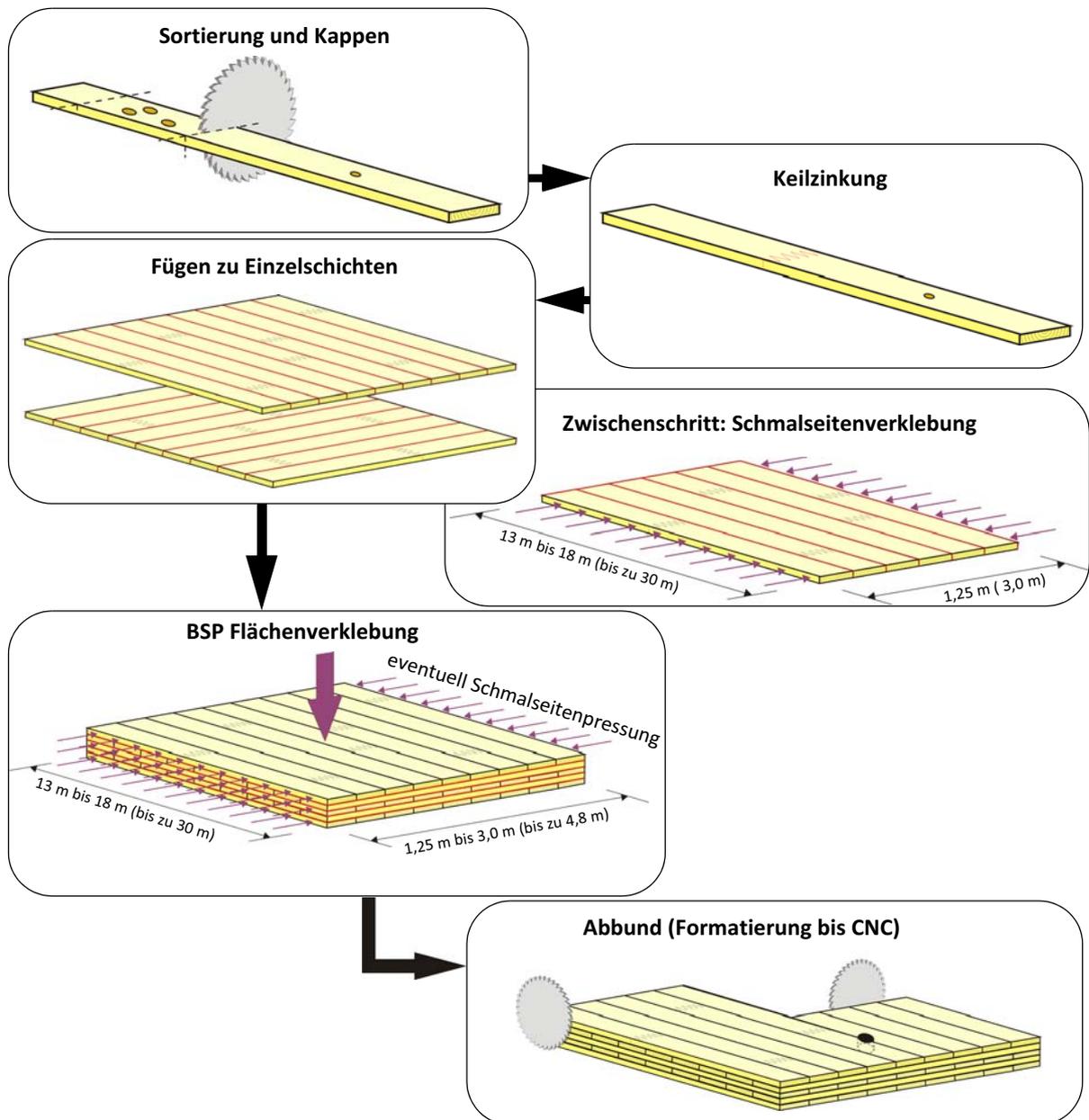


Abb. 1.1: Allgemeiner Produktionsprozess von Brettsperrholz [15]

Am Beginn eines jeden Produktionsprozesses steht die Sortierung der Brettware. Die Sortierung wird aufgrund der großen Kubaturen maschinell durchgeführt. Durch Sortierung werden Fehlstellen lokalisiert und ausgekappt. Im Regelfall werden die Bretter mittels Keilzinkenverbindung zu Endloslamellen weiterverarbeitet. Der anschließenden Dickenhobelung kommt besonderer Bedeutung zu. Die Anforderungen an die Genauigkeit sind sehr hoch, da durch die anschließende flächige Verklebung keine unzulässig dicken Klebstoffugen auftreten dürfen, siehe Abb. 1.2.

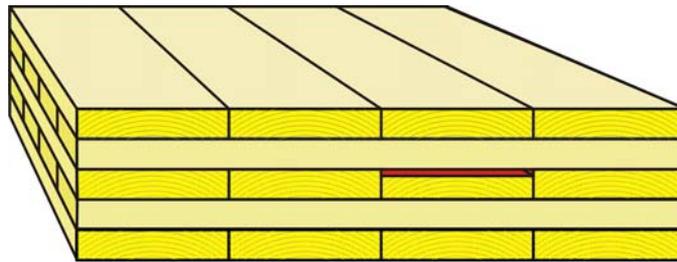


Abb. 1.2: Brettsperrholzquerschnitt mit einer zu dünnen Lamelle [15]

Die einzelnen Brettlamellen werden nach der Keilzinkung entweder zu Einschichtplatten mit definierter Schmalseitenverklebung verarbeitet, oder einzeln schichtweise zu einer BSP-Platte aufgebaut. Nach der Beileimung, entweder mit dem Lamellen-Durchlauf-Verfahren oder Vollflächenbeileimung, wird das „Bretterpaket“ im Pressbett positioniert. Die verwendeten Klebstoffe müssen für die Herstellung tragender Bauteile aus Holz zugelassen sein. Verwendung finden hauptsächlich zwei normativ geregelte Klebstofffamilien: Aminoplaste (Melamin Formaldehyd-Klebstoff [MF] und Melamin Harnstoff Formaldehyd-Klebstoff [MUF]) und einkomponentige Polyurethanklebstoffe (1K-PUR).

Mit der abschließenden Flächenpressung wird der Produktionsprozess abgeschlossen. Die Anforderungen an den Pressdruck, Presszeit, Kalt- oder Warmaushärtung richten sich im Allgemeinen nach dem verwendeten Klebstoff. Der übliche Mindestpressdruck liegt zwischen $0,6 \text{ N/mm}^2$ und $0,8 \text{ N/mm}^2$. Damit soll sichergestellt werden, dass die Oberflächen der einzelnen Bretter dicht aneinanderliegen, auch wenn das Brett verdreht, längs- oder quergekrümmt („geschüsselt“) ist.

Abbund – Finish:

Die fertige Brettsperrholzplatte wird je nach Verwendungszweck besäumt mit oder ohne einer weiteren Oberflächenbehandlung (hobeln, schleifen) zwischengelagert.

Mittels CNC-Abbund erfolgt meist die abschließende Bearbeitung. Türen, Fenster, Aussparungen für die Installationen usw. werden ausgeschnitten.

Das fertig produzierte Brettsperrholzbauteil wird je nach Auftrag und Vorfertigungsgrad weiter bearbeitet (z. B. Aufbringen einer Dämmstoffschicht) oder direkt als Rohbauteil auf die Baustelle transportiert und montiert.

1.1.2 Einsatzbereiche

Seit seiner Markteinführung vor ca. 15 Jahren hat sich das Brettsperrholz als ein vielseitiges Bauprodukt etabliert. Wände, Decken, Stiegenlaufplatten, Balkonplatten, Aussteifungselemente, usw. werden als Bauteile mit hohem Vorfertigungsgrad im Werk hergestellt und auf der Baustelle im Baukastensystem zusammengesetzt.

Die folgenden Bilder zeigen die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Brettsperrholz.



Abb. 1.3: Einsatzmöglichkeiten von BSP (vgl. [15])

1.2 Grundlagen der Scheibentheorie und Tragfähigkeitsnachweis für BSP-Strukturen [15]

Die Kapitel 1.2 und 1.3 sind großteils aus dem BSPHandbuch [15] entnommen und an die Formatierung dieser Masterarbeit angepasst worden.

1.2.1 Einleitung

Im folgenden Kapitel wird die statische Berechnung von Wandscheiben als Teil von Gebäuden sowohl in Bezug auf deren Steifigkeiten als auch hinsichtlich der Tragfähigkeit dargestellt. Eine typische Wandscheibe ist in Abb. 1.4 dargestellt.

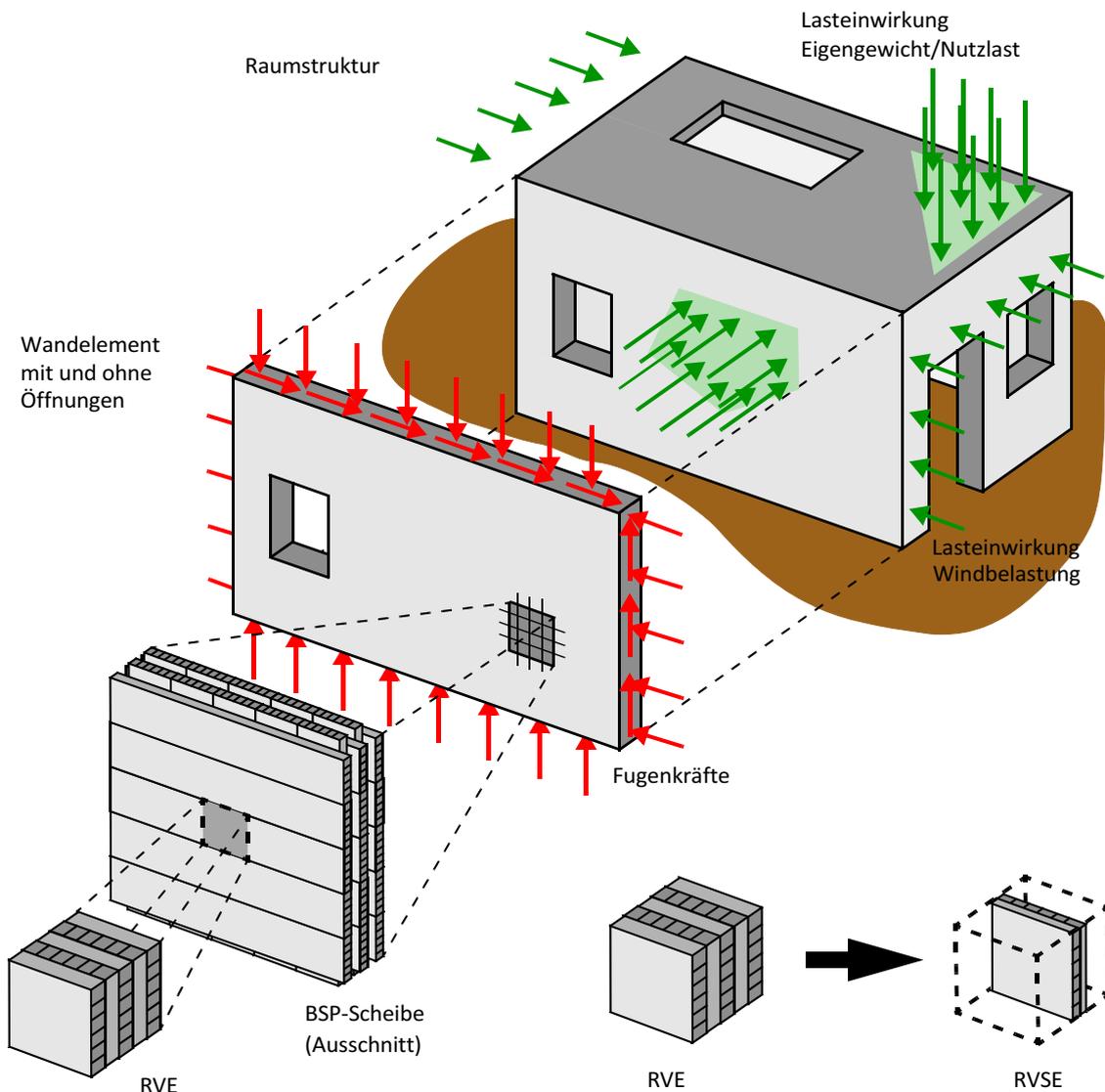


Abb. 1.4: Reduktion: Von der BSP-Scheibe eines Gebäudes über das RVE (Repräsentatives Volumenelement) bis zum RVSE (Repräsentatives Volumen-Sub-Element)

Das RVE (Repräsentatives Volumen-Element) erstreckt sich über die Kreuzungsfläche benachbarter Bretter inkl. eventueller anteiliger Fugenbreiten und die Gesamtdicke der BSP-Scheibe. Erhöht man gedanklich die Schichtanzahl n gegen ∞ , entstehen in allen Brettmittelflächen Symmetrieebenen. Das RVE kann daher weiter zum RVSE (Repräsentatives Volumen-Sub-Element) reduziert werden (siehe Abb. 1.4).

1.2.2 Scheibensteifigkeiten eines BSP-Elementes – Grundlagen

Unter „Scheibenberechnung“ wird hier die Ermittlung der inneren Schnittgrößen einer Wandscheibe unter der Wirkung von Lasten in Scheibenebene verstanden. Weiters müssen noch Belastungen quer zur BSP-Scheibe berücksichtigt werden, welche im Gegensatz zu den Scheibenkräften jedoch Plattenbiegemomente hervorrufen. Im Folgenden wird jedoch nur auf die Nachweise in der Scheibenebene eingegangen, da der Nachweis der Plattenbeanspruchung gleich wie bei Deckenplatten zu führen ist. Genau genommen ist bei gleichzeitiger Wirkung von Scheibenkräften und Plattenbiegemomenten ein Interaktionsnachweis zu führen. Hier stehen allerdings Forschungsergebnisse zur Thematik Biegemoment und Zug- bzw. Drucknormalkraft aus.

In einer Brettspertholz-scheibe treten bekanntermaßen drei Scheibenkräfte auf: Normalkraft n_x , Normalkraft n_y und Schubkraft n_{xy} .

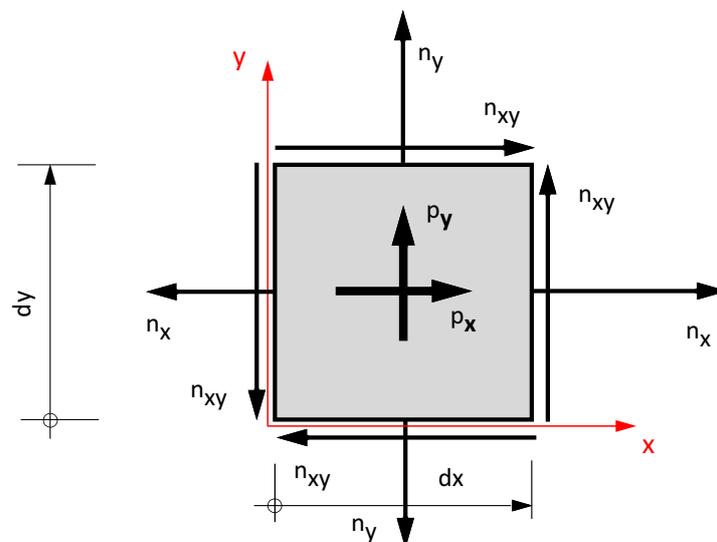


Abb. 1.5: Scheibenkräfte n_x , n_y und n_{xy}

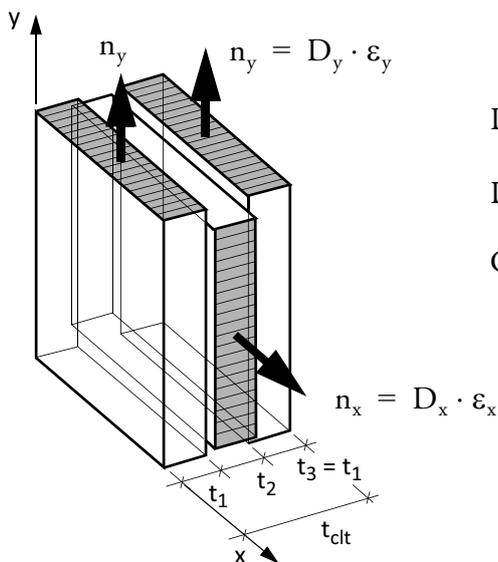
Die konstitutiven Gleichungen für das „Material BSP-Scheibe“ verknüpfen über die Dehnsteifigkeiten D_x , D_y , über die Schubsteifigkeit D_{xy} sowie über die gekoppelte Dehnsteifigkeit C_{xy} die Scheibenverformungen bzw. genauer die drei inneren Scheibenverzerrungen ε_x , ε_y und γ_{xy} mit den drei Scheibenkräften n_x , n_y und n_{xy} . Diese vier Werte D_x , D_y , D_{xy} und C_{xy} müssen für eine orthotrope Scheibenberechnung nach der FE-Methode im Allgemeinen zur Verfügung gestellt werden, wenn nicht das Programm die Struktur der „BSP-Scheibe“ implementiert hat. Die Scheibensteifigkeitsmatrix für eine allgemeine orthotrope Platte sieht wie folgt aus:

$$\begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_x & C_{xy} & 0 \\ C_{xy} & D_y & 0 \\ 0 & 0 & D_{xy} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

1.2.3 Dehnsteifigkeiten D_x und D_y für ein BSP-Element

Die Dehnsteifigkeiten D_x und D_y sind einfach zu bestimmen. Effekte aus den Dehnsteifigkeiten der Brettlamellen quer zur Faser sowie gekoppelte Steifigkeiten (gekoppelte Steifigkeiten zufolge Querkontraktionseffekte) werden vernachlässigt ($C_{xy} \approx 0$).

Die Scheibendehnsteifigkeiten D_x und D_y für z. B. eine 3-schichtige BSP-Scheibe mit Decklagen in y -Richtung (Dicke t_1) und in x -Richtung (Dicke t_2), so wie sie auch im anschließenden Beispiel zum Einsatz kommt, werden im Folgenden bestimmt. Es wird angenommen, dass der E-Modul $E_{0,\text{mean}}$ in Faserrichtung in allen drei Schichten gleich ist. Beim E-Modul quer zur Faserrichtung $E_{90,\text{mean}}$ wird die Annahme getroffen $E_{90,\text{mean}} = 0$.



$$D_x = E_{0,\text{mean}} \cdot t_2 \quad \text{Dehnsteifigkeit in x-Richtung}$$

$$D_y = E_{0,\text{mean}} \cdot 2 \cdot t_1 \quad \text{Dehnsteifigkeit in y-Richtung}$$

$$C_{xy} \approx 0 \quad \text{Vernachlässigung der gekoppelten Dehnsteifigkeiten}$$

t_{clt} ... Gesamtplattendicke

Abb. 1.6: Repräsentatives BSP-Volumen-Element (RVE) unter Normalkraftbeanspruchung

Im Falle unterschiedlicher E-Moduln der einzelnen Schichten sind die einzelnen Schichten mit dem jeweiligen E-Modul gewichtet in die Ermittlung der Steifigkeiten einzusetzen.

1.2.4 Schubsteifigkeit D_{xy} für ein gedanklich unendlich dickes BSP-Element mit konstanten Schichtdicken

Unterschied von BSP-Platten mit und ohne Schmalseitenverklebungen für die Bestimmung der Schubsteifigkeit D_{xy} :

Im Falle von BSP-Scheiben mit Seitenverklebung an den Brettschmalseiten könnte analog zur Bestimmung der Scheibendehnstefigkeit die Schubsteifigkeit mit $D_{xy} = G_{0, \text{mean}} \cdot t_{\text{clt}}$ angesetzt werden. Risse, die mit großer Wahrscheinlichkeit in einem BSP-Element auftreten werden, führen zu einer Reduktion der effektiven Schubsteifigkeit analog einer BSP-Scheibe ohne Seitenverklebung. Begründet darauf wird im Weiteren kein Unterschied zwischen Scheiben mit und ohne Seitenverklebungen gemacht. Mit „a“ wird entweder die Brettbreite oder ein mittlerer Rissabstand bezeichnet.

Voraussetzungen:

Die wesentlichen Voraussetzungen für die folgenden Ausführungen in diesem Unterkapitel zur Schubsteifigkeit D_{xy} sind:

- Die Schichtdicke der Einzellamelle i wird t_i bezeichnet. Alle Schichtdicken sind gleich und werden in diesem Unterkapitel mit t bezeichnet.
- Aufgrund des gedanklich ∞ - dicken BSP-Elementes und der Symmetrieflächen in allen Brettmittelflächen kann anstatt des RVE das RVSE mit zwei halben Einzelschichten für die folgenden Ausführungen verwendet werden (RVE und RVSE: siehe „Einleitung“ auf Seite 9).
- Die Fugenbreiten zwischen benachbarten Brettern in einer Einzelschicht bleiben vernachlässigbar gering.

Modell für die Schubsteifigkeit D_{xy} [13]:

Die Schubverzerrung der BSP-Scheibe setzt sich aus den beiden Anteilen „Schub der ungerissenen, perfekten BSP-Scheibe“ (Mechanismus I – „Schub“, siehe Abb. 1.7.a), und einem Mechanismus II – „Torsion“ (Abb. 1.7.b) zusammen. Beide Anteile zusammen ergeben das BSP-Scheibenmodell mit der nominellen Schubbeanspruchung $\tau_0 = n_{xy}/t_{\text{clt}}$.

Im ungerissenen Zustand wirkt nur der Mechanismus I – „Schub“. Die Schubverzerrung ist mit $\gamma_I = \tau_0/G_{0, \text{mean}}$ gegeben (Abb. 1.7 a).

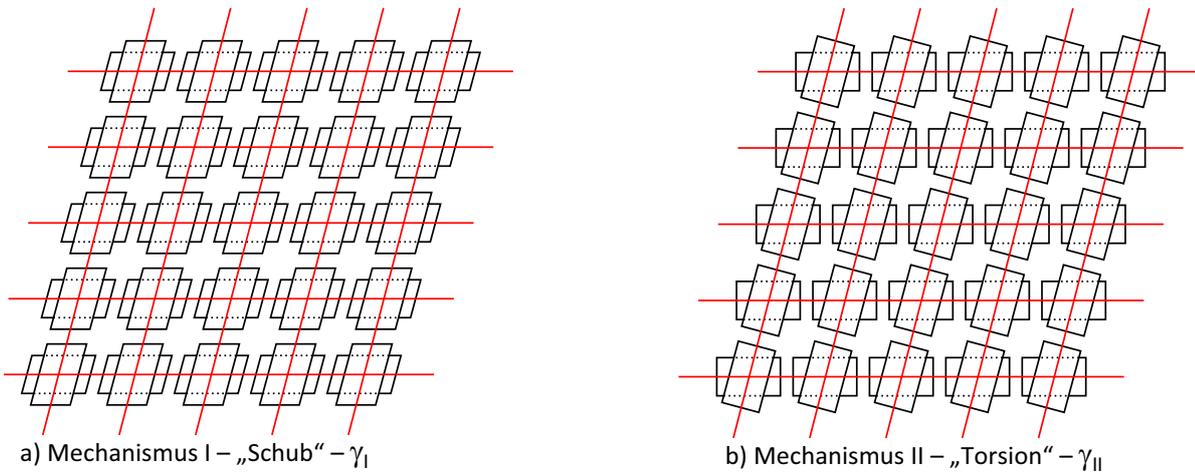


Abb. 1.7: Schubmechanismen I und II der BSP – Scheibe

Nun werden gedanklich alle Schmalseiten aufgeschnitten. Die dort wirkenden Schubspannungen müssen daher verschwinden. Dadurch kommt es zu einer inneren Spannungsumlagerung. Der daraus resultierende Mechanismus II – „Torsion“ (Abb. 1.7.b) führt zu einer zusätzlichen Schubverformung γ_{II} . Der ursprüngliche Mechanismus I – „Schub“ reduziert sich auf Querkraftschub in den einzelnen Brettlagen. Aus diesem Grund müssen die Bretter zweier benachbarter Schichten gemeinsam wirken, um ein Schubfeld bilden zu können. Das lokale Gleichgewicht zwischen den beiden Querkraftpaaren wird über das innere Torsionsmoment an den Klebeflächen aufrecht erhalten. Dies bedeutet, dass für eine Schubbeanspruchung beide Mechanismen (Mechanismus I – „Schub“ und Mechanismus II – „Torsion“) gleichzeitig wirken müssen.

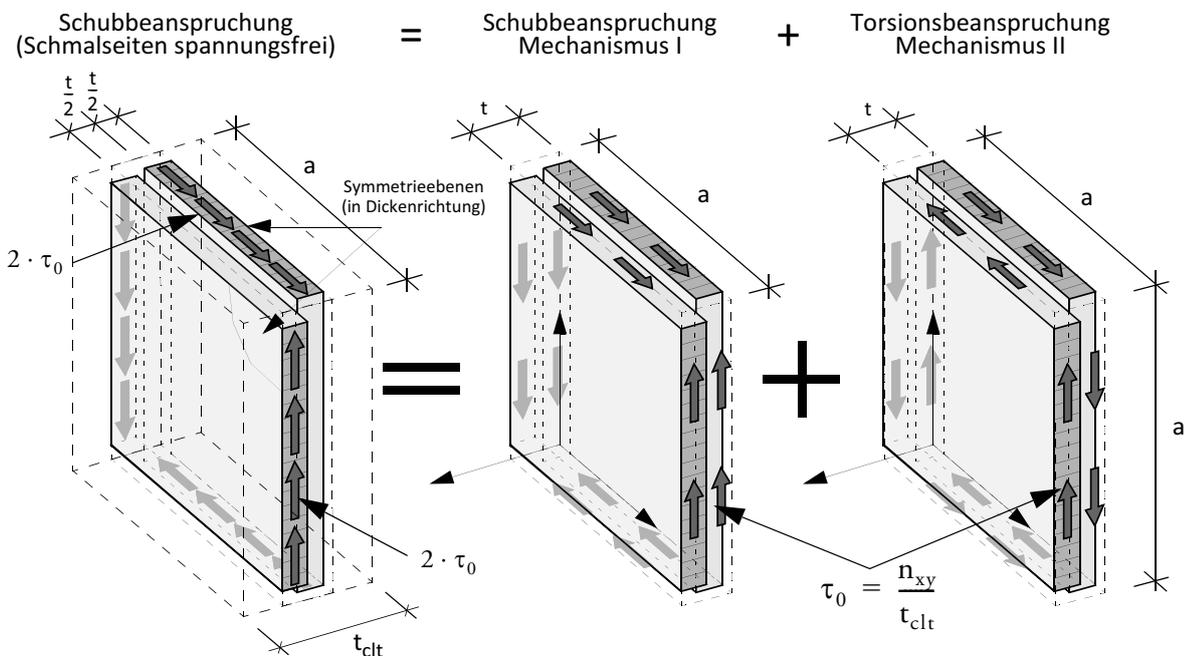


Abb. 1.8: Schubkräfte am RVSE-Knotenelement einer BSP-Scheibe

Die Schubverzerrung γ_I kann für den Mechanismus I – „Schub“, wie bereits ausgeführt, exakt bestimmt werden.

$$\gamma_I = \frac{\tau_0}{G_{0, \text{mean}}}$$

Mit einem Torsionsmodell lässt sich γ_{II} näherungsweise abschätzen. Als effektiver Schubmodul für das Torsionsmodell auf Basis einer komplett wölbbehinderten Torsion (die Torsionssteifigkeit ergibt sich in diesem Fall aus dem polaren Trägheitsmoment) wird näherungsweise $G_{0, \text{mean}}/2$ verwendet, da der Anteil des Rollschubmoduls, im Vergleich zur Schubsteifigkeit in Faserrichtung vernachlässigbar gering ist.

$$\phi = \gamma_{II} = \frac{M_T}{G_{\text{Torsion}} \cdot J_p} \cdot \frac{t}{2} = \frac{\tau_0 \cdot t \cdot a^2}{G_{\text{Torsion}} \cdot \frac{a^4}{6}} \cdot \frac{t}{2} \approx \quad \text{mit } G_{\text{Torsion}} \approx \frac{G_{0, \text{mean}}}{2} \quad (\text{Annahme})$$

$$\gamma_{II} = \frac{6 \cdot \tau_0}{G_{0, \text{mean}}} \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2$$

Die gesamte Schubverzerrung γ unter der wirkenden nominellen Schubspannung τ_0 ergibt sich als Summe der beiden Nachgiebigkeiten des Mechanismus I – „Schub“ und Mechanismus II – „Torsion.“

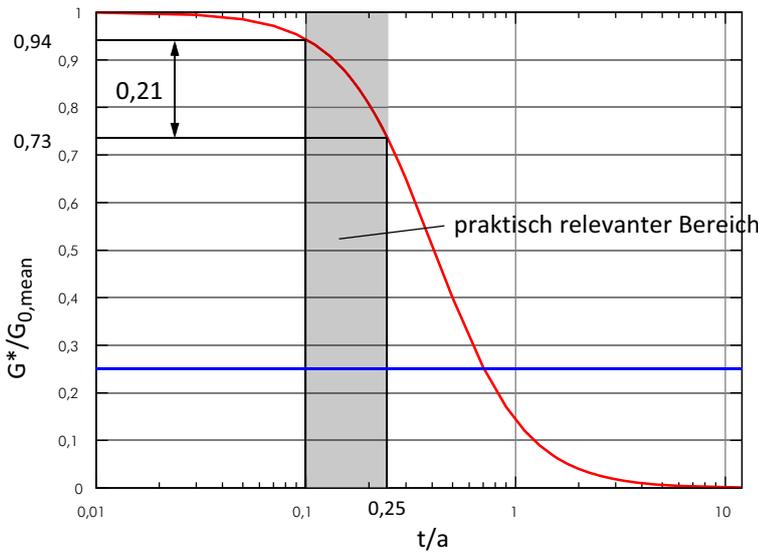
$$\gamma = \frac{\tau_0}{G_{0, \text{mean}}} + \frac{6 \cdot \tau_0}{G_{0, \text{mean}}} \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2$$

Durch Invertieren von γ erhält man den effektiven Schubmodul G^* einer BSP-Struktur (siehe Abb. 1.9).

$$G^* = \frac{\tau_0}{\gamma} = \frac{\tau_0}{\frac{\tau_0}{G_{0, \text{mean}}} + \frac{6 \cdot \tau_0}{G_{0, \text{mean}}} \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2} = \frac{G_{0, \text{mean}}}{1 + 6 \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2} \quad D_{xy} = G^* \cdot t_{\text{clt}}$$

$G_{0, \text{mean}}$ Schubmodul des Grundmaterials (Brettware)

Die Schubsteifigkeit D_{xy} der BSP-Scheibe ergibt sich als Produkt des effektiven Schubmoduls G^* und der Gesamtdicke t_{clt} .



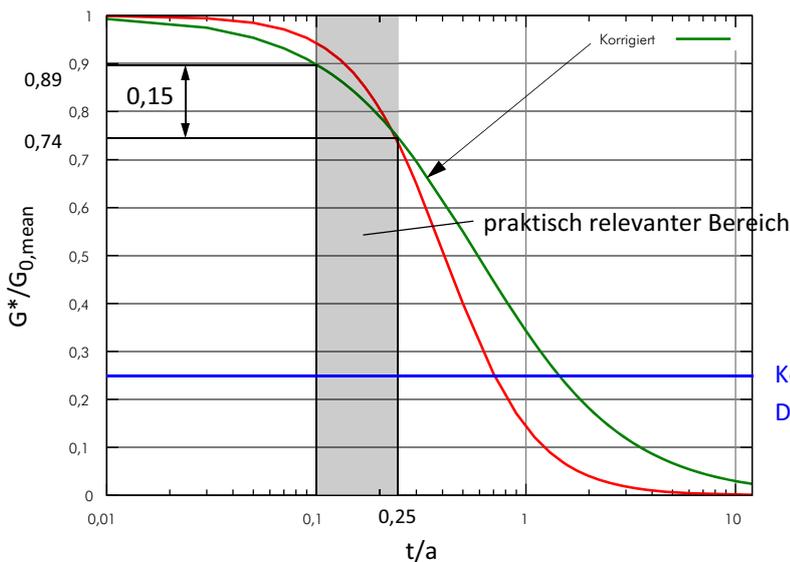
$$\frac{G^*}{G_{0, \text{mean}}} = \frac{1}{1 + 6 \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2}$$

Konstanter Wert nach
DIN 1052:2008 [22]

Abb. 1.9: Effektive Schubsteifigkeit einer BSP-Scheibe

Der Abfall der Schubsteifigkeiten im praktisch relevanten Bereich liegt nach diesem einfachen Modell bei einer BSP-Scheibe im Bereich von 6 % bis 27 %.

Eine genaue Lösung nach der linearen Elastizitätstheorie erhält man über eine FE-Studie (FE - Modell siehe Abb. 1.11), da das hier angesetzte Torsionsmodell die Nachgiebigkeit γ_{II} nur näherungsweise erfasst. In dieser FE-Studie wird die Dicke t_i der Einzelschicht i in Relation zur Brettbreite bzw. dem Rissabstand a variiert. Durch Vergleich der FE-Lösungen mit der oben aufgestellten Formel kommt man zur folgenden Formel für die Schubsteifigkeit von BSP-Scheiben (Abb. 1.10), in der im Vergleich zum vorher aufgestellten einfachen Torsionsmodell zusätzlich eine Korrekturfunktion $\alpha_T = f(t/a)$ eingefügt wurde. Der Abfall der Schubsteifigkeiten im praktisch relevanten Bereich nach dieser korrigierten Funktion liegt bei 11 % bis 26 %.



$$\frac{G^*}{G_{0, \text{mean}}} = \frac{1}{1 + 6 \cdot \alpha_T \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2}$$

$$\alpha_T = 0,32 \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^{-0,77}$$

α_T Korrekturfunktion
Vergleich mit FE-Lösung

Konstanter Wert nach
DIN 1052:2008 [22]

Abb. 1.10: Effektive Schubsteifigkeit einer BSP-Scheibe, korrigiert auf Basis einer FE-Analyse

- FE-Modell für die Bestimmung der effektiven Scheibenschubsteifigkeiten ohne Randeffekt aus dem Endevaluierungsbericht [6]:

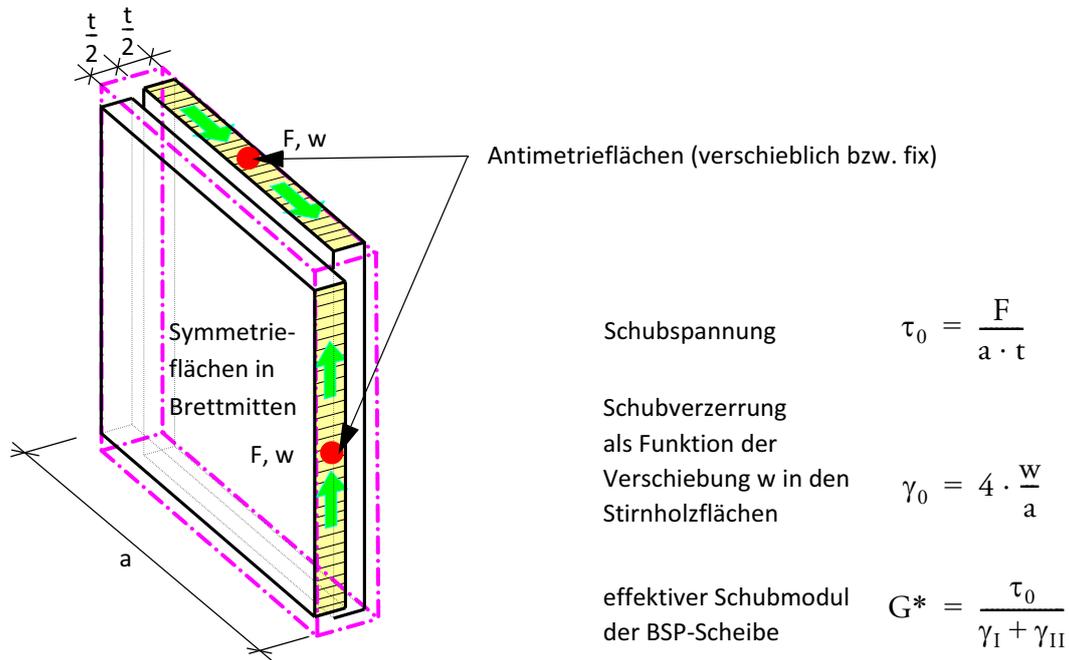


Abb. 1.11: FE-Modell für die FE-Studie von D_{xy} anhand eines RVSE

Eine experimentelle Überprüfung ist an der holz.bau forschungs gmbh Graz erfolgt [17].

1.2.5 Schubsteifigkeit D_{xy} für Elemente mit endlicher Schichtanzahl und variablen Schichtdicken (t_i)

Randeffekt:

Bei BSP-Scheiben mit endlicher Schichtanzahl kommt zusätzlich zu den bisherigen Ausführungen in Kapitel 1.2.4 ein Randeffekt zum Tragen. In der Praxis werden 3-, 5-, 7- oder auch 9-schichtigen BSP-Scheiben nachzuweisen sein.

Der Einfluss dieses Randeffektes wird ebenfalls über eine FE-Studie bestimmt. Für eine 3- bzw. 5-schichtige BSP-Struktur ist der Randeffekt (ohne Randeffekt: Schichtanzahl $n \rightarrow \infty$) in Abb. 1.12 dargestellt.

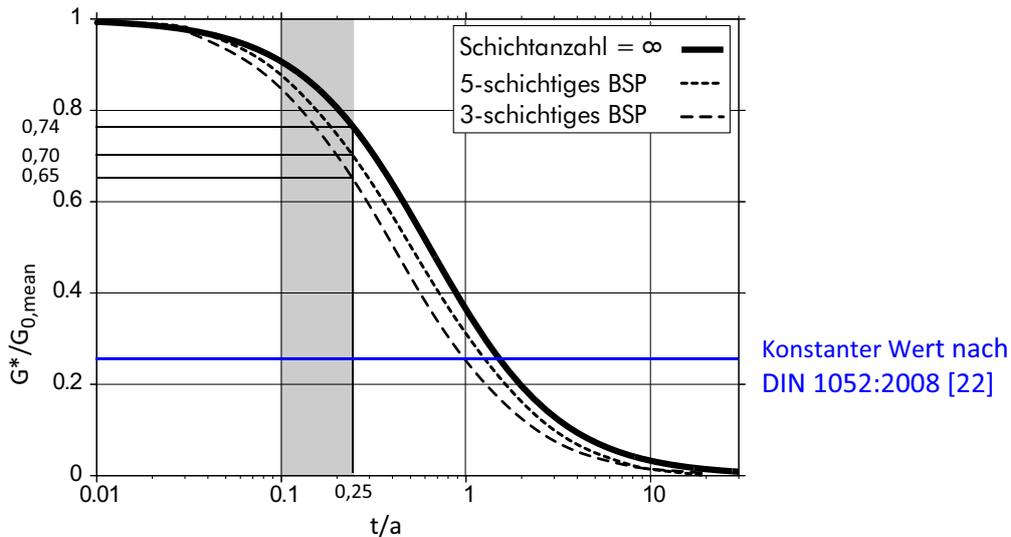


Abb. 1.12: BSP-Scheibe mit und ohne Randeffekte

Zum Randeffect sei noch angemerkt, wie aus Abb. 1.12 ersichtlich ist, dass der reduzierende Einfluss des Randeffectes mit Zunahme der Schichtanzahl deutlich abnimmt. Für eine 3-schichtige Platte beträgt die Abnahme der Schubsteifigkeit maximal 14 %, bezogen auf den vorher erwähnten Sonderfall des RVSE (RVSE: siehe “Einleitung” auf Seite 9).

Unterschiedliche Schichtstärken:

Sind die Schichtdicken t_i unterschiedlich, wird t näherungsweise als Mittelwert der Schichtdicken t_i bestimmt.

Resümee:

Tab. 1.1: Effektive Schubsteifigkeit G^* für BSP in Abhängigkeit von der Schichtanzahl

Schichtenanzahl	$G^*/G_{0,mean}$	$G_{0,mean}$ [N/mm ²] Entwurf ÖNORM EN 14080:2009	G^* [N/mm ²]	$G_{0,mean}$ [N/mm ²] ON EN 1194:1999	G^* [N/mm ²]
∞	0,74	650	481	720	533
5	0,70	650	455	720	504
3	0,65	650	422	720	468

Für diese Tabelle wurden die üblichen Schubmodulwerte herangezogen, die zwischen 650 und 720 N/mm² liegen.

Näherungsweise kann daher für praktische Berechnungen handelsüblicher BSP-Scheiben mit ausreichender Genauigkeit mit einem G^* zwischen 450 und 500 N/mm² gerechnet werden.

Ein Beispiel zur Verformungsberechnung ist in [15] 7.2.4 zu finden.

1.2.6 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) – Scheibenverformung

Für Wandscheiben fehlen explizite Grenzwerte in den Normen bzw. Zulassungen. Die Verformungen sind daher in Absprache mit dem Bauherrn bzw. nach den Erfahrungen des planenden Ingenieurs so festzulegen, dass keine Beeinträchtigungen des Bauwerks bzw. der Einbauten entstehen. Als Beispiel ist hier z. B. auf die Begrenzung der größten Schrägstellung von Wand- bzw. Stützelementen zu achten, es ist aber auch Bedacht auf Einbauteile wie Fenster und Türen zu legen.

1.2.7 Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) – Normalkraftnachweise für Elemente mit variablen Einzelschichtdicken (t_i)

Die maßgebenden Einwirkungen n_x und n_y ergeben sich z. B. aus der Scheibenberechnung (z. B. FE) oder auch aus einfachen Gleichgewichtsmodellen. Diese sind Scheibenkräfte pro Länge, bezogen auf die gesamte Dicke der BSP-Scheibe. Entsprechende Überlagerungen und Kombinationen der Einzellastfälle führen schließlich zu den nachweisrelevanten „design“-Werten der Einwirkungen.

Für die einzelnen Nachweise werden aus den charakteristischen Festigkeitskenngrößen die „design“-Werte der Widerstände ermittelt, denen die Einwirkungen gegenübergestellt werden. Für Nachweise in der Baupraxis werden pro Lage nur jene Schichten berücksichtigt, welche die Normalspannungen in Faserrichtung übertragen. Der E-Modul in Faserrichtung soll für alle Schichten gleich sein. Diese Annahme wurde in dieser Art bereits bei der Ermittlung der Dehnsteifigkeiten (siehe „Dehnsteifigkeiten D_x und D_y für ein BSP-Element“ auf Seite 11) getroffen. Die Normalspannungen σ_x und σ_y ergeben sich infolge des Dividierens der jeweiligen Normalkraft n_x und n_y durch die Summe der Schichtdicken in die zugehörigen Richtungen, also $\sigma_x = n_x/t_x$ und $\sigma_y = n_y/t_y$. Da die Querlagen unberücksichtigt bleiben, gilt $t_{clt} = t_x + t_y$.

Zur Ermittlung der charakteristischen Festigkeitskenngrößen für Zug und Druck parallel zur Faserrichtung ($f_{t,clt,k}$ und $f_{c,clt,k}$) kann vereinfachend auf die Basiskenngrößen des verwendeten Brettmaterials zurückgegriffen werden ($f_{t,0,k}$ bzw. $f_{c,0,k}$). Bei konstanten Spannungsverläufen und einer gleichwertigen Mitwirkung von vier oder mehr Brett lamellen kann ein Systemfaktor k_l mit 1,10 in Rechnung gestellt werden. Treten jedoch Spannungsspitzen bzw. lokale Spannungskonzentrationen auf, so sollte dieser Systemfaktor nicht berücksichtigt werden. Diese Regelung erfolgt in Analogie zur BSP-Plattenbiegung (siehe [15] 4.1.4).

Zu beachten ist, dass zwischen Zug- und Druckkräften zu unterscheiden ist.

„design“-Werte der Widerstände bei Zugbeanspruchungen sowie Nachweise in x- bzw. y-Richtung:

$$\sigma_{x,d} = \frac{n_{x,d}}{t_x} \leq \frac{f_{t,clt,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_m} = \frac{f_{t,0,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_m} \qquad \sigma_{y,d} = \frac{n_{y,d}}{t_y} \leq \frac{f_{t,clt,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_m} = \frac{f_{t,0,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_m}$$

„design“-Werte der Widerstände bei Druckbeanspruchungen sowie Nachweise in x- bzw. y-Richtung:

$$\sigma_{x,d} = \frac{|n_{x,d}|}{t_x} \leq \frac{f_{c,clt,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_m} = \frac{f_{c,0,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_m} \qquad \sigma_{y,d} = \frac{|n_{y,d}|}{t_y} \leq \frac{f_{c,clt,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_m} = \frac{f_{c,0,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_m}$$

1.2.8 Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) – Schubfestigkeitsnachweis in einer gedanklich unendlich dicken BSP-Scheibe mit gleichen Schichtdicken $t_i = t$

Die maßgebende Einwirkung n_{xy} ergibt sich z. B. aus der Scheibenberechnung (z. B. FE) oder auch aus einfachen Gleichgewichtsmodellen. Entsprechende Überlagerungen und Kombinationen der Einzellastfälle führen schließlich zu den nachweisrelevanten „design“-Werten der Einwirkungen.

Die Nachweisführung auf Schub in einer theoretisch ∞ -dicken BSP-Scheibe bietet den Vorteil, dass alle Brettmittelflächen Symmetrieebenen sind. Der zu führende Schubfestigkeitsnachweis kann vom Bereich her betrachtet daher auf ein RVSE (RVSE: siehe „Einleitung“ auf Seite 9) reduziert werden.

Wäre die BSP-Struktur völlig rissfrei bzw. voll seitenflächenverklebt, tritt nur die Schubspannung τ_0 auf. Die tatsächliche Schubspannung τ_v weicht in einer gerissenen, nicht seitenverklebten BSP-Struktur allerdings von der nominellen Schubspannungsverteilung τ_0 ab, da die Schubspannungen nur in den Stirnholzflächen wirken und die Schmalseiten spannungsfrei sind (Mechanismus I – „Schub“).

Aus den beiden Querkraftpaaren zweier angrenzender Schichten ergeben sich die 4 Schubkräfte eines reinen Schubfeldes. Das versetzte Wirken der beiden Querkraftpaare aktiviert das Torsionsmoment (Mechanismus II – „Torsion“) in der Klebefläche. Dadurch ergibt sich der Torsionsnachweis, wobei eine polare Torsion angenommen wird.

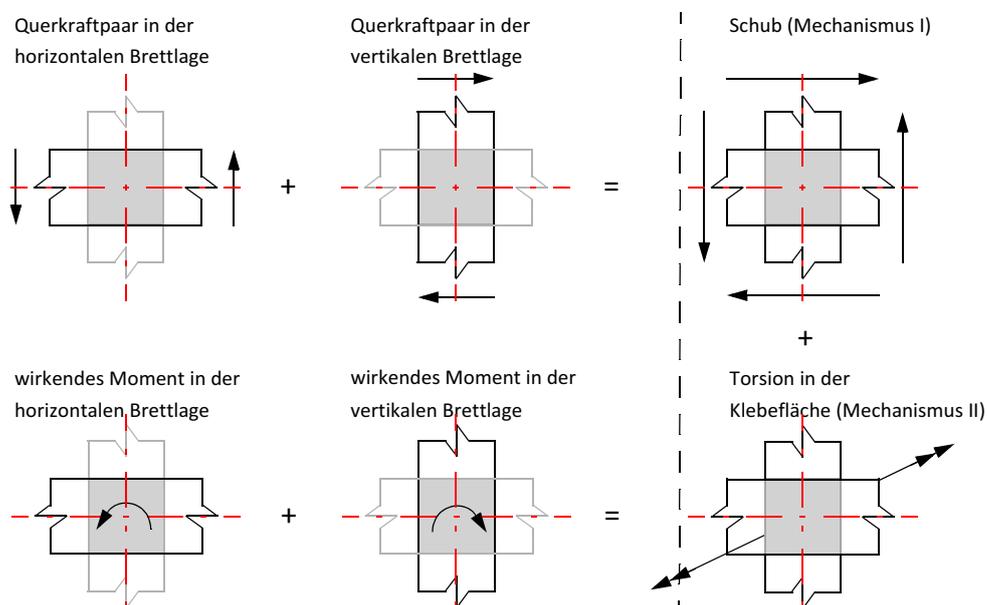


Abb. 1.13: Entstehen des Torsionsmomentes in der Klebefläche

Das Nachweisverfahren ist aufgrund der beiden immer gemeinsam auftretenden Mechanismen (Schubabtragung in den Brettern sowie Torsionsmoment in den Klebeflächen) knotenflächenorientiert.

Die Ermittlung der Schubbeanspruchung erfolgt über den Mechanismus I – „Schub“ beziehend auf das in Abb. 1.14 dargestellte repräsentative Volumen-Sub-Element; weiters wird die Torsionsbeanspruchung über den Mechanismus II – „Torsion“ ermittelt. Bei der Nachweisführung der Spannungen zufolge Schub (Mechanismus I: $\tau_{v,d} = 2 \cdot \tau_{0,d}$) und Torsion (Mechanismus II: $\tau_{T,d} = 3 \cdot \tau_{0,d} \cdot t/a$) ist nachzuweisen, dass die „design“-Werte der Widerstände größer oder gleich den Einwirkungsgrößen sind (siehe Abb. 1.14).

„design“-Werte der Widerstände bei Schubbeanspruchungen und Nachweis:

$$|\tau_{v,d}| \leq f_{v,clt,d} = \frac{f_{v,clt,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_m}$$

„design“-Werte der Widerstände der Torsionsbeanspruchung und Nachweis:

$$|\tau_{T,d}| \leq f_{T,clt,d} = \frac{f_{T,clt,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_m}$$

Eine Erhöhung der charakteristischen Festigkeiten um einen Systemfaktor sollte nach Meinung der Verfasser bei Schub nicht in Rechnung gestellt werden.

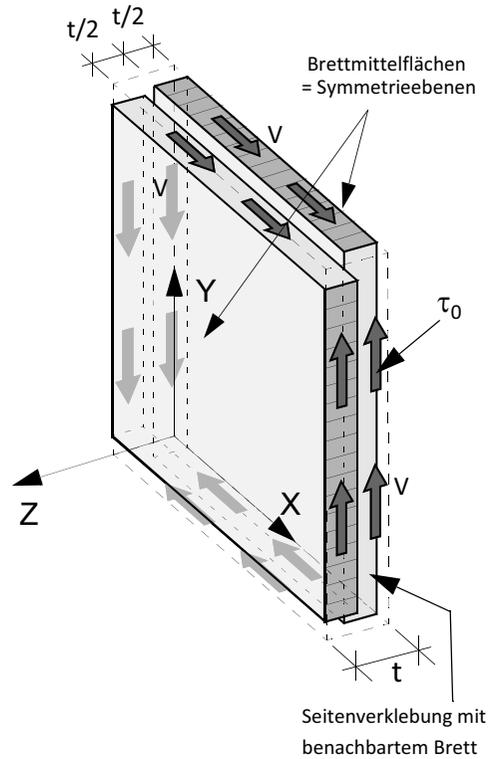
Zu diesen beiden Mechanismen I und II gibt es folgende zugehörige Festigkeitskennwerte:

Mechanismus I – „Schub“: charakteristische Schubfestigkeit des RVSE: $f_{v,clt,k}$

Mechanismus II – „Torsion“: charakteristische Torsionsfestigkeit in der Klebefläche: $f_{T,clt,k}$

Die Festlegung der Festigkeitswerte $f_{v,clt,k}$ und $f_{T,clt,k}$ wird in 1.2.11 und in 1.2.12 erläutert.

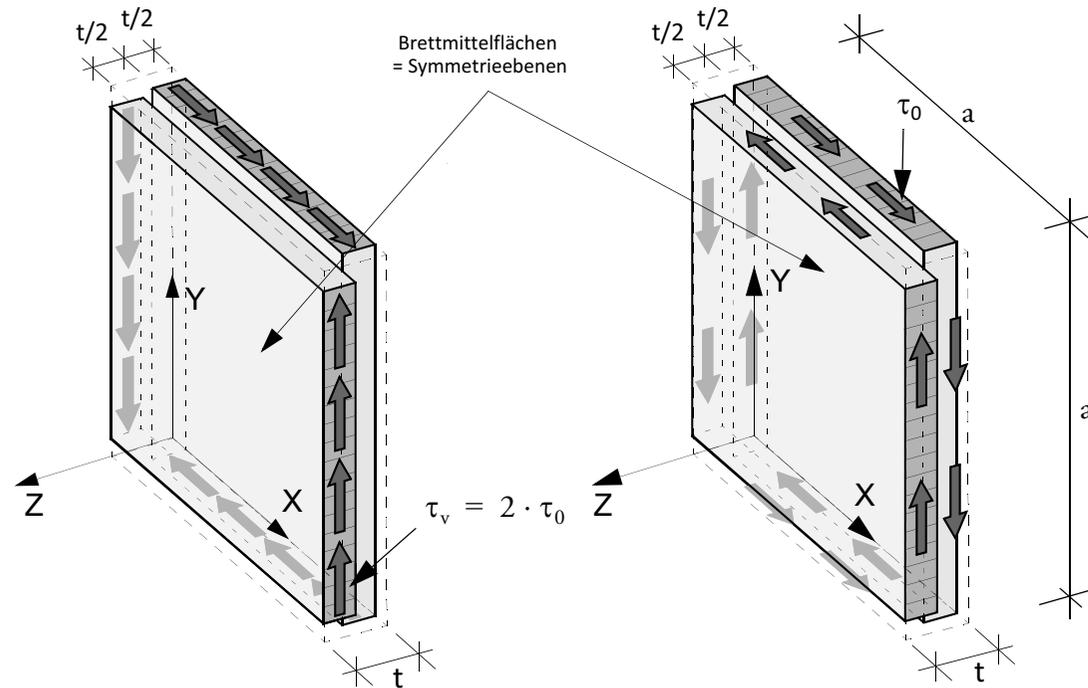
Nominelle Schubspannungen in der rissefreien, seitenverklebten BSP-Scheibe



Nominelle Schubspannung:

$$\tau_0 = \frac{V}{a \cdot t}$$

Schubspannungen in der gerissenen, nicht seitenverklebten BSP-Scheibe



Querkraftschub:

Schubkraft im RVSE: $V = \tau_0 \cdot t \cdot a$

effektive Dicke: $\frac{t}{2}$

tatsächliche Schubspannung: $\tau_v = \frac{\tau_0 \cdot t}{t/2} = 2 \cdot \tau_0$

Torsion in der Klebefläche:

Torsionmoment in der Klebefläche: $M_T = \tau_0 \cdot t \cdot a^2$

polares Widerstandsmoment: $W_p = \frac{a^3}{3}$

$\tau_T = \frac{M_T}{W_p} = 3 \cdot \tau_0 \cdot \frac{t}{a}$

Abb. 1.14: Nachweis gegenüber dem Grundzustand der Tragfähigkeit bei Schubbeanspruchung in Scheibenebenen

1.2.9 Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) – Schubfestigkeitsnachweis bei endlicher Schichtanzahl und variablen Einzelschichtdicken (t_i)

Der zuvor dargestellte Schubfestigkeitsnachweis gilt, wie bereits erwähnt, zwischen zwei Symmetrieebenen, die lediglich für eine theoretisch ∞ - dicke BSP-Scheibe ident mit einem Bereich von Brettmitte zu Brettmitte ist. Im Folgenden werden daher die notwendigen Anpassungen für eine endlich dicke BSP-Scheibe mit endlich vielen Schichten unterschiedlicher Dicke unter Schub dargestellt.

- für die Einzelschichtdicken soll gelten: $t \rightarrow t_i$
- für den knotenflächenorientierten Nachweis soll gelten: $t_i \rightarrow t_i^*$
- für die Scheibendicke soll gelten: $t_{clt} \rightarrow t^* = \sum_{i=1}^n t_i^*$
- für die Schubspannung soll gelten: $\tau_0 \rightarrow \tau_0^*$

t	Einzelschichtdicke für die ∞ - dicke BSP-Scheibe
t_i	Einzelschichtdicke für die endlich dicke BSP-Scheibe
t_i^*	Ideelle Ersatzdicke
t_{clt}	Gesamtscheibendicke
t^*	Ideelle Gesamtersatzdicke
τ_0	nominelle Schubspannung bezogen auf t_{clt}
τ_0^*	Ideelle Schubspannung bezogen auf t^*

Die Bestimmung der Schubbeanspruchung τ_v in den Stirnholzflächen und der Torsionsbeanspruchung τ_T erfolgt analog wie für den vorher erwähnten Sonderfall gleicher Schichtdicken $t_i = t$, jedoch sind für die unterschiedlichen Dicken t_i die jeweiligen ideellen Ersatzdicken t_i^* der jeweils betrachteten RVSE's (RVSE: siehe "Einleitung" auf Seite 9) anzusetzen. Die ideelle Gesamtersatzdicke t^* für die Schubbeanspruchung ergibt sich durch Summation aller einzelnen rechnerischen Ersatzdicken $t^* = \sum_{i=1}^n t_i^*$ aller RVSE's, wobei n die Anzahl der Klebeflächen bezeichnet. Die ideelle Ersatzdicke t_i^* lässt sich für eine innere Klebefläche (z. B. bei einer 5-schichtigen BSP-Platte die beiden inneren Klebeflächen) als Minimum aus den Brettdicken der beiden angrenzenden Brettlagen bestimmen. Grenzt die Klebefläche an eine Randschicht (z. B. bei einer 3-schichtigen BSP-Platte grenzen beide Klebeflächen an eine Randschicht), so kann die ideelle Ersatzdicke t_i^* wieder aus dem Minimum der beiden angrenzenden Brettdicken bestimmt werden. Die Dicke der Außenschicht kann dabei jedoch mit dem Faktor 2 berücksichtigt werden. Diese Regeln zur Bestimmung von t_i^* sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst bzw. in der anschließenden Grafik (Abb. 1.15) beispielhaft für den vierten Knoten (= Randknoten) bzw. zweiten Knoten (= Innenknoten) dargestellt.

Tab. 1.2: Konzept zur Bestimmung der ideellen Ersatzdicke t_i^* einer n -schichtigen BSP-Scheibe

Knoten		
Knoten 1 (= Randknoten)	Schicht $i = 1$ außen; Schicht $i + 1 = 2$ innen	$t_1^* = \min(2 \cdot t_1, t_2)$
Knoten i [$1 < i < n-1$] (= Innenknoten)	Schicht i innen; Schicht $i + 1$ innen	$t_i^* = \min(t_i, t_{i+1})$
Knoten $n-1$ (= Randknoten)	Schicht $i = n-1$ innen; Schicht $i + 1 = n$ außen	$t_{n-1}^* = \min(t_{n-1}, 2 \cdot t_n)$

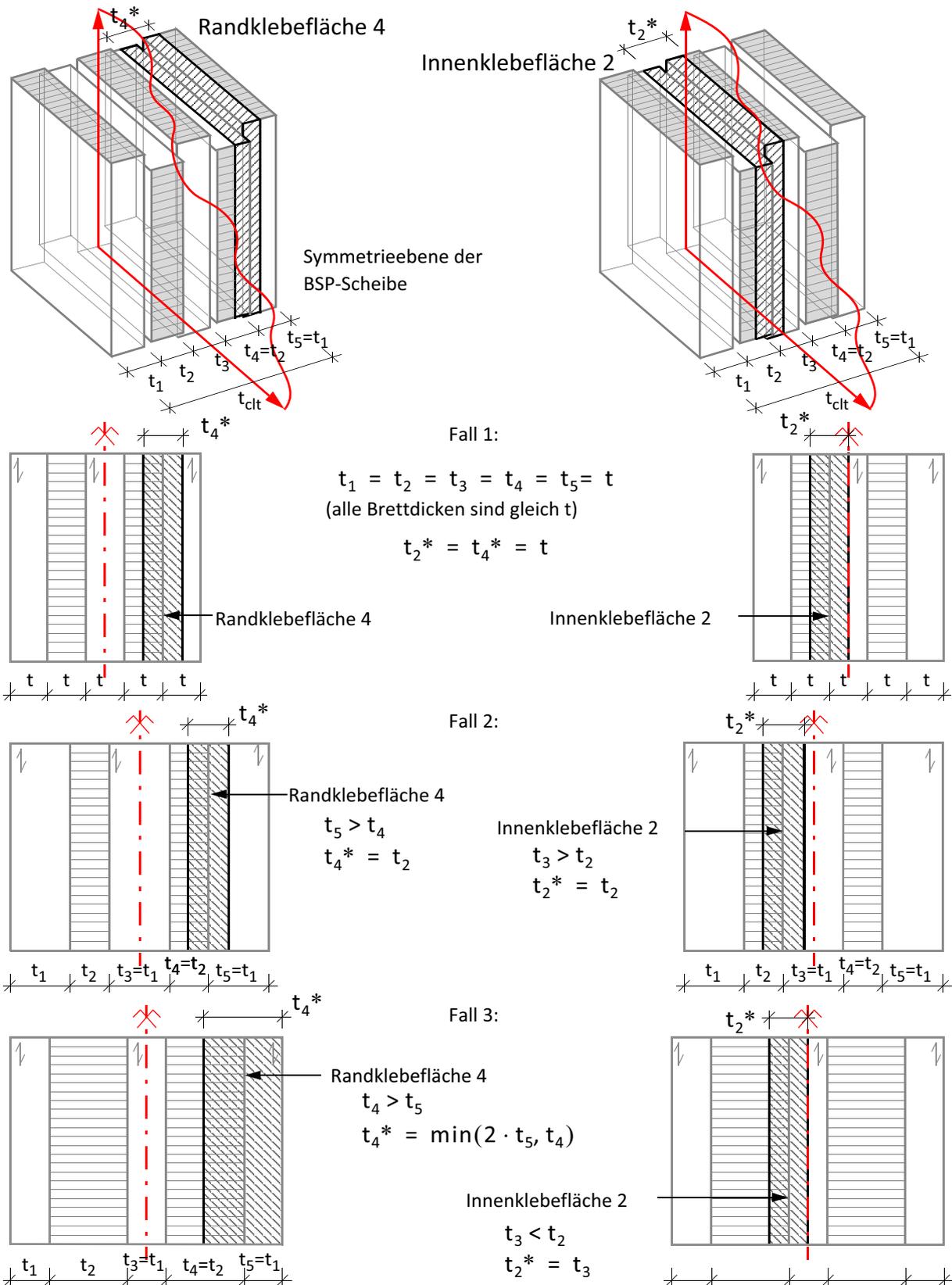
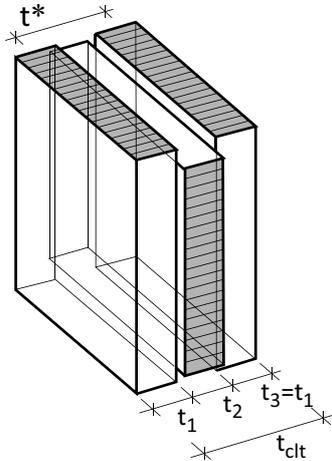


Abb. 1.15: Ideelle Ersatzdicken t_i^* für den zweiten bzw. vierten Knoten (t_2^* bzw. t_4^*)

Bestimmung der ideellen Ersatzdicken t_i^* und der ideellen Gesamtersatzdicke t^* an Hand eines Beispiels einer 3-schichtigen BSP-Scheibe:



$$t_{clt} = 94 \text{ mm} \quad t_1 < t_2$$

$$t_1 = 30 \text{ mm}$$

$$t_2 = 34 \text{ mm}$$

$$t_1^* = t_2^* = \min(2 \cdot 30, 34) = 34 \text{ mm}$$

Anzahl der Klebeflächen: $n = 2$

$$t^* = \sum_{i=1}^2 t_i^* = t_1^* + t_2^* = 34 + 34 = 68 \text{ mm}$$

Abb. 1.16: Ideelle Ersatzdicken t_i^* und ideelle Gesamtersatzdicke $t^* = \sum_{i=1}^n t_i^*$

Bei BSP-Scheiben mit variablen Schichtstärken ist die ideelle Gesamtersatzdicke t^* als die Summe der ideellen Ersatzdicken t_i^* mit 68 mm geringer als die geometrische Gesamtdicke t_{clt} mit 94 mm.

Der gesamte Schubnachweis kann für BSP-Scheiben nun wie folgt geführt werden:

- **Step-1:** Bestimmung der ideellen Schubspannung $\tau_{0,i}^*$

Anteilige Schubkraft je Klebefläche:

$$n_{xy,i} = n_{xy} \cdot \frac{t_i^*}{\sum_{i=1}^n t_i^*}$$

Ideelle Schubspannung $\tau_{0,i}^*$

$$\tau_{0,i}^* = \frac{n_{xy,i}}{t_i^*} = n_{xy} \cdot \frac{t_i^*}{\sum_n t_i^*} \cdot \frac{1}{t_i^*} = n_{xy} \cdot \frac{1}{\sum_n t_i^*}$$

Anmerkung: Die ideellen Schubspannungen $\tau_{0,i}^*$ aller Knoten sind gleich $\tau_{0,i}^* = \tau_0^*$.

- **Step-2:** Nachweise für Mechanismus I – „Schub“ und II – „Torsion“

Nachweis für Mechanismus I – „Schub“ analog zum Festigkeitsnachweis am RVSE der ∞ - dicken BSP-Scheibe:

$$\tau_{v,d} = 2 \cdot \tau_{0,d}^* \leq f_{v,clt,k} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_m}$$

Nachweis für Mechanismus II – „Torsion“ analog zum Festigkeitsnachweis am RVSE der ∞ - dicken BSP-Scheibe:

$$\tau_{T,d} = 3 \cdot \tau_{0,d}^* \cdot \frac{t_i^*}{a} \leq f_{T,clt,k} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_m}$$

Die Voraussetzung bei diesen beiden Festigkeitsnachweisen ist wieder – analog zum Längsspannungsfestigkeitsnachweis – dass der Schubmodul aller Schichten gleich ist.

Aus diesen Nachweisen ist ersichtlich, dass jene Knotenfläche für den Torsionsnachweis maßgebend wird, welche die größte Ersatzdicke t_i^* aufweist.

Anmerkung: Für die Ermittlung der Schubspannungen in den Lamellen wird nicht von einer quadratischen Verteilung der Schubspannungen über die Brettstärke ausgegangen, (τ_{max} ist bekanntermaßen bei einem Rechteckquerschnitt um den Faktor 3/2 höher als eine konstant angesetzte Schubspannung), sondern von einer konstanten Verteilung der Schubspannungen. Dies kann deshalb angenommen werden, weil die Voraussetzungen der Stabtheorie nach ungestörten, konstanten Querkraftverläufen sowie Rändern mit freier Schubverwölbungsmöglichkeit hier nicht gegeben sind. Vielmehr ist davon auszugehen, dass die gegenseitigen Behinderungen durch die gesperrte Struktur bei der hier vorliegenden BSP-Scheibe eher zu konstanten Schubspannungsverteilungen führen werden, als zu Verteilungen entsprechend einer quadratischen Parabel.

1.2.10 ULS-Scheibenschubnachweis gemäß Zulassungen

Die erforderlichen Nachweise in diversen Zulassungen (z. B. ETA-09/0036 [31] oder ETA-08/0242 [33]) unterscheiden sich von den hier präsentierten Nachweisverfahren. Diese Differenzen sollen hier im Folgenden aufgezeigt werden.

Grenzzustand der Tragfähigkeit - Mechanismus I - Querkraftschub in den Brettlagen:

Für den Nachweis eines BSP-Elements unter Scheibenschubbeanspruchung ($n_{xy,d}$) wird in den oben genannten Zulassungen folgender Schubfestigkeitsnachweis vorgeschlagen:

$$\tau_{v,d} = \frac{3}{2} \cdot \frac{n_{xy,d}}{t_{min}} \leq f_{v,clt,k} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_m}$$

- $n_{xy,d}$ Scheibenschubkraft, „design“-Wert
- t_{min} Minimum aus der Summe der Brettdicken gleichgerichteter Brettlagen
- $f_{v,clt,k}$ charakteristische Schubfestigkeit

Dieses Verfahren orientiert sich im Wesentlichen an die physisch vorhandenen Gesamtbrettdicken für die Einzelschichten in den beiden Richtungen. Der maßgebende Nachweis ist für jene Schicht zu führen, in welcher die Gesamtbrettdicke ein Minimum ist. Dies führt aber dazu, dass die Schubspannungen in den beiden Richtungen der BSP-Scheibe nicht ident sind, wie es jedoch die Mechanik/Festigkeitslehre über den Satz der Dualität der Schubspannungen fordert. Der zusätzliche Faktor 3/2 ergibt sich aus dem vorgeschriebenen CUAP-Prüfverfahren, welches staborientiert aufgebaut ist. Beim Stab ist bei rechteckigen Querschnitten in der Mitte die quadratisch verteilte Schubspannung um diesen Faktor 3/2 höher als eine mittlere, konstante Schubspannung. Dies zeigt

sich auch darin, dass in der ETA-09/0036 [31] bei den Nachweisen der Scheibenbeanspruchungen von Querkraften (V) gesprochen wird.

Für BSP-Scheiben mit geringen Unterschieden der Schichtdicken ergeben sich im Vergleich rechnerisch die gleichen Beanspruchungen zu den hier präsentierten Verfahren, sofern der Faktor $3/2$ nicht angesetzt wird. Das wird im folgenden Beispiel noch veranschaulicht werden (siehe “ULS – Schubfestigkeitsnachweis” auf Seite 31).

Grenzzustand der Tragfähigkeit – Mechanismus II – „Torsion“ – in der Klebefläche für den folgenden Sonderfall einer rechteckigen Scheibe und konstanten Schub:

In den Zulassungen (z. B. ETA-08/0242 [33]) findet man die Nachweise für den Mechanismus II – „Torsion“ in einer Form aufbereitet [1] [2] [3] [9] [19], die für konstante Schichtstärken rechteckiger Abmessungen ohne Öffnungen unter konstantem Schub gilt. Im Folgenden wird gezeigt, dass der vorher angeführte Nachweis für den Mechanismus II – „Torsion“ sich bei Einhaltung der angeführten Einschränkungen identisch in die Form, wie in diversen Zulassungen gegeben, überführen lässt.

Für eine BSP-Scheibe mit n konstanten Schichtdicken (siehe Seite 19) kann der Mechanismus II – „Torsion“ wie folgt umgeformt werden:

$$\tau_{T,d} = \frac{M_{T,d}}{W_p} = 3 \cdot \tau_{0,d} \cdot \frac{t_i}{a} \leq f_{T,clt,k} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_m} \quad \text{mit} \quad \tau_{0,d} = \frac{n_{xy,d}}{n \cdot t}$$

$$\tau_{T,d} = 3 \cdot \tau_{0,d} \cdot \frac{t}{a} = 3 \cdot \frac{n_{xy,d}}{n \cdot t} \cdot \frac{t}{a} = 3 \cdot \frac{n_{xy,d}}{n \cdot a} \leq f_{T,clt,d}$$

- $\tau_{0,d}$ anteilige Schubkraft in der Klebefläche i
- n Anzahl der Klebeflächen in Dickenrichtung
- t Schichtstärke (konstant)

Für den Sonderfall einer rechteckigen BSP-Scheibe mit den Abmessungen b und h sowie einer konstanten Schubkraft F_h kann im Folgenden eine weitere Umformung der Gleichung zur Bestimmung der maßgebenden Torsionsschubspannung in den Klebeflächen betrieben werden.

$$b = m_h \cdot a \quad h = m_v \cdot a$$

$$J_p = \frac{a^4}{6}$$

$$N = n \cdot m_h \cdot m_v \quad F_h = n_{xy} \cdot b$$

$$\tau_{T,d} = 3 \cdot \frac{n_{xy,d}}{n \cdot a} \cdot \frac{b \cdot h \cdot \frac{a}{2}}{m_h \cdot a \cdot m_v \cdot a \cdot \frac{a}{2}} = \frac{n_{xy,d} \cdot b}{N \cdot J_p} \cdot h \cdot \frac{a}{2} = \frac{F_{h,d} \cdot h}{N \cdot J_p} \cdot \frac{a}{2} \leq f_{T,clt,k} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_m}$$

- m_h Anzahl der Klebeflächen in horizontaler Richtung
- m_v Anzahl der Klebeflächen in vertikaler Richtung
- F_h Horizontale Einwirkung an der Scheibenoberkante (konstant)
- h Scheibenhöhe

- N Gesamtanzahl der Klebeflächen in der rechteckigen BSP-Scheibe
- J_p polares Trägheitsmoment einer quadratischen Klebefläche
- a Brettbreite des Ausgangsmaterials
- $f_{T,k}$ Bemessungsfestigkeit für Mechanismus II – „Torsion“

Anmerkung: Der Anteil Torsionsschubspannungen kann für BSP-Scheiben mit konstanten Dicken für rechtwinkelige Scheiben und konstanten Schubkräften in dieser Form geführt werden und ist völlig äquivalent zum Nachweis, wie er zuvor dargestellt wurde. Diese Nachweisform ist hier aus Vollständigkeitsgründen angeführt. Für nicht rechteckige Scheiben, Scheiben mit Öffnungen, nicht konstante Schubkraftverteilungen in der BSP-Scheibe etc. kann der Nachweis in dieser modifizierten Form jedoch nicht geführt werden.

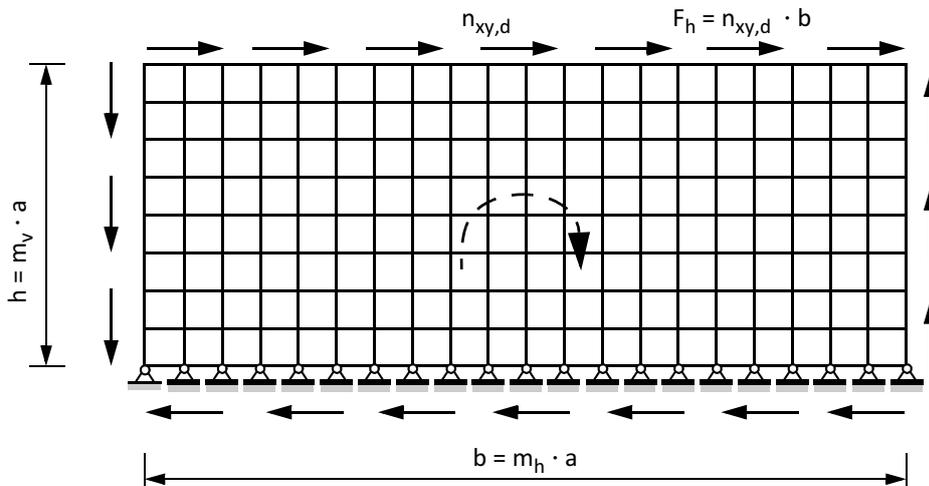


Abb. 1.17: BSP-Scheibe unter konstanter Schubbeanspruchung

1.2.11 Ansetzbare Scheibenschubfestigkeit für Mechanismus I

Die anzusetzende Schubfestigkeit $f_{v,clt,k}$ ist derzeit in Diskussion. Übliche Werte liegen zwischen ca. $3,0 \text{ N/mm}^2$ (BSH-Schubfestigkeitskennwert) bis $5,2 \text{ N/mm}^2$ (ETA-06/0138 [32]). Untersuchungen an der TU Graz zeigen [10], dass dieser Wert durch den Effekt der gesperrten Struktur wesentlich höher sein wird als jene angeführten Werte, siehe 1.4.6 auf Seite 44.

Ansatz für höhere Schubfestigkeiten gemäß den Festigkeiten für Sperrholz lt. DIN 1052:2008 [22]

In der Tabelle F.11 der DIN 1052:2008 [22] findet man Festigkeitskennwerte für Sperrholz (Dichte $\rho = 350 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, $t/a \ll$) auf Basis der Schubfestigkeitskonfiguration der EN 789:2005, welche höher sind als Werte der Tabelle 1.6 auf Seite 46. Die Werte der Tabelle F.11 sind für die ganze Dicke des Sperrholzes gültig. Für eine 3-schichtige Brettsperrholzplatte mit gleicher Dicke aller Lagen ergibt sich die gleiche Festigkeit wie für Furniersperrholz, bezogen auf die einzelne BSP-Schichte, welche wie folgt hergeleitet werden kann: $f_{v,k} = 3 \cdot 5 \text{ [N/mm}^2\text{]} = 15 \text{ [N/mm}^2\text{]}$. Die Werte für eine 5- oder mehrschichtige Platte sind noch höher. Für eine n-lagige Brettsperrholzplatte ergibt sich $f_{v,k}$ mit $2 \cdot 8 \text{ [N/mm}^2\text{]} = 16 \text{ [N/mm}^2\text{]}$.

1.2.12 Ansetzbare Torsionsfestigkeit in der Klebefläche für Mechanismus II



Abb. 1.18: Versuchskonfiguration an der TU Graz zur Bestimmung für BSP-Torsionsfestigkeit in der Klebefläche – Mechanismus II

Im Zuge einer Diplomarbeit (G. Jeitler [9]) wurden 300 Versuche an der holz.bau forschungs gmbh bzw. am Institut für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz durchgeführt (Abb. 1.18). Es wurden drei geometrische Konfigurationen sowie zwei verschiedene Brettwaren (Rift, Seitenware) im Rahmen dieser 300 Versuche untersucht. Die 5 % - Fraktile über alle Versuche ergab einen mittleren Wert von $f_{T,clt,05} = 2,5 \text{ [N/mm}^2\text{]}$.

1.2.13 Vergleich der beiden Mechanismen I+II in einer BSP-Scheibe

Welcher Mechanismus (I oder II) ist nun der Maßgebende? Ist die Schubfestigkeit in den einzelnen Brett lamellen oder die Torsionsfestigkeit in den Klebeflächen maßgebend? Durch Verknüpfen der beiden Festigkeiten über die rechnerische Scheibenspannung τ_0 kann die folgende Geradengleichung aufgestellt werden:

$$\tau_0 = \frac{f_{v,clt,k}}{2} \rightarrow f_{T,clt,k} = 3 \cdot \tau_0 \cdot \frac{t}{a} = \frac{3}{2} \cdot \frac{t}{a} \cdot f_{v,clt,k} \quad \text{Annahme: RVE mit } t = \text{konst.}$$

Obige Gleichung unterstellt die 100 %-ige Auslastung beider Mechanismen I und II. Im Folgenden lassen sich Kurvenscharen mit dem Parameter t/a auftragen (Abb. 1.19). Die Werte der Schubfestigkeit werden auf der x-Achse aufgetragen, die jeweiligen Werte der Torsionsfestigkeit auf der y-Achse. Geht man nun mit einem angenommenen Wert der Schubfestigkeit in die Abb. 1.19 und zeichnet dort eine Vertikale, bringt diese im Weiteren mit der gewünschten t/a -Parameterkurve zum Schnitt, liefert dieser Schnittpunkt eine Torsionsfestigkeit. Liegt dieser Wert nun unter $2,5 \text{ N/mm}^2$, ist die Schubfestigkeit maßgebend, liegt er darüber, ist die Torsionsfestigkeit ausschlaggebend.

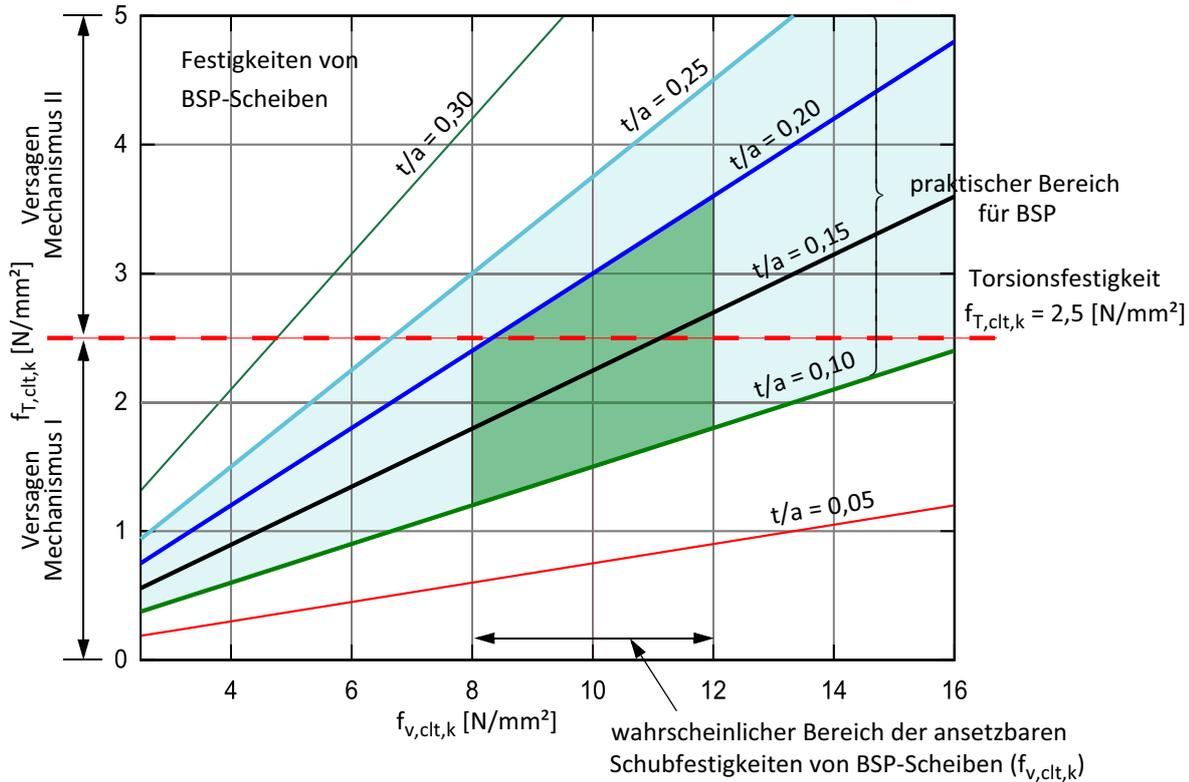


Abb. 1.19: Einteilung der Versagensformen von BSP-Scheiben unter Variation der Geometrie (t/a) und der ansetzbaren Festigkeiten für Mechanismus I und II

Nachfolgend (Tab. 1.3) wurden 3 Fälle untersucht. Zuerst der traditionelle Fall mit einer Schubfestigkeit von $3,0 \text{ N/mm}^2$ in Anlehnung an BSH, im weiteren die ermittelte Festigkeit der TU Graz mit $10,3 \text{ N/mm}^2$ für BSP und ein sehr hoher Wert für die Schubfestigkeit mit $16,0 \text{ N/mm}^2$ in Anlehnung an Sperrholz gemäß DIN 1052:2008 [22]. In der folgenden Tabelle ist zusammengefasst, ob Mechanismus I – „Schub“ oder II – „Torsion“ der maßgebende Nachweis ist. Die zugrunde gelegte Torsionsfestigkeit für Mechanismus II – Torsion ist fix mit $f_{T,clt,k} = 2,5 \text{ [N/mm}^2]$ angesetzt.

Tab. 1.3: Einteilung der Versagensformen von BSP-Scheiben unter Variation der Geometrie (t/a) und der ansetzbaren Schubfestigkeit für Mechanismus I

Schubfestigkeit	$t/a = 0,10$	$t/a = 0,15$	$t/a = 0,20$	$t/a = 0,25$
$3,0 \text{ [N/mm}^2]$	Schub	Schub	Schub	Schub
$10,3 \text{ [N/mm}^2]$	Schub	Schub	Torsion	Torsion
$16,0 \text{ [N/mm}^2]$	Schub	Torsion	Torsion	Torsion

1.3 Scheibenbeispiel

1.3.1 Geometrie und maßgebende Lastfallkombination

Für die Bemessung einer BSP-Scheibe sind die folgenden Nachweise zu führen:

- 1) Tragfähigkeit – ULS
- 2) Stabilitätsnachweis
- 3) Verformungsnachweis

Das folgende Beispiel ist der Statik für ein BSP-Haus in der Steiermark/A (Haus „Jeitler“) entnommen. Im konkreten Beispiel soll die westseitige Außenwand statisch nachgewiesen werden. Die Lastfallkombination wurde in [15] 3.2 für die Lasten Eigengewicht, Nutzlast, Schneelast und Windlast durchgeführt. Diese Lasten führen zu den Lastfallkombinationen Eigengewicht ($k_{mod} = 0,60$), Eigengewicht und Nutzlast ($k_{mod} = 0,80$) sowie Eigengewicht, Nutzlast und Schnee/Wind ($k_{mod} = 0,90$). Für die letzte Lastfallkombination müssen wieder die Fälle Nutzlast-führend, Schnee-führend sowie Wind-führend betrachtet werden (siehe [15] 3.2.4).

Für das folgende Beispiel und die darin geführten Nachweise wird die Lastfallkombination Eigengewicht, Nutzlast und Schnee/Wind von Nord ($k_{mod} = 0,90$) für den Fall „Nutzlast-führend“ gewählt.

Die Geometrie der Wandscheibe (westseitige Außenwand) ist im folgenden Bild Abb. 1.20 dargestellt. Für den Verformungsnachweis in [15] Kapitel 7.2.4 wurde für die Handrechnung eine einfachere Geometrie gewählt. Die Ermittlung der Kräfte in der Bodenfuge (Linie 3) sowie der Nachweis der Übertragung der Zug- und Schubkräfte befindet sich in [15] im Teil Verbindungstechnik.

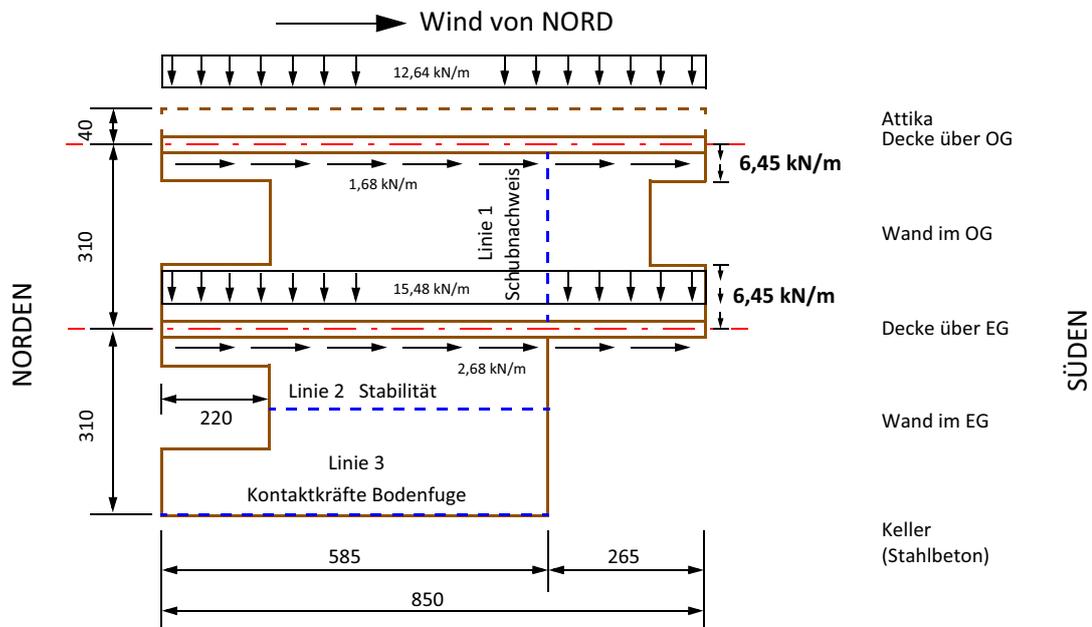


Abb. 1.20: Geometrie der Wandscheibe (westseitige Außenwand)

1.3.2 ULS – Schubfestigkeitsnachweis

Die Tragfähigkeit einer BSP-Struktur unter Wirkung von Normalkräften und Schubkräften ist nachzuweisen. Während der Tragfähigkeitsnachweis zufolge Normalkräfte (ohne Stabilität, nur Querschnittstragfähigkeit) relativ einfach ist (Nachweis mit effektiven Flächen), ist der Schubfestigkeitsnachweis komplizierter.

Als Beispiel für den Festigkeitsnachweis wird ein Schubfestigkeitsnachweis an der Linie 1 gezeigt.

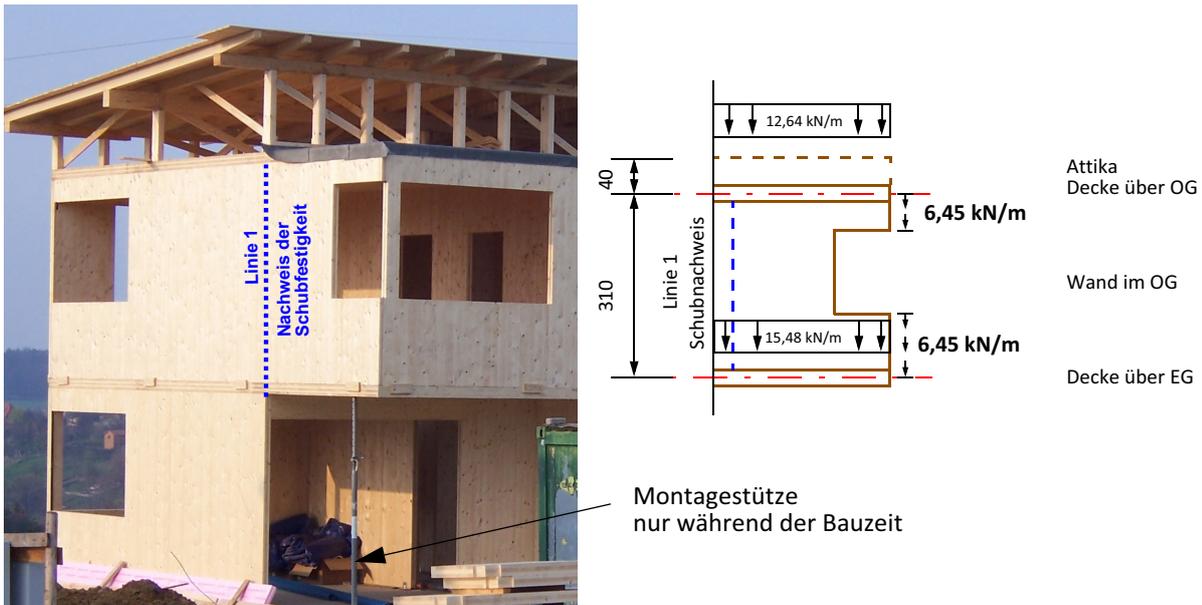


Abb. 1.21: Linie 1 – Stelle für den Schubfestigkeitsnachweis

Die Ermittlung der inneren Schnittgröße (Schubkraft n_{xy} entlang der Linie 1) erfolgt mittels einer einfachen „Handrechnung“. Dabei geht man von möglichst einfachen Verteilungen der inneren Kräfte aus, die Gesamtgröße kann mittels einer Gleichgewichtsbetrachtung ermittelt werden. Im vorliegenden Beispiel wird von einer konstanten Schubkraftverteilung entlang der Linie 1 ausgegangen.

Bestimmung der in der Linie 1 wirkenden Schubkraft $n_{xy,d}$:

$$n_{xy,d} = 2,65 \cdot (12,64 + 15,48) / 3,10 + (6,45 \cdot 1,60) / 3,10 = 24,04 + 3,33 = 27,37 \text{ kN/m} = 27,37 \text{ N/mm}$$

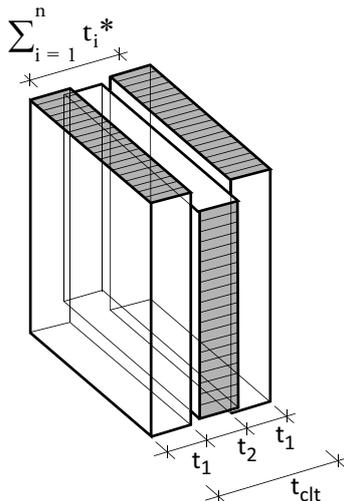
Maßgebende Schubfestigkeit (Mechanismus I – „Schub“) und Torsionsfestigkeit (Mechanismus II – „Torsion“):

$$f_{v,clt,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,clt,k}}{\gamma_M} = \frac{0,90 \cdot 5,0}{1,25} = 3,60 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{T,clt,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{T,clt,k}}{\gamma_M} = \frac{0,90 \cdot 2,50}{1,25} = 1,80 \text{ N/mm}^2$$

Im Beispiel wird eine Schubfestigkeit von $5,0 \text{ N/mm}^2$ gemäß ETA-09/0036 [31] gewählt. Der Unterschied zur ETA-06/0138 [32], die die Schubfestigkeit mit $5,20 \text{ N/mm}^2$ angibt, beträgt 4 % und wird als vernachlässigbar angesehen. Wie bereits erwähnt wurde (1.2.11), ist diese Schubfestigkeit in Diskussion. Es ist davon auszugehen, dass diese charakteristische Schubfestigkeit wesentlich höher sein wird als der hier angesetzte Wert mit $5,0 \text{ N/mm}^2$.

Aufbau der BSP-Scheibe (westseitige Außenwand):



$$t_{clt} = 94 \text{ [mm]}$$

$$t_1 = 30 \text{ [mm]}$$

$$t_2 = 34 \text{ [mm]}$$

$$t_1^* = t_2^* = \min(2 \cdot 30, 34) = 34 \text{ [mm]}$$

Anzahl der Klebeflächen: $n = 2$

$$\sum_{i=1}^n t_i^* = 2 \cdot 34 = 68 \text{ [mm]}$$

Abb. 1.22: Dicken des Wandelements – ideale Ersatzdicken t_i^*

Schubfestigkeitsnachweis in der Linie 1:

- **Step-1:** Bestimmung der ideellen Ersatzdicken t_i^* und der ideellen Schubspannungen $\tau_{0,d}^*$ für die Klebeflächenschichten 1 und 2 (siehe 1.2.9)

$$\tau_{0,d}^* = \frac{n_{xy,d}}{\sum_{i=1}^n t_i^*} = \frac{27,37}{68} = 0,403 \text{ N/mm}^2$$

- **Step-2:** Festigkeitsnachweis für Mechanismus I – „Schub“ und Mechanismus II – „Torsion“

$$\tau_{v,d}^* = 2 \cdot \tau_{0,d}^* = 2 \cdot 0,403 = 0,805 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{T,d}^* = 3 \cdot \tau_{0,d}^* \cdot \frac{t_1^*}{a} = 3 \cdot 0,403 \cdot \frac{34}{150} = 0,274 \text{ N/mm}^2 \quad = \text{Knoten 1}$$

$$\tau_{T,d}^* = 3 \cdot \tau_{0,d}^* \cdot \frac{t_2^*}{a} = 3 \cdot 0,403 \cdot \frac{34}{150} = 0,274 \text{ N/mm}^2 \quad = \text{Knoten 2}$$

Nachweis Mechanismus I – „Schub“:

$$\frac{\tau_{v,d}^*}{f_{v,clt,d}} = \frac{0,805}{3,60} = 0,22 \leq 1,0$$

Nachweis Mechanismus II – „Torsion“:

$$\frac{\tau_{T,d}^*}{f_{T,clt,d}} = \frac{0,274}{1,80} = 0,15 \leq 1,0$$

Bestimmung der Schubbeanspruchung – zulassungskonform (Mechanismus I – „Schub“):

$$t_{\min} = 34 \text{ mm}$$

$$\tau_{v,d} = \frac{n_{xy,d}}{t_{\min}} = \frac{27,37}{34} = 0,805 \text{ N/mm}^2$$

Anmerkung: Somit liefert das Verfahren laut Zulassung bei annähernd gleichen Schichtdicken das gleiche Ergebnis ($\tau_{v,d}^* \equiv \tau_{v,d}$).

Bestimmung der Torsionsbeanspruchung – zulassungskonform (Mechanismus II – „Torsion“):

Anmerkung: Betrachtung einer einzigen Klebefläche.

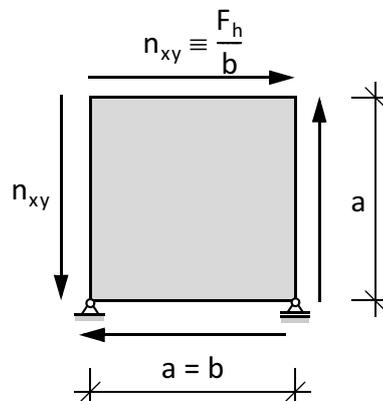


Abb. 1.23: BSP Scheibe, reduziert auf eine einzelne Klebefläche

$$\begin{aligned}
 m_h &= 1 && m_h & \text{Anzahl der Klebeflächen in horizontaler Richtung} \\
 m_v &= 1 && m_v & \text{Anzahl der Klebeflächen in vertikaler Richtung} \\
 a &= 0,15 \\
 b &= 0,15 \\
 J_p &= \frac{0,15^4}{6} && \text{polares Trägheitsmoment einer quadratischen Klebefläche} \\
 N &= n \cdot m_h \cdot m_v = 2 && \text{Gesamtanzahl der Klebeflächen in der rechteckigen BSP-Scheibe} \\
 F_{h,d} &= n_{xy,d} \cdot b = 27,37 \cdot 0,15 && \text{einwirkende, konstante Schubkraft an der Oberseite der Wand} \\
 \tau_{T,d} &= 3 \cdot \frac{n_{xy,d}}{n \cdot a} \cdot \frac{b \cdot h \cdot \frac{a}{2}}{m_h \cdot a \cdot m_v \cdot a \cdot \frac{a}{2}} = \frac{n_{xy,d} \cdot b}{N \cdot J_p} \cdot h \cdot \frac{a}{2} = \frac{F_{h,d} \cdot h}{N \cdot J_p} \cdot \frac{a}{2}
 \end{aligned}$$

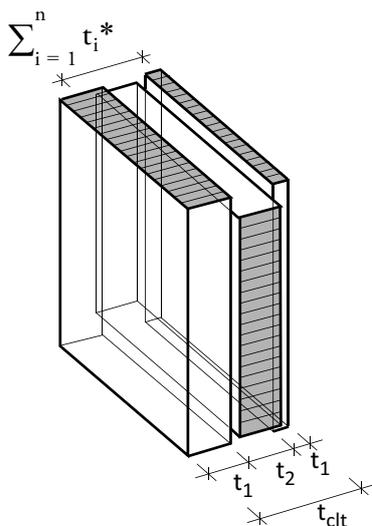
$$\begin{aligned}
 n_{xy,d} &= 27,37 \text{ kN/m} = 27,37 \text{ N/mm} \\
 F_{h,d} &= 27,37 \cdot 150 = 4106 \text{ N} \\
 h &= 150 \text{ mm} \\
 \tau_{T,d} &= \frac{4106 \cdot 150}{2 \cdot \frac{150^4}{6}} \cdot \frac{150}{2} = 0,274 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

Anmerkung: Somit liefert das Verfahren laut Zulassung bei annähernd gleichen Schichtdicken das gleiche Ergebnis ($\tau_{v,d}^* \equiv \tau_{v,d}$).

Nachweis der Schubbeanspruchung im Brandfall:

Annahme: Schicht 3 ist bis auf 6 mm abgebrannt. Zum besseren Vergleich der Ausnutzung bleibt die Bemessungsschubkraft hier ident mit $n_{xy,d} = 27,37 \text{ kN/m} = 27,37 \text{ N/mm}$.

Querschnitt:



$$\begin{aligned}
 t_{clt} &= 70 \text{ [mm]} \\
 t_1 &= 30 \text{ [mm]} \\
 t_2 &= 34 \text{ [mm]} \\
 t_3 &= 6 \text{ [mm]} \\
 \text{Knoten 1} \quad t_1^* &= \min(60, 34) = 34 \text{ mm} \\
 \text{Knoten 2} \quad t_2^* &= \min(34, 12) = 12 \text{ mm} \\
 \text{Anzahl der Klebeflächen: } n &= 2 \\
 \sum_{i=1}^n t_i^* &= 34 + 12 = 46 \text{ [mm]}
 \end{aligned}$$

Abb. 1.24: Dicken des Wandelements – ideale Ersatzdicken t_i^* im Brandfall

- Step-1:

$$\tau_{0,d}^* = \frac{n_{xy,d}}{\sum_{i=1}^n t_i^*} = \frac{27,37}{46} = 0,595 \text{ N/mm}^2$$

- Step-2:

$$\tau_{v,d}^* = 2 \cdot \tau_{0,d}^* = 2 \cdot 0,595 = 1,19 \text{ N/mm}^2 \quad \rightarrow 47 \% \text{ Erhöhung}$$

$$\tau_{T,d}^* = 3 \cdot \tau_{0,d}^* \cdot \frac{t_1^*}{a} = 3 \cdot 0,595 \cdot \frac{34}{150} = 0,405 \text{ N/mm}^2 \quad = \text{Knoten 1}$$

$$\tau_{T,d}^* = 3 \cdot \tau_{0,d}^* \cdot \frac{t_2^*}{a} = 3 \cdot 0,595 \cdot \frac{12}{150} = 0,143 \text{ N/mm}^2 \quad = \text{Knoten 2}$$

Anmerkung: Die Torsionsbeanspruchung steigt im Knoten 1 an und im Knoten 2 fällt sie massiv ab.

Bestimmung der Schubbeanspruchung – zulassungskonform (Mechanismus I – „Schub“):

$$t_{\min} = 34 \text{ mm}$$

$$\tau_{v,d} = \frac{n_{xy,d}}{t_{\min}} = \frac{27,37}{34} = 0,805 \text{ N/mm}^2 \quad \rightarrow \text{keine Änderung gegenüber Grundfall}$$

Anmerkung: Da die minimale Schichtdicke konstant bleibt, ergibt sich keine Änderung gegenüber dem Grundfall.

Bestimmung der Torsionsbeanspruchung – zulassungskonform (Mechanismus II – „Torsion“):

$$n_{xy,d} = 27,37 \text{ kN/m} = 27,37 \text{ N/mm}$$

$$F_{h,d} = n_{xy,d} \cdot b = 27,37 \cdot 150 = 4106 \text{ N}$$

$$h = 150 \text{ mm}$$

$$\tau_{T,d} = \frac{F_{h,d} \cdot h}{N \cdot J_p} \cdot \frac{a}{2} = \frac{4106 \cdot 150}{2 \cdot \frac{150^4}{6}} \cdot \frac{150}{2} = 0,274 \text{ N/(m)m}^2$$

Anmerkung: Nach den Verfahren der Zulassungen ergibt sich auch keine Änderung der Torsionsspannungen.

Der Stabilitäts- und Verformungsnachweis sind im BSPhandbuch [15] geführt.

1.4 Literaturstudie – Ausgewählte Arbeiten zum Thema

1.4.1 Dissertation von R. Bosl [5]

Besondere Bedeutung hat die Dissertation von Bosl [5] mit den darin beschriebenen versuchstechnischen Untersuchungen an BSP-Elementen. Die verwendete Prüfkongfiguration ermöglichte die Bestimmung der Schubsteifigkeiten von Scheibenstrukturen. Mit einem viergelenkigen quasi-starren Stahlrahmen (siehe Abb. 1.26 (a)) wurden die für die Bestimmung der Schubsteifigkeiten notwendigen Schubverzerrungen dem Probekörper aufgezwungen.

Untersucht wurden fünfschichtige Brettsperrholzelemente mit zwei sich unterscheidenden Schichtaufbauten. Beide Konfigurationen weisen eine orthogonale Schichtstruktur auf. Bei der zweiten Konfiguration wurde die Mittellage des BSP-Elementes um 45° verdreht eingebaut (siehe Abb. 1.25).

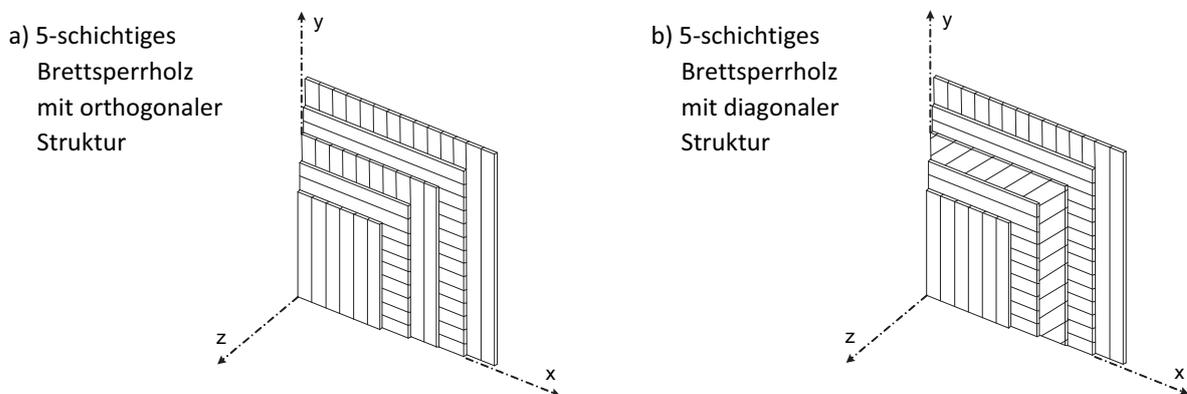


Abb. 1.25: Aufbau der Wandscheiben aus Brettsperrholz [5]

Abb. 1.26 (b) zeigt den Versuchsaufbau, bei dem der Prüfkörper um 45° zur Horizontalen gedreht eingebaut ist. Bosl schildert in seiner Arbeit [5], dass sich bei allen Probekörpern mit orthogonaler Struktur bis zum Erreichen des Bruchzustandes nur im mittleren Bereich (siehe Abb. 1.26 (b)) des Probekörpers gut erkennbare Schubverformungen einstellten. Die Probekörper mit diagonaler Mittellage wiesen im Vergleich zu den Probekörpern mit orthogonaler Mittellage eine doppelt so große Schubsteifigkeit auf. Für die Erzeugung eines reinen Schubspannungszustandes sind sowohl Hauptdruck- als auch Hauptzugkräfte in die Probekörper einzuleiten. Bosl schilderte in [5], dass in seiner Konfiguration, aufgrund fehlender durchgehender kraftschlüssiger Verbindung zwischen Stahlrahmen und Probekörper, nur lokale Druckkräfte eingeleitet werden konnten. Durch die hohe Scheibentragfähigkeit wurden große Druckkräfte in den Lasteinleitungsstellen übertragen, die zum lokalen Versagen der Eckpunkte der BSP-Elemente führte, siehe Abb. 1.26 (c).

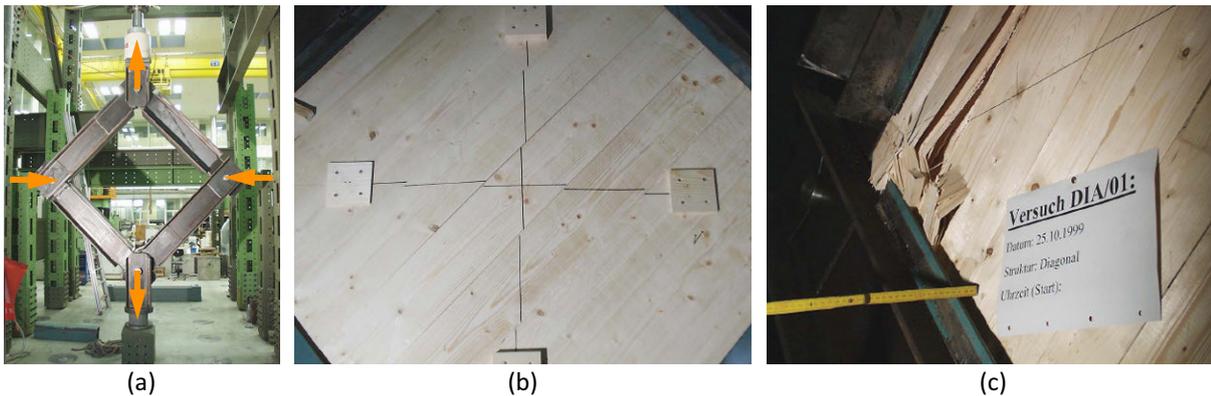


Abb. 1.26: Versuchsaufbau nach Bosl [5]: (a) Stahlrahmen, (b) Schubverformung einer BSP-Scheibe, (c) Versagen von BSP-Scheiben mit diagonaler Struktur im Kräfteinleitungsbereich

Resümee:

Bosl konnte mit der in [5] beschriebenen Versuchskonfiguration die Schubsteifigkeit verschiedener Plattenaufbauten untersuchen. Keine Aussagen konnten jedoch zur Scheibenschubfestigkeit getroffen werden, da hierzu sicherlich ein Versagen der BSP-Elemente auf Schub Voraussetzung wäre. Sehr gut ersichtlich ist das hohe Schubtragvermögen der Prüfkörper. Verdeutlicht wird dies durch das Versagen der Lasteinleitungspunkte, die nicht im Stande waren die hohen Kräfte in die Prüfkörper einzuleiten.

1.4.2 Diplomarbeit von G. Wallner [19]

Wallner [19] untersuchte an einer Vielzahl von Versuchen die Verschiebungskenngrößen an orthogonal verklebten Brettlamellen. Ziel war es, für das „Brettachsen-Feder-Modell“ (siehe Abb. 2.2 in [19]), die Verschiebungskennwerte zu ermitteln.

Für die experimentelle Bestimmung dieser Kenngrößen wurde ein dreischichtiger Prüfkörper entwickelt. Dieser bestand aus orthogonal miteinander verklebten Brettlamellen, reduziert auf nur einen Kreuzungspunkt (Abb. 1.27).



Abb. 1.27: Versuchsaufbau und Messkonfiguration [19]

Aus einer Vielzahl an Parametern, welche die technologischen Eigenschaften von Holz beeinflussen, wurden die Auswirkungen der Variation der Mittelholzbreite, der Jahrringlage (Rift-, Halbrift- und Seitenwarebretter) an merkmalfreien Proben untersucht. Weiters wurde noch der Einfluss der Astigkeit betrachtet.

In Tab. 1.4 sind die Anzahl der Probekörper zusammengefasst.

Tab. 1.4: Prüfprogramm/Anzahl der Probekörper

Mittelbrett	Seitenware	Riftbretter	Halbriftbretter	astiges Holz
Breite 100 mm	55 Stk.	24 Stk.	19 Stk.	28 Stk.
Breite 150 mm	45 Stk.	22 Stk.	16 Stk.	14 Stk.
Breite 200 mm	53 Stk.	5 Stk.	-	22 Stk.
Mittelholzdicke: 30 mm				
Laschen: Breite = 145 mm, Dicke = 30 mm				

Bei den Prüfungen traten zwei Bruchformen auf. Das ursprünglich erwartete Rollschubversagen des Probekörpers im Bereich der Klebefläche (Abb. 1.28a), trat nur bei Probekörpern mit Mittelbrettern aus Seiten- und Halbriftware auf. Zusätzlich war überraschenderweise als zweite Bruchform ein Schubversagen des Mittelbrettes (Abb. 1.28b) bei jeder Jahrringlage festzustellen.

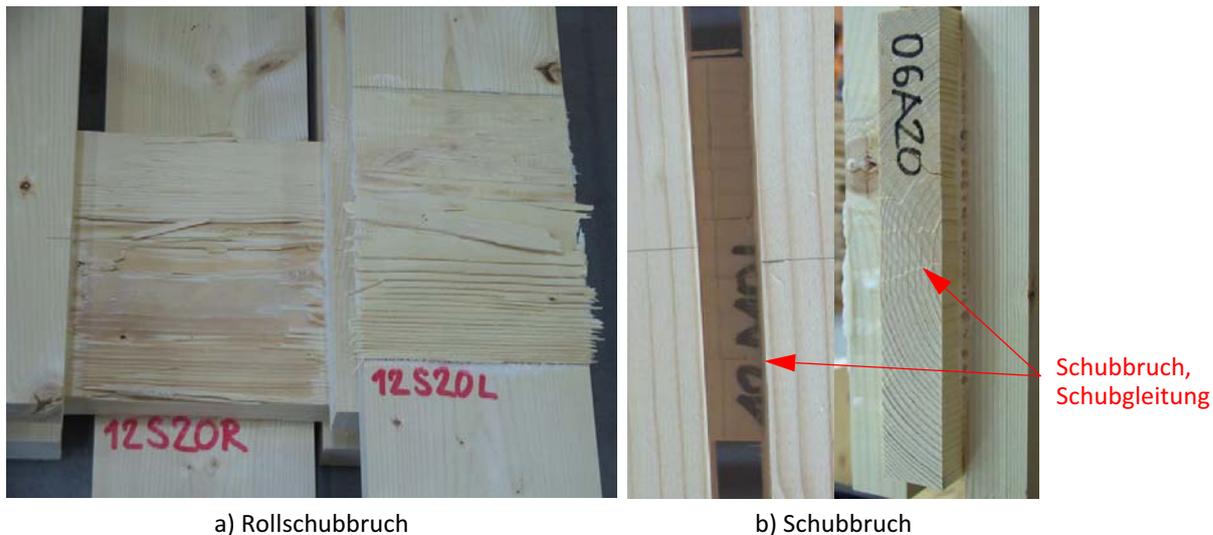


Abb. 1.28: Bruchbilder [19]

Die Ermittlung des Verschiebungsmoduls gilt bei allen Prüfungen als Maß für die Steifigkeit. Für die Bestimmung der Festigkeiten wurde bei den Rollschubbrüchen die Schubspannung in der Klebefläche herangezogen. Bei den Schubbrüchen wurde die Festigkeit als Schubspannung in der Querschnittsfläche dargestellt.

Die publizierten Ergebnisse sind als Mittelwerte in Tab. 1.5 angegeben.

Tab. 1.5: Übersicht über die Mittelwerte der Versuchsergebnisse [19]

Serie	C_{AK} [N/mm ³]	τ_{AK} [N/mm ²]	τ_{AQ} [N/mm ²]	Versuche
S20	4,83	1,64	7,89	45
S15	4,37	1,47	6,50	45
S10	3,29	1,38	6,68	45
R20	4,73	2,81	6,79	5
R15	4,19	2,62	6,32	17
R10	4,18	2,47	5,97	16
H15	4,80	1,47	6,96	16
H10	4,50	1,56	6,98	19
A20	4,31	2,73	6,60	22
A15	4,36	2,68	6,47	14
A10	3,95	2,50	6,04	28
S ... Seitenware R ... Riftware H ... Halbriftware A ... Ast in der Klebefläche		20 ... Mittelholzbreite 200 [mm] 15 ... Mittelholzbreite 150 [mm] 10 ... Mittelholzbreite 100 [mm] AK ... Klebefläche QK ... Querschnittsfläche des Mittelbrettes		

Resümee:

Wallner [19] beabsichtigte in seiner Arbeit durch die gewählte Prüfkörpergeometrie gezielt Rollschubbrüche zu erzeugen. Überraschenderweise traten auch Schubbrüche auf. Diese Schubversagensarten unterscheiden sich durch ihre unterschiedlichen Bruchbilder. Beim Rollschubversagen werden die Holzfasern quer zur Faserrichtung beansprucht und „rollen“ dann bei Überbeanspruchung gegeneinander ab. Beim Schubversagen in Faserrichtung hingegen gleiten die Fasern gegeneinander ab. Dieser Unterschied spiegelt sich auch in der Ergebnistabelle wieder, wenn man die beiden Festigkeiten (τ_{AK} und τ_{AQ}) miteinander vergleicht. Der Mittelwert der Schubfestigkeit τ_{AQ} lag im Bereich von 6,04 bis 7,89 N/mm², der der Rollschubfestigkeit τ_{AK} im Bereich von 1,40 bis 2,73 N/mm².

Es wird nun, durch eine Weiterentwicklung des Prüfkörpers möglich sein, gezielt Schubbrüche für die Bestimmung der Festigkeit „Mechanismus I Schub“ (siehe 1.2.8) zu erzeugen.

1.4.3 Zulassungsprüfungen nach dem CUAP-Verfahren [21]

Zur Erlangung einer Europäisch-Technischen-Zulassung (ETA) für ein Brettsperrholzprodukt, ist eine Übereinstimmung mit dem CUAP 03.04/06 (Common Understanding of Assessment Procedure) „Massive plattenförmige Holzbauelemente für tragende Bauteile Bauwerken“ [21] notwendig.

In der CUAP sind folgende Punkte geregelt:

- Definition des Bauprodukts
- Verwendungszweck des Bauprodukts
- Charakteristische Eigenschaften des Bauprodukts, welche in der ETA bewertet werden.
- Methoden zur Bestimmung der charakteristischen Eigenschaften des Bauproduktes.

- Grenzwerte und Klassen der relevanten Eigenschaften des Bauproduktes, die in der ETA betrachtet werden.
- Annahmen, unter denen die Brauchbarkeit des Produktes für die vorgesehene Nutzung bewertet werden.
- Empfehlungen für den Hersteller
- System der Konformitätsbescheinigung
- CE-Kennzeichnung

Für die Bestimmung der Scheibenschubfestigkeit gilt der Abs. 4.1.2.3 in der CUAP [21]. Dieser besagt, dass die Prüfkongfiguration entsprechend EN 408 [26] aufzubauen und durchzuführen ist. Dies entspricht einem Vierpunkt-Biegeversuch. Weiters ist unter Abs. 4.1.2.3 angeführt, dass die Schichten des Prüfkörpers, die parallel zur Spannrichtung des Prüfkörpers laufen, eine Fuge auf halber Prüfkörperhöhe aufweisen müssen, siehe Abb. 1.29.

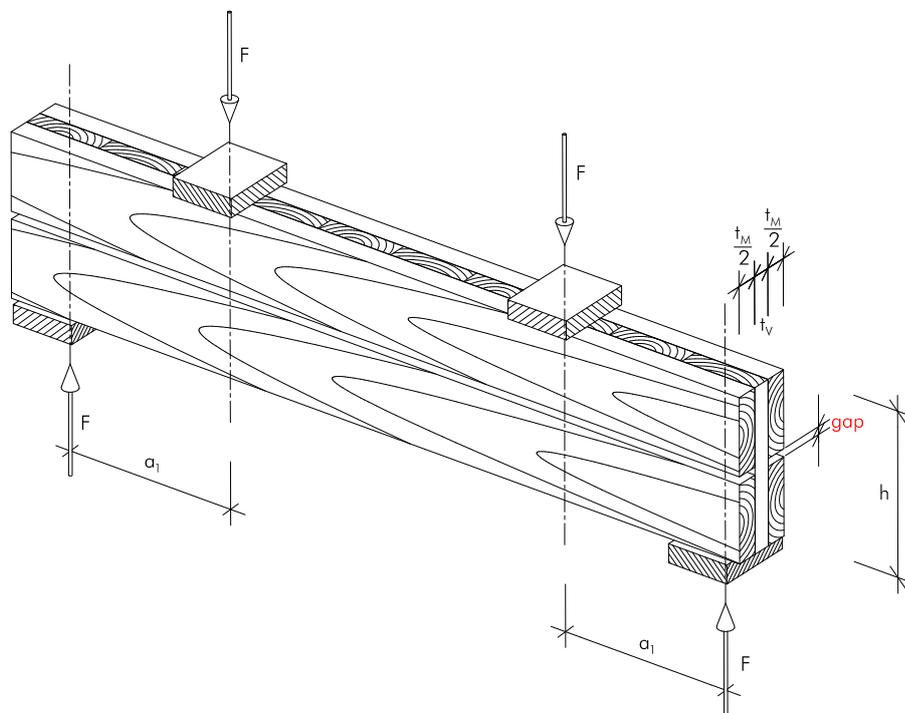


Abb. 1.29: Prüfkongfiguration für den CUAP-Schubversuch

Durch die Fuge auf halber Prüfkörperhöhe (Schwerlinie), können die Längslagen keine Schubkräfte aufnehmen. Die Schubkräfte werden in diesem Bereich von der Querlage aufgenommen. Die Ermittlung der Schubfestigkeit erfolgt nach der Stabtheorie, wobei die Gesamtbreite der Querlage für die Berechnung herangezogen wird.

Die, wie vorhin beschrieben, ermittelte Schubfestigkeit ist jedoch nur eine Schubspannung zum Zeitpunkt des Versagens des Probekörpers auf Biegung, siehe Abb. 1.30.

Die tatsächliche Größe des Schubfestigkeitswertes wird unterschätzt, da kein Schubbruch erzeugt werden konnte.



Abb. 1.30: Versagen der Zugzone bei der CUAP-Scheibenschubprüfung

1.4.4 Forschungsbericht von G. Traetta [17]

Als Weiterentwicklung der Bosl-Versuche [5] ist die Arbeit von Traetta zu sehen. Auch in dieser Arbeit steht die Ermittlung des Schubmoduls für Brettsperrholzscheiben im Vordergrund. Im Gegensatz zu den Versuchen von Bosl wird hier nur ein dreischichtiges BSP-Element untersucht. Aufbau und Geometrie siehe Abb. 1.31. Die Einleitung der Schubkräfte wird kontinuierlich über linienförmige eingeklebte Stahllaschen bewerkstelligt, entgegen der lokalen Lasteinleitung bei Bosl.

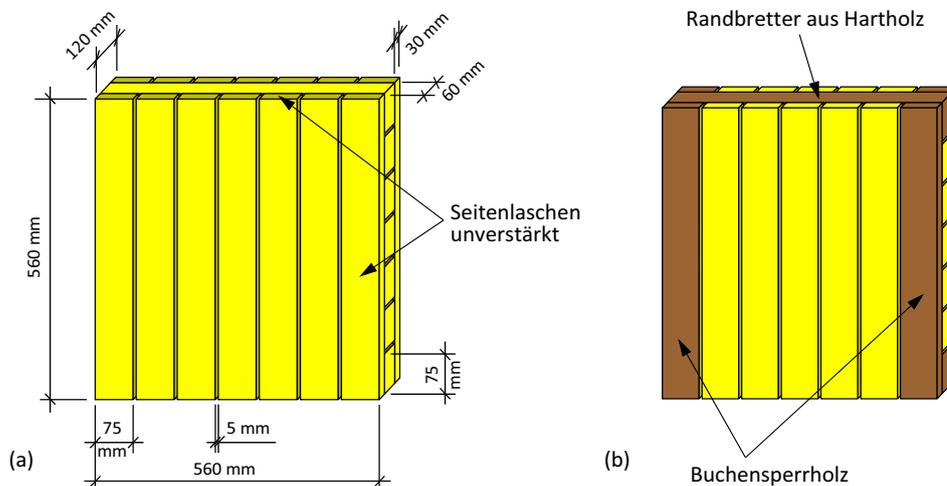


Abb. 1.31: (a) Abmessungen der BSP-Scheibe, (b) BSP-Scheibe mit Verstärkung [17]

Die dreischichtigen Scheibenelemente sind aus Einzelbrettern der Festigkeitsklasse C24 hergestellt worden. Die Prüfkörper wurden als „aufgelöste Scheibe“ mit einer Fugenbreite von 5 mm hergestellt. Die Fuge garantiert auch noch im verformten Zustand ein von Reibungseffekten unbeeinflusstes Messergebnis. Die Reibung zwischen benachbarten Brettern würde zu einer erhöhten Steifigkeit führen. Auch in der Praxis sind in Produktzulassungen Fugen bis 6 mm erlaubt.

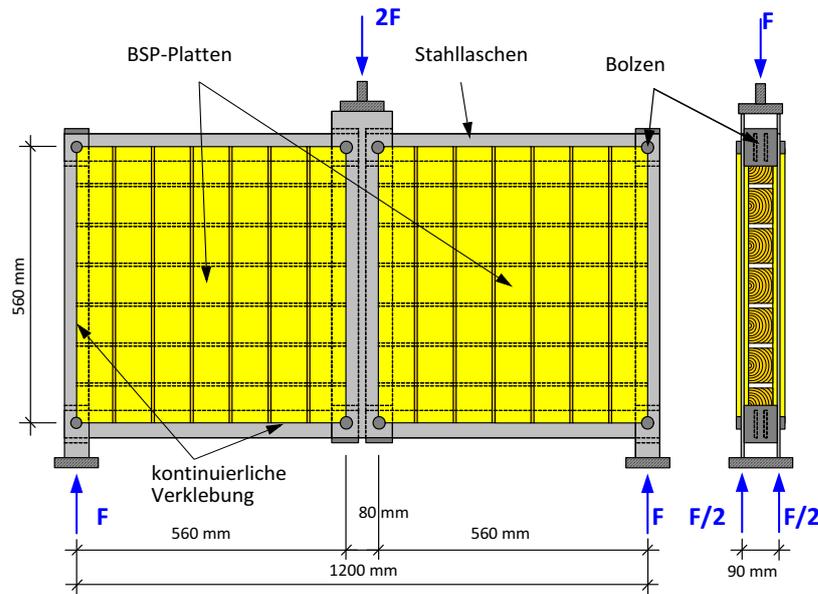


Abb. 1.32: Versuchskonfiguration I und II – schematische Darstellung [17]

Grundlage für die Prüfkonfiguration ist der Drei-Punkt-Biegeversuch nach EN 408 [26], siehe Abb. 1.32. Die Konfiguration besteht aus einem quasi-starren gelenkigen Stahlrahmen. Die auftretenden Biegedruck- und -zugspannungen werden durch den Stahlrahmen aufgenommen ($EI_{\text{Stahl}} \gg EI_{\text{Holz}}$). Der Stahlrahmen besteht aus Stahllaschen, die gelenkig mit Bolzen in den Eckpunkten verbunden sind. Zur Übertragung der Schubkräfte in die BSP-Scheibe werden jeweils zwei Laschen in Einschlitzungen in der Außen- und Mittelage eingeklebt. Durch die kontinuierliche Lasteinleitung in den Seitenflächen, ist die Erzeugung eines nahezu reinen Schubspannungszustandes in der BSP-Scheibe möglich.

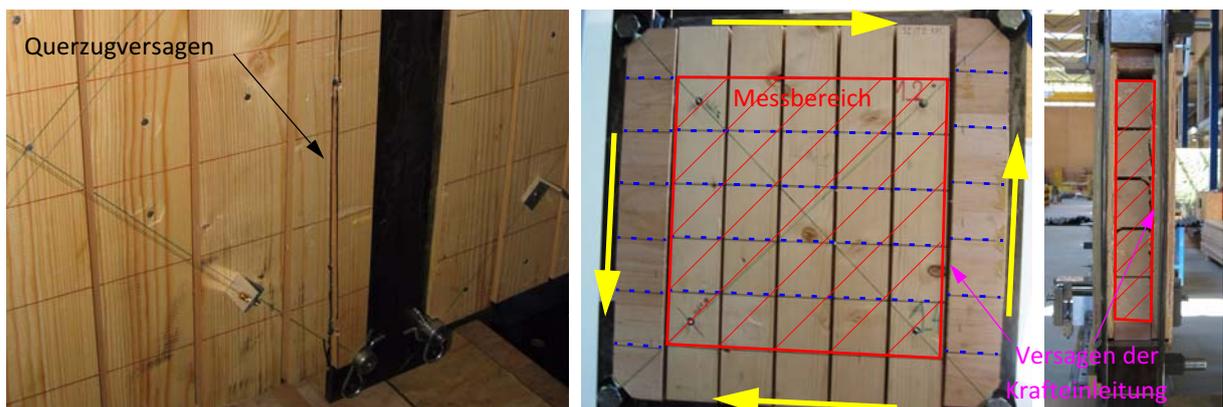


Abb. 1.33: Versagensbilder der Versuchskonfiguration I (ganz links) bzw. II mit einem zerstörungsfreien Bereich von 5x5-Brettkreuzungsflächen [17]

Insgesamt wurden drei Versuche durchgeführt. Beim ersten Versuch wurden unverstärkte Scheibenelemente geprüft. Im Bruchzustand waren lokale Querzugversagen in den Randbrettern im Lasteinleitungsbereich feststellbar (siehe Abb. 1.33). Aus diesem Grund wurden die Randbretter für den zweiten Versuch mit Buchensperholz verstärkt.

Ein Querschnittversagen der Randbretter konnte dadurch verhindert werden. Dennoch kam es zu einem lokalen Versagen der Krafteinleitung im Übergang zur Mittellage (siehe Abb. 1.33). Der dritte Versuch konnte mit dem nicht beschädigten BSP-Körper aus Versuch II durchgeführt werden (Abb. 1.34). Die fehlende Platte wurde durch eine Stahldiagonale ersetzt. Die Bruchkraft konnte gegenüber den beiden ersten Versuchen nochmals gesteigert werden. Beim Erreichen der Bruchkraft kam es zum Bruch der Klebefuge zwischen Stahlasche und Probekörper.

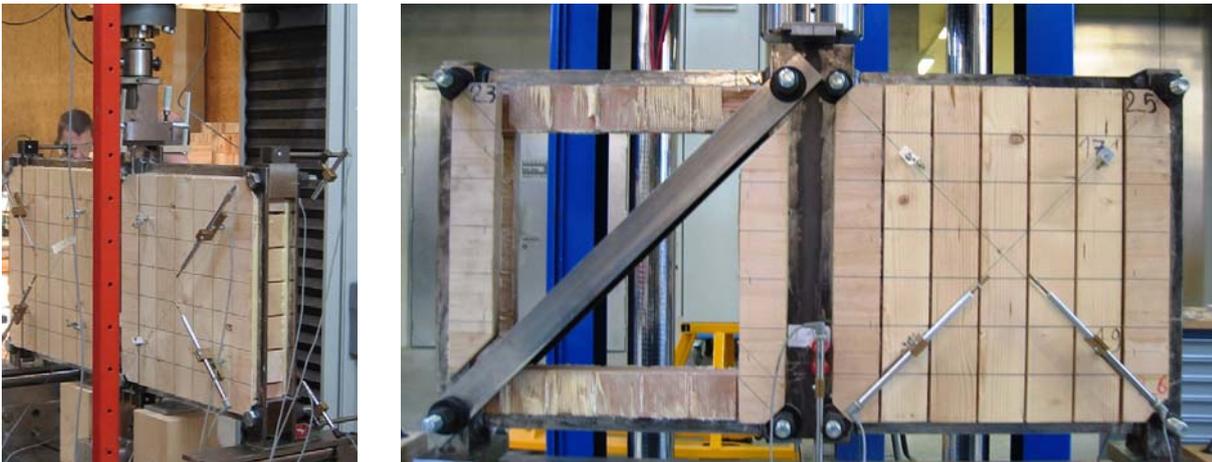


Abb. 1.34: Versuchskonfiguration im eingebauten Zustand (links: Versuchskonfiguration I bzw. II; rechts: Versuchskonfiguration III) [17]

Fazit:

Bei allen Versuchen von Traetta [17] konnte im linear elastischen Bereich problemlos die Schubsteifigkeit ermittelt werden. Die über alle Versuche gemittelte Schubsteifigkeit konnte mit $G_{\text{Scheibe, Versuch, mean}} = 230 \text{ N/mm}^2$ bestimmt werden. Mit einer begleitenden FE-Untersuchung der Versuchskonfiguration konnte ein Schubmodul mit $G^* = 228 \text{ N/mm}^2$ bestimmt werden, welcher mit dem Versuchsergebnis gut übereinstimmt.

Aussagen über die Schubfestigkeit konnten keine getroffen werden, da kein eindeutiger Schubbruch erzeugt werden konnte.

1.4.5 Vergleich der technischen Schubfestigkeiten im CIB-paper von Th. Bogensperger [4]

Bogensperger betrachtete die oben angeführten Schubprüfkonfigurationen von Bosl, Traetta und dem CUAP-Verfahren zusammenfassend und ermittelte technische Schubfestigkeiten zum Zeitpunkt des Bruches der jeweiligen Prüfkonfigurationen. Weiters berechnete er auf Basis der Vorgaben für Furnierschichtholz in der DIN 1052 mögliche Schubfestigkeiten für Brettspertholz, siehe "Ansetzbare Scheibenschubfestigkeit für Mechanismus I" auf Seite 27.

Betrachtet man die in Abb. 1.35 dargestellten technischen Schubfestigkeiten, so ist ersichtlich, dass mit zunehmender Brettstärke die Schubfestigkeit sinkt. Anzumerken ist, dass die dargestellten Kenngrößen die tatsächliche Größe unterschätzen.

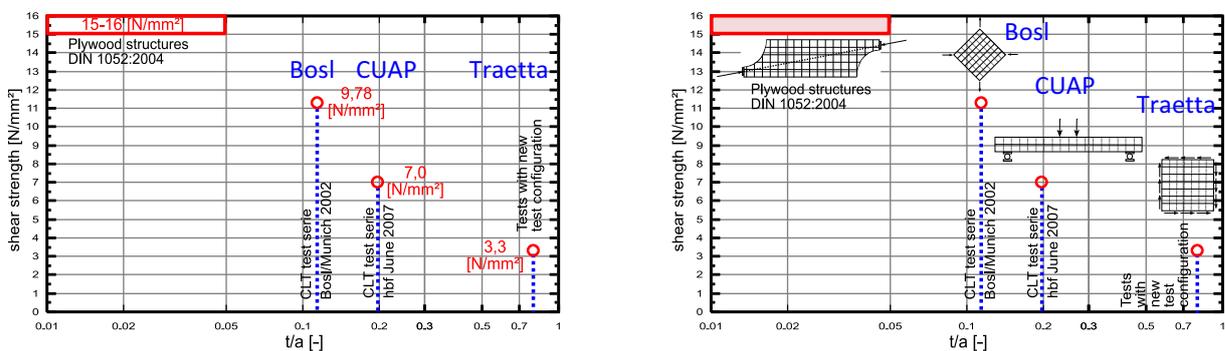


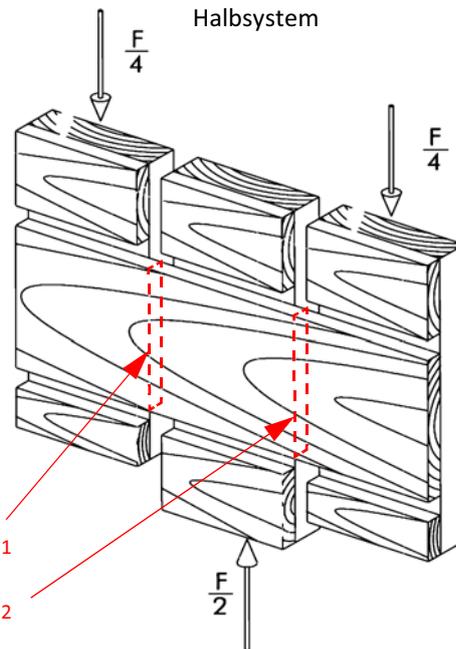
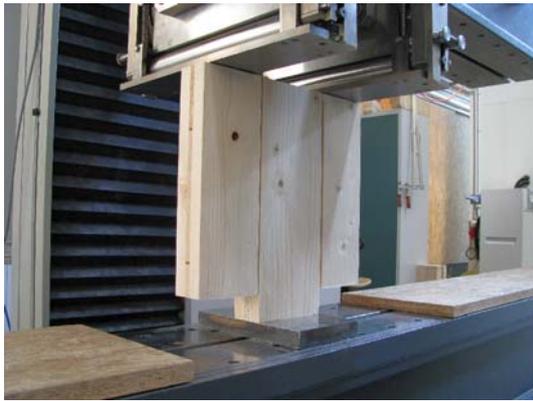
Abb. 1.35: Vergleich der technischen Schubspannungen unterschiedlicher Prüfkonfigurationen bezogen auf das Verhältnis Brettbreite zu -dicke (t/a)

1.4.6 CIB-paper von R. Jöbstl [10]

Die Arbeit von Wallner [19] ist die Basis für die Prüfkonfiguration von Jöbstl.

Zum Unterschied zu den Versuchen von Wallner war bei den Versuchen von Jöbstl das Ziel, nur Schubbrüche zu erzeugen, die zur Festigkeitsbestimmung dienen.

Der symmetrisch aufgebaute Prüfkörper besteht aus drei Schichten. Die Decklagen dienen der Kraftein- und weiterleitung. Die horizontalen Querlagen bestehen aus dem Prüfbrett und den oben und unten angeordneten Füllhölzern. Diese Füllhölzer dienen der Lastverteilung und werden in den Fugen der Decklagen durchtrennt, sodass im Prüfbrett zwei relevante Schubebenen entstehen, siehe Abb. 1.36. Ein Nachteil dieser Prüfkonfiguration ist, dass immer die schwächere der beiden Schubebenen zuerst brechen wird und dadurch die tatsächliche Festigkeitskenngröße unterschätzt wird.



Schubversagensfläche $A_{v,1}$

Schubversagensfläche $A_{v,2}$

Abb. 1.36: Versuchskonfiguration von Jöbstl [10]

Das Kraft-Verschiebungsverhalten von 10 typischen, der insgesamt 20 durchgeführten Versuche, ist in Abb. 1.37 dargestellt.

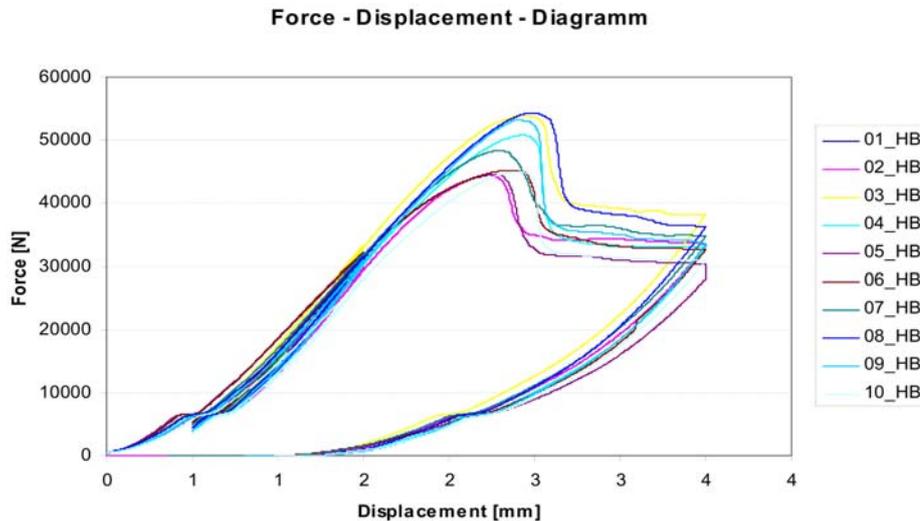


Abb. 1.37: Kraft-Verschiebungsdiagramm 10 typischer Prüfkörper

Bei allen Versuchskörpern trat beim Erreichen der Bruchkraft ein Versagen in einer der beiden Schubflächen $A_{v,1}$ oder $A_{v,2}$ (Abb. 1.36) ein. Erkennbar wurde dies auch durch große Verschiebungen in den Fugen der Decklagen (Abb. 1.38). Nach Abbau der Bruchkraft stellte sich ein horizontales Plateau ein, welches durch weitere Deformationen bei gleichbleibender Prüfkraft erkennbar wurde (Abb. 1.37).



Abb. 1.38: Schubversagen am Prüfkörper der Versuchskonfiguration Jöbstl

Die Auswertung der 20 durchgeführten Versuche ist in Tab. 1.6 dargestellt. Da alle Probekörper Schubversagen aufweisen, kann die Bruchspannung direkt als Schubfestigkeit bezogen auf die Querschnittsfläche des Prüfbrettes angegeben werden.

Der Mittelwert liegt bei 12,80 N/mm² und der COV bei 11,30 %. Abhängig von der statistischen Verteilungsfunktion liegt der 5 % - Fraktilewert $f_{v,ct,05}$ zwischen 10,30 N/mm² und 10,60 N/mm².

Tab. 1.6: Ergebnisse der Versuchsreihe:

Datenreihe	TU Graz
Anzahl	20
Höhe h [mm]	200
Dicke t [mm]	10
$f_{v,ct,50}$ Mittelwert [N/mm ²]	12,80
Standard Deviation	1,45
COV [%]	11,30
$f_{v,ct,05}$ 5 % - Fraktile Normalverteilung [N/mm ²]	10,40
$f_{v,ct,05}$ 5 % - Fraktile Log. Normalverteilung [N/mm ²]	10,60
k_s	1,93
$f_{v,ct,05}$ 5 % - Quantil EN 14358 [N/mm ²]	10,30

1.5 Stand der Normung

1.5.1 Eurocode 5

Im Grunddokument des Eurocode 5 [23] – EN 1995 -1-1 – sind keine Angaben zur Berechnung von Brettsperrholz angeführt.

Im österreichischen Nationalen Anhang (NA) [24] des Eurocode 5 findet man im Absatz 6.3.3 auf Seite 25 folgende Bestimmung:

„Brettsperrholz ist ein mehrschichtig verklebtes flächenhaftes Produkt mit in alternierender Folge rechtwinklig zueinander angeordneten Schichten. Der Einsatz von Brettsperrholz in tragender Funktion wird durch technische Spezifikationen (Zulassungen) geregelt, in denen der Aufbau, die Abmessungen sowie die charakteristischen Festigkeits-, Steifigkeits- und Rohdichte-Kennwerte festgelegt sind.“ [24]

1.5.2 DIN 1052:2008-12 [22]

In der DIN 1052 findet man auszugsweise folgende Regelungen:

Brettsperrholz (Mehrschichtige Massivholzplatten), ([22], Abs. 7.6, S.29)

7.6 Brettsperrholz (Mehrschichtige Massivholzplatten)

(1) Brettsperrholz bedarf eines Nachweises der Verwendbarkeit durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen, in denen der Plattenaufbau, die Schichtdicken sowie die charakteristischen Festigkeits-, Steifigkeits- und Rohdichtekennwerte festgelegt sind.

Flächen aus zusammengeklebten Schichten ([22], Abs. 8.9.2, S.61)

8.9.2 Flächen aus zusammengeklebten Schichten

(1) Für Flächentragwerke mit Querschnitten aus geklebten Schichten (z. B. aus Holzwerkstoffplatten, Brettern oder Bohlen) sind die auf die Mittelfläche bezogenen Steifigkeitswerte nach der Verbundtheorie mit starrem Verbund zu berechnen. Dies gilt auch für die Spannungsberechnung.

(2) Rechenregeln sind in Anhang D angegeben.

Anhang D ([22], Abs. D.1, S.174)

D.1 Allgemeines

(1) Für ebene Flächentragwerke mit einem Querschnittsaufbau aus Schichten werden Rechenregeln für Steifigkeitswerte angegeben. Mit diesen Steifigkeitswerten können Systemberechnungen mit EDV-Programmen durchgeführt oder Tabellenwerke verwendet werden. Bei großen Steifigkeitsunterschieden eignen sich Stabprogramme gut. Schnittgrößen und Verformungen sind das Ergebnis.

(2) Aus den Schnittgrößen werden für die einzelnen Schichten entsprechend der technischen Biegelehre Spannungen berechnet. Die Querdehnung wird dabei vernachlässigt.

(3) Der Querschnitt des Flächentragwerks aus n Schichten ist symmetrisch aufgebaut. Die Schichten sind zueinander parallel oder orthogonal ausgerichtet.

(4) Bestehen die Schichten aus nebeneinander liegenden Brettern, die an den Schmalseiten nicht miteinander verklebt sind, so ist der Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung gleich null zu setzen. Der Schubmodul für die Rollschub-Beanspruchung ist nach Tabelle F.5 anzunehmen.

(5) Für den Elastizitätsmodul, den Schubmodul und die Verbindungsmittelsteifigkeiten sind für den Nachweis der Tragsicherheit die durch den Sicherheitsbeiwert geteilten Mittelwerte zu verwenden.

$$E = \frac{E_{\text{mean}}}{\gamma_M}; \quad G = \frac{G_{\text{mean}}}{\gamma_M}; \quad K = \frac{2}{3} \cdot \frac{K_{\text{ser}}}{\gamma_M} \quad (\text{D.1})$$

Anhang D ([22], Abs. D.2, S.174 und S.176-177)

D.2 Flächen aus zusammengeklebten Schichten

D.2.1 Allgemeines

(1) Die Schichten des Flächentragwerks sind miteinander verklebt. Es besteht keine Nachgiebigkeit zwischen benachbarten Schichten (starrer Verbund).

(2) Die für die Plattenwirkung maßgebenden Steifigkeiten werden mit Biege- und Drillsteifigkeiten B bezeichnet. Sie setzen sich aus einem Steineranteil B_S und den Eigenbiegesteifigkeiten B_E der einzelnen Schichten zusammen. Die Schubsteifigkeiten für die Verformungen infolge der Querkräfte q_x und q_y in z -Richtung werden mit S bezeichnet.

(3) Die für die Scheibenwirkung maßgebenden Steifigkeiten werden mit D bezeichnet.

(4) Für die Bezeichnungen gilt 8.9, Bilder 16a, 16b und 16c. Für die Schicht i sind die entsprechenden Elastizitäts- und Schubmoduln sowie die Koordinate z_i einzusetzen.

(5) Grundlage ist die technische Biegelehre mit Berücksichtigung der Schubverformung.

D.2.3 Scheibenbeanspruchung

(1) Die Steifigkeiten werden auf eine Breite 1 bezogen (Kraft/Länge).

(2) Dehnung in x -Richtung (Normalkraft n_x), Dehnsteifigkeit D_x und Normalspannung in x -Richtung:

$$D_x = \sum E_{x,i} \cdot d_i \quad (\text{D.18})$$

$$\sigma_{x,i} = E_{x,i} \cdot \frac{n_x}{D_x} \quad (\text{D.19})$$

(3) Dehnung in y -Richtung (Normalkraft n_y), Dehnsteifigkeit D_y und Normalspannung in y -Richtung:

$$D_y = \sum E_{y,i} \cdot d_i \quad (\text{D.20})$$

$$\sigma_{y,i} = E_{y,i} \cdot \frac{n_y}{D_y} \quad (\text{D.21})$$

(4) Gleitung der xy -Ebene (Schubkraft n_{xy}), Schubsteifigkeit D_{xy} und Schubspannung $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ für auch an den Schmalseiten verklebte Brettlagen:

$$D_{xy} = \sum G_{xy,i} \cdot d_i \quad (\text{D.22})$$

$$\tau_{xy,i} = G_{xy,i} \cdot \frac{n_{xy}}{D_{xy}} \quad (\text{D.23})$$

(5) Gleitung der xy -Ebene (Schubkraft n_{xy}), Schubsteifigkeit D_{xy} und Schubspannung $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ für an den Schmalseiten nicht verklebte Brettlagen:

$$D_{xy} = \frac{1}{4} \cdot \sum G_{xy,i} \cdot d_i \quad (\text{D.24})$$

$$\tau_{xy,i} = G_{xy,i} \cdot \frac{n_{xy}}{D_{xy}} \quad (\text{D.25})$$

(6) Bei an den Schmalseiten nicht verklebten Brettlagen sind die Klebflächen der Brettlagen analog zu D.3.4 für ein Torsionsmoment M_ϕ zu bemessen.

$$M_\phi = \frac{e_x \cdot e_y \cdot n_{xy}}{n \cdot 1} \quad (\text{D.26})$$

Bezeichnungen siehe Bild D.3.

1.5.3 Fazit

Die oben angeführten Normen verweisen, im Bezug auf Materialkenngrößen und Bemessungsvorschriften, auf die Produktzulassungen der jeweiligen Hersteller.

Nur in der DIN 1052 [22] findet man Angaben zur Spannungsermittlung bei Scheibenbeanspruchung aber keine zu den Festigkeitskenngrößen.

2 Prüfkörperentwicklung/Prüfplanung

Einleitung

Betrachtet man rückblickend die Literaturstudie (Kap. 1.4), so sind mehrere Punkte auffallend. Für die Bestimmung der Scheibensteifigkeiten wurden Probekörper mit mehreren Knotenpunkten – Knotenpunkt = Kreuzungspunkt zweier Bretter bzw. RVSE – verwendet. Das reale Verformungsverhalten des Systems Brettspertholz wird durch das Aktivieren möglichst vieler Knotenpunkte sehr gut nachempfunden. Auch materialbedingte Streuungen der Ausgangsbretter werden durch die Verwendung größerer Probekörper verringert.

Durch die hohe Schubtragfähigkeit der BSP-Scheibe ließen sich jedoch keine Festigkeitskenngrößen bestimmen, da hierzu das Erreichen eines entsprechenden Schubbruchs notwendig wäre. Bei Bosl [5] und Traetta [17] versagten die Lasteinleitungspunkte, die nicht im Stande waren die hohen Kräfte in die Scheibe ein- bzw. weiterzuleiten.

Für die Bestimmung der Festigkeitskenngrößen wird es notwendig sein, BSP-Scheiben mit mehreren Knotenpunkten auf Probekörper zu reduzieren, die möglichst wenige Knotenpunkte aufweisen, siehe RVSE in „Einleitung“ auf Seite 9. Die Versuche von Wallner [19] und Jöbstl [10] zeigten, dass es durch die Reduktion der Knotenpunkte möglich ist das Schubtragverhalten von BSP zu untersuchen und gezielt Rollschub- und Schubversagen zu erzeugen.

Durch die Entwicklung einer „neuen“ Prüfkongfiguration soll die Reduktion auf maximal vier Knotenflächen (entspricht einem dreischichtigen Aufbau) mit einer relevanten Schubebene erfolgen. In den folgenden Kapiteln wird die neue Konfiguration mit „EN“ und die von Jöbstl mit „CIB“ benannt.

2.1 Entwicklung der Prüfkongfiguration „EN“

Als Grundlage für die Entwicklung des Versuchskörpers „EN“ dienen die Prüfnormen EN 789 „Holzbauwerke - Prüfverfahren - Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Holzwerkstoffen“ [27] und die EN 408 „Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften“ [26].

Der in der EN 789 Anhang B beschriebene Prüfkörper zur Bestimmung der Scherfestigkeit rechtwinkelig zur Plattenebene, ist in erster Linie für die Untersuchung von Holzwerkstoffen, wie z. B. Spanplatten oder Furnierschichtholz, konzipiert.

Der Prüfkörper besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen, der zu untersuchenden Platte und den aufgeklebten Seitenhölzern, siehe Abb. 2.1 (a).

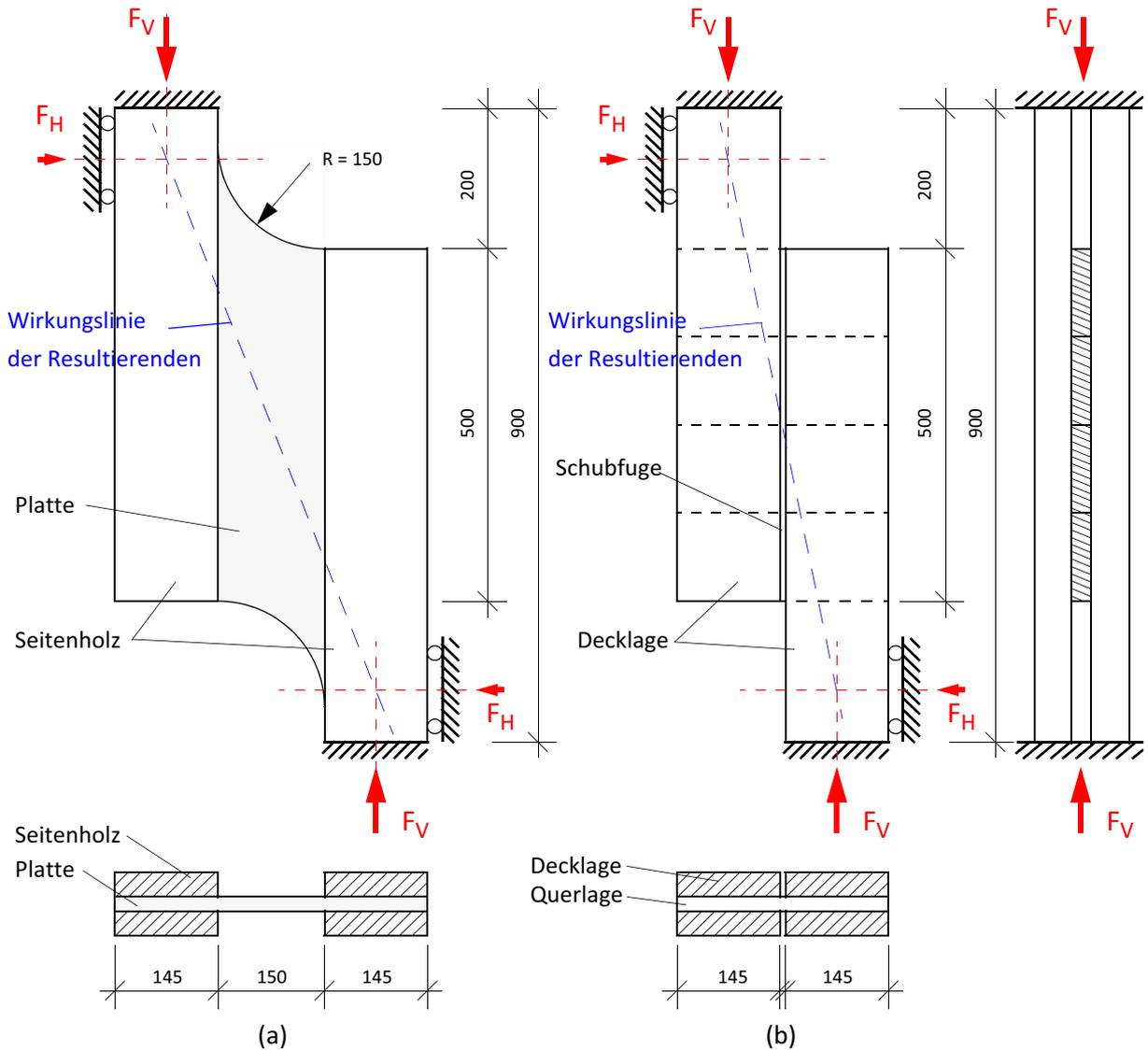


Abb. 2.1: Versuchskonfiguration nach EN 789 (a) / Step 1 – möglicher BSP-Versuchskörper (b)

Dieser Prüfkörper wird nun im Step 1 zu einem dreischichtigen Brettsperrholzelement „umgebaut“, siehe Abb. 2.1 (b). Die Seitenhölzer werden zu Decklagen und die Platte zur Querlage des Prüfkörpers umfunktioniert. Der Abstand zwischen den Seitenhölzern (150 mm) wird als Fuge zwischen den Decklagenbrettern gesehen. Diese Fuge von 150 mm Breite wird auf einen Spalt von wenigen Millimetern reduziert. Diese „neue“ Fugenbreite wird den in den Produktzulassungen geregelten maximal zulässigen Fugenbreiten für Brettsperrholz entsprechen.

Die Abmessungen der Deck- und Querlagen werden in der „ingenieurmäßigen“ statischen Überprüfung des Probekörpers festgelegt.

Nun werden die Prüfkrafteinleitung und die Lagerung des Prüfkörpers näher betrachtet.

Wie in Abb. 2.1 (a) und (b) ersichtlich ist, wird die Prüfkraft über die beiden Seitenhölzer eingeleitet. Da die Wirkungslinien der vertikalen Kräfte F_V einen Abstand zueinander aufweisen, muss aus Gleichgewichtsgründen eine seitliche Abstützung angebracht werden. Der Probekörper würde

ansonsten seitlich kippen. Bildet man nun die Resultierende F_R der Kräfte F_V und F_H , so wird diese resultierende Kraft im Schnittpunkt der Wirkungslinien von F_V und F_H angreifen und entlang ihrer Wirkungslinie durch den Schwerpunkt des Probekörpers zum gegenüberliegenden Lager „wandern“.

Ersetzt man nun in Step 2 und 3 die vertikalen und horizontalen Lager durch ein Lager, welches im rechten Winkel zur Wirkungslinie der resultierenden Kraft angeordnet ist, so kann die resultierende Prüfkraft direkt z. B. über eine Druckkraft eingeleitet werden, siehe Abb. 2.2.

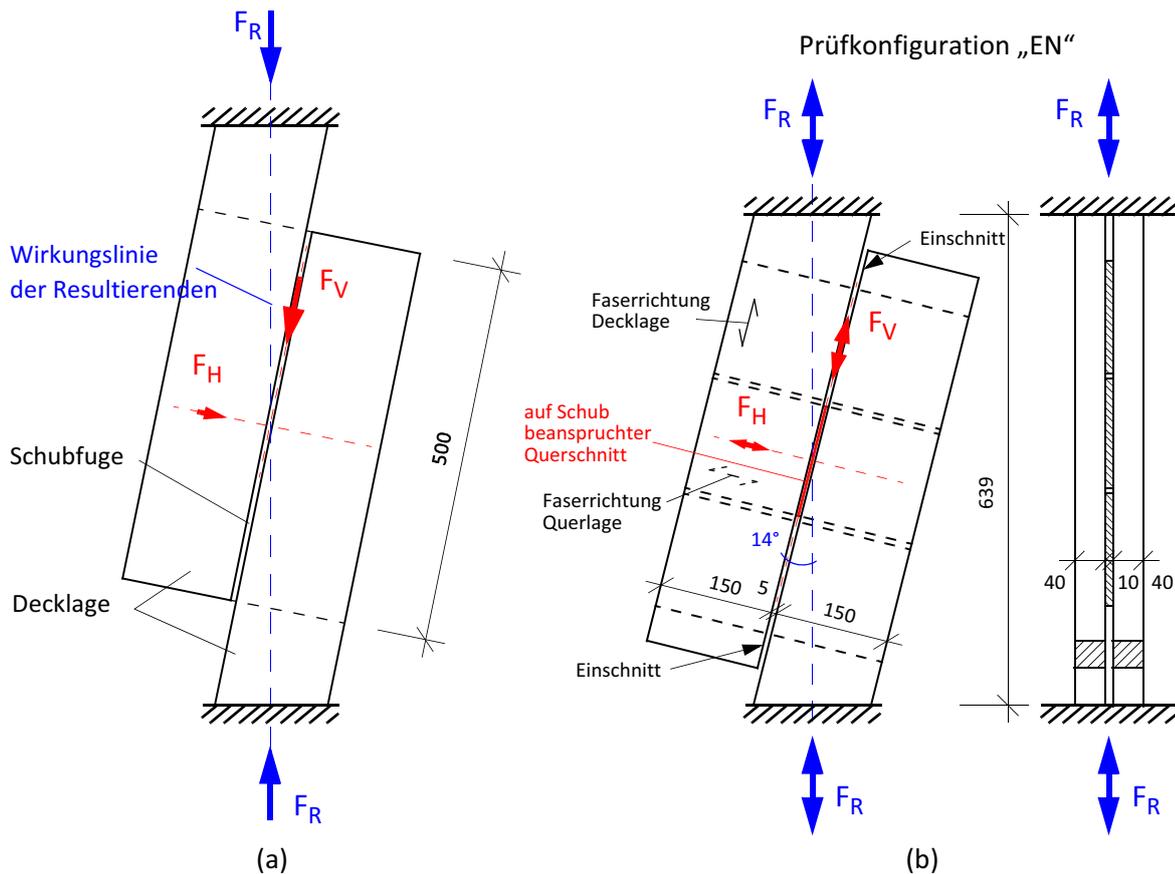


Abb. 2.2: Step 2 – modifizierter (a) und – Step 3 – finalisierte Prüfkongfiguration „EN“ (b)

Diese Art der Lagerung hat mehrere Vor- und einen Nachteil:

Zum Ersten kann der Prüfaufbau bedeutend einfacher gestaltet werden, da keine seitlichen Abstützungen notwendig werden. Der Prüfkörper wird, entsprechend dem Winkel zwischen Wirkungslinie und der Vertikalen, verdreht eingebaut.

Der zweite Vorteil liegt im Kräftefluss des belasteten Prüfkörpers. Da die Prüfkraft entlang ihrer Wirkungslinie durch den Schwerpunkt des Probekörpers „wandert“, entstehen keine planmäßigen Lastexzentrizitäten die unerwünschte Störspannungen erzeugen, welche Auswirkungen auf das Messergebnis haben könnten.

Nachteilig zu sehen ist die planmäßige Spannungsinteraktion in der Schubfuge, bestehend aus Schub- und Druckspannungen in Faserrichtung der Querlage.

Erzeugt wird dies durch den Kraft-Faserwinkel zwischen der resultierenden Prüfkraft F_R und dem Querlagenbrett. Inwieweit diese Interaktion das Messergebnis beeinflusst, ist nicht bekannt.

Natürlich wäre es auch denkbar anstatt einer Druck- eine Zugkraft als Prüfkraft zu verwenden. In diesem Fall würde sich durch den Vorzeichenwechsel (Druck „-“ auf Zug „+“) die oben genannte Spannungsinteraktion aus Schub- und Zugspannungen in Faserrichtung zusammensetzen. Eine Überprüfung der Auswirkungen durch die unterschiedliche Lasteinleitung wird im Kapitel 2.3 – Tastversuche gezeigt.

Als Anhaltspunkt für die Neigung des Prüfkörpers „EN“ wird der Schrägstellungswinkel aus der Prüfkonfiguration „Bestimmung der Scherfestigkeit in Faserrichtung“ aus der EN 408 Abs. 18 übernommen. In dieser Konfiguration wird der Probekörper planmäßig mit einem Winkel von 14° verdreht in das Prüfgerüst eingebaut, siehe Abb. 2.3. Auch dort tritt planmäßig eine Spannungsinteraktion auf, welche sich aber aus Schub- und Querdruckspannungen zusammensetzt.

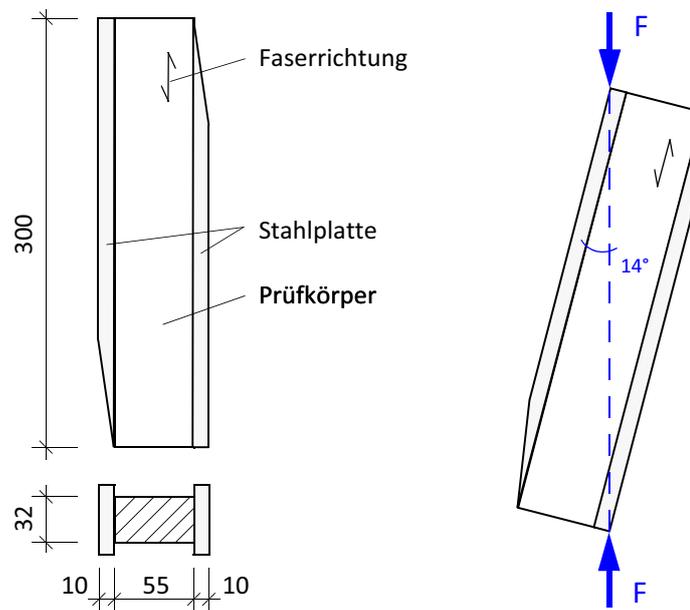


Abb. 2.3: Scherprüfkörper nach EN 408 Abs. 18 [26]

Wie bereits in der Einleitung beschrieben, wird dieser neue Prüfkörper „EN“ nur eine relevante Schubebene in der Querlage besitzen. Diese Schubebene befindet sich im mittleren Querlagenbrett. Die oben und unten angeordneten Bretter der Querlage (Füllhölzer) haben eine lastverteilende Wirkung und werden in der Fuge zwischen den Decklagen durchtrennt, siehe Abb. 2.2 (b). So wird garantiert, dass nur ein Querschnitt auf Schub belastet wird.

Die Geometrie des Versuchskörpers, insbesondere die Prüfkörperlänge, wird durch die Abmessungen der Einzelteile und dem Winkel der Schrägstellung bestimmt. Der Konstruktionsplan ist in Anhang A.2 abgebildet.

2.2 Prüfkongfiguration „CIB“

Die Prüfkongfiguration „CIB“ entspricht der Kongfiguration von Jöbstl (siehe 1.4.6) und ist wie folgt aufgebaut:

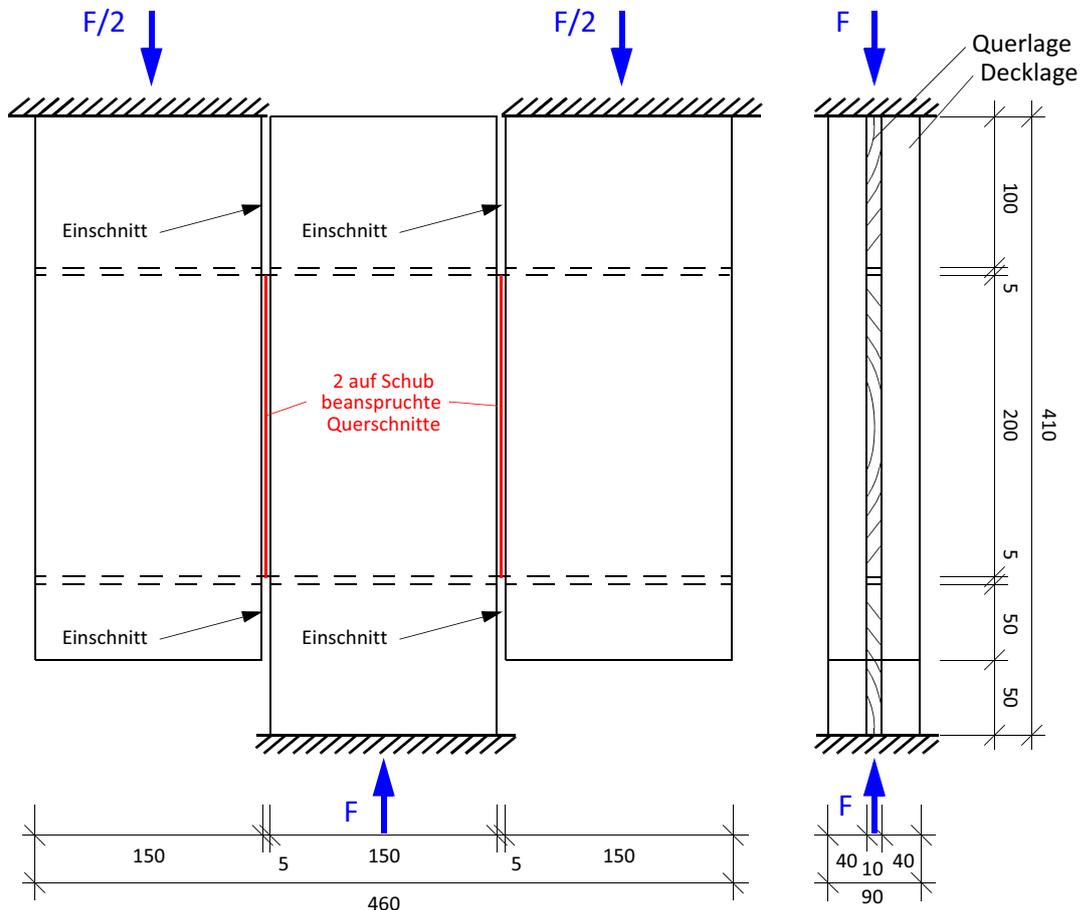


Abb. 2.4: Versuchskongfiguration „CIB“

Mit dieser Prüfkongfiguration werden parallel zur Kongfiguration „EN“ Untersuchungen durchgeführt und die Ergebnisse beider Kongfigurationen miteinander verglichen.

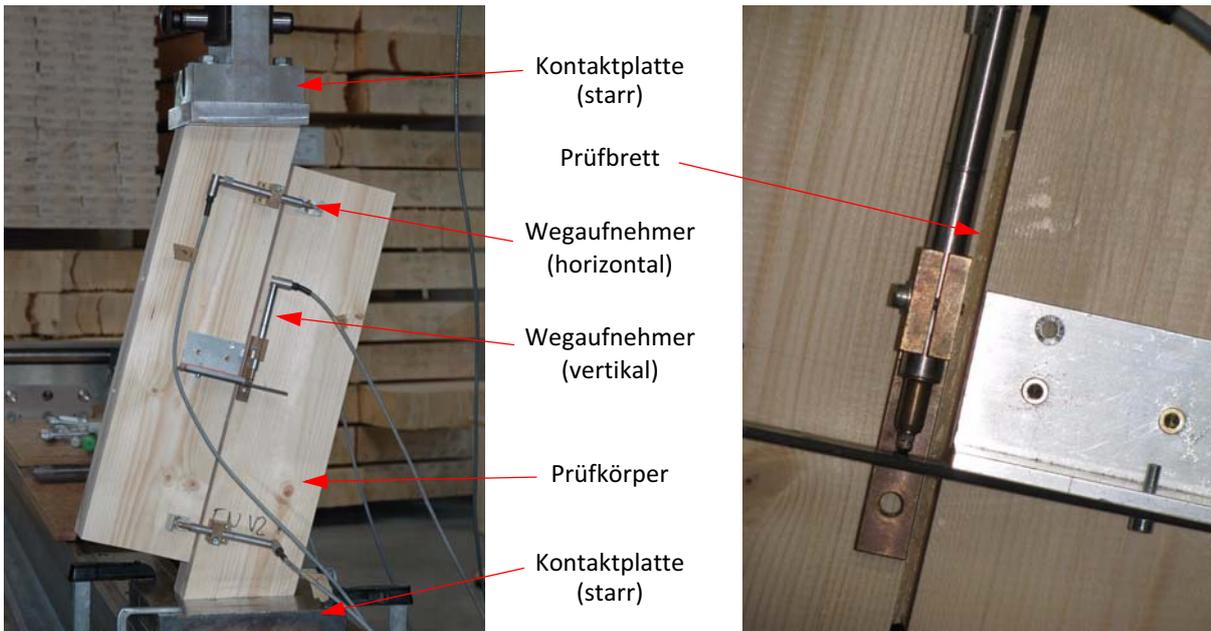


Abb. 2.5: Aufbau der Tastversuche

Auswertung:

Alle Prüfkörper versagten auf Schub, siehe Abb. 2.6. Wie in den Versagensbildern zu erkennen ist, bildeten sich die Bruchzonen nur in einem begrenzten Bereich aus. Außerhalb dieser Zonen blieb das Prüfbrett unbeschädigt. Die unten dargestellten Bruchbilder stellten sich erst deutlich nach Erreichen der Bruchkraft ein, man beachte die großen Verschiebungen Δw .

Somit wurde die Druckprüfkonfiguration als „geeignet“ für die Schubfestigkeitsprüfung von BSP-Scheiben eingestuft.

In Tab. 2.1 und Tab. 2.2 sind die gesammelten Versuchsergebnisse angegeben. Die Bestimmung der Rohdichte und der Schubfestigkeit ist in Kap. 5.1 gezeigt.



Abb. 2.6: Bruchbilder der aufgetrennten Prüfkörper

Tab. 2.1: Gesammelte Versuchsergebnisse der Tastversuche V1-V3

Bezeichnung	b/t [mm]	F _{max} [N]	w _{zugeh} [mm]	K _{ser} [N/mm]	f _v [N/mm ²]	ρ ₁₂ [kg/m ³]
PA10-112-2_EN-150-20-V1	150/20	25016	1,263	41980	8,03	395,9
PA10-112-2_EN-150-20-V2	150/20	28168	1,106	40953	9,24	439,7
PA10-112-2_EN-150-20-V3	150/20	30008	1,112	52467	9,68	435,5
Mittelwert	-	27731	1,160	45134	8,98	432,7

Tab. 2.2: Gesammelte Versuchsergebnisse der Tastversuche V4-V6

Bezeichnung	b/t [mm]	F _{max} [N]	w _{zugeh} [mm]	K _{ser} [N/mm]	f _v [N/mm ²]	ρ ₁₂ [kg/m ³]
PA10-112-2_EN-150-10-V4	150/10	16196	0,948	32552	10,31	427,6
PA10-112-2_EN-150-10-V5	150/10	15680	0,873	31472	10,07	427,6
PA10-112-2_EN-150-10-V6	150/10	14336	0,862	26944	9,18	385,5
Mittelwert	-	15404	0,894	30323	9,85	413,6

b/t	Breite/Dicke des Prüfbrettes
F _{max}	Bruchkraft
w _{zugeh}	Vertikalverformung beim Erreichen der Bruchkraft
K _{ser}	Verschiebemodul
f _v	Schubfestigkeit
ρ ₁₂	Rohdichte bei einer Holzfeuchtigkeit von 12 %

Betrachtet man die oben dargestellten Mittelwerte der Schubfestigkeiten vergleichend, so ist bereits zu erkennen, dass sich die unterschiedliche Prüfbrettdicke auf das Ergebnis auswirkt.

2.3.2 Zugastversuche

Wie bereits im Kapitel 2.1 – Entwicklung der Prüfkonfiguration „EN“ beschrieben wird der mögliche Effekt aus der unterschiedlichen Lasteinleitung durch weitere Tastversuche untersucht.

Vorbereitung:

Um die erforderliche Zugkraft in den Probekörper einleiten zu können, ist eine kraftschlüssige Zugverbindung zur Prüfmaschine notwendig. Die auf Druck beanspruchten Probekörper wurden lediglich über Kontaktpressung belastet.

Als Verbindungsmittel wurden Stabdübel gewählt, die über ein eingeschlitztes Stahlblech die Kraft in das Holz übertragen. Bei der Anordnung der Stabdübel wurde beachtet, dass der Schwerpunkt der Verbindung in der Wirkungslinie der Prüfkraft zu liegen kam. Die Bemessung der Stabdübelverbindung ist in Anhang A.5 zu entnehmen. Für das erforderliche Stahlblech mit dem Kopperteil waren bereits ausreichend dimensionierte Stahlteile, die als Vorlage dienten, vorhanden.

Um die Messergebnisse zwischen den Druck- und Zugversuchen besser vergleichen zu können wurden insgesamt sechs Probekörper hergestellt, welche aus dem gleichen Ausgangsmaterial bestanden. Alle sechs Prüfkörper wurden aus einem Brett geschnitten und es wurde darauf geachtet, merkmalfreies Holz für die Prüfbretter zu verwenden. Die Breite und Dicke der Prüfbretter betragen $b = 150 \text{ mm}$ bzw. $t = 10 \text{ mm}$.

Die Konstruktionszeichnungen für die Zugprobekörper und dem Stahlteil sind im Anhang A.3 und A.4 ersichtlich.

Durchführung:

Die Versuchsdurchführung erfolgte analog den in 2.3.1 gezeigten Versuchen.

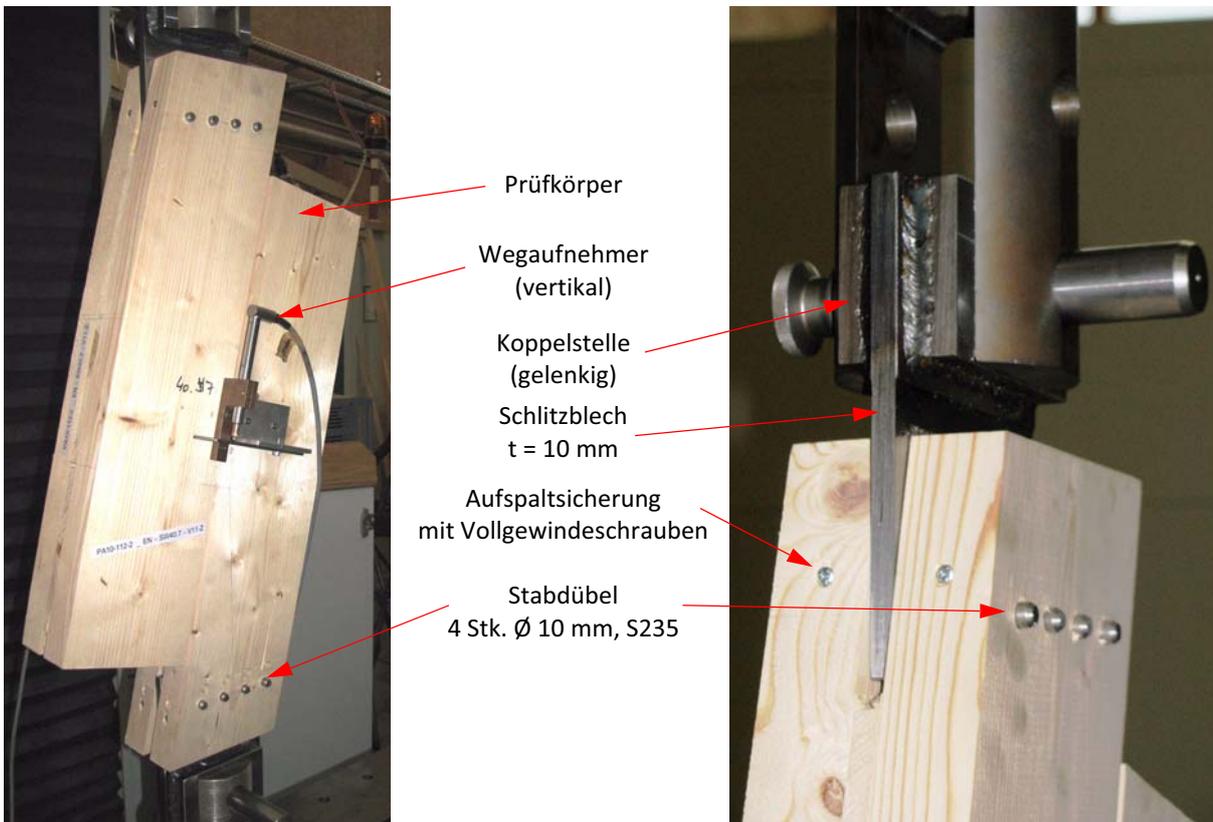


Abb. 2.7: Aufbau Zugtastversuche

Auswertung:

Alle Probekörper versagten wieder auf Schub.

In Tab. 2.3 und Tab. 2.4 sind die gesammelten Ergebnisse angegeben.

Tab. 2.3: Gesammelte Versuchsergebnisse der Druckastversuche V07-V09

Bezeichnung	b/t [mm]	F _{max} [N]	w _{zugeh} [mm]	K _{ser} [N/mm]	f _v [N/mm ²]	ρ ₁₂ [kg/m ³]
PA10-112-2_EN-V-D-07	150/10	14175	0,696	35914	9,01	411,7
PA10-112-2_EN-V-D-08	150/10	15775	1,008	34480	10,10	452,6
PA10-112-2_EN-V-D-09	150/10	14698	0,781	36293	9,57	418,0
Mittelwert	-	14883	0,828	35562	9,56	427,4

Tab. 2.4: Gesammelte Versuchsergebnisse der Zugastversuche V10-V12

Bezeichnung	b/t [mm]	F _{max} [N]	w _{zugeh} [mm]	K _{ser} [N/mm]	f _v [N/mm ²]	ρ ₁₂ [kg/m ³]
PA10-112-2_EN-V-Z-10	150/10	16349	0,825	39708	10,46	416,2
PA10-112-2_EN-V-Z-11	150/10	15381	0,898	35540	9,83	435,6
PA10-112-2_EN-V-Z-12	150/10	14772	0,959	36822	9,14	418,2
Mittelwert	-	15501	0,894	37357	9,81	423,3

Betrachtet man die Ergebnistabellen, so ist ersichtlich, dass die Einzelergebnisse der beiden Konfigurationen auf dem gleichen Niveau liegen. Die Differenz der Mittelwerte Bruchkräfte F_{max} beträgt lediglich 618 N (4 %) und die der Schubfestigkeiten f_v bei 0,25 N/mm² (2,6 %). Da auch die Streuungen im Bereich von ~5 % liegen ist ersichtlich, dass beide Konfigurationen vergleichbare Ergebnisse liefern.

Da die Zugprüfkonfiguration in der Herstellung, vor allem die Stabdübelverbindung, bedeutend aufwendiger war, wird nun die Druckkonfiguration für die nachfolgende Parameterstudie angewendet.

2.4 Prüfplanung

Mit den beiden Versuchskonfigurationen „EN“ und „CIB“ soll nun mittels einer Parameterstudie die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Schubfestigkeit untersucht werden.

Mögliche Parameter für das Prüfbrett sind: Brettbreite, Brettdicke, Jahrringlage, Fugenbreite, Rohdichte, Holzfeuchtigkeit, Holzart und Wachstumsmerkmale wie Astigkeit, Schrägfasrigkeit und Reaktionsholz.

Als Basis zur Festlegung der Parameter Brettbreite, -dicke und Fugenbreite diene eine statische Abschätzung der „ingenieurmäßigen“ Modelle der Prüfkfigurationen „EN“ und „CIB“.

2.4.1 Statische Überprüfung der Prüfkfigurationen

In der folgenden statischen Überprüfung wurden kritische Punkte an den Probekörpern „EN“ und „CIB“ einer Traglastuntersuchung unterzogen. Um die maximal möglichen Abmessungen des Prüfbrettes festlegen zu können wurden die Tragfähigkeiten der Lasteinleitung sowie der Klebeflä-

che bei gegebener Prüfbrettgeometrie untersucht. Die Prüfbrettabmessungen mussten für die Parameterstudie so gewählt werden, dass die Bruchlasten der unten genannten Punkte immer größer als die der Schubfuge sind.

Folgende Punkte wurden nachfolgend überprüft:

- Pressung in der Lasteinleitung
- Torsion in der Klebefläche
- Rollschub in der Klebefläche
- Schub in der Fuge

Anmerkung: In den Klebeflächen der Konfiguration „EN“ bildet sich genau genommen eine Interaktion aus Rollschub- und Torsionsspannungen. Da ein kombinierter Nachweis aufgrund fehlender Nachweisbestimmungen nicht möglich war, wurden beide Nachweise getrennt geführt.

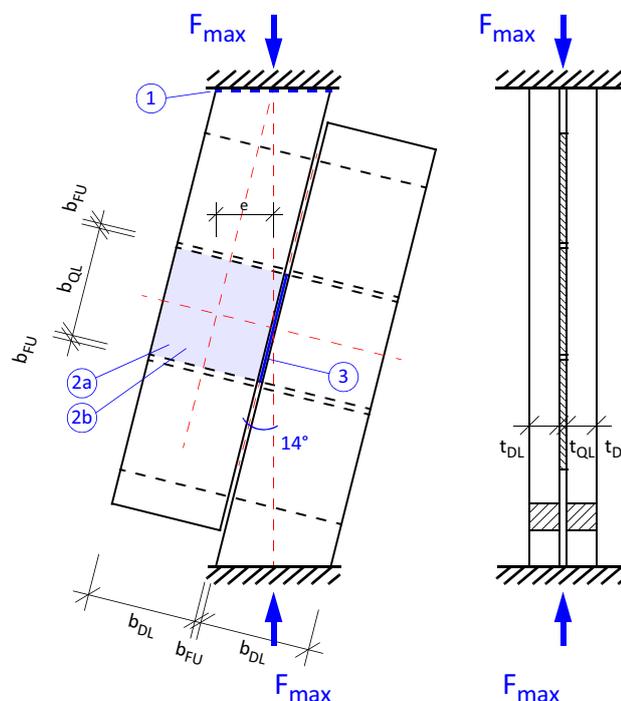
Weiters wurden folgende Annahmen getroffen:

Es wurde Vollholz der Festigkeitsklasse C24 mit den charakteristischen Kenngrößen angesetzt. Für die Festigkeitskenngrößen der Klebefläche und der Schubfuge wurden folgende Werte angesetzt:

- Rollschub: $1,51 \text{ N/mm}^2$ (Mittelwert nach Wallner [19] Diagramm 6.10)
- Torsion: $2,70 \text{ N/mm}^2$ (nach Jeitler [9] Tab. 8-1)
- Schub: $12,80 \text{ N/mm}^2$ (Mittelwert nach Jöbstl [10] Tab. 3)

Die Auswertung der Traglastuntersuchungen für verschiedene Prüfbrettgeometrien und Fugenbreiten wurden mit Hilfe eines Tabellenprogramms durchgeführt und sind in Anhang B ersichtlich.

Probekörper „EN“:



- ① Pressung in der Lasteinleitung
- ②a Torsion in der Klebefläche
- ②b Rollschub in der Klebefläche
- ③ Schub in der Fuge

Abb. 2.8: Skizze mit den nachzuweisenden Punkten

• **Material:**

Vollholz C24

$$f_{c,0,k} = 21,0 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{c,90,k} = 2,50 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{r,clt} = 1,51 \text{ N/mm}^2$$

Mittelwert nach Wallner [19] Diagramm 6.10

$$f_{v,clt} = 12,80 \text{ N/mm}^2$$

Mittelwert nach Jöbstl [10] Tab. 3

$$f_{T,clt,k} = 2,70 \text{ N/mm}^2$$

nach Jeitler [9] Tab. 8-1

• **Pressung in der Lasteinleitung:**

$$f_{c,\alpha,k} = \frac{f_{c,0,k} \cdot f_{c,90,k}}{f_{c,0,k} \cdot \sin(\alpha)^2 + f_{c,90,k} \cdot \cos(\alpha)^2} = \frac{21,0 \cdot 2,5}{21,0 \cdot \sin(14)^2 + 2,5 \cdot \cos(14)^2} = 14,65 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{F_{\max,1}}{A_{DL}} = \frac{2 \cdot \frac{F_{\max,1}}{2} \cdot \frac{b_{DL} \cdot t_{DL}}{\cos(\alpha)}}{f_{c,\alpha,k}} = 1,0$$

$$F_{\max,1} = f_{c,\alpha,k} \cdot 2 \cdot \frac{b_{DL} \cdot t_{DL}}{\cos(\alpha)}$$

• **Torsion in der Klebefläche:**

$$M_T = \frac{F_{\max,2a}}{2} \cdot e \quad \text{mit} \quad e = \frac{b_{DL} + b_{FU}}{2} \cdot \cos(\alpha)$$

$$W_T = \frac{J_P}{\frac{a}{2}} \quad \text{mit} \quad J_P = \frac{b_{DL} \cdot b_{QL}^3 + b_{DL}^3 \cdot b_{QL}}{12} \quad \text{und} \quad a = \max(b_{DL}; b_{QL})$$

$$\frac{M_T}{W_T} = 1,0$$

$$F_{\max,2a} = f_{T,clt,k} \cdot W_T \cdot \frac{2}{e}$$

• **Rollschub in der Klebefläche:**

$$\frac{\frac{F_{\max,2b} \cdot \cos(\alpha)}{A_{KF}}}{f_{r,clt}} = \frac{\frac{F_{\max,2b} \cdot \cos(\alpha)}{2 \cdot (b_{DL} \cdot b_{QL})}}{f_{r,clt}} = 1,0$$

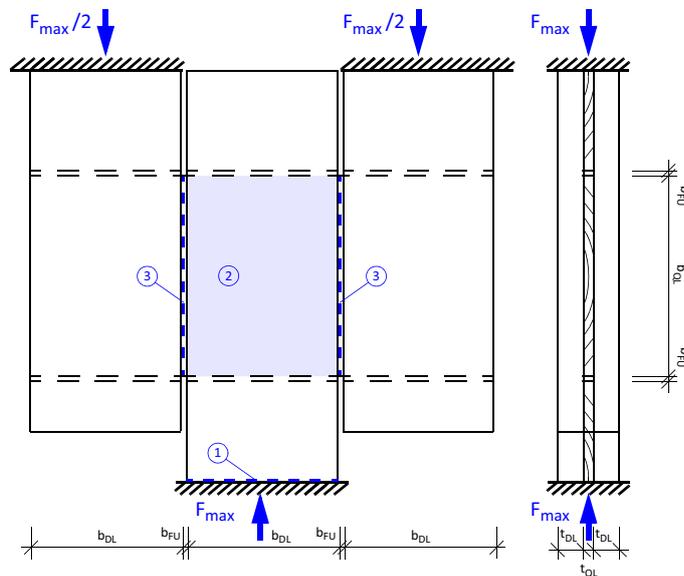
$$F_{\max,2b} = \frac{f_{r,clt} \cdot 2 \cdot (b_{DL} \cdot b_{QL})}{\cos(\alpha)}$$

• **Schub in der Fuge:**

$$\frac{\frac{F_{\max,3} \cdot \cos(\alpha)}{A_{QL}}}{f_{v,clt}} = \frac{\frac{F_{\max,3} \cdot \cos(\alpha)}{b_{QL} \cdot t_{QL}}}{f_{v,clt}} = 1,0$$

$$F_{\max,3} = \frac{f_{v,clt} \cdot (b_{QL} \cdot t_{QL})}{\cos(\alpha)}$$

Probekörper „CIB“:



- ① Pressung in der Lasteinleitung
- ② Rollschub in der Klebefläche
- ③ Schub in der Fuge

Abb. 2.9: Skizze mit den nachzuweisenden Punkten

• Material:

Vollholz C24

- $f_{c,0,k} = 21,0 \text{ N/mm}^2$
- $f_{r,clt} = 1,51 \text{ N/mm}^2$ Mittelwert nach Wallner [19] Diagramm 6.10
- $f_{v,clt} = 12,80 \text{ N/mm}^2$ Mittelwert nach Jöbstl [10] Tab. 3
- $f_{T,clt,k} = 2,70 \text{ N/mm}^2$ nach Jeitler [9] Tab. 8-1

• Pressung in der Lasteinleitung:

$$\frac{F_{max,1}}{A_{DL}} = \frac{F_{max,1}}{2 \cdot b_{DL} \cdot t_{DL}} = 1,0 \quad F_{max,1} = f_{c,\alpha,k} \cdot 2 \cdot b_{DL} \cdot t_{DL}$$

• Rollschub in der Klebefläche:

$$\frac{F_{max,2}}{A_{KF}} = \frac{F_{max,2}}{2 \cdot b_{DL} \cdot b_{QL}} = 1,0 \quad F_{max,2} = f_{r,clt} \cdot 2 \cdot b_{DL} \cdot b_{QL}$$

• Schub in der Fuge:

$$\frac{F_{max,3}}{A_{QL}} = \frac{F_{max,3}}{2 \cdot b_{QL} \cdot t_{QL}} = 1,0 \quad F_{max,3} = f_{v,clt} \cdot 2 \cdot b_{QL} \cdot t_{QL}$$

2.4.2 Untersuchte Parameter

Für die Parameterstudie wurde die Untersuchung folgender Einflussfaktoren festgelegt:

Brettbreite:

Jöbstl [10] baute in seinen Versuchen Prüfbretter mit einer Breite von 200 mm ein. Um an die Versuche von Jöbstl anschließen zu können, wird jeweils eine Serie beider Konfigurationen mit 200 mm Brettbreite durchgeführt um anschließend auf der Referenzbreite von 150 mm zu bleiben.

Brettdicke:

Die Untersuchung der Brettdicke ist von besonderer Bedeutung. Durch den Sperr effekt der kreuzweise verklebten Bretter in den Knotenflächen wird die Ausbildung der Schubgleitung zwischen den einzelnen Holzfasern in Faserrichtung behindert. Das Resultat sind höhere Schubfestigkeiten (siehe 2.3) als beispielsweise beim Vollholz. Betrachtet man den Aufbau des BSP in Dickenrichtung genauer, so kann folgender Zusammenhang angenommen werden:

Je dicker die Einzelschicht der BSP-Scheibe wird, desto geringer wird der Einfluss der Sperrwirkung zur Brettmittelfläche hin werden. Die Behinderung der Schubgleitung wird in der Klebefläche am größten sein und zur Brettmittelfläche abnehmen.

Die Variation der Brettdicke bedeutet auch eine Änderung des beanspruchten Holzvolumens. Aus der Diplomarbeit Lackner [12] geht hervor, dass es eine Abhängigkeit zwischen Schubfestigkeit und Bauteilgröße gibt.

Zusammenfassend kann angenommen werden, dass bei einer Variation der Brettdicke zwei Effekte, Sperr effekt und Größeneinfluss, in Kombination auftreten werden, wobei nicht bekannt ist in welchem Verhältnis beide Effekte zueinander stehen.

Daraus folgend ist ableitbar, dass die Schubfestigkeit vermutlich mit zunehmender Brettdicke sinken wird.

Je nach Hersteller werden BSP-Platten aus Brettern von 19 mm bis 44 mm Dicke aufgebaut.

Für die Parameterstudie wurde festgelegt Dicken von 10, 20, 30 mm einzubauen, entsprechend den Ergebnissen der statischen Überprüfung.

Fugenbreite:

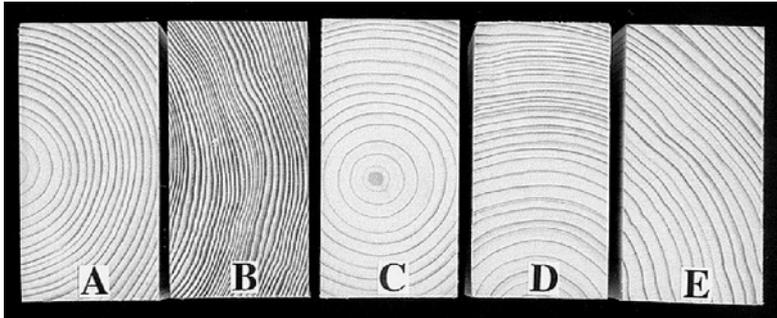
Für die Wahl der Fugenbreite gilt ähnlicher Zusammenhang wie die oben erwähnte Wahl der Brettdicke. Je breiter die Fuge wird, desto stärker wird die Beeinflussung durch die Sperrwirkung abnehmen. Es werden drei Fugenbreiten untersucht: 1,5 mm, 5 und 25 mm.

Die 1,5 mm Fugenbreite repräsentiert eine „schmalseitenverklebte“ BSP-Platte. Die Fuge dient lediglich zur Unterbindung von Reibungseinflüssen zwischen den Decklagen, die durch Verformungen während der Prüfung entstehen. Die 5 mm Fuge orientiert sich nach den in den Zulassungen geregelten maximal zulässigen Fugenbreiten. Die 25 mm Fuge dient zur Verdeutlichung einer möglichen Festigkeitsabnahme.

Stamm- und Jahrringlage:

Schon Wallner [19] stellte in seiner Arbeit fest, dass die Jahrringlage Auswirkungen auf die Versuchsergebnisse hat (siehe Tab. 1.5).

Aus diesem Grund werden für die nachfolgend durchgeführten Versuche folgende Stamm- und Jahrringlagen untersucht: Seiten-, Halbrift-, Riftware und Kernbretter.



- A) Seitenware mit juvenilem Holz
- B) Seitenware ohne juvenilem Holz
- C) Kernbrett
- D) Riftbrett
- E) Halbriftbrett

Abb. 2.10: Jahrringstellung nach Hoffmeyer [7]

2.4.3 Konstante Parameter

Um die Auswirkungen der oben angeführten variierten Parameter untersuchen zu können, muss gewährleistet werden, dass keine weiteren störenden Einflüsse das Ergebnis beeinträchtigen. Deshalb werden die unten angeführten Parameter möglichst konstant gehalten.

Holzart:

Es wird ausschließlich die Holzart Fichte verwendet.

Holzfeuchtigkeit:

Die Holzfeuchtigkeit wirkt sich auf nahezu alle Eigenschaften von Holz aus. Horvath et al. [8] untersuchte den Einfluss der Holzfeuchtigkeit auf die Scherfestigkeit bei Fichten-, Eichen- und Rotbuchenholz und stellte eine deutliche Abhängigkeit fest. Die Ergebnisse von Horvath u. a. [8] sind in Kap. 5.1.4 zu finden.

Deshalb ist es von besonderer Bedeutung die Streuung der Holzfeuchtigkeit so gering wie nur möglich zu halten. Außerdem schreibt die EN 408 [26] in Abs. 8 vor, dass die Prüfkörper vor der Prüfung bei Normklima (20 ± 2 °C und 65 ± 5 % relativer Luftfeuchtigkeit) zu klimatisieren sind. Das entspricht den Referenzbedingungen nach EN 384 [25] Abs. 5.3.3 mit einer Holzgleichsfeuchtigkeit von 12 %.

Rohdichte:

Um die Streuung des Ausgangsmaterials so gering wie nur möglich zu halten, wird mithilfe von Rohdichtemessungen die Brettware sortiert und somit ein möglicher Einfluss auf die Schubfestigkeit weitgehend ausgeschlossen.

Wuchsmerkmale:

Die Festigkeitskenngrößen von Holz werden im Allgemeinen auch von typischen Wuchsmerkmalen wie Astigkeit, Reaktionsholz, Harzgallen, Schrägfasrigkeit oder Risse maßgebend beeinflusst. Um die Messergebnisse besser miteinander vergleichen zu können, wird möglichst merkmalfreies Holz für die Prüfbretter verwendet. Da ein Fichtenbaum auch Äste mit annähernd regelmäßigem Abstand besitzt, ist es nur sehr schwer möglich Prüfbretter mit einer Länge von 31 - 46 cm aus völlig merkmalfreiem Holz zu bekommen. Betrachtet man die Versagensbilder in Abb. 2.6, so ist erkennbar, dass der Schubbruch nur in einem Teilbereich des Prüfbrettes ausgebildet wird. Aus diesem Grund können Zonen im Prüfbrett festgelegt werden, in denen keine Äste sein dürfen (Bruchzone, rot markierter Bereich), siehe Abb. 2.11. Zonen, in denen Äste vorkommen dürfen sind blau markiert. Die Festlegung der astfreien Zonen gilt sinngemäß auch für die Decklagenbretter.

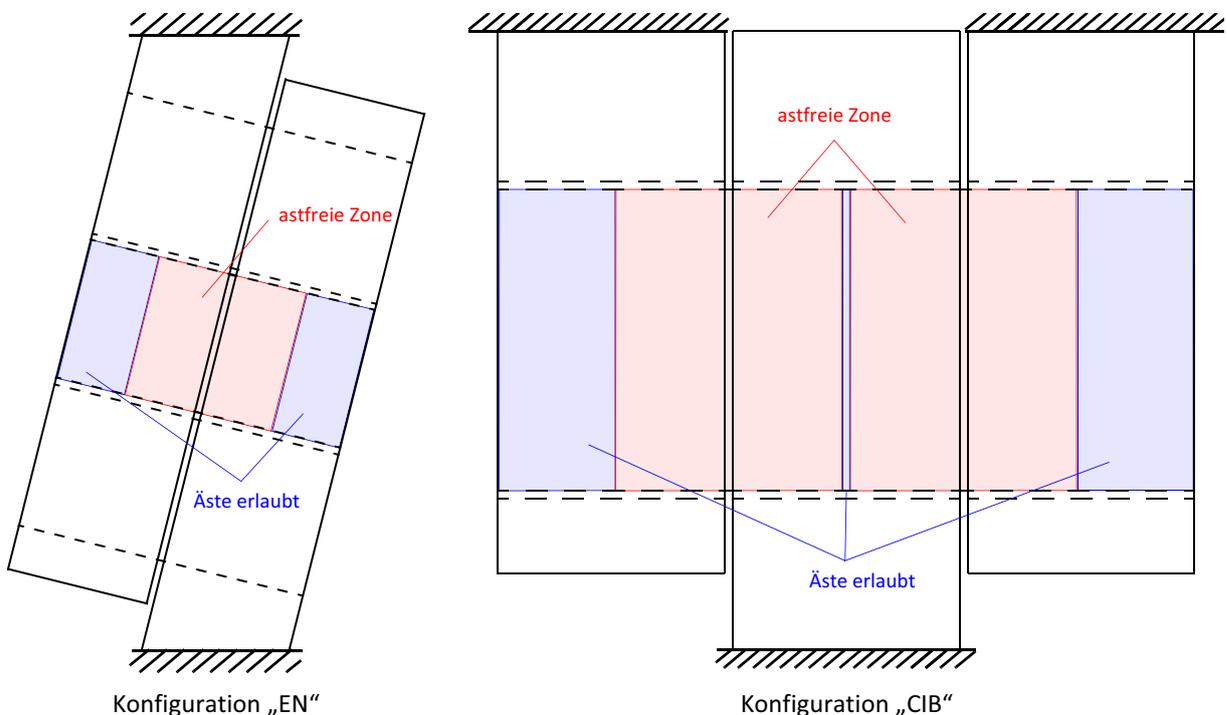


Abb. 2.11: Astzonendefinition

2.4.4 Prüfplan

Aus den oben beschriebenen zu untersuchenden Parametern lässt sich nun ein Prüfplan erstellen, wobei jede Parametervariation eine Prüfserie entspricht. Da die Versuche einer Parameterstudie dienen, wurde für jede Prüfserie eine Probenanzahl von $n = 10$ festgelegt.

Tab. 2.5: Prüfplan für Konfiguration „CIB“

Konfig.	QL-Breite [mm]		QL-Dicke [mm]		Lage im Stamm				Fugenbreite			Stück
	200	150	10	20	SW	HR	R	KB	1,5	5	25	
CIB A	X		X		X					X		10
CIB B		X	X		X					X		10
CIB C		X		X	X					X		10
CIB E		X		X		X				X		10
CIB F		X		X			X			X		10
CIB G		X		X				X		X		10
CIB H		X		X	X				X			10
CIB I		X		X	X						X	10
											Summe	80

Tab. 2.6: Prüfplan für Konfiguration „EN“

Konfig.	QL-Breite [mm]			QL-Dicke [mm]			Lage im Stamm				Fugenbreite			Stück
	200	150		10	20	30	SW	HR	R	KB	1,5	5	25	
EN A	X			X			X					X		10
EN B		X		X			X					X		10
EN C		X			X		X					X		10
EN D		X				X	X					X		10
EN E		X			X			X				X		10
EN F		X			X				X			X		10
EN G		X			X					X		X		10
EN H		X			X		X				X			10
EN I		X			X		X						X	10
											Summe	90		

In Summe wurde festgelegt 170 Prüfkörper für diese Parameterstudie zu fertigen.

3 Prüfkörperherstellung

3.1 Ausgangsmaterial

Als Ausgangsmaterial wurden visuell vorsortierte Brettschichtholzlamellen aus Fichtenholz verwendet, welche auch für die BSP-Produktion Verwendung finden. Die Massenermittlung für die benötigte Rohwarenmenge aller Prüfungen ist in tabellarischer Form in Anhang C.1 und C.2 ersichtlich. Die Lamellen wurden mit den Rohmaßen (Dicke x Breite x Länge) 46 x 170 x 4000 und 46 x 210 x 4000 ungehobelt bestellt und angeliefert.

3.1.1 Vorsortierung

Zu Beginn der Herstellung wurden die Lamellen, welche für die Prüfbrettherstellung dienen, einer Vorsortierung am Stapel unterzogen. Die Bretter für die Rift- und Kernware wurden mit einem rotem Punkt markiert, siehe Abb. 3.1, und die Bretter für die Seitenware mit einem schwarzen Punkt. Bei der Markierung der Bretter wurde auf folgende Merkmale geachtet: Alle Bretter wurden augenscheinlich nach der Jahrringbreite und nach der Lage im Stamm beurteilt. Es wurden Seitenwarebretter mit möglichst gleichmäßiger Jahrringbreite ohne Markanschnitt nach Abb. 2.10 B und Kernbretter nach Abb. 2.10 C ausgesucht. Jene Lamellen, welche für die Produktion der Decklagen und Füllhölzer benötigt wurden, stammten aus nicht vorsortierter Ware.



Abb. 3.1: Schritt 1: Vorsortierung der BSH-Lamellen in Seitenware und Kernware

Im Prüfplan (siehe Tab. 2.5 und Tab. 2.6) wurde festgelegt zwei Serien mit Prüfbrettern aus Halb-riftware zu untersuchen. Da in der Ausgangsware keine Halb-riftbretter vorhanden waren, mussten die Serien CIB_E und EN_E gestrichen werden. Die Anzahl der Versuche reduzierte sich dadurch auf 150 Stück.

Üblicherweise werden keine Rift- und Halb-riftwaren gezielt für die Produktion von BSH-Lamellen eingeschnitten, es sei denn es wird Tischlerware erzeugt. Für die Parameterstudie sollten aber alle verwendeten Bretter aus der gleichen Grundgesamtheit entsprechen. Deswegen wurde auf BSH-Lamellen zurückgegriffen. Die in der Ausgangsware vorhandenen Kernbretter entstanden beim Einschnitt mehr oder weniger zufällig. Da im Versuchsplan auch die Untersuchung von Riftware vorgesehen war (Serien CIB_F und EN_F), aber nur Kernbretter vorhanden waren, wurden die Riftbretter aus Kernbrettern hergestellt, siehe Abb. 3.4.

3.2 Zuschnitt

Mit dem Zuschnitt der Einzelteile (Prüfbretter, Füll- und Decklagenhölzer) begann der eigentliche Produktionsprozess. Bereits beim Kappen der vorsortierten Brettlamellen wurde darauf geachtet möglichst merkmalfreie Einzelteile zu erhalten, die nach dem Kappen nummeriert und gestapelt wurden.

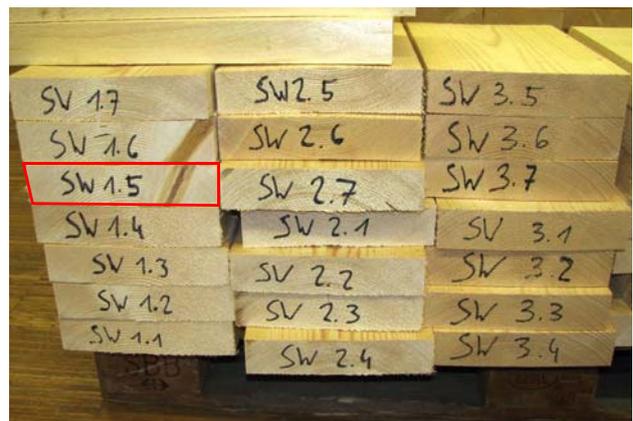


Abb. 3.2: Schritt 2: Zuschnitt, Nummerierung

Der Nummerierung lag folgendes System zu Grunde:

Bezeichnungsbeispiel: SW 1.5

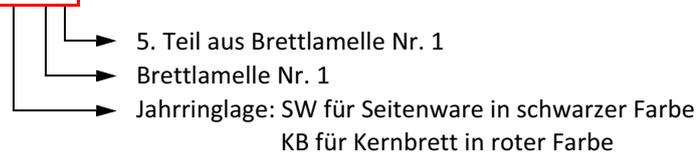
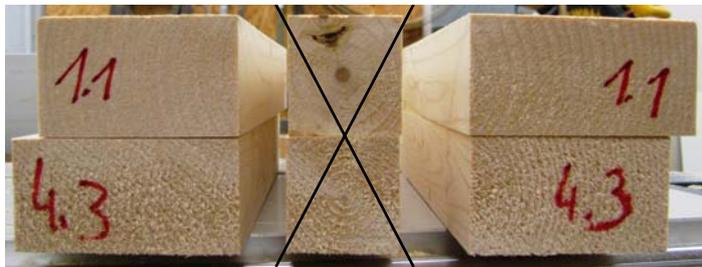


Abb. 3.3: Nummerierungssystem für die Prüfbretter

Durch die Nummerierung konnte zu jedem späteren Zeitpunkt nachvollzogen werden welcher Probekörper aus welchem Prüfbrett besteht mit allen zugehörigen Daten wie: Länge, Breite, Dicke, Gewicht, Holzfeuchtigkeit, Lage im Stamm (siehe Abb. 3.5), etc.

Wie oben angesprochen wurden die Riftbretter aus Kernbrettern folgendermaßen hergestellt: Zuerst wurden aus den gekappten Rohlingen der Kern entfernt und dadurch auch ein möglichst großer Teil des juvenilen Holzes. Nach der Kernentfernung wurden die Innenkantenflächen mit 1-K PUR-Klebstoff bestrichen und entsprechend der Nummerierung aufeinandergelegt. Der Pressvorgang bildete den Abschluss der Riftbrettherstellung.



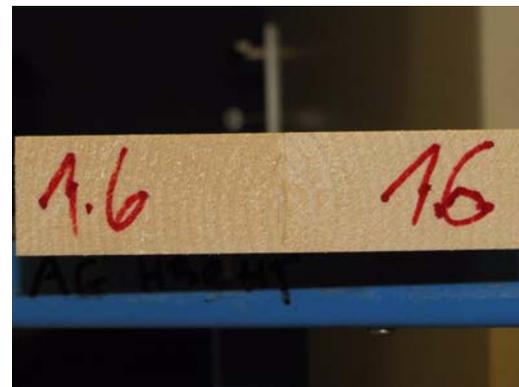
Kern entfernen



Kleben



Pressen



fertiges Riftbrett R 1.6

Abb. 3.4: Schritt 3: Herstellung der Riftbretter

Aus den restlichen nicht vorsortierten Brettlamellen wurden alle weiteren benötigten Einzelteile für die Decklagen und Füllhölzer geschnitten. Diese Teile wurden nicht nummeriert. Insgesamt wurden 1158 Einzelteile (inkl. Reserve) für die Herstellung der Probekörper vorbereitet.

3.2.1 Feuchtigkeitskontrolle

Für den weiteren Fortschritt der Probekörperherstellung war es wesentlich die Holzfeuchtigkeit der BSH-Lamellen zum Zeitpunkt der Anlieferung zu kennen. Zu diesem Zweck wurde beim Zuschnitt der Prüfbretter von jeder Brettlamelle eine Darrprobe entnommen. Mithilfe der Darrmethode nach ON EN 13183 [29] wurde dann die Holzfeuchtigkeit bestimmt. Die tabellarische Auswertung der Eingangskontrolle ist in Anhang C.3 ersichtlich.

Die Auswertung der Darrproben ergab eine sehr große Streuung der Holzfeuchtigkeit. Sie schwankte zwischen 10,0 % und 15,4 %. Der Mittelwert lag bei 13,1 %, wie in 2.4.3 angeführt liegt aber die Referenzfeuchte bei 12 %. Durch eine nachfolgende Nachtrocknung des Holzes (siehe 3.3) wurde versucht, die Streuung zu reduzieren und den Mittelwert an die Referenzfeuchtigkeit anzupassen.

3.2.2 Sortierung nach der Rohdichte

Bevor die Prüfbretter zu den einzelnen Serien zugeteilt werden konnten (siehe Abb. 3.5), wurde ein weiterer Sortierungsprozess als Zwischenschritt eingeführt. Die Prüfbretter wurden nach dem Zuschnitt und der Nummerierung vorgehobelt, um im Anschluss die Rohdichtebestimmung durchführen zu können. Für die Berechnung der Rohdichte wurde nur das Durchschnittsvolumen und das Gewicht der einzelnen Prüfbretter bestimmt (siehe Abb. 3.5). Obwohl die Prüfbretter noch weiter bearbeitet werden mussten (Trocknen, Endhobelung), konnte zu diesem Zeitpunkt bereits ein Überblick über die Rohdichteverteilung der Prüfbretter gewonnen werden. Mithilfe der errechneten Rohdichte der vorgehobelten Prüfbretter konnte die Zusammenstellung jeder Serie so gestaltet werden, dass sich innerhalb einer jeden Serie Prüfbretter mit ähnlicher Rohdichte befanden. Durch die Vorsortierung der BSH-Lamellen am Stapel und den im Zuschnitt angelegten Reserven war es möglich die Streuung der Rohdichte, der bereits vorbereiteten Prüfbretter, stark zu reduzieren. Die Zuteilung der Prüfbretter zu den Serien konnte dadurch in sehr engen Rohdichtegrenzen erfolgen (siehe Abb. 3.5 unten).

Anmerkung: Die in Abb. 3.5 bestimmte Rohdichte diente nur zu Sortierungszwecken und ist nicht für die Auswertung der Versuchsergebnisse geeignet.

Durchschnittsabmessungen für CIB				Durchschnittsabmessungen für EN			
Bez.	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Bez.	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]
SW 1-3	490	204,50	35,75	SW 1-5	326	204,70	35,88
SW 3-2	491	204,90	35,85	SW 3-5	327	204,58	35,97
SW 5-1	490	204,55	36,04	SW 5-6	327	204,60	36,12
Mittelwert	490	204,65	35,88	Mittelwert	327	204,63	35,99
Volumen [mm³]	3600440			Volumen [mm³]	2405741		

Bez.	Konfig.	Masse [g]	Rohdichte [kg/m³]	Mittelwert [kg/m³]	HF [%]	Rohdichte korrigiert	Zuordnung zu Prüfkörper	Anmerkungen
SW 1-1	CIB	1448,44	402,3	401,7	11,0	404,4		ausgeschieden, Ast in Fuge
SW 1-2	CIB	1459,54	405,4		11,0	407,5	A 1	
SW 1-3	CIB	1438,09	399,4		11,0	401,5	A 2	
SW 1-4	CIB	1450,06	402,7		11,0	404,8		ausgeschieden, Ast in Fuge
SW 1-5	EN	954,75	396,9		11,0	398,9	A 1	
SW 1-6	EN	996,64	414,3		11,0	416,4	A 2	zusätzlich, aber gr- Äste am Rand
SW 1-7	EN	939,96	390,7		11,0	392,7	A 3	
SW 2-1	CIB	1855,39	515,3	505,3	14,0	510,2		Risse
SW 2-2	CIB	1846,93	513,0		14,0	507,9		Risse
SW 2-3	CIB	1828,24	507,8		14,0	502,7		Risse
SW 2-4	CIB	1801,98	500,5		14,0	495,5		Risse
SW 2-5	EN	1196,95	497,5		14,0	492,6		Risse
SW 2-6	EN	1209,98	503,0		14,0	497,9		Risse
SW 2-7	EN	1203,43	500,2		14,0	495,2		
SW 3-1	CIB	1409,48	391,5	397,7	12,0	391,5	A 3	
SW 3-2	CIB	1425,79	396,0		12,0	396,0	A 4	
SW 3-3	CIB	1453,77	403,8		12,0	403,8	A 5	
SW 3-4	CIB	1472,86	409,1		12,0	409,1	A 6	
SW 3-5	EN	919,20	382,1		12,0	382,1	A 4	
SW 3-6	EN	948,48	394,3		12,0	394,3	A 5	
SW 3-7	EN	979,91	407,3		12,0	407,3		
SW 4								ausgeschieden
SW 5-1	CIB	1512,84	420,2	399,5	12,0	420,2		
SW 5-2	EN	988,20	410,8		12,0	410,8		
SW 5-3	EN	941,75	391,5		12,0	391,5		ausgeschieden, Ast in Fuge
SW 5-4	EN	935,58	388,9		12,0	388,9		ausgeschieden, Ast in Fuge
SW 5-5	EN	943,18	392,1		12,0	392,1	A 6	
SW 5-6	EN	953,57	396,4		12,0	396,4	A 7	
SW 5-7	EN	954,20	396,6		12,0	396,7	A 8	

Rohdichtegrenzen	MIN	MAX	
Basis	390	410	kg/m³
zusätzlich	380	389,9	kg/m³

Abb. 3.5: Schritt 4: Tabelle zur Prüfbrettsortierung und der Zuordnung der Prüfkörper

Abb. 3.5 zeigt beispielsweise die Vorgehensweise der Rohdichtesortierung zur Einteilung der Prüfserien:

- 1) Nummerierung
- 2) Zuteilung zur Prüfkfiguration entsprechend der Prüfbrettlänge
- 3) Bestimmung der Rohdichte aus Masse und Durchschnittsvolumen
- 4) Rohdichtekorrektur nach der Holzfeuchte entsprechend der Eingangskontrolle
- 5) Zusammenstellung der Serien von z. B. EN A1- EN A10
- 6) Anmerkungen zum Ausscheiden des Brettes aus der Parameterstudie

3.3 Holztrocknung

Durch die große Streuung der Holzfeuchtigkeit beim Wareneingang wurde eine Nachtrocknung aller Einzelteile notwendig. Nach dem Zuschnitt wurde das vorbereitete Holz gestapelt um den Trocknungsprozess zu beschleunigen. (Siehe Abb. 3.6) Durch das Stapeln kann die erhitzte Luft besser in die Zwischenräume eindringen und die frei werdende Feuchtigkeit abtransportieren. Zur Überwachung des Trocknungsprozesses wurden insgesamt zwölf Bretter ausgewählt, um durch Kontrollwiegungen den Trocknungsfortschritt zu beobachten. Da der Masseverlust der Bretter während der Holztrocknung dem Feuchtigkeitsverlust entspricht, konnte durch eine elektrische Feuchtigkeitsmessung zu Beginn der Trocknung und durch Kontrollwiegungen während dessen Trocknung sehr einfach der Trocknungsfortschritt beobachtet werden. Aus den ermittelten Daten konnte der Trocknungsprozess in einem Diagramm dargestellt werden (Diagr. 3.1).



Stapeln



Transport in die Klimakammer

Abb. 3.6: Schritt 5: Trocknungsprozess Step 1



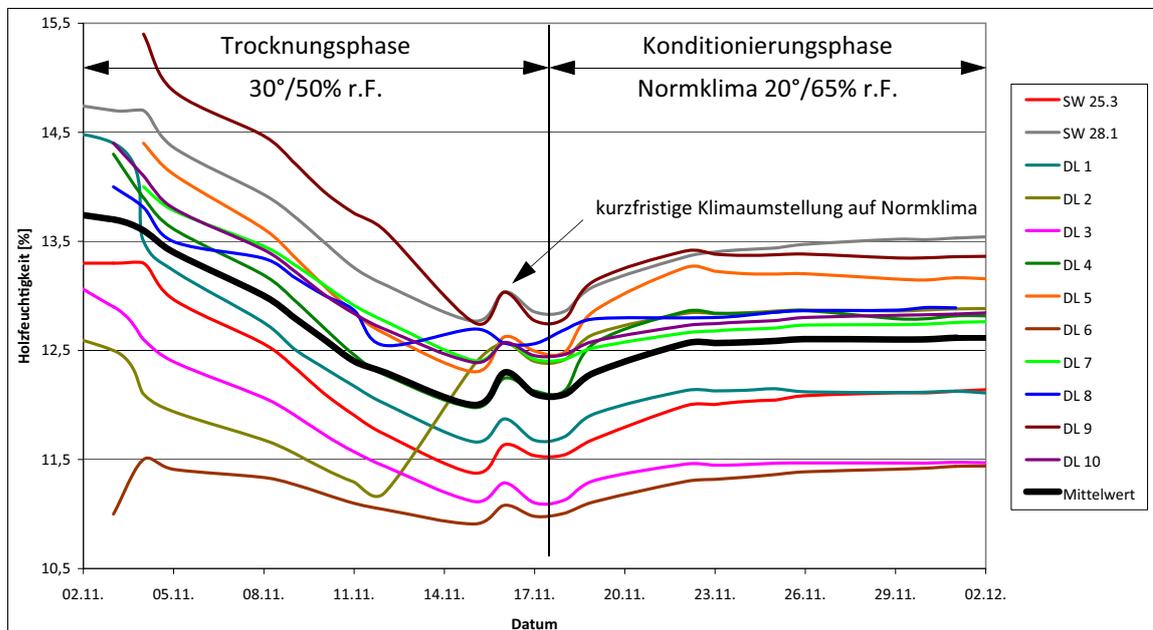
Stapelübersicht



Kontrollwiegung und Aufzeichnung

Abb. 3.7: Schritt 5: Trocknungsprozess Step 2

Die Holz Trocknung wurde in der Klimakammer des Instituts für Materialprüfung und Baustofftechnologie durchgeführt. In dieser Kammer war es möglich ein Klima mit einer Temperatur von 30 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % zu erzeugen. Dadurch konnte in sehr kurzer Zeit das Holz auf eine mittlere Holzfeuchtigkeit von ca. 12 % getrocknet werden, siehe Diagr. 3.1. Eine kurzfristige Klimaumstellung auf Normklima (20 °C und 65 % rel. Luftfeuchtigkeit) in der Trockenkammer zeigte, dass durch den Feuchtigkeitsanstieg des Holzes bei Normklima, der Trocknungsprozess als abgeschlossen betrachtet werden konnte. Im Anschluss wurde das Holz in die Klimakammer des Instituts überstellt und im Normklima bis zur Weiterverarbeitung konditioniert.



Diagr. 3.1: Holzfeuchteänderung während der Trocknung

3.4 Klebprozess

Der Klebprozess setzt sich im Wesentlichen aus diese Arbeitsschritten zusammen: Endhobelung, Rohdichtebestimmung, Kleben und Zusammensetzen der Teile zum Probekörper und dem Pressvorgang. Da die Kapazität der Presse ausschließlich eine bestimmte Anzahl an Probekörpern zuließ, konnten nur zehn Probekörper in einem Produktionszyklus hergestellt werden. Dieser Zyklus bestand aus den Tätigkeiten Hobeln, Rohdichtebestimmung, Kleben und Pressen. Abschließend wurden die Probekörper formatiert, beschriftet und bis zur Versuchsdurchführung in der Klimakammer gelagert.

3.4.1 Hobeln

Durch die Endhobelung wurden die Endabmessungen der Einzelteile bestimmt. Sie musste unmittelbar vor dem Verkleben erfolgen, da eine längere Lagerung der Teile nach dem Hobeln zu Verformungen, aufgrund von Feuchteänderungen führen würde.

Am Beginn des Hobelprozesses wurden eine Fläche und eine Kante der Teile abgerichtet und durch dieses Abrichten werden die Oberflächen von Längs- und Querkrümmungen („Schüsselung“) befreit. Mit dem abschließenden Dickenhobeln wird die erforderliche Breite und Dicke der Einzelteile erreicht.



Abrichten



Dickenhobeln

Abb. 3.8: Schritt 6: Endhobelung

3.4.2 Rohdichtebestimmung

Für die Bestimmung der Rohdichte wurden die Maße (in Millimeter) und die Masse (in Gramm) der Prüfbretter bestimmt. Die Genauigkeitsanforderungen an das Gerät (Schiebelehre und Waage) und die Messdurchführung entsprachen den Vorgaben der ON ISO 3131 [28]. Weiters wurden etwaige Äste in den Prüfbrettern im Aufzeichnungsprotokoll vermerkt. Die Auswertung der Rohdichte erfolgte in der Einzelauswertung in Kapitel 5.1.3.

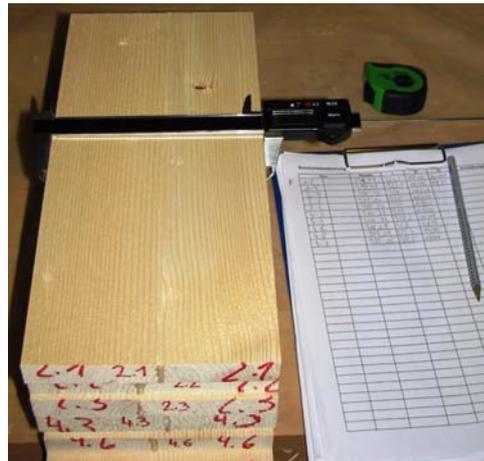


Abb. 3.9: Schritt 7: Bestimmung der Abmessungen mittels Schiebelehre

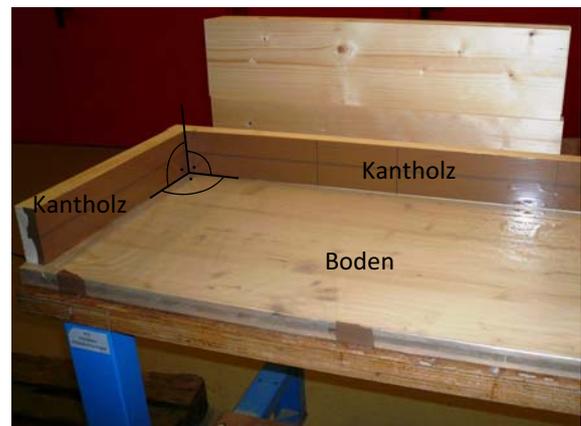
3.4.3 Klebevorgang

Beim Klebevorgang wurden die vorbereiteten Einzelteile zu den Probekörpern zusammengesetzt. Als Klebstoff wurde ein 1-K Polyurethanklebstoff der Firma Jowat eingesetzt. Die technischen Daten und die Verarbeitungshinweise sind in den Produktdatenblättern im Anhang C.4 angegeben. Entsprechend der Zulassungsnummer Z-9.1-636 ist dieser Klebstoff für die Herstellung verlebter tragender Holzbauteile zugelassen. Der Klebstoff wurde mit Hilfe einer Beileimungsmaschine mit einer Auftragsmenge von 200 g/m^2 auf die Decklagenhölzer aufgebracht.

Um die Einzelteile rationell und mit entsprechender Genauigkeit zusammenbauen zu können, wurden eine Leimschablone und Abstandhalter als Legehilfe angefertigt. Die Leimschablone bestand aus einem Boden und zwei auf dem Boden aufgeschraubten Kantenhölzern. Alle Bauteile stehen im rechten Winkel zueinander. Mit Hilfe der Abstandhalter konnte der gewünschte Fugenabstand garantiert werden. Um beim Manipulieren der lose zusammengesetzten Teile ungewollte Verschiebungen zu verhindern, wurde der Probekörper abschließend mit Klammern im Bereich der Füllhölzer fixiert.



Leimauftragsmaschine



Leimschablone

Abb. 3.10: Schritt 8: Zusammenbau der Probekörper Step 1



probeweise Zusammensetzung 1



probeweise Zusammensetzung 2



fixieren der Querlage



fixieren der Decklage

Abb. 3.11: Schritt 8: Zusammenbau der Probekörper Step 2

3.4.4 Pressen

Der Pressvorgang bildete den Abschluss eines Produktionszykluses. Die zuvor in der Leimschablone zusammengesetzten Probekörper wurden in der Furnierpresse positioniert und anschließend dem Pressdruck ausgesetzt. Der Pressdruck und die Presszeit wurden entsprechend den Vorgaben des Klebstoffherstellers gewählt. Mit einem Pressdruck von $0,6 \text{ N/mm}^2$ und nach einer Presszeit von drei Stunden wurde der Produktionszyklus abgeschlossen.



Positionierung in der Presse



Probekörper nach dem Pressen

Abb. 3.12: Schritt 9: Pressvorgang

3.5 Formatieren/Finish

Die Formatierung und die Beschriftung bildeten den Abschluss der Prüfkörperherstellung. Beim Probekörper „EN“ wurden durch den „verdrehen“ Einbau in das Prüfgerüst Winkelschnitte notwendig um die erforderlichen Kontaktflächen zu erzeugen. Vorab mussten die Seitenkanten durch Parallelschnitte kalibriert werden, welche anschließend als Anschlag für den Winkelschnitt dienten. Durch Kontrollmessungen wurde die Genauigkeit der Prüfkörpergeometrie überprüft. Abschließend wurden noch die Ausklinkung und die Durchtrennung der Füllhölzer ausgeführt. Die oben angegebenen Arbeitsschritte gelten natürlich sinngemäß für beide Prüfkonfigurationen.

Durch die abschließende Beschriftung der Probekörper wurde die notwendige nachvollziehbare Dokumentation sämtlicher Versuchsdaten möglich.

Der Probekörperbeschriftung lag folgendes System zu Grunde:

Beschriftungsbeispiel: **PA10-112-2_EN_H2_SW13-2**

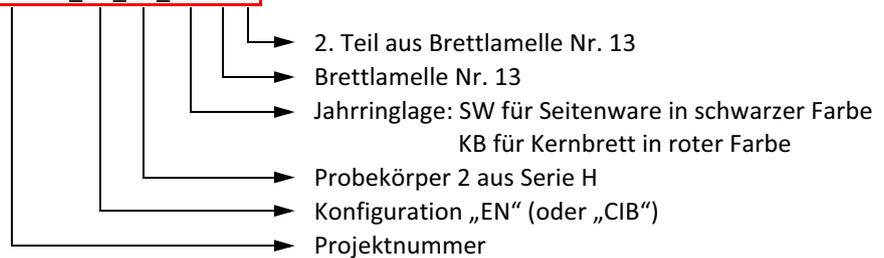


Abb. 3.13: Nummerierungssystem der Probekörper



Parallelschneiden am Bsp. Serie EN I



Winkelschneiden am Bsp. Serie EN I



Kontrolle am Bsp. Serie EN I



Ausklinken am Bsp. Serie EN I



Durchtrennen der Füllhölzer am Bsp. Serie CIB I



Beschriften am Bsp. Serie EN H

Abb. 3.14: Schritt 10: Formatieren

4 Prüfdurchführung

Die Prüfdurchführung bildete den Abschluss der praktischen Arbeiten für die Parameterstudie. In diesem Kapitel werden die für die Durchführung der Versuche notwendigen Arbeitsschritte und die dazu benötigten Geräte erläutert.

4.1 Prüfaufbau

Wie im Kapitel 2 beschrieben, wurden die Probekörper einer Druckprüfung – in Anlehnung an die EN 408 [26] – unterzogen.

Die Prüfungen wurden auf einer Universalprüfmaschine durchgeführt, die Zug- und Druckbelastungen in einem Bereich von 0 bis ± 275 kN auf den Probekörper aufbringen kann. Die auf dem Probekörper aufgebrachte Prüfkraft wurde mittels einer Kraftmessdose erfasst und die Verformungsmessung erfolgte mit induktiven Wegaufnehmern.

Die Messeinrichtungen entsprachen der Genauigkeitsklasse 0,5 nach DIN ISO 7500-1 (2004), und somit den Anforderungen zur Prüfdurchführung nach EN 408.



Universalprüfmaschine



Wegaufnehmer

Abb. 4.1: Prüfgeräte

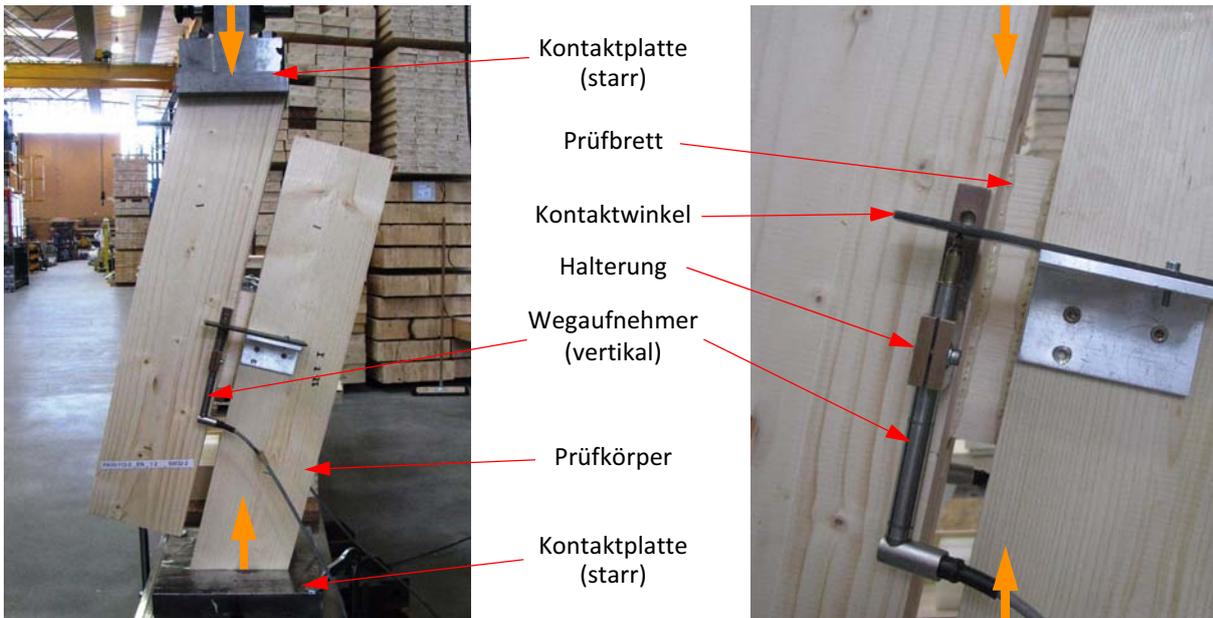
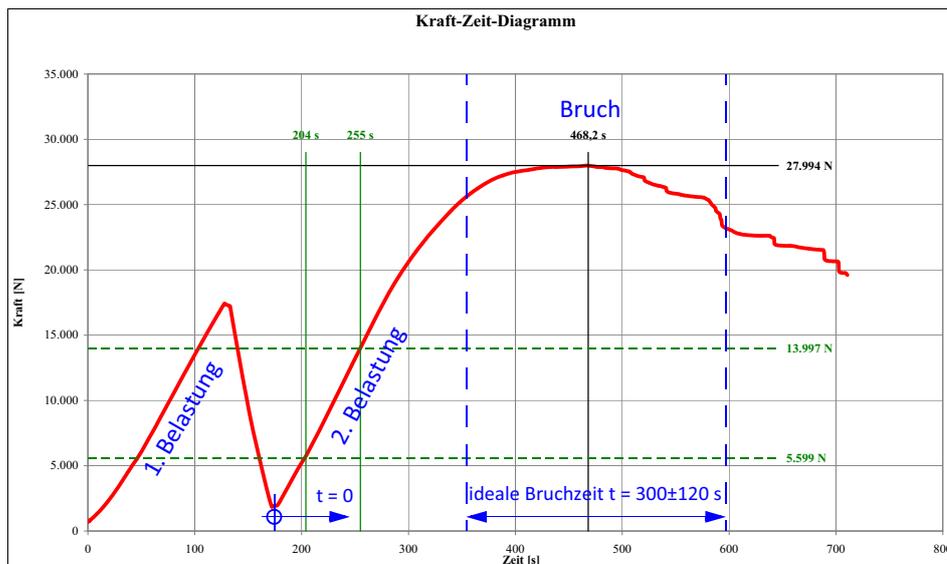


Abb. 4.3: Prüfaufbau „EN“

4.2 Prüfungsparameter

Die Steuerung der Universalprüfmaschine erfolgte in Anlehnung an die EN 408. Um eine Beeinflussung des Messergebnisses durch lokale Störstellen zu vermeiden, wurde eine Hystereseschleife entsprechend Diagr. 4.1 gefahren. Der erste Belastungsast wurde bis zu einem Lastniveau von ca. 50 % der geschätzten Bruchlast geführt. Die Prüfgeschwindigkeit wurde so eingestellt, dass der Bruch nach einer Prüfzeit von 300 ± 120 s im zweiten Belastungsast eintrat. Als Abbruchkriterium wurde ein 30 % iger Kraftabfall, bezogen auf die Bruchlast definiert.



Diagr. 4.1: Beispiel einer typischen Hystereseschleife

4.3 Genereller Ablauf eines Prüfvorganges

Die zeitliche Abfolge eines Prüfvorganges kann wie folgt beschrieben werden:

- Entnahme des Probekörpers aus der Klimakammer
- Montage der Halterungen für die Wegaufnehmer
- Zentrale Positionierung des Probekörpers in der Prüfmaschine
- Montage und Funktionskontrolle der Wegaufnehmer
- Datenaufzeichnung auf Null setzen
- Start der Prüfung
- Überwachung der Datenaufzeichnung im Bezug auf Unregelmäßigkeiten
- Abbruch der Prüfung nach Erreichen des Bruchzustandes
- handschriftliche Aufzeichnung der Bruchkraft
- speichern der Rohdaten zur späteren Auswertung
- Demontage der Wegaufnehmer
- Darrprobenentnahme zur Holzfeuchtebestimmung
- Einzelauswertung der Rohdaten (siehe Kap. 5.1)

4.4 Bestimmung der Holzfeuchtigkeit

Um zum Zeitpunkt der Prüfung die Holzfeuchtigkeit bestimmen zu können, wurde nach dem Prüfvorgang eine Darrprobe aus dem absolut astfreien Prüfbrettbereich (siehe Abb. 2.11 und Abb. 4.4) des Probekörpers entnommen. Mit Hilfe der Darrmethode nach EN 13183 [29] wurde die Feuchtigkeit bestimmt und in der Einzelauswertung in Kapitel 5.1.2 angegeben.



Abb. 4.4: Darrprobenentnahme am Bsp. EN_H6

5 Auswertung der Prüfergebnisse

Am Beginn des Auswerteprozesses steht die Einzelauswertung eines jeden Probekörpers. Die in der Prüfung erfassten Daten wie Bruchkraft, Verformungen, Rohdichte, Holzfeuchtigkeit usw. repräsentieren den zugehörigen geprüften Probekörper und bilden die Grundlage für statistische Untersuchungen der Prüfserien.

In der anschließenden explorativen Datenanalyse werden die Messwerte und daraus abgeleiteten Größen verdichtet und dargestellt. Die confirmatorische Datenanalyse dient der mathematisch begründeten Unterscheidung in signifikante und nicht signifikante Einflüsse auf die Schubfestigkeit und der Formulierung eines Berechnungsmodells, für den Mittelwert der Schubfestigkeit in Abhängigkeit der signifikanten Einflüsse.

5.1 Einzelauswertung

5.1.1 Einleitung

Im Folgenden wird die Einzelauswertung der Probekörper erläutert und die dazu notwendigen Berechnungen und deren Annahmen angeführt.

Diese Auswertung wurde mit Hilfe eines Tabellenprogrammes erstellt und begleitend zu den Prüfungen durchgeführt, um Unregelmäßigkeiten bei der Prüfdurchführung rasch erkennen zu können. In Abb. 5.1 ist beispielhaft die Einzelauswertung eines Probekörpers abgebildet.

Die Einzelauswertung wurde soweit vorbereitet, dass folgende Daten direkt aus dem Rohdatenfile ausgelesen werden konnten:

- Prüfkörperbezeichnung
- Prüfdatum
- Prüfdauer bei F_{\max} [s]
- Bruchkraft F_{\max} [kN]
- Bruchverformung w_{zugeh} [mm]
- Verschiebemodul K_{ser} [N/mm]
- Bestimmtheitsmaß des Verschiebemoduls r^2

Die Abmessungen des Prüfbrettes, sowie die Ergebnisse aus der Feuchtigkeitsbestimmung nach EN 13183 [29] wurden nachträglich ergänzt um die weiteren Kenngrößen wie Rohdichte oder Schubfestigkeit bei 12 % Holzfeuchte bestimmen zu können.

Daten zum Prüfkörper:	Prüfergebnisse:
PK-Bezeichnung PA10-112-2_EN_H06_SW29-5	Prüfzeit 711 s
Prüfdatum 21.12.2010 -	F_{max} 27.994 N
L₁ 326,5 mm	w_{zugeh.} 1,390 mm
B₁ 150,19 mm	F₂₀ 5.599 N
B₂ 150,07 mm	F₅₀ 13.997 N
Korrektur Breite mm	
D₁ 20,16 mm	k = K_{ser} 56.646 N/mm
D₂ 20,22 mm	R² 1,000 -
Masse 416,35 g	
Feuchte 12,9 %	f_v 8,96 N/mm ²
Referenzfeuchte 12,0 %	f_{v,12} 9,15 N/mm ²
β_{v,mean} 11,8 %	ρ 420,7 kg/m ³
	ρ_{korr} - kg/m ³
	ρ₁₂ 418,7 kg/m ³

Astdokumentation:			
Art der Äste	Ort	DM [mm]	Anmerkungen
Punktast	KF		

Astkorrektur:	<input type="button" value="Nein"/>
----------------------	-------------------------------------

Abkürzungen: Ast ... Äste ≥ 5 mm Durchmesser
 Punktast ... Äste < 5 mm Durchmesser
 KF ... Klebefläche
 FU ... Scherfuge

Abb. 5.1: Beispiel für eine Einzelauswertung

5.1.2 Holzfeuchtigkeit

Die Holzfeuchtigkeit errechnet sich entsprechend EN 13183 [29] nach:

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} \cdot 100\%$$

- m_u Masse des Holzes vor dem Trocknen in Gramm
- m_0 Masse des Holzes in darrgetrocknetem Zustand in Gramm
- u Holzfeuchtigkeit in Prozent

5.1.3 Rohdichte

Aus den in Kapitel 3.4.2 bestimmten Abmessungen wurde die Rohdichte bei der Holzfeuchte u entsprechend der unten angegebenen Formel berechnet:

$$\rho_u = \frac{m_u}{L_1 \cdot \frac{B_1 + B_2}{2} \cdot \frac{D_1 + D_2}{2}}$$

- m_u Masse des Holzes mit der Feuchtigkeit u in Gramm
- L_1 Länge des Prüfbrettes in Millimeter
- B_1, B_2 Breite des Prüfbrettes in Millimeter
- D_1, D_2 Dicke des Prüfbrettes in Millimeter
- ρ_u Rohdichte des Prüfbrettes mit der Feuchtigkeit u in kg/m³

Anmerkung: Die Bestimmung der Rohdichte erfolgte am zu prüfenden Einzelbrett vor der Verklebung. Nach der Schubprüfung wurde der Probekörper aufgetrennt und eine Darrprobe aus dem geprüften Einzelbrett gewonnen. Daher differieren die Zeitpunkte der Messung der Rohdichte und der Holzfeuchte. Da die Bretter vor der Verklebung im Normklima (20°C/65 r.LF) bis zur Massekonstanz gelagert wurden und auch die fertigen Probekörper im gleichen Klima bis zur Prüfung aufbewahrt wurden, kann von einem vernachlässigbar kleinen Einfluss der unterschiedlichen Zeitpunkte der Messungen für Rohdichte und Holzfeuchtigkeit ausgegangen werden.

Astkorrektur der Rohdichte:

Die Brettware wurde so ausgesucht, dass nur wenig Äste in den zu prüfenden Einzelbrettern vorhanden waren. Äste erhöhen durch ihre gegenüber dem astfreien Holz erheblich höhere Rohdichte (bis zu 1000 kg/m³) die Rohdichte des ganzen Brettes. Um die tatsächliche Rohdichte in der Bruchzone (= astfreie Zone) bestimmen zu können, wurde eine Astkorrektur auf Basis der Arbeit von Werner [20] erstellt.

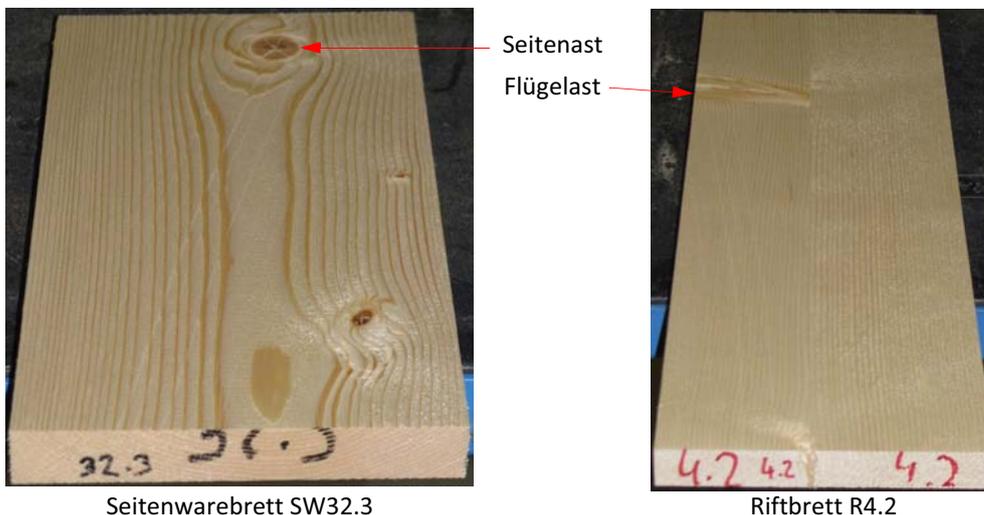


Abb. 5.2: Beispiele für Prüfbretter mit Ästen

Die astkorrigierte Rohdichte lässt sich entsprechend den Angaben von Werner [20] wie folgt errechnen:

$$\rho_{u, \text{korr}} = \frac{\rho_u}{\left(1 + 1,5 \cdot \frac{A_A}{A}\right)}$$

- ρ_u Rohdichte des Prüfbrettes mit der Feuchtigkeit u in kg/m³
- $\rho_{u, \text{korr}}$ astkorrigierte Rohdichte des Prüfbrettes mit der Feuchtigkeit u in kg/m³
- A_A Astfläche in mm²
- A Probengesamtfläche in mm²

Aufgrund der generell wenigen Äste und des erheblichen Aufwandes bei deren Erfassung wurde auf eine Rohdichtekorrektur verzichtet.

Feuchtekorrektur der Rohdichte:

Entsprechend der EN 384 [25] Abs. 5.3.3 ist die Rohdichte auf die Referenzfeuchtigkeit von $u_{\text{ref}} = 12\%$ umzurechnen, welche nach den Angaben von Kollmann [11] erfolgte. Kollmann geht davon aus, dass bei 25 % Holzfeuchte 75 % der Quellung abgeschlossen sind. Deswegen gilt die untere Gleichung nur im Bereich von etwa 7 bis 25 %.

$$\rho_u = \rho_0 \cdot \frac{1+u}{1+u \cdot \alpha'_v} \rightarrow \rho_0 = \rho_u \cdot \frac{1+u \cdot \alpha'_v}{1+u} \quad \text{mit} \quad \alpha'_v = \frac{\alpha_v \cdot 0,75}{25}$$

für $u = u_{\text{ref}} = 12\%$

$$\rho_{12} = \rho_0 \cdot \frac{1+u_{\text{ref}}}{1+u_{\text{ref}} \cdot \alpha'_v} = \left(\rho_u \cdot \frac{1+u \cdot \alpha'_v}{1+u} \right) \cdot \frac{1+u_{\text{ref}}}{1+u_{\text{ref}} \cdot \alpha'_v} \quad \text{mit} \quad \alpha_v = \frac{\beta_v}{1-\beta_v}$$

ρ_u	Rohdichte des Prüfbrettes mit der Feuchtigkeit u in kg/m^3
ρ_0	Darrrohndichte in kg/m^3
ρ_{12}	Rohdichte des Prüfbrettes mit 12 % Feuchtigkeit in kg/m^3
u	Holzfeuchtigkeit in Prozent
u_{ref}	Referenzfeuchtigkeit in Prozent; $u_{\text{ref}} = 12\%$
α_v	Gesamtschwindmaß in Prozent
α'_v	differenzielles Schwindmaß in %/%
β_v	Gesamtquellmaß; für Fichte nach Wagenführ [18] $\beta_v = 11,8\%$

5.1.4 Schubfestigkeit

Die Schubfestigkeit für die Prüfkfiguration „EN“ wurde wie folgt bestimmt:

$$f_{v, \text{EN}} = \frac{F_{\text{max}} \cdot \cos(14^\circ)}{\left(\frac{B_1 + B_2}{2} - B_{\text{korrr}} \right) \cdot \frac{D_1 + D_2}{2}} \quad [\text{N/mm}^2]$$

Die Schubfestigkeit für die Prüfkfiguration „CIB“ wurde wie folgt bestimmt:

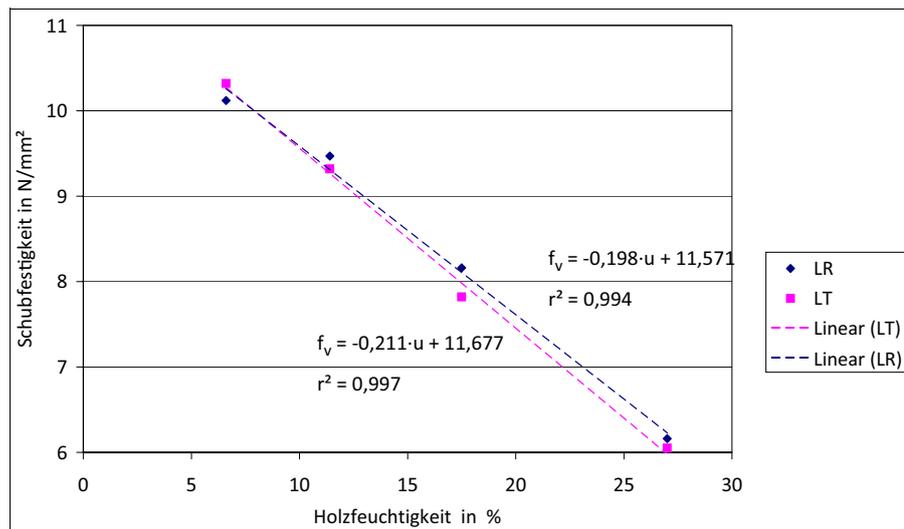
$$f_{v, \text{CIB}} = \frac{0,5 \cdot F_{\text{max}}}{\left(\frac{B_1 + B_2}{2} - B_{\text{korrr}} \right) \cdot \frac{D_1 + D_2}{2}} \quad [\text{N/mm}^2]$$

f_v	Schubfestigkeit in N/mm^2
F_{max}	Bruchkraft in kN
B_1, B_2	Breite des Prüfbrettes in Millimeter
B_{korrr}	Abzug aus unbeabsichtigtem Einschnitt des Prüfbrettes, siehe Abb. 3.14
D_1, D_2	Dicke des Prüfbrettes in Millimeter

Anmerkung: Vereinzelt wurden beim Durchtrennen der Füllhölzer unbeabsichtigt die Prüfbretter angeschnitten. Um diese lokale Querschnittsänderung des Prüfbrettes ansatzweise zu berücksichtigen, wurde diese Schnitttiefe B_{korrr} von der Breite abgezogen.

Feuchtekorrektur der Schubfestigkeit:

Entsprechend der EN 384 [25] Abs. 5.3.3 ist die Schubfestigkeit auf die Referenzfeuchtigkeit von $u_{ref} = 12\%$ zu korrigieren. Diese Korrektur basiert auf der Arbeit von Horvath et al. [8]. Im Diagr. 5.1 sind die Ergebnisse von Horvath für die zwei Scherebenen Längs-Radial (LR) und Längs-Tangential (LT) angegeben. Für die Korrekturfunktion wurde näherungsweise die mittlere Steigung beider Trendlinien angenommen.



Diagr. 5.1: Einfluss der Holzfeuchtigkeit auf die Schubfestigkeit nach Horvath et al. [8]

Die Korrekturfunktion errechnet sich somit zu:

$$k_{mean} = \frac{k_{LT} + k_{LR}}{2} = \frac{0,211 + 0,198}{2} = 0,205 \text{ N/mm}^2/\%$$

$$f_{v,12} = (u - u_{ref}) \cdot k_{mean} + f_{v,u} \quad [\text{N/mm}^2]$$

k_{LT} Steigung der Trendlinie für LT in $\text{N/mm}^2/\%$

k_{LR} Steigung der Trendlinie für LR in $\text{N/mm}^2/\%$

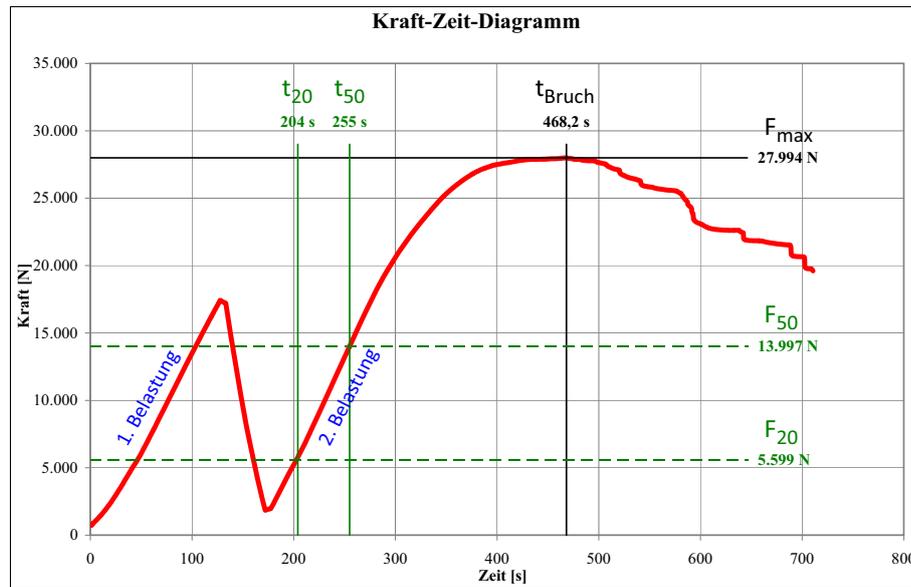
k_{mean} gemittelte Steigung für LT und LR in $\text{N/mm}^2/\%$

$f_{v,u}$ Schubfestigkeit in N/mm^2 bei der Feuchtigkeit u

$f_{v,12}$ korrigierte Schubfestigkeit in N/mm^2

5.1.5 Verschiebemodul

Der Verschiebemodul wurde im linear elastischen Bereich der Probekörperverformung zwischen 20 und 50 % der Bruchkraft bestimmt, siehe Diagr. 5.2. Mit Hilfe eines Tabellenprogrammes wurde zwischen $0,2 F_{max}$ und $0,5 F_{max}$ im 2. Belastungsast eine Regressionsgerade an die Prüfwerte für Kraft und Verformungsweg angepasst, deren Steigung k dem Verschiebemodul K_{ser} entspricht. Mit der Berechnung des Bestimmtheitsmaßes r^2 wurde die Korrelation zwischen der Regressionsgerade und dem Kraft und Verformungsweg im zweiten Belastungsast bestimmt.



Diagr. 5.2: Kraft-Zeit-Diagramm mit Angabe der Grenzen für die Bestimmung des Verschiebemoduls

5.2 Vergleich der Prüfserien

5.2.1 Einleitung

Die zusammenfassende Darstellung und die vergleichende Betrachtung der Prüfergebnisse verdeutlichen die statistischen Kenngrößen der Parameter und Messgrößen. Die folgenden Diagramme und statistischen Auswertungen wurden mit dem Programm „R“ erstellt. Als Literaturgrundlage dienten die Vorlesungsunterlagen von Stadlober [16].

Mit Hilfe von statistischen Lageparametern wie Minimum, Maximum, Median, Mittelwert und dem Streuungsparameter Variationskoeffizient (COV) wurden die einzelnen Serien untersucht. Die grafische Darstellung der Ergebnisse erfolgte mit Box-Plots und Histogrammen.

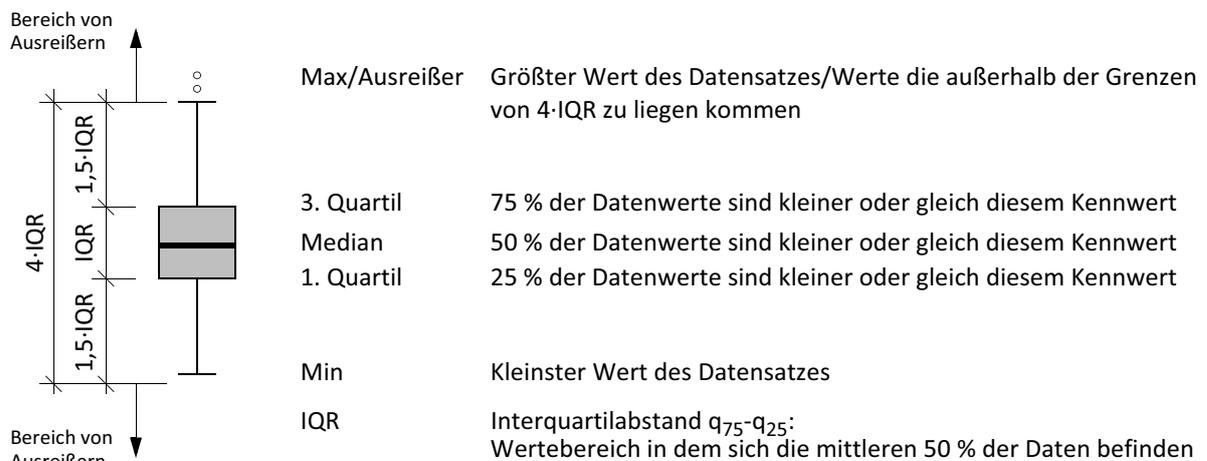


Abb. 5.3: Box-Plot Definition

Als Übersicht der Serienbezeichnungen und den darin variierten Parametern wird in Tab. 5.1 der Versuchsplan aus 2.4.4 nochmals zusammengefasst dargestellt.

Tab. 5.1: Prüfplan beider Konfigurationen

Konfig.		QL-Breite [mm]		QL-Dicke [mm]			Lage im Stamm			Fugenbreite			Anzahl	
		200	150	10	20	30	SW	R	KB	1,5	5	25	CIB	EN
CIBA	EN A	X		X			X				X		10	10
CIB B	EN B		X	X			X				X		10	10
CIB C	EN C		X		X		X				X		10	10
	EN D		X			X	X				X			10
CIB F	EN F		X		X			X			X		10	10
CIB G	EN G		X		X				X		X		10	10
CIB H	EN H		X		X		X			X			10	10
CIB I	EN I		X		X		X					X	10	10
												Summe	70	80

5.2.2 Bemerkungen zur statistischen Auswertung

Box-Plots:

Die Box-Plots und der in den Plots angegebene 5%-Quantilwert wurden auf Basis empirisch ermittelter Daten erstellt.

Bestimmung der Festigkeitskenngrößen:

Die charakteristischen Festigkeitskenngrößen (5%-Quantilwerte) werden üblicherweise auf Basis der folgenden statistischen Verteilungsmodelle bestimmt:

- Log-Normalverteilung 2p/3p
- Weibull-Verteilung 2p/3p

Würde man auf Basis dieser Parameterstudie nach der EN 14358 [30] einen charakteristischen Festigkeitswert berechnen, müsste man mit sinkender Probenanzahl (in diesem Fall $n = 10$) zunehmende statistische Unsicherheiten in Kauf nehmen – der k_s -Faktor nach EN 14358 steigt mit sinkender Probenanzahl an. Voraussetzung für die Bestimmung der charakteristischen Festigkeitskenngrößen ist auch eine Stichprobenentnahme aus der allgemeinen Grundgesamtheit. Die in dieser Parameterstudie verwendeten Prüfbretter stammten aber aus einer selektierten Probenentnahme (siehe 3.1.1 und 3.2.2). Deshalb wurde von der Angabe eines 5%-Quantilwertes als Grundlage eines charakteristischen Festigkeitswertes abgesehen.

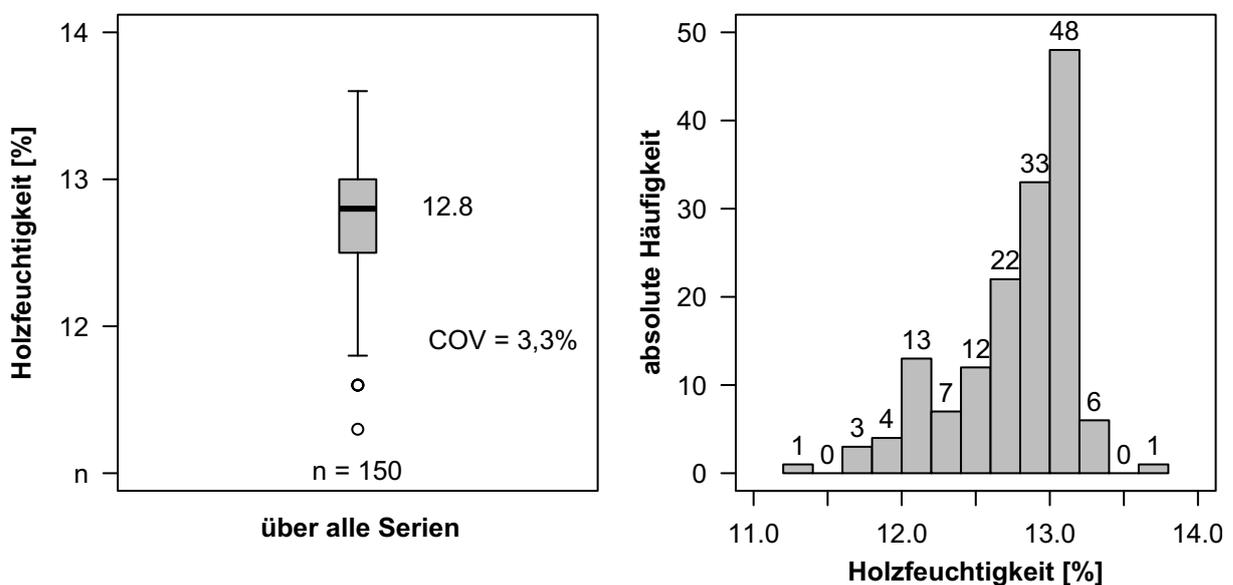
Parameterstudie und Auswertung:

Das Ziel dieser Parameterstudie liegt in der Untersuchung der Parameter Brettbreite, -dicke, Stamm- und Jahrringlage, sowie der Fugenbreite und deren Einflussnahme auf die Schubfestigkeit. Aussagen zum Einfluss der genannten Parameter gewinnt man in der Statistik durch die Bestim-

mung der jeweiligen Signifikanz. In dieser Masterarbeit erfolgt die Bestimmung der Signifikanz mit Hilfe des paarweisen t-Tests, und als Alternative der oneway-Test. Gebräuchlich wäre auch der Wilcoxon-Mann-Whitney-Test, welcher aber hier nicht angewendet wurde. Als Voraussetzung für den paarweisen t-Test müssen die Serien zuvor mit Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung und dem Fligner-Kileen-, sowie dem Levene-Test auf Gleichheit der Varianzen überprüft werden. Prinzipiell könnten auch andere Verteilungsmodelle wie Log-Normal- oder Weibull-Verteilung für diese Probenanzahl angewendet werden.

5.2.3 Holzfeuchtigkeit

Diagr. 5.3 zeigt das Ergebnis der Holzfeuchtebestimmung:

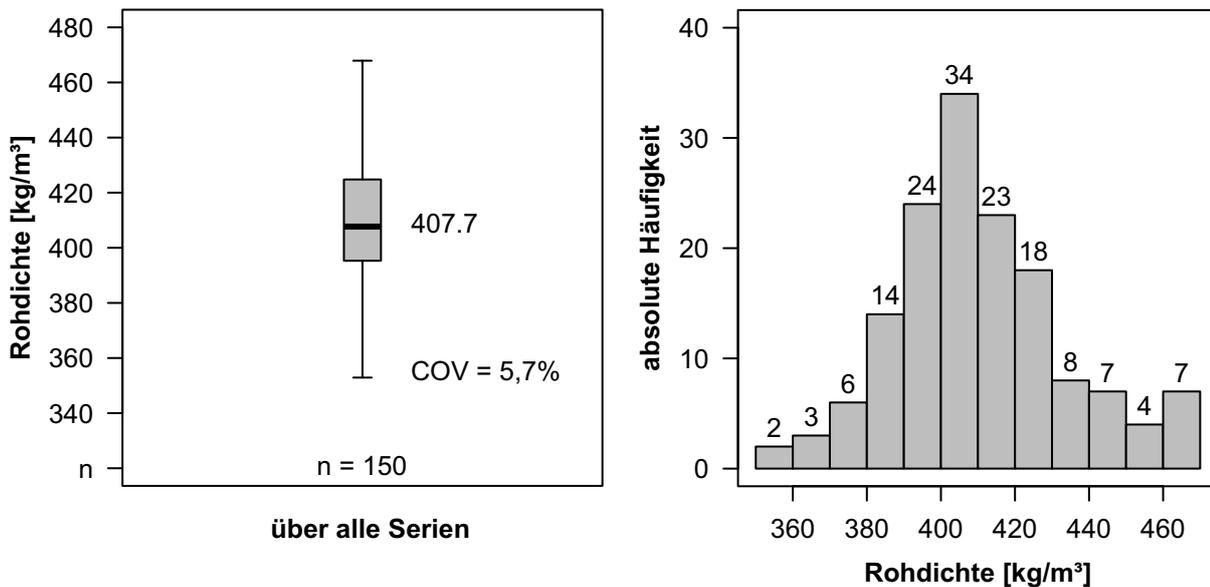


Diagr. 5.3: Box-Plot und Histogramm der Holzfeuchtigkeit aller Prüfkörper

Der Median der Holzfeuchtigkeit liegt bei 12,8 % und weicht um 0,8 % von der Referenzfeuchtigkeit von 12 % ab. Betrachtet man den obigen Box-Plot und das Diagr. 3.1 vergleichend, kann gesagt werden, dass die Holz Trocknung eine deutliche Verringerung der Streuung bewirkte und somit die Abweichungen zur Referenzfeuchtigkeit nur sehr gering sind.

5.2.4 Rohdichte

Im Diagr. 5.4 ist der Boxplot der Rohdichte aller Probekörper abgebildet. Durch die Rohdichtesortierung der Prüfbretter im Zuge des Herstellungsprozesses konnte die mittlere Rohdichte von 407,7 kg/m³ mit einer niedrigen Streuung von 5,7 % eingehalten werden. Im Histogramm ist durch die Betrachtung der Stückzahl erkennbar, dass nur in Ausnahmefällen Bretter mit größeren Abweichungen verwendet wurden. Die Rohdichte des überwiegenden Anteils der Prüfbretter (113 Stk.) liegt zwischen 380 und 430 kg/m³.



Diagr. 5.4: Box-Plot und Histogramm der Rohdichte aller Prüfkörper

5.2.5 Kraft-Weg-Diagramme

Die folgenden Kraft-Weg-Diagramme (Abb. 5.4 und Abb. 5.5) der einzelnen Serien zeigen die Verformungscharakteristik der Prüfkörper. Betrachtet man die Kurvenscharen beider Prüfkonfigurationen („CIB“ und „EN“) vergleichend, so ist zu erkennen, dass die qualitativen Verläufe der Kurvenscharen, trotz der Differenzen im Prüfkörperaufbau und -konfigurationen die gleiche Form aufweisen. Das Kraft-Weg-Diagramm verbunden mit der Bruchausbildung lässt sich in vier Phasen einteilen:

- Phase 1: linear-elastischer Bereich.
- Phase 2: beginnendes Plastifizieren des Holzes bis zum Bruch.
- Phase 3: Das Nachbruchverhalten ist gekennzeichnet durch einen stufenweisen Kraftabfall. Dieser entsteht durch die allmähliche Ausbildung von Schubbruchflächen, welche sich über den ganzen Querschnitt verteilen.
- Phase 4: Ausbildung eines Kraftplateaus bei gleichzeitiger Verformungszunahme nach Abschluss der Schubbruchausbildung.

Zusammenfassend kann hier aufgrund der Plateauausbildung und den plastischen Anteilen im Verformungsdiagramm von einer Mischform aus sprödem und duktilem Materialverhalten gesprochen werden.

Prüfkonfiguration „CIB“:

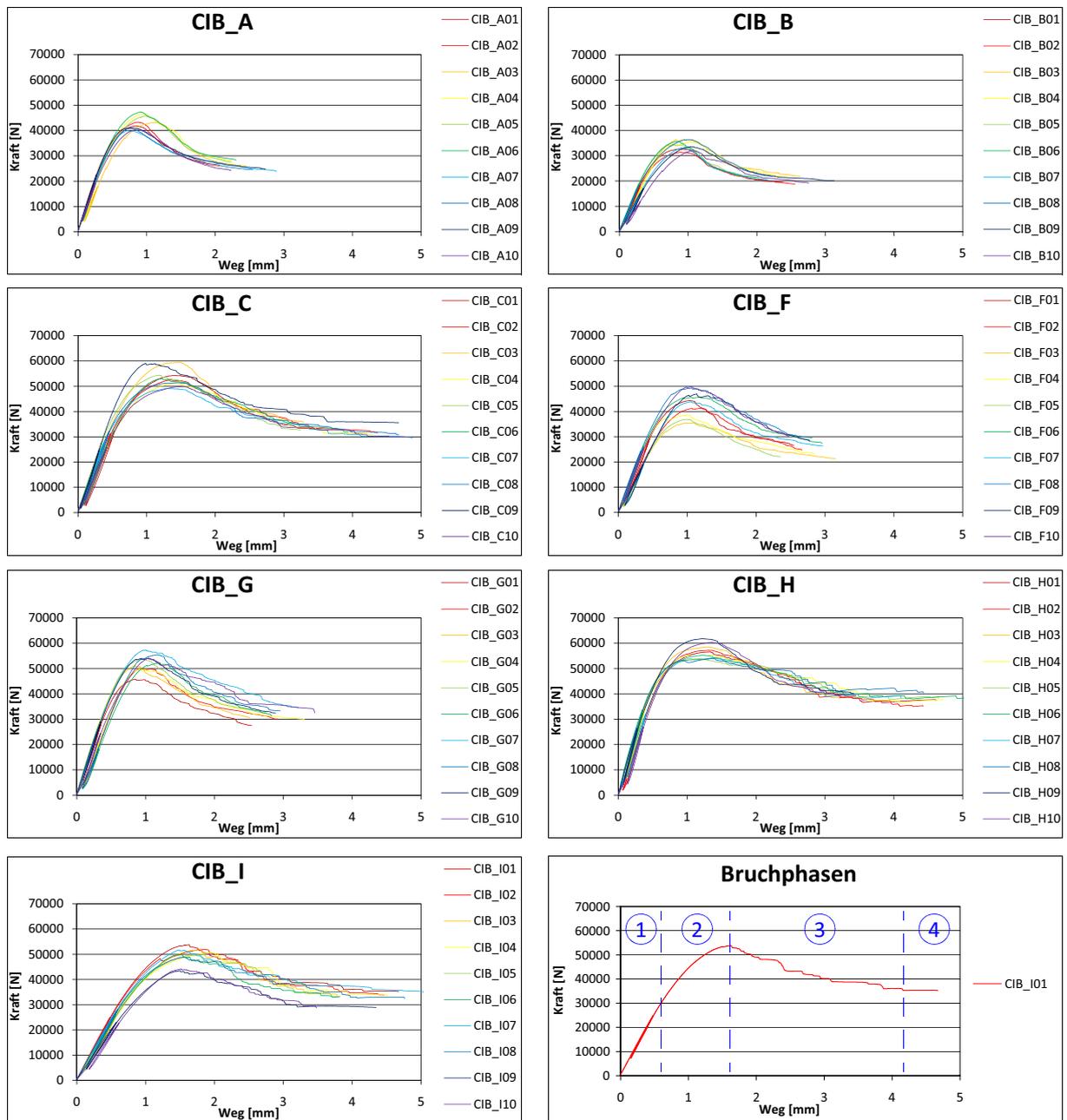


Abb. 5.4: Kraft-Weg-Diagramme der Prüfkonfiguration „CIB“

Prüfkonfiguration „EN“:

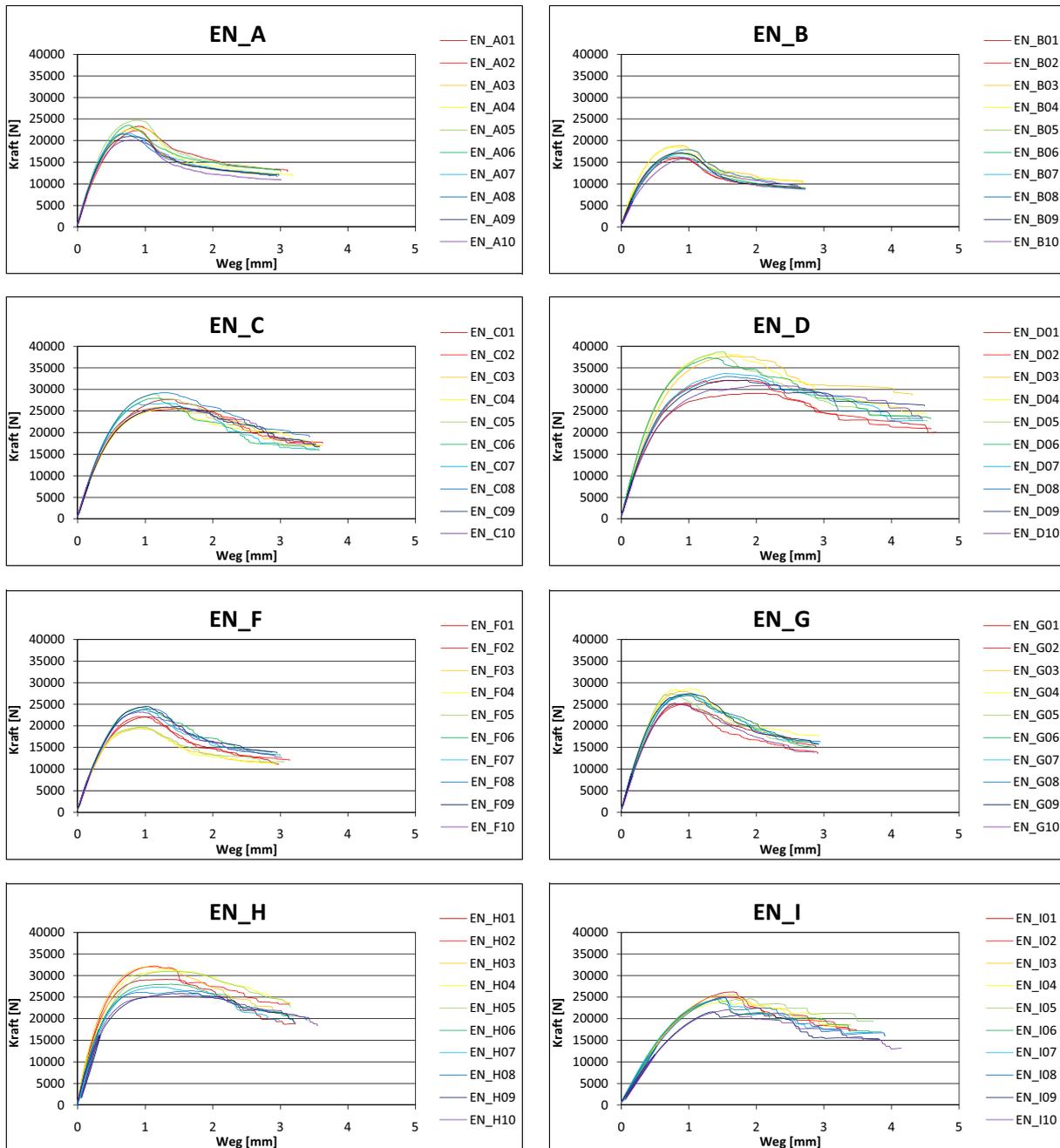


Abb. 5.5: Kraft-Weg-Diagramme der Prüfkonfiguration „EN“

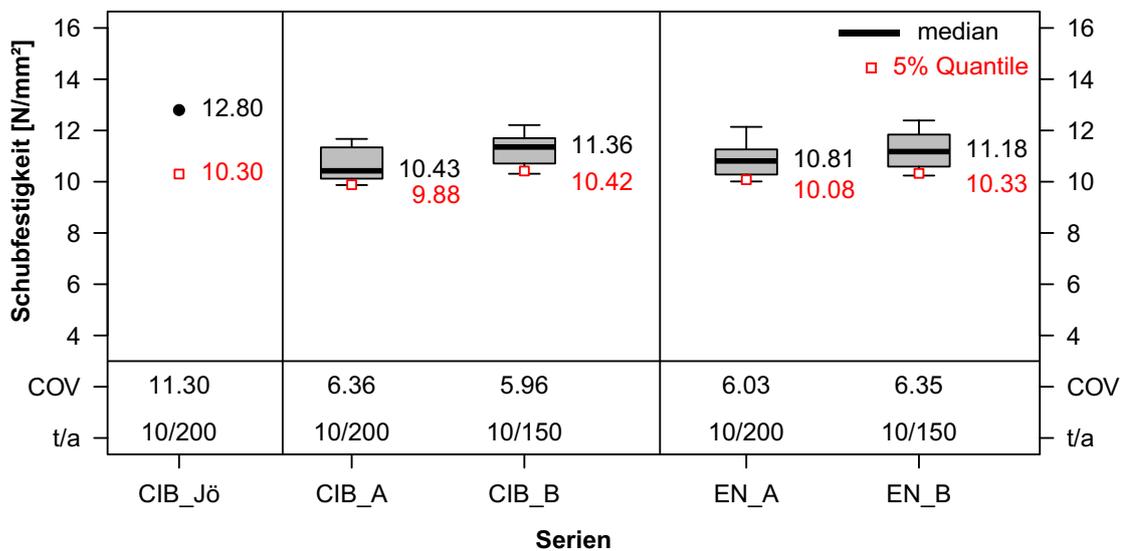
5.2.6 Parameter Brettbreite

In den folgenden Ausführungen wird der Einfluss der Brettbreite auf die Schubfestigkeit untersucht und auf Signifikanz überprüft. Zum Vergleich werden die Ergebnisse von Jöbstl [10] angegeben, aber nicht in den statistischen Test mitberücksichtigt, da die Probekörper nicht derselben Grundgesamtheit entsprechen.

Im folgenden Diagramm 5.5 sind folgende Ergebnisse enthalten:

- Box-Plot der Serien: CIB_A, CIB_B, EN_A, EN_B
- Der Median und 5%-Quantilwert jeder Serie auf Basis empirischer Daten
- Maße des Prüfbrettes als Dicken/Breiten-Verhältnis (t/a), mit $t = 10 \text{ mm} = \text{konstant}$
- Der Variationskoeffizient (COV) jeder Serie
- Der Median und 5%-Quantilwert der Ergebnisse von Jöbstl [10] als Serie CIB_Jö auf Basis empirischer Daten

Die Prüfbretter bestanden aus Seitenware SW und die Fugenbreite betrug 5 mm.



Diagr. 5.5: Box-Plot der Serien A und B und die Ergebnisse von Jöbstl

Vergleicht man den Median von Jöbstl [10] mit dem Median der Serien CIB_A und CIB_B, erhält man eine Differenz von 2,37 N/mm². Auffallend sind auch die unterschiedlichen Streuungen der Schubfestigkeiten, welche auf die Auswahl des Grundmaterials zurückgeführt werden können.

Test auf Normalverteilung der Probe:

Zu Beginn der Untersuchung wurden die Serien mit dem Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung getestet:

Tab. 5.2: p-Werte des Shapiro-Wilk-Tests auf Normalverteilung

	CIB_A	CIB_B	EN_A	EN_B
p-Wert	0,15	0,52	0,63	0,67

Testet man die Daten der Serien A und B beider Prüfkonfigurationen mit dem Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung, werden p-Werte größer 0,05 ausgegeben. Die Hypothese, dass die Probe einer normalverteilten Grundgesamtheit entstammt, kann mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % nicht verworfen werden.

Test auf Gleichheit der Varianzen:

Bei der varianzanalytischen Betrachtung des Parameters Brettbreite erhält man folgende Ergebnisse: Der Fligner-Kileen-Test ergibt mit einem p-Wert von 0,99, dass die Nullhypothese mit $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots \sigma_n^2$ nicht abgelehnt werden kann. Das heißt, dass sich die Varianzen der Serien CIB_A, CIB_B, EN_A und EN_B nicht signifikant unterscheiden, also homogen sind. Der Levene-Test führt zu einem p-Wert von 0,99, sodass die Nullhypothese des Tests mit $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots \sigma_n^2$ nicht abgelehnt werden kann. Das heißt wiederum, dass sich die Varianzen der Serien CIB_A, CIB_B, EN_A und EN_B nicht signifikant unterscheiden, also homogen sind.

Test auf Gleichheit der Serienmittelwerte:

In Tab. 5.3 sind die p-Werte der paarweisen t-Tests angegeben. Die Nullhypothese der Gleichheit der Mittelwerte kann bei allen Kombinationen nicht abgelehnt werden, da alle p-Werte größer 0,05 sind. Das bedeutet, dass sowohl die Brettbreite als auch die Unterschiede zwischen den beiden Prüfkonfigurationen keinen signifikanten Einfluss auf Schubfestigkeit haben.

Tab. 5.3: p-Werte der paarweisen t-Tests unter der Annahme gleicher Varianzen $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots \sigma_4^2$

	CIB_A	CIB_B	EN_A
CIB_B	0,22	-	-
EN_A	0,93	0,64	-
EN_B	0,37	0,93	0,83

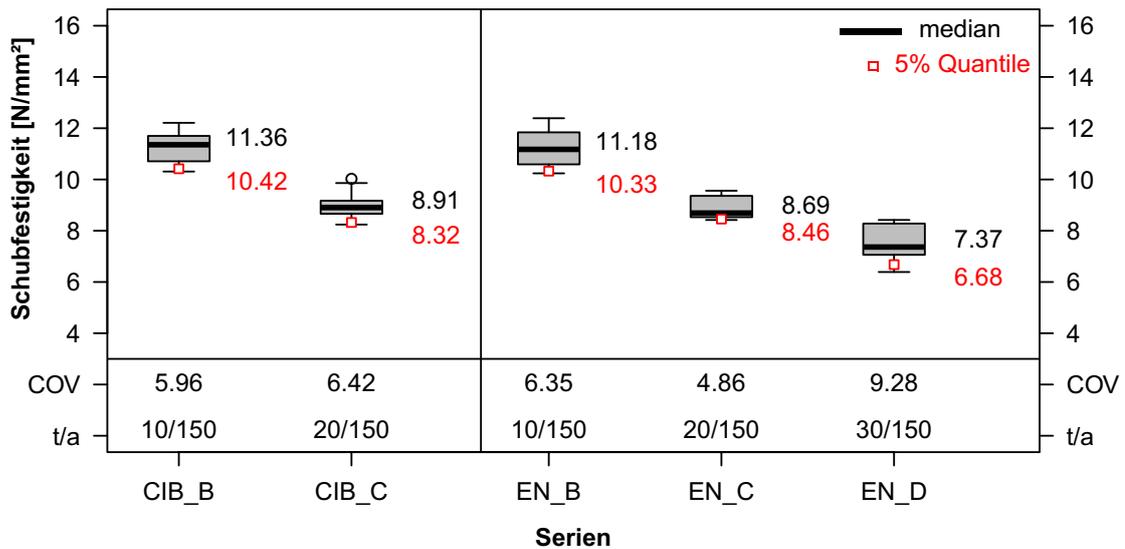
5.2.7 Parameter Brettdicke

In den folgenden Ausführungen wird der Einfluss der Brettdicke auf die Schubfestigkeit untersucht und auf Signifikanz überprüft.

Im folgenden Diagramm 5.6 sind folgende Ergebnisse enthalten:

- Box-Plot der Serien: CIB_B, CIB_C, EN_B, EN_C, EN_D
- Der Median und 5%-Quantilwert jeder Serie auf Basis empirischer Daten
- Maße des Prüfbrettes als Dicken/Breiten-Verhältnis (t/a), mit $a = 150 \text{ mm} = \text{konstant}$
- Der Variationskoeffizient (COV) jeder Serie

Die Prüfbretter bestanden aus Seitenware SW und die Fugenbreite betrug 5 mm.



Diagr. 5.6: Box-Plot der Serien B, C und D

Test auf Normalverteilung der Probe:

Testet man die Daten der Serien B, C und D beider Prüfkonfigurationen nach dem Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung, werden p-Werte größer 0,05 ausgegeben. Die Annahme, dass die jeweilige Probe einer jeweils normalverteilten Grundgesamtheit entstammt, kann also mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % nicht verworfen werden.

Tab. 5.4: p-Werte des Shapiro-Wilk-Tests auf Normalverteilung

	CIB_B	CIB_C	EN_B	EN_C	EN_D
p-Wert	0,52	0,42	0,67	0,08	0,23

Test auf Gleichheit der Varianzen:

Bei der varianzanalytischen Betrachtung des Parameters Brettstärke erhält man folgende Ergebnisse: Der Fligner-Kileen-Test ergibt mit einem p-Wert von 0,53, sodass die Nullhypothese mit $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_n^2$ nicht abgelehnt werden kann. Das heißt, dass sich die Varianzen der Serien B, C und D nicht signifikant unterscheiden, also homogen sind. Der Levene-Test führt zu einem p-Wert von 0,53, sodass die Nullhypothese des Tests mit $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_n^2$ nicht abgelehnt werden kann. Das heißt wiederum, dass sich die Varianzen der Serien B, C und D nicht signifikant unterscheiden, also homogen sind.

Test auf Gleichheit der Serienmittelwerte:

In Tab. 5.5 sind die p-Werte der paarweisen t-Tests angegeben. Die Nullhypothese der Gleichheit der Mittelwerte kann nur bei den Kombinationen CIB_B – EN_B und CIB_C – EN_C nicht abgelehnt werden, da alle p-Werte größer 0,05 sind. Das bedeutet, dass die Brettstärke einen signifikanten Einfluss auf die Schubfestigkeit hat, die Prüfkonfiguration aber nicht.

Tab. 5.5: *p*-Werte der paarweisen *t*-Tests unter der Annahme gleicher Varianzen $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots \sigma_5^2$

	CIB_B	CIB_C	EN_B	EN_C
CIB_C	0	–	–	–
EN_B	1,0	0	–	–
EN_C	0	1,0	0	–
EN_D	0	0	0	0

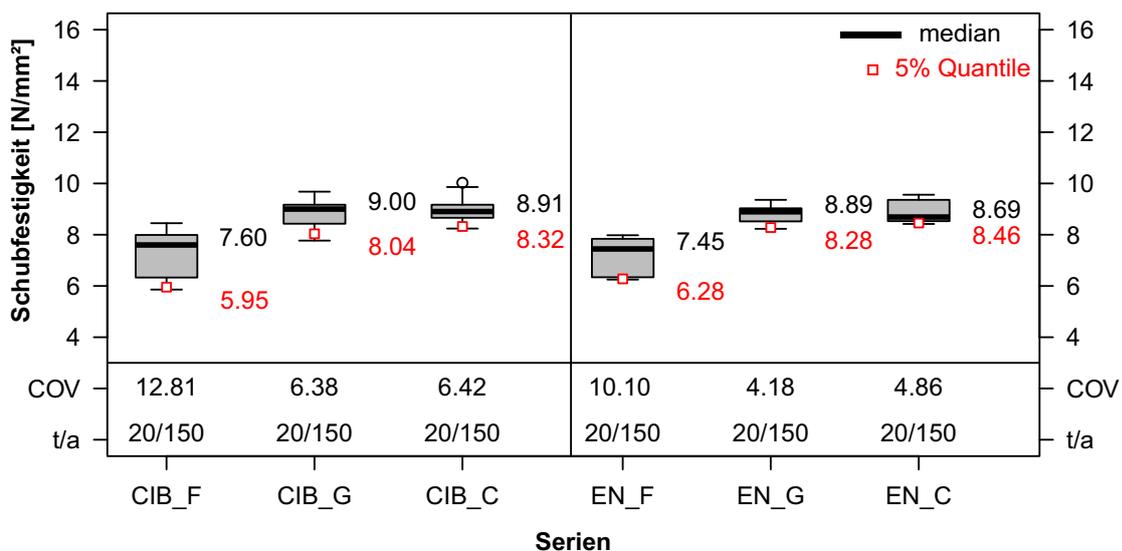
5.2.8 Parameter Stamm- und Jahrringlage

In den folgenden Ausführungen wird der Einfluss der Stamm- und Jahrringlage auf die Schubfestigkeit untersucht und auf Signifikanz überprüft.

Im folgenden Diagramm 5.7 sind folgende Ergebnisse enthalten:

- Box-Plot der Serien: CIB_F – Riftware
CIB_G – Kernbrettern
CIB_C – Seitenware
EN_F – Riftware
EN_G – Kernbrettern
EN_C – Seitenware
- Der Median und 5%-Quantilwert jeder Serie auf Basis empirischer Daten
- Maße des Prüfbrettes als Dicken/Breiten-Verhältnis (*t/a*), mit $t/a = 20/150 \text{ mm} = \text{konstant}$
- Der Variationskoeffizient (COV) jeder Serie

Die Fugenbreite betrug 5 mm.



Diagr. 5.7: Box-Plot der Serien F, G und C

Test auf Normalverteilung der Probe:

Testet man die Daten der Serien F, G und C beider Prüfkongfigurationen nach dem Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung, werden p-Werte größer 0,05 mit Ausnahme der Serie EN_F ausgegeben. Die Annahme, dass die Probe einer normalverteilten Grundgesamtheit entstammt, kann also mit Ausnahme der Serie EN_F mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % nicht verworfen werden.

Tab. 5.6: *p-Werte des Shapiro-Wilk-Tests auf Normalverteilung*

	CIB_F	CIB_G	CIB_C	EN_F	EN_G	EN_C
p-Wert	0,24	0,84	0,42	0,03	0,50	0,08

Test auf Gleichheit der Varianzen:

Bei der varianzanalytischen Betrachtung des Parameters Stamm- und Jahrringlage erhält man folgende Ergebnisse: Der Fligner-Kileen-Test ergibt mit einem p-Wert von 0,07, sodass die Nullhypothese mit $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots \sigma_n^2$ abgelehnt werden muss. Das heißt, dass sich die Varianzen der Serien F, G und C signifikant unterscheiden, also nicht homogen sind. Der Levene-Test führt zu einem p-Wert von 0,06, sodass die Nullhypothese des Tests mit $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots \sigma_n^2$ abgelehnt werden muss. Das heißt wiederum, dass sich die Varianzen der Serien F, G und C signifikant unterscheiden, also nicht homogen sind. Beide Tests liefern niedrige p-Werte unter 0,10, einem nach Stadlober [16] empfohlenen Grenzwert. In Diagr. 5.7 kann man erkennen, dass die Interquartilsbereiche der Serien CIB_F und EN_F etwa gleich groß sind. Die anderen Serien weisen einen wesentlich kleineren IQR auf. Deswegen werden der Fligner-Kileen-Test und der Levene-Test ohne die Serien CIB_F und EN_F wiederholt.

Der Fligner-Kileen-Test ergibt einen p-Wert von 0,55, sodass die Nullhypothese mit $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots \sigma_n^2$ nicht abgelehnt werden kann. Das heißt, dass sich die Varianzen der Serien G und C nicht signifikant unterscheiden, also homogen sind. Der Levene-Test führt zu einem p-Wert von 0,62, sodass die Nullhypothese des Tests mit $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots \sigma_n^2$ nicht abgelehnt werden kann. Das heißt wiederum, dass sich die Varianzen der Serien G und C nicht signifikant unterscheiden, also homogen sind.

Test auf Gleichheit der Serienmittelwerte:

In Tab. 5.7 sind die p-Werte des paarweisen t-Tests für die Serien G und C beider Prüfkongfigurationen angegeben. Die Nullhypothese der Gleichheit der Mittelwerte kann bei allen Kombinationen nicht abgelehnt werden, da alle p-Werte größer als 0,05 sind. Das bedeutet, dass die Prüfkörper mit Seitenwarebrettern und Kernbrettern keinen signifikanten Einfluss auf die Schubfestigkeit haben. Die Prüfkongfiguration sowie die Stammlage haben demnach keinen signifikanten Einfluss.

Tab. 5.7: *p-Werte der paarweisen t-Tests unter der Annahme gleicher Varianzen $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots \sigma_4^2$*

	CIB_C	CIB_G	EN_C
CIB_G	1,0	–	–
EN_C	1,0	1,0	–
EN_G	1,0	1,0	1,0

Alternativ wurde mit dem oneway-Test auf Gleichheit der Mittelwerte der Serien F, G und C getestet, wobei die Varianzgleichheit keine Voraussetzung ist. Dabei ergab der Test einen p-Wert von $4,9 \cdot 10^{-6}$ und daher eine Ablehnung der Hypothese der globalen Gleichheit der Serienmittelwerte.

Als Schlussfolgerung der oben genannten Tests kann gesagt werden, dass die Jahrringlage (Riftware) einen signifikanten Einfluss auf die Schubfestigkeit hat, die Stammlage (Seitenware, Kernbrett) nicht.

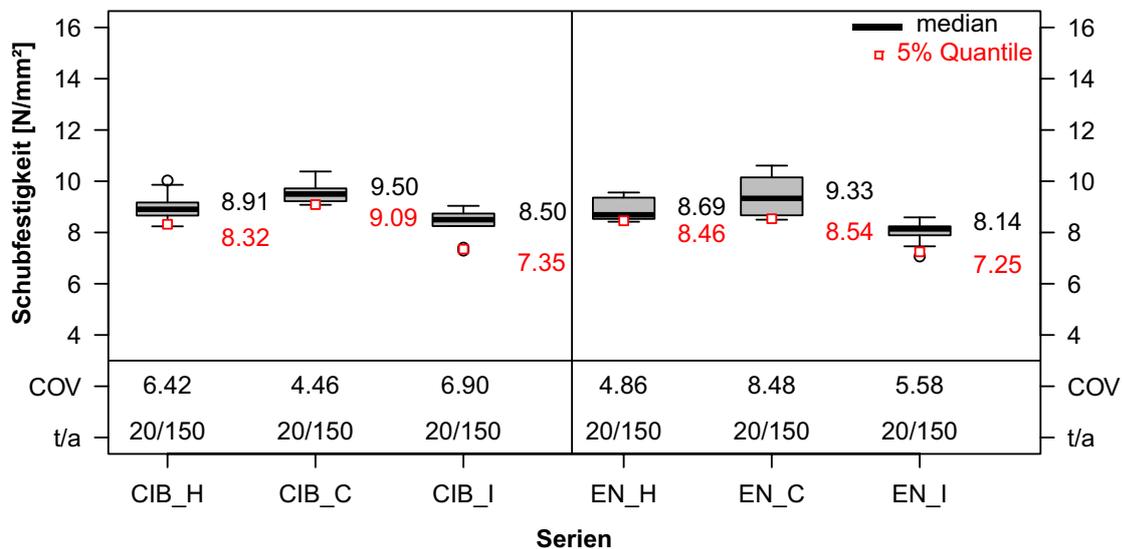
5.2.9 Parameter Fugenbreite

In den folgenden Ausführungen wird der Einfluss der Fugenbreite auf die Schubfestigkeit untersucht und auf Signifikanz überprüft.

Im folgenden Diagramm 5.8 sind folgende Ergebnisse enthalten:

- Box-Plot der Serien: CIB_H mit 1,5 mm Fuge
CIB_C mit 5 mm Fuge
CIB_I mit 25 mm Fuge
EN_H mit 1,5 mm Fuge
EN_C mit 5 mm Fuge
EN_I mit 25 mm Fuge
- Der Median- und 5%-Quantilwert jeder Serie auf Basis empirischer Daten
- Maße des Prüfbrettes als Dicken/Breiten-Verhältnis (t/a),
mit $t/a = 20/150 \text{ mm} = \text{konstant}$
- Der Variationskoeffizient (COV) jeder Serie

Es wurde nur Seitenware SW verwendet.



Diagr. 5.8: Box-Plot der Serien H, C und I

Test auf Normalverteilung der Probe:

Testet man die Daten der Serien H, C und I der beiden Prüfkfigurationen nach dem Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung, werden p-Werte größer 0,05 ausgegeben. Die Annahme, dass die Probe einer normalverteilten Grundgesamtheit entstammt, kann also mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % nicht verworfen werden.

Tab. 5.8: p-Werte des Shapiro-Wilk-Tests auf Normalverteilung

	CIB_H	CIB_C	CIB_I	EN_H	EN_C	EN_I
p-Wert	0,35	0,42	0,06	0,24	0,08	0,14

Test auf Gleichheit der Varianzen:

Bei der varianzanalytischen Betrachtung des Parameters Fugenbreite erhält man folgende Ergebnisse: Der Fligner-Kileen-Test ergibt mit einem p-Wert von 0,17, dass die Nullhypothese mit $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots \sigma_n^2$ nicht abgelehnt werden kann. Das heißt, dass sich die Varianzen der Serien H, C und I nicht signifikant unterscheiden, also homogen sind. Der Levene-Test führt zu einem p-Wert von 0,14, sodass die Nullhypothese des Tests mit $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots \sigma_n^2$ nicht abgelehnt werden kann. Das heißt wiederum, dass sich die Varianzen der Serien H, C und I nicht signifikant unterscheiden, also homogen sind.

Test auf Gleichheit der Serienmittelwerte:

Für den paarweisen t-Test werden folgende Kombinationen Gründen der Plausibilität nicht gebildet: CIB_C – EN_I, CIB_C – EN_H, CIB_H – EN_C, CIB_H – EN_I, CIB_I – EN_C, CIB_I – EN_H. In Tab. 5.9 sind die p-Werte des paarweisen t-Tests angegeben. Die Nullhypothese der Gleichheit der Mittelwerte kann bei den Kombinationen CIB_H – CIB_I, EN_C – EN_I, und EN_H – EN_I abgelehnt werden, da alle p-Werte größer 0,05 sind. Das bedeutet, dass zwischen Prüfkörpern mit 1,5 bzw. 5 mm Fugenbreite kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Schubfestigkeit nachgewiesen werden kann, wohl aber zwischen Probekörpern mit bis zu 5 mm Fugenbreite gegenüber denen mit 25 mm Fugenbreite. Die Prüfkfiguration hat demnach wiederum keinen signifikanten Einfluss.

Tab. 5.9: p-Werte der paarweisen t-Tests unter der Annahme gleicher Varianzen $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots \sigma_6^2$

	CIB_C	CIB_H	CIB_I	EN_C	EN_H
CIB_H	0,20	–	–	–	–
CIB_I	0,11	0,0002	–	–	–
EN_C	1,0	–	–	–	–
EN_H	–	1,0	–	0,17	–
EN_I	–	–	0,54	0,01	0

5.2.10 Multiple Mittelwertmodelle für die Schubfestigkeit

Für die Prüfkfiguration „EN“ werden Mittelwertmodelle für die oben dargestellten Einflussparameter Brettbreite, Brettdicke, Stamm- und Jahrringlage, Fugenbreite und Rohdichte entwickelt. Sie gelten für folgende Voraussetzungen:

- merkmalfreies Holz entsprechend den Angaben in Abschnitt 2.4.3
- Rohdichte zwischen 380 und 430 kg/m³
- Holzfeuchtigkeit u = 12 %

Modell 1:

Als Start für die Modellbildung wurde für das erste Modell folgender Zusammenhang aufgestellt:

$$f_{v, \text{mean}} = \beta_0 + \beta_1 \cdot D_{\text{mean}} + \beta_2 \cdot \text{JL} + \beta_3 \cdot \text{FU_B} + \beta_4 \cdot \rho_{12} + \beta_5 \cdot B_{\text{mean}} \quad [\text{N/mm}^2]$$

Die Regressionsanalyse dieses Modells liefert folgendes Ergebnis:

Tab. 5.10: Regressionsanalyse Modell 1

	Parameter	Schätzer	Std. Fehler	p-Wert	Signifikanz
	β_0	7,429	2,321	0,002	**
	β_1 D _{mean}	-0,177	0,013	0	***
	β_2 JL SW	0,278	0,002	0	**
	β_2 JL R	-1,021	0,341	0,004	**
	β_3 FU_B	-0,068	0,011	0	***
	β_4 ρ_{12}	0,012	0,004	0,007	**
	β_5 B _{mean}	-0,001	0,005	0,86	

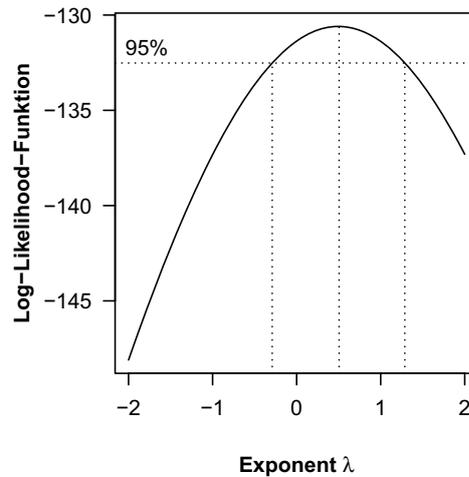
- D_{mean} Mittelwert der Brettdicke in mm
- JL Jahrringlage, Seitenware SW, Riftware R oder Kernbrett KB
- FU_B Fugenbreite in mm
- ρ_{12} Rohdichte bei u = 12 %
- B_{mean} Mittelwert der Brettbreite in mm

Das unkorrigierte Bestimmungsmaß r² für das Modell 1 liegt bei 0,85. Somit ist bereits eine gute Übereinstimmung mit den empirisch ermittelten Werten gegeben.

In Tab. 5.10 ist ersichtlich, dass die Breite B_{mean} keinen signifikanten Einfluss auf die mittlere Schubfestigkeit hat (keine Signifikanz, da p-Wert größer 0,05). Dieses Ergebnis stimmt mit den in Abschnitt 5.2.6 ermittelten überein.

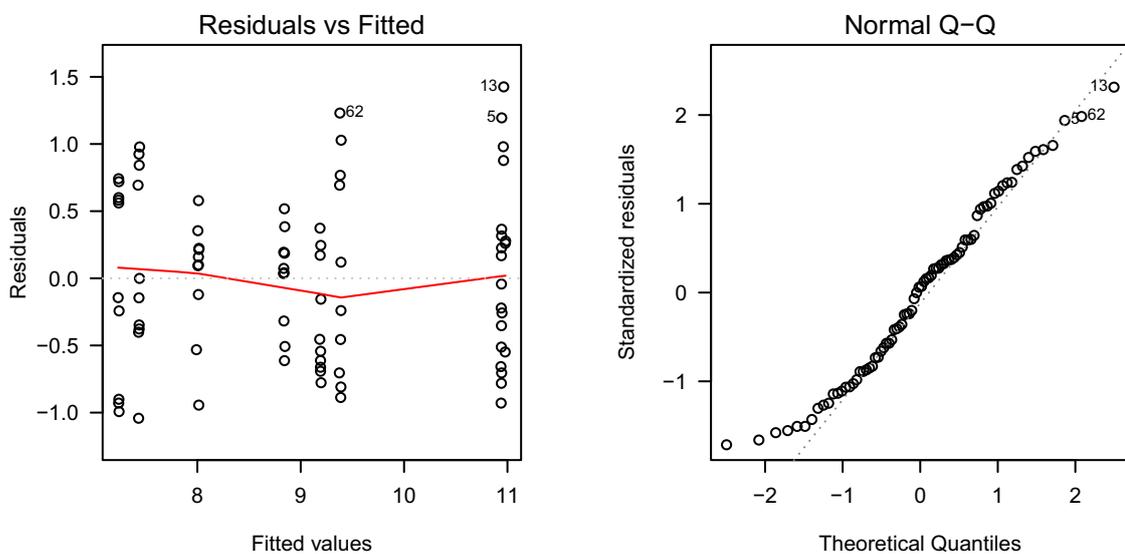
Der Test der Residuen des Modells 1 auf Normalverteilung mit Hilfe des Shapiro-Wilk-Test liefert einen p-Wert von 0,05, sodass die Nullhypothese nicht abgelehnt werden kann und die Modellvoraussetzungen für eine lineare Regression gegeben sind.

Die Überprüfung des Modells 1 mit Hilfe einer Box-Cox-Transformation zeigt, dass keine varianzstabilisierende Transformation nötig ist, da Lambda $\lambda = 0$ im 95 %-Konfidenzintervall liegt (Diagr. 5.9).

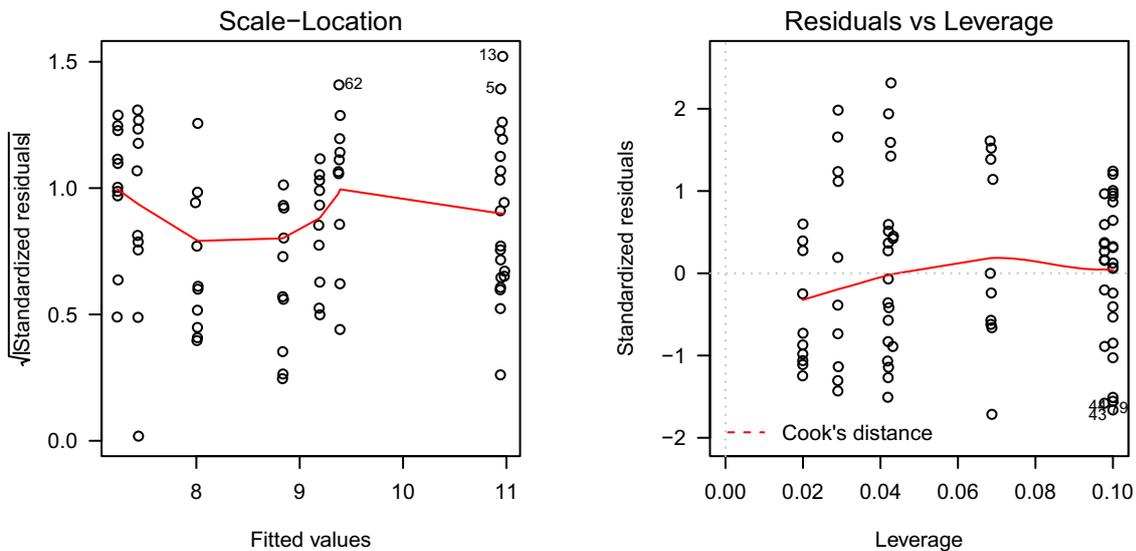


Diagr. 5.9: Box-Cox-Transformation für Modell 1

Betrachtet man das linke Diagr. 5.10 näher, so ist zu erkennen, dass die Residuen bandförmig angeordnet sind und gleichmäßig um ihren Erwartungswert Null verteilt sind. Auch der Q-Q-Plot liefert eine gute Übereinstimmung der empirischen und der theoretischen Residuen. Nur im unteren Teil des Plots weichen die ersten Wertepaare stärker von der durch das 1. und 3. Quartil verlaufenden Geraden ab.



Diagr. 5.10: Diagramm der Residuen und Q-Q-Plot der Residuen



Diagr. 5.11: Diagramm der Quadratwurzel der standardisierten Residuen vs. theoretischer Schubfestigkeit und standardisierten Residuen vs. Variablenkategorien

Somit kann für den Mittelwert der Schubfestigkeit folgender Zusammenhang angegeben werden:

$$f_{v, \text{mean}} = 7,429 - 0,177 D_{\text{mean}} + \left\{ \begin{array}{l} 0,875 \quad \text{für JL SW und JL KB} \\ -1,021 \quad \text{für JL R} \end{array} \right\} - 0,068 FU_B + 0,012 \rho_{12} - 0,001 B_{\text{mean}} \quad [\text{N/mm}^2]$$

Parameterstudie anhand des Bestimmtheitsmaßvergleiches:

In der folgenden Tab. 5.11 wird für das Modell 1 der Einfluss der einzelnen Parameter auf die Modellanpassung anhand der Veränderung des Bestimmtheitsmaße gezeigt. Durch das Streichen einzelner Parameter wird das Bestimmtheitsmaß verändert und somit die Modellgenauigkeit verbessert oder verschlechtert.

Tab. 5.11: Parameterstudie anhand des Vergleiches des Bestimmtheitsmaßes

Modell	Parameter	r ²	Δr ²
1-0	D _{mean} + JL + FU_B + ρ ₁₂ + B _{mean}	0,85	0,85
1-1	D _{mean} + JL + FU_B + ρ ₁₂	0,85	0,00
1-2	D _{mean} + JL + FU_B	0,83	-0,02
1-3	D _{mean} + JL	0,76	-0,07
1-4	D _{mean}	0,60	-0,16

In Tab. 5.11 ist ersichtlich, dass trotz Streichen der Parameter Brettbreite B_{mean} und Rohdichte ρ₁₂ das Bestimmtheitsmaß für das Modell 1 nicht wesentlich sinkt. Folglich können beide Parameter für die weitere Modellbildung außeracht gelassen werden.

Modell 2:

Für das Modell 2 wurde aus der Regressionsgleichung für Modell 1 die nicht signifikanten Parameter Brettbreite B_{mean} und Rohdichte ρ_{12} eliminiert.

$$f_{v,\text{mean}} = \beta_0 + \beta_2 \cdot D_{\text{mean}} + \beta_3 \cdot \text{FU_B} + \beta_4 \cdot \text{JL} \quad [\text{N/mm}^2]$$

Die Regressionsanalyse dieses Modells liefert folgendes Ergebnis:

Tab. 5.12: Regressionsanalyse Modell 2

	Parameter	Schätzer	Std. Fehler	p-Wert	Signifikanz
β_0		12,657	0,311	0	***
β_2	D_{mean}	-0,175	0,012	0	***
β_3	FU_B	-0,059	0,010	0	***
β_4	JL SW	0,348	0,218	0,115	
β_4	JL R	-1,600	0,282	0	***

D_{mean} Mittelwert der Brettdicke in mm

JL Jahrringlage, Seitenware SW, Riftware R oder Kernbrett KB

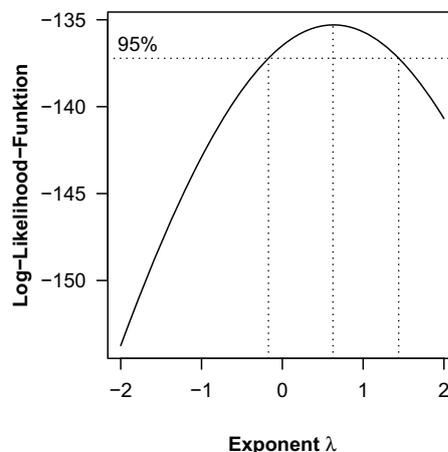
FU_B Fugenbreite in mm

Das unkorrigierte Bestimmungsmaß r^2 für das Modell 2 liegt auch bei 0,83. Damit entstand durch das Streichen des Parameters B_{mean} kein Verlust an Vorhersagekraft.

In Tab. 5.12 ist ersichtlich, dass alle Parameter eine hohe Signifikanz aufweisen, ausgenommen der Parameter Jahrringlage nimmt den Wert SW für Seitenware an.

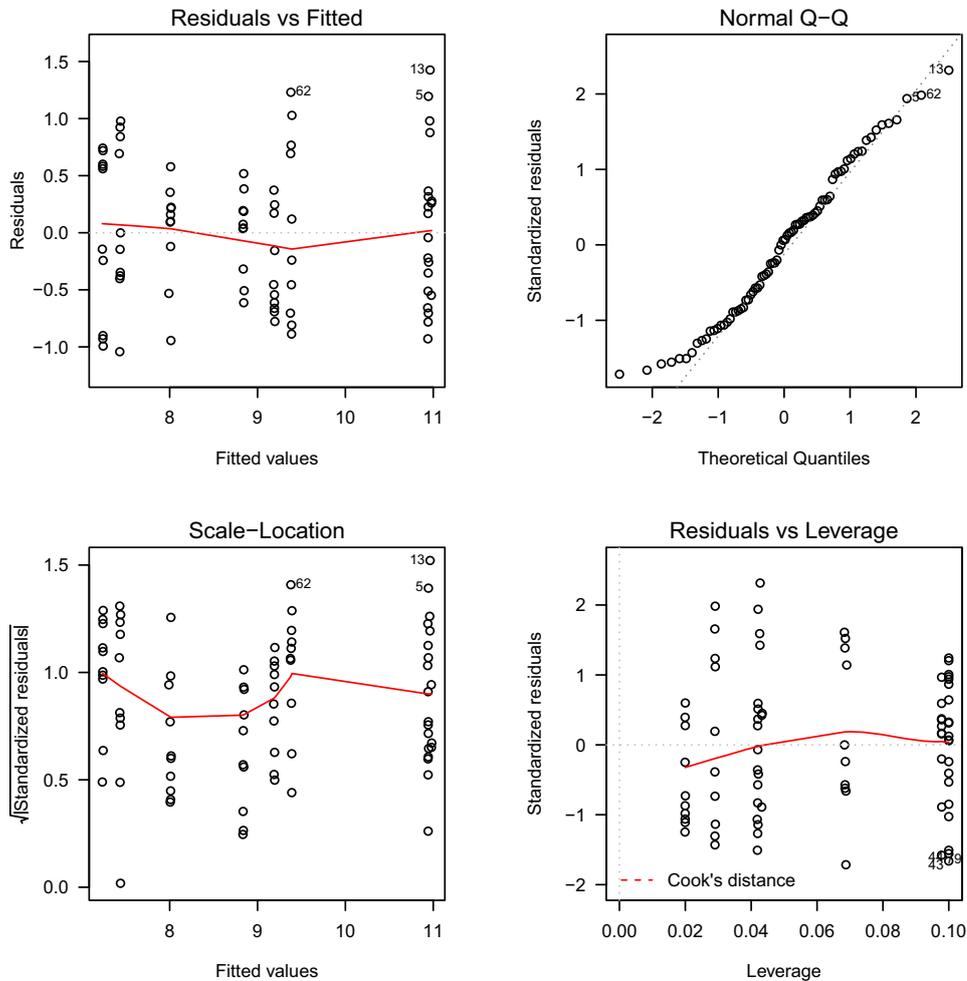
Der Test der Residuen des Modells auf Normalverteilung mit Hilfe des Shapiro-Wilk-Test liefert einen p-Wert von 0,09, sodass die Nullhypothese nicht abgelehnt werden kann und die Modellvoraussetzungen für eine lineare Regression gegeben sind.

Die Überprüfung des Modells mit Hilfe einer Box-Cox-Transformation zeigt, dass keine varianzstabilisierende Transformation nötig ist, da Lambda $\lambda = 0$ im 95 %-Konfidenzintervall liegt (Diagr. 5.12).



Diagr. 5.12: Box-Cox-Transformation für Modell 2

Betrachtet man das linke Diagr. 5.13 näher, so ist zu erkennen, dass die Residuen bandförmig angeordnet sind und gleichmäßig um ihren Erwartungswert Null verteilt sind. Auch der Q-Q-Plot liefert eine gute Übereinstimmung der empirischen mit den theoretischen Residuen. Nur im unteren Teil des Plots weichen die ersten Wertepaare stärker von der durch das 1. und 3. Quartil verlaufenden Geraden ab.



Diagr. 5.13: Diagramm der Residuen, Q-Q-Plot der Residuen, Quadratwurzel der standardisierten Residuen vs. theoretischer Schubfestigkeit und standardisierten Residuen vs. Variablenkategorien

Somit kann für den Mittelwert der Schubfestigkeit folgender Zusammenhang angegeben werden:

$$f_{v, \text{mean}} = 12,657 - 0,175 D_{\text{mean}} - 0,059 FU_B + \left\{ \begin{array}{ll} 0,344 & \text{für JL SW und JL KB} \\ -1,600 & \text{für JL R} \end{array} \right\} [\text{N/mm}^2]$$

Modell 3:

Für das Modell 3 werden die Parameter JL KB und JL R eliminiert. Der folgende Zusammenhang gilt somit nur für Seitenware:

$$f_{v, \text{mean}} = \beta_0 + \beta_2 \cdot D_{\text{mean}} + \beta_3 \cdot \text{FU_B} \quad [\text{N/mm}^2]$$

Die Regressionsanalyse dieses Modells liefert folgendes Ergebnis:

Tab. 5.13: Regressionsanalyse Modell 3

	Parameter	Schätzer	Std. Fehler	p-Wert	Signifikanz
β_0		13,005	0,246	0	***
β_2	D_{mean}	-0,175	0,012	0	***
β_3	FU_B	-0,059	0,011	0	***

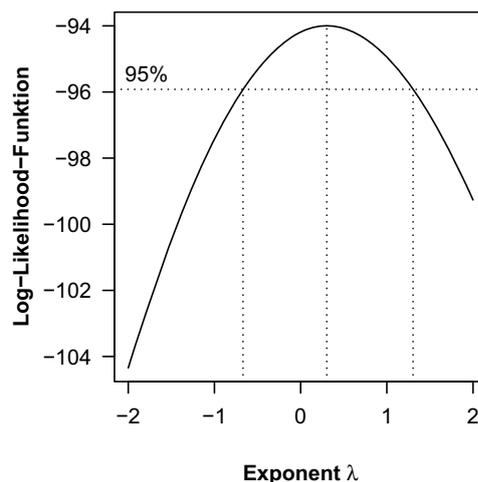
D_{mean} Mittelwert der Brettstärke in mm

FU_B Fugenbreite in mm

Das unkorrigierte Bestimmungsmaß r^2 für das Modell 3 liegt auch bei 0,82. Damit weißt das Modell 3 für die Vorhersage der Schubfestigkeit von Seitenware beinahe das gleiche Bestimmtheitsmaß auf wie das Modell für alle Stammlagen SW, KB und R.

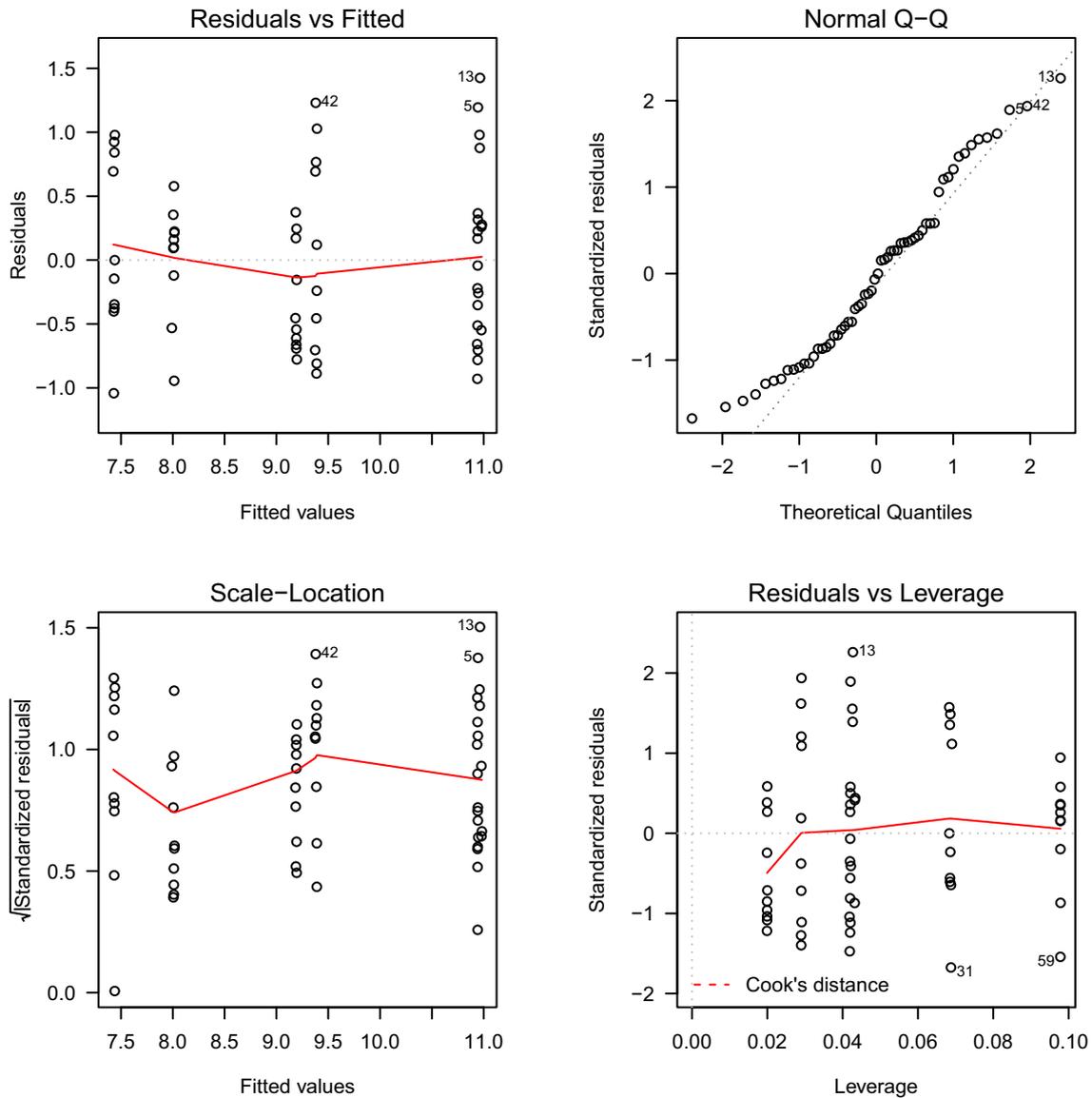
Der Test der Residuen des Modells auf Normalverteilung mit Hilfe des Shapiro-Wilk-Test liefert einen p-Wert von 0,06, sodass die Nullhypothese nicht abgelehnt werden kann und die Modellvoraussetzungen für eine lineare Regression gegeben sind.

Die Überprüfung des Modells mit Hilfe einer Box-Cox-Transformation zeigt, dass keine varianzstabilisierende Transformation nötig ist, da Lambda $\lambda = 0$ im 95 %-Konfidenzintervall liegt (Diagr. 5.14).

**Diagr. 5.14:** Box-Cox-Transformation für Modell 3

Betrachtet man das linke Diagr. 5.15 näher, so ist zu erkennen, dass die Residuen bandförmig angeordnet sind und gleichmäßig um ihren Erwartungswert Null verteilt sind. Auch der Q-Q-Plot liefert eine gute Übereinstimmung der empirischen und der theoretischen Residuen.

Nur im unteren Teil des Plots weichen die ersten Wertepaare stärker von der durch das 1. und 3. Quartil verlaufenden Geraden ab.



Diagr. 5.15: Diagramm der Residuen, Q-Q-Plot der Residuen, Quadratwurzel der standardisierten Residuen vs. theoretischer Schubfestigkeit und standardisierten Residuen vs. Variablenkategorien

Somit kann für den Mittelwert der Schubfestigkeit folgender Zusammenhang angegeben werden:

$$f_{v, \text{mean}} = 13,005 - 0,175 D_{\text{mean}} - 0,059 \text{ FU_B} \quad [\text{N/mm}^2]$$

Modell 4:

Für das Modell 4 wird ein logarithmierter Zusammenhang aufgestellt, wobei nur Seitenware berücksichtigt wird, da Riftware und Kernbretter üblicherweise nicht für die BSP-Herstellung verwendet werden.

$$f_{v, \text{mean}} = e^{\beta_0} \cdot D_{\text{mean}}^{\beta_2} \cdot \text{FU_B}^{\beta_3} \quad [\text{N/mm}^2]$$

Die Regressionsanalyse dieses Modells liefert folgendes Ergebnis:

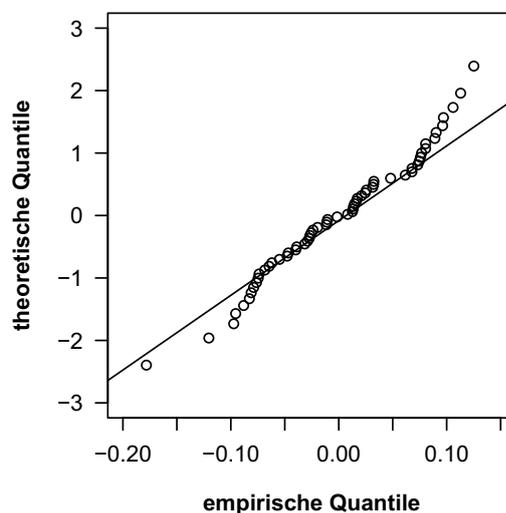
Tab. 5.14: Regressionsanalyse Modell 4

	Parameter	Schätzer	Std. Fehler	p-Wert	Signifikanz
β_0		3,269	0,065	0	***
β_2	D_{mean}	-0,335	0,022	0	***
β_3	FU_B	-0,058	0,011	0	***

D_{mean} Mittelwert der Brettstärke in mm
 FU_B Fugenbreite in mm

Das unkorrigierte Bestimmungsmaß r^2 für das Modell 4 liegt bei 0,81. Damit weist das Modell 4 für die Vorhersage der Schubfestigkeit von Seitenware beinahe das gleiche Bestimmtheitsmaß auf wie das Modell für alle Stammlagen SW, KB und R.

Der Test der Residuen des Modells auf Normalverteilung mit Hilfe des Shapiro-Wilk-Test liefert einen p-Wert von 0,28, sodass die Nullhypothese nicht abgelehnt werden kann und die Modellvoraussetzungen für eine Regression der logarithmierten Werte gegeben sind.



Diagr. 5.16: Q-Q-Plot für Modell 4

Betrachtet man das Diagr. 5.16 näher, so ist zu erkennen, dass der Q-Q-Plot eine gute Übereinstimmung der empirischen und der theoretischen Residuen liefert. Nur im oberen Teil des Plots weichen die ersten Wertepaare stärker von der durch das 1. und 3. Quartil verlaufenden Geraden ab.

Somit kann für den Mittelwert der Schubfestigkeit folgender Zusammenhang angegeben werden:

$$f_{v, \text{mean}} = 26,285 \cdot D_{\text{mean}}^{-0,335} \cdot FU_B^{-0,058} \quad [\text{N/mm}^2]$$

Resümee:

Betrachtet man die Modelle 1 bis 4 vergleichend, ist zu erkennen, dass selbst durch die Eliminierung der Parameter Brettbreite B_{mean} und Rohdichte ρ_{12} kein Verlust an Vorsagekraft entstand. Für die Überprüfung der Modelle 3 und 4 wurde nur die in der Brettspertholzproduktion übliche Seitenware als Parameter für die Jahrringlage zugelassen.

Anzumerken ist, dass die Rohdichte ursprünglich nicht in die Parameterstudie mit einbezogen wurde. Da die Bestimmungsmaße r^2 der Modelle zwischen 0,81 und 0,85 liegen wurde mit allen Modellen eine gute Übereinstimmung mit den empirisch ermittelten Daten erreicht. Als Hauptinflussfaktoren kristallisierten sich die Parameter Brettdicke D_{mean} und Fugenbreite FU_B heraus, unter der Voraussetzung der Verwendung von Seitenware und den der Einleitung genannten Selektionskriterien: merkmalfreies Holz entsprechend den Angaben in Abschnitt 2.4.3, Rohdichte zwischen 380 und 430 kg/m^3 und Holzfeuchtigkeit von $u = 12 \%$

6 Resümee und Ausblick

6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

In dieser Masterarbeit wurde eine Parameterstudie mit insgesamt 150 Probekörpern durchgeführt, welche in 15 Prüfserien zu je 10 Probekörpern aufgeteilt wurden. Mit Hilfe dieser Prüfserien wurden die Parameter Brettbreite (150 und 200 mm), Brettdicke (10, 20 und 30 mm), Stamm- und Jahrringlage (Seitenware, Kernbretter und Riftware) und Fugenbreite (1,5 mm, 5 und 25 mm) untersucht und auf deren Einfluss auf die Schubfestigkeit überprüft.

Über die gesamte Parameterstudie konnte eine mittlere Schubfestigkeit $f_{v,median,12}$ auf Basis der getroffenen Annahmen (merkmalfreies Holz, Sortierung nach der Rohdichte, geringe Probenanzahl, siehe 2.4.3) von 7,37 bis 11,36 N/mm² ermittelt werden, wobei das Ergebnis von Jöbstl mit $f_{v,median} = 12,80$ N/mm² nicht erreicht werden konnte. Die 5%-Quantilwerte $f_{v,05}$ der selektierten Ausgangsware bewegten sich zwischen 5,95 und 10,42 N/mm².

Die Rohdichte der Prüfbretter lag bei $\rho_{12,median} = 407,7$ kg/m³ mit einem COV von 5,7 % und die Holzfeuchtigkeit bei $u_{median} = 12,80$ % mit einem COV von 3,3 %.

Durch die erfolgreiche Entwicklung der neuen Prüfkonfiguration „EN“ wurde es möglich Schubbrüche an nur einer Schubfuge zu erzeugen, auch bei größeren Brettdicken.

Die in der Parameterstudie parallel untersuchte „CIB“-Konfiguration mit zwei Schubfugen lieferte entgegen den Erwartungen gleiche Ergebnisse. Ein möglicher Grund dafür wäre die sorgfältige Sortierung der Prüfbretter nach der Rohdichte, sowie die von Holzmerkmalen befreiten Bruchzonen. Dadurch wurde die Streuung des Ausgangsmaterials sehr stark reduziert, wodurch das Holz in beiden Schubfugen der „CIB“-Konfiguration annähernd gleiche Eigenschaften aufwies.

Es ist jedoch weiterhin zu erwarten, dass bei der Untersuchung von Stichproben aus der allgemeinen Grundgesamtheit die Prüfkonfiguration „CIB“ konservative Prüfergebnisse liefert.

Signifikante Einflüsse auf die Schubfestigkeit konnte bei folgenden Parametern festgestellt werden:

- Brettdicke: Mit zunehmender Brettdicke sinkt die Schubfestigkeit.
- Stamm- und Jahrringlage: Riftware liefert signifikant niedrigere Schubfestigkeitswerte als Probekörper mit Seitenware und Kernbrettern.
- Fugenbreite: Probekörper mit 25 mm Fugenbreite lieferten signifikant niedrigere Schubfestigkeiten.

Kein signifikanter Einfluss auf die Schubfestigkeit konnte durch Variation der Brettbreite festgestellt werden.

6.2 Weiterer Forschungsbedarf

6.2.1 Scheibenschubfestigkeit

Um abgesicherte Angaben zur Festigkeitskenngröße „Mechanismus I – Scheibenschub“ und deren Einflussgrößen geben zu können, sind weitere Forschungsaktivitäten notwendig.

In einer auf Basis dieser Masterarbeit erweiterten Parameterstudie sollten folgende Einflussgrößen berücksichtigt werden:

- Erhöhung der Brettdicke auf 40 mm
- Systembedingte Effekte an 3-, 5- und 7-schichtigen Probekörpern mit mehreren Schubfugen in serieller und/oder paralleler Anordnung.
- Experimentelle Absicherung der Prüfkörperneigung (zurzeit 14°) durch Variation dieser.
- Untersuchungen an Probekörpern mit Ästen und Wuchsunregelmäßigkeiten und deren Einfluss auf die Schubfestigkeit.

Diese weiterführenden Untersuchungen sollten auch auf Basis selektierter Probennahme und vergrößerter Probenanzahl durchgeführt werden.

Parallel zur erweiterten Parameterstudie sind zur Absicherung der Prüfkonfiguration „EN“ Untersuchungen mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode zu folgenden Fragestellungen notwendig um mechanisch begründete Effekte (Sperreffekt) zu konkretisieren:

- Auswirkungen des Sperreffektes in der Klebefläche durch unterschiedliche Brettdicken auf die Schubfestigkeit.
- Absicherung der Prüfkörperneigung (zurzeit 14°) und den damit verbundenen Spannungskombinationen.
- Rahmeneckeffekt: Durch die Momentenumlagerung in der Klebefläche der Konfiguration „EN“ entstehen planmäßig zusätzliche Schubspannungen, welche noch nicht in ihrer Größe und Auswirkung auf die Schubfestigkeit in dieser Arbeit erfasst sind.

6.2.2 Vorschlag einer international anerkannten Prüfkonfiguration

Auf Basis dieser Masterarbeit und der in 6.2.1 getätigten weiteren Untersuchungen ist es zielführend, einen Vorschlag für eine Prüfkonfiguration „Scheibenschub“ zu empfehlen um diese in den entsprechenden europäischen Prüfnormen zu verankern. Mit dieser international anerkannten Prüfkonfiguration können dann Brettsperrholzscheiben unterschiedlicher Hersteller getestet und ein charakteristischer Festigkeitskennwert für das entsprechende Produkt angegeben werden.

Durch die einfache Geometrie besteht die Möglichkeit, den Probekörper direkt aus der BSP-Scheibe zu gewinnen bzw. zu schneiden und gleichzeitig produktionsspezifische Einflussgrößen mit der Stichprobe zu erfassen. Bei nicht seitenverklebten Brettsperrholzscheiben kann nicht garantiert werden, dass aufgrund unterschiedlicher Brettbreiten kein Versatz zwischen den Fugen der Decklagen auftritt und somit das Prüfbrett durch diesen schräg belastet wird. Um diesen Versatz und den damit verbundenen Einfluss auf das Prüfergebnis zu vermeiden, kann auch eine Stichprobe vom Ausgangsmaterial genommen werden um damit im Labor Probekörper zu fertigen.

6.2.3 Untersuchungen in Bauteilgröße

Zum Unterschied an den oben angeführten Untersuchungen an, im Verhältnis zur BSP-Scheibe, kleinen Prüfkörpern sind sicherlich noch Forschungsaktivitäten an ganzen Wandelementen mit Öffnungen notwendig.

Hier sind im Speziellen die Ecken der Öffnungen ausführlicher zu betrachten. Das kann damit begründet werden, da bei Wänden mit Öffnungen keine konstante Schubspannungsverteilung vorliegt, sondern Spannungsspitzen in den Ecken der Öffnungen auftreten (siehe Abb. 6.1). Gesicherte Angaben über die Lage und der damit verbundenen Größe des Spannungswertes stehen noch aus.

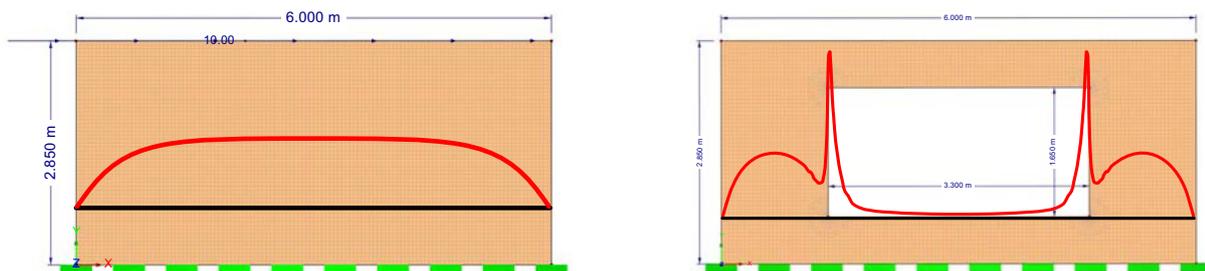


Abb. 6.1: Schubspannungsverlauf einer BSP-Scheibe ohne Öffnungen (links)/mit Öffnungen und Spannungsspitzen in den Ecken (rechts)

Die praktische Nutzbarkeit dieser Untersuchungen ist vor allem in Anwendungsfällen gegeben, in denen Schubbeanspruchungen von Wandscheiben infolge der Einleitung von großen Horizontalkräften in Richtung der betreffenden Achsen bemessungsbestimmend werden können. Hier sind beispielsweise Erdbebeneinwirkungen und bei ungünstigen Geometrieverhältnissen Windeinwirkungen zu nennen. Auch auskragende Wandscheiben mit und ohne Öffnungen, die Beanspruchungen ganzer Geschosse über Einspannstellen in das Tragsystem weiterleiten müssen, können durch weitere Forschungsaktivitäten wie Versuche in Bauteilgröße und begleitenden FE-Untersuchungen betrachtet werden.

Mit den gewonnen Erkenntnissen können praxisgerechte Bemessungsvorschriften erstellt werden mit denen es in Zukunft möglich sein wird Brettsperrholz kreativ als universell einsetzbares Holzbauprodukt zu sehen.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Blaß, H.J., Görlacher, R. (2002): Zum Trag- und Verformungsverhalten von Brettsperrholz-Elementen bei Beanspruchung in Plattenebene. Bauen mit Holz. 11/2002 S. 34-41 und 12/2002 S. 30-34.
- [2] Blaß, H.J., Görlacher, R. (2002): Brettsperrholz – Berechnung von Elementen mit kreuzweise verklebten Brettern bei Beanspruchung in Plattenebene. Ingenieurholzbau, Karlsruher Tage 2002. Bruderverlag, Universität Karlsruhe.
- [3] Blaß, H.J., Görlacher, R. (2003): Brettsperrholz – Berechnungsgrundlagen. Holzbaukalender 2003. Bruderverlag.
- [4] Bogensperger, Th., Moosbrugger, Th., Schickhofer, G.: New test configuration for CLT-wall-elements under shear load. CIB W18 40-21-2. 2007.
- [5] Bosl, R.: Zum Nachweis des Trag- und Verformungsverhaltens von Wandscheiben aus Brettsperrholz. Dissertation. Universität der Bundeswehr München. Jänner 2002.
- [6] Guggenberger, W., Moosbrugger, Th., Bogensperger, Th.: Ebene Tragstrukturen im konstruktiven Holzbau. Teil1: Strukturmechanik. Kapitel 3-1: Wandscheiben – Einzelknoten. Endevaluierungsbericht für das Projekt P01 schell_structures. Unveröffentlicht. April 2007.
- [7] Hoffmeyer, P., Damkilde, L., Pedersen, T. N.: Structural timber and glulam in compression perpendicular to grain. Holz als Roh- und Werkstoff 58 (2000) S. 73-80. Springer-Verlag 2000.
- [8] Horvath N., Molnar S., Niemz P.: Untersuchungen zum Einfluss der Holzfeuchte auf ausgewählte Eigenschaften von Fichte, Eiche und Rotbuche. Holztechnologie. Ausgabe 1/2008 S. 10-15.
- [9] Jeitler, G.: Versuchstechnische Ermittlung der Verdrehungskenngrößen von orthogonal verklebten Brettlamellen. Diplomarbeit, eingereicht am Institut für Stahlbau, Holzbau und Flächentragwerke, TU Graz. November 2003.
- [10] Jöbstl, R. A., Bogensperger, Th., Schickhofer, G.: In-plane shear strength of cross laminated timber. CIB W18 41-12-3. 2008.
- [11] Kollmann, F.: Holzgewicht und Feuchtigkeit. Zeitung des Vereins Deutscher Ingenieure. Band 78. S. 1399-1401. 1934.

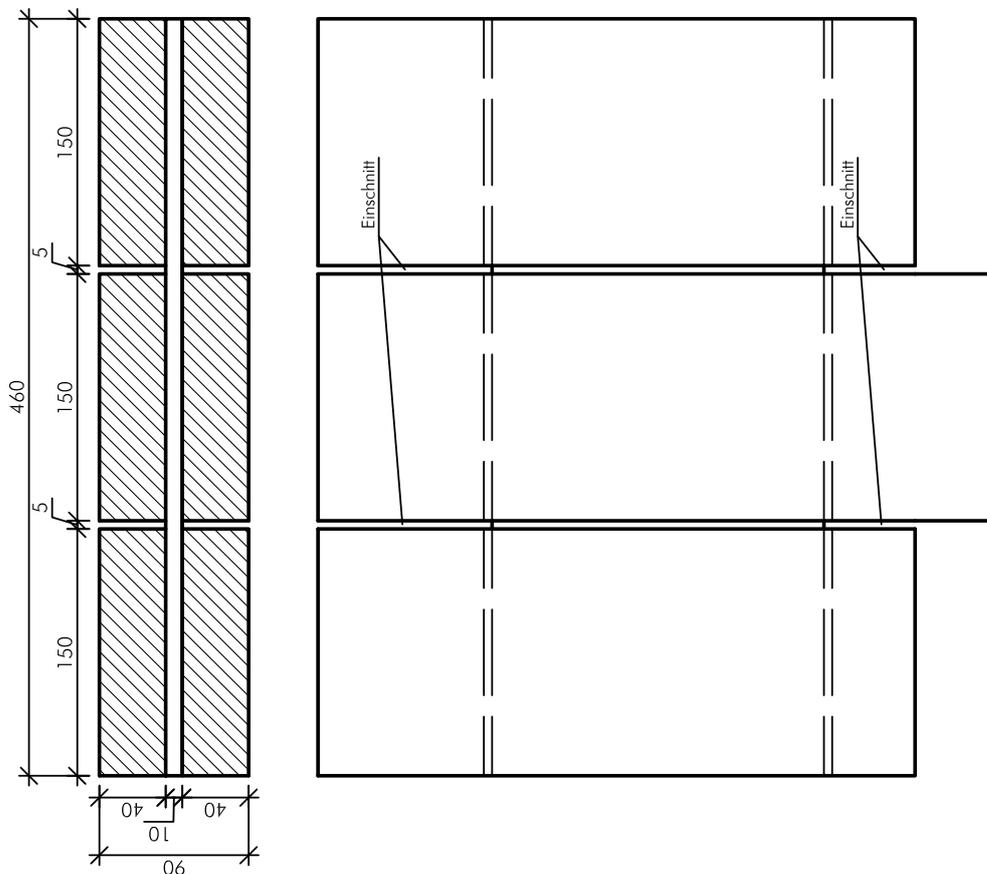
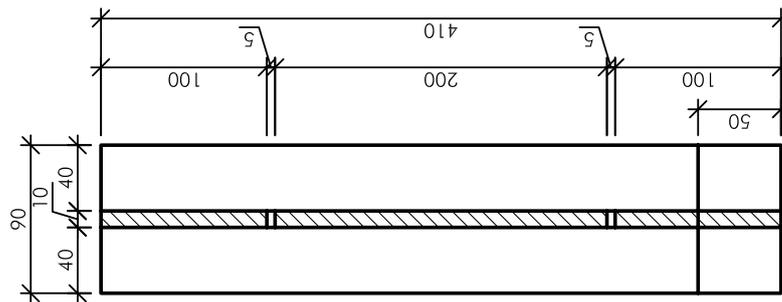
- [12] Lackner, H.: Festlegung einer Prüfkonfiguration für die Ermittlung der Schubfestigkeit von Vollholz sowie Analyse des Größeneinflusses. Diplomarbeit, eingereicht am Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz. Jänner 2011.
- [13] Moosbrugger, Th., Guggenberger, W., Bogensperger, Th.: Forschung an der TU Graz – Steifigkeitsuntersuchungen an BSP-Scheiben-Elementen (Englisch). 5. Grazer Holzbau-Fachtagung. September 2006.
- [14] Niemz, P. (2004): Physik des Holzes. ETH Zürich, Institut für Baustoffe. Oktober 2004.
- [15] Schickhofer, G., Bogensperger, T., Moosbrugger, T. (Hrsg.): BSPhandbuch: Holzmassivbauweise in Brettspertholz. 2. Aufl. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2010. – ISBN 978-3-85125-109-8.
- [16] Stadlober, E.: Angewandte Statistik. Wintersemester 2010/11. Institut für Statistik der Technischen Universität Graz.
- [17] Traetta, G., Bogensperger, Th., Moosbrugger, Th., Schickhofer, G.: Verformungsverhalten von Brettspertholzplatten unter Schubbeanspruchung in der Ebene. 5. Grazer Holzbau-Fachtagung. September 2006.
- [18] Wagenführ, R.: Holzatlas. Fachbuchverlag Leipzig im Hansa-Verlag. München 2007.
- [19] Wallner, G.: Versuchstechnische Ermittlung der Verschiebungskenngrößen orthogonal verklebter Brett lamellen. Diplomarbeit, eingereicht am Institut für Stahlbau, Holzbau und Flächentragwerke, TU Graz. Jänner 2004.
- [20] Werner, G.: Die Rohdichteverteilung und deren feuchteabhängige Änderung bei astiger Fichte im Hinblick auf die maschinelle Holzsortierung. Holz als Roh- und Werkstoff 46 (1988) S. 321-325. Springer-Verlag 1988.
- [21] CUAP 03.04/06: Solid wood slab element to be used as a structural element in buildings. Version Juni 2005.
- [22] DIN 1052:2008: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau. Berlin. Dezember 2008.
- [23] EN 1995-1-1:2009: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Deutsche Fassung. Juli 2009.
- [24] ON B 1995-1-1:2010: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Nationale Festlegungen, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen zur ÖNORM EN 1995-1-1. August 2010.
- [25] Entwurf ON EN 384:2008: Bauholz fuer tragende Zwecke - Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte. Deutsche Fassung. Dezember 2008.
- [26] FprEN 408:2010: Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften. Schlussentwurf. Deutsche Fassung. April 2010
- [27] EN 789:2005: Holzbauwerke – Prüfverfahren. Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Holzwerkstoffen. Deutsche Fassung. April 2005.

- [28] ON ISO 3131:1996: Holz – Bestimmung der Dichte für physikalische und mechanische Prüfungen. Deutsche Fassung. Juni 1996.
- [29] ON EN 13183-1:2004: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz. Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren. Deutsche Fassung. Februar 2004.
- [30] ON EN 14358:2007:Holzbauwerke - Berechnung der 5-Prozent-Quantile für charakteristische Werte und Annahmekriterien für Proben. Deutsche Fassung. April 2007.
- [31] Zulassung ETA-09/0036: MM BSP. Wien. 2009. gültig bis 2014.
- [32] Zulassung ETA-06/0138: KLH Massivholzplatten. Wien. 2006. gültig bis 2011.
- [33] Zulassung ETA-08/0242: HMS - Element. Berlin. 2009. gültig bis 2014.

Anhang

Anhang A – Konstruktionspläne

A.1 – Konstruktionsplan für einen typischen „CIB“-Probekörper

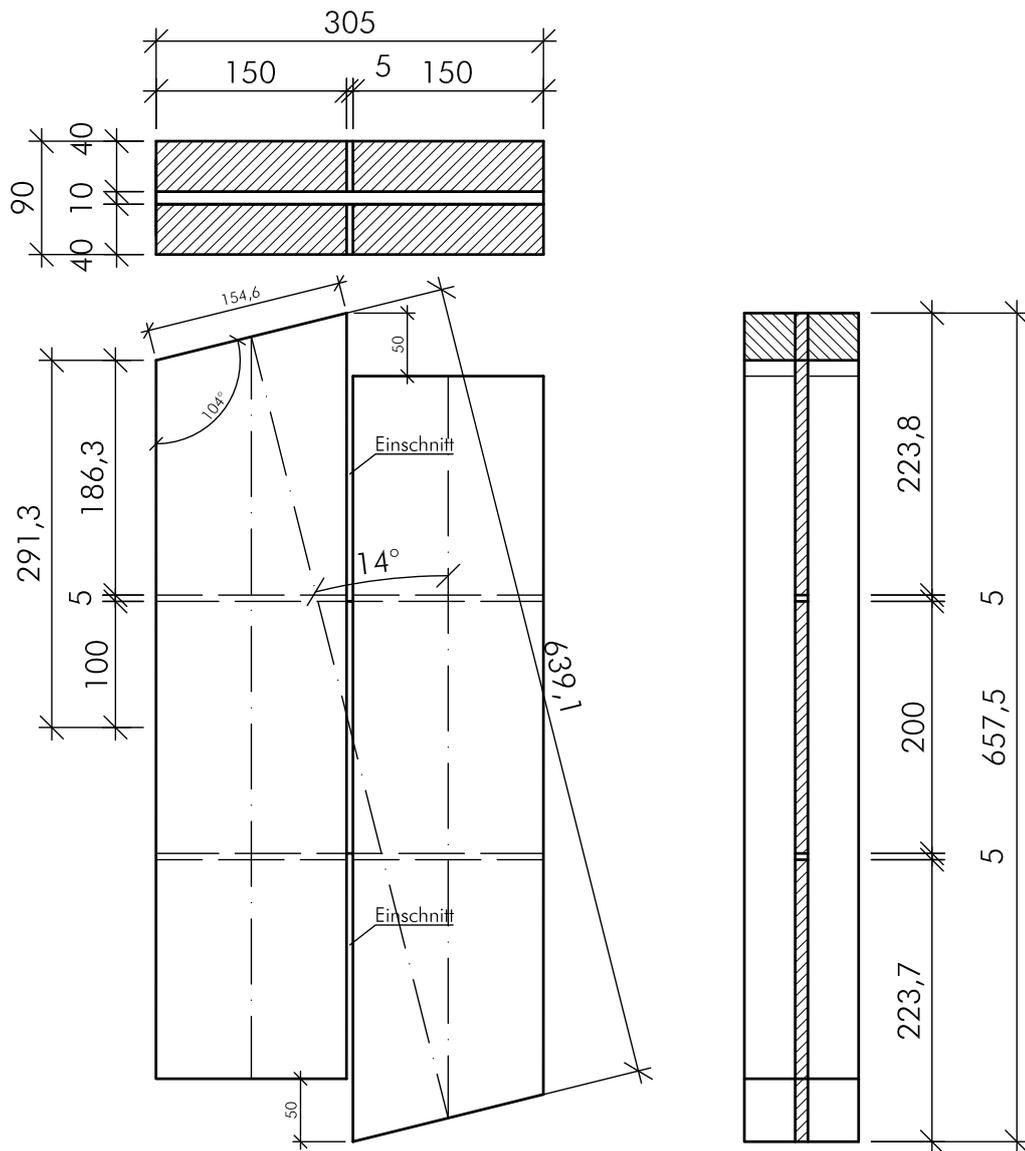


A.2 – Konstruktionsplan für einen typischen „EN“ Probekörper

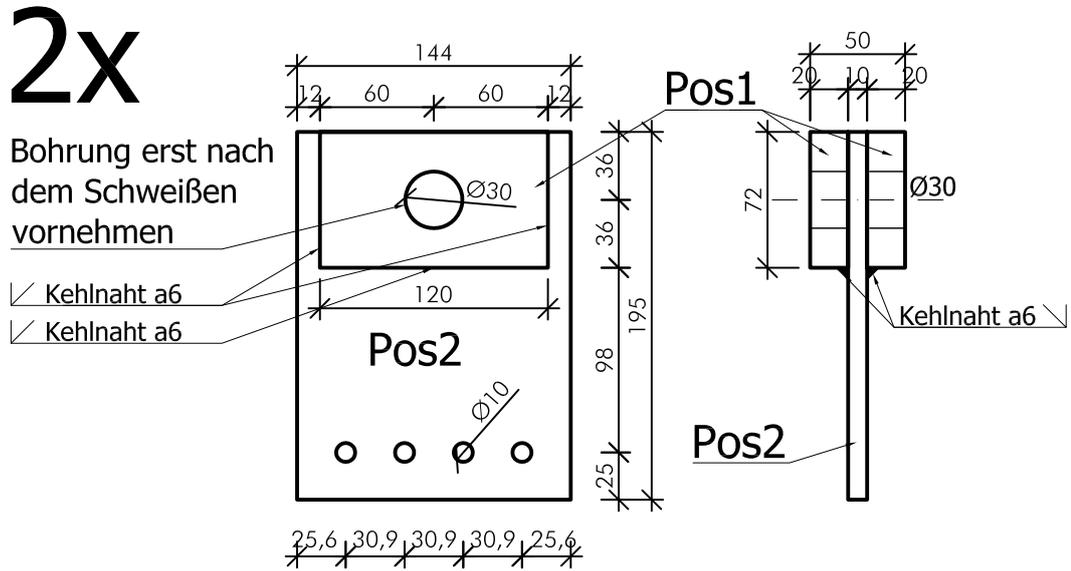
Konfiguration: EN A

Decklagen: SW 150/40

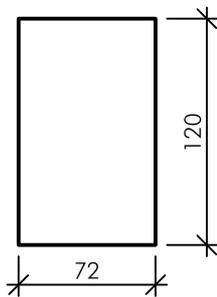
Querlagen: SW 200/10



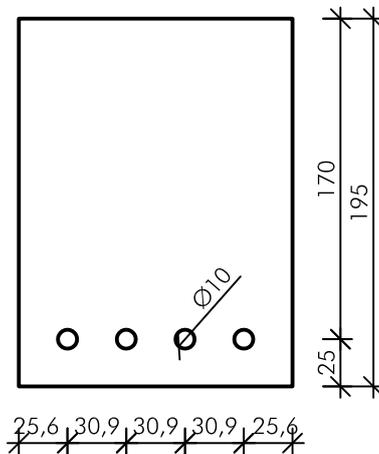
A.4 – Konstruktionsplan Schlitzblech-Koppelteil



2xPos1
120/72/20 S235



1xPos2
195/144/10 S235



A.5 – Stabdübelbemessung für die Zugtestversuche

Materialkenngrößen:

Holz: C24 $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$
 Stabdübel S235: $f_{u,k} = 360 \text{ N/mm}^2$

Mindestabstände:

$$a_2 \geq 3 \cdot d = 3 \cdot 10 = 30 \text{ mm}$$

$$a_{3,t} \geq \max\{7 \cdot d; 80 \text{ mm}\} = 80 \text{ mm}$$

$$a_{4,t} \geq 3 \cdot d = 3 \cdot 10 = 30 \text{ mm}$$

$$a_{4,c} \geq 3 \cdot d = 3 \cdot 10 = 30 \text{ mm}$$

Lochleibungsfestigkeit:

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot 10) \cdot 350 = 25,83 \text{ N/mm}^2$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d = 1,35 + 0,015 \cdot 10 = 1,5$$

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin(\alpha)^2 + \cos(\alpha)^2} = \frac{25,83}{1,5 \cdot \sin(14)^2 + \cos(14)^2} = 25,09 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{h,d} = \frac{f_{h,\alpha,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} = \frac{25,09 \cdot 1,0}{1,3} = 19,30 \text{ N/mm}^2$$

Fließmoment für einen Stabdübel S235, $\varnothing 10 \text{ mm}$:

$$M_{y,d} = \frac{0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6}}{\gamma_{M,St}} = \frac{0,3 \cdot 360 \cdot 10^{2,6}}{1,1} = 39086 \text{ N/mm}^2$$

Bemessungswert der Tragfähigkeit: zweischnittige Holz-Stahlblech Verbindung mit innen liegendem Stahlblech ohne ΔR_d :

$$k_M = \frac{t_1}{\sqrt{\frac{M_{y,d}}{f_{h,d} \cdot d}}} = \frac{40}{\sqrt{\frac{39086}{19,30 \cdot 10}}} = 2,81 \quad \rightarrow \text{Versagensmechanismus (g)}$$

$$R_d = f_{h,d} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4}{k_M^2}} - 1 \right] = 19,30 \cdot 40 \cdot 10 \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4}{2,81^2}} - 1 \right] = 4502 \text{ N}$$

Bestimmung von $R_{d,ges}$ für diesen Anschluss:

$$n_{ef} = 1,0$$

$$R_{d,ges} = n_{ef} \cdot R_d \cdot 4 \cdot 2 = 1,0 \cdot 4502 \cdot 8 = 36016 \text{ N}$$

Nachweis:

$$\frac{F_{max}}{R_{d,ges}} = \frac{16,0}{36,02} = 0,44 \leq 1,0$$

Anmerkung: Als erwartete Bruchkraft wurden 16 kN angesetzt, entsprechend Tabelle 2.2 auf Seite 58.

Anhang B – Statische Überprüfung der Probekörper

B.1 – Probekörper „EN“

Vorversuchsstatik für die EN Konfiguration

zum Kontrollzwecke und Versuchsplanung

Material: C24 Winkel 14

$f_{c,0,k}$	21,00	N/mm ²	
$f_{c,90,k}$	2,50	N/mm ²	
$f_{c,\alpha,k}$	14,65	N/mm ²	
$f_{r,ct}$	1,51	N/mm ²	nach Wallner
$f_{T,ct,k}$	2,697	N/mm ²	nach Jeitler
$f_{v,ct}$	12,80	N/mm ²	nach Jöbstl

Erwartete Bruchlasten an den Nachweisstellen:

Parameter					F _{max} für die Versagensart [kN]					
Decklage [mm]		Querlage [mm]		Fugenbreite [mm]	Lasteinleitung Pressung F _{max,1} [kN]	Torsion			Rollschub	Schubfuge
b _{DL}	t _{DL}	b _{QL}	t _{QL}	b _{FU}		W _r [mm ²]	e [mm]	F _{max,2a} [kN]	F _{max,2b} [kN]	F _{max,3} [kN]
150	40	200	10	5	181,23	1562500	75,2	112,08	93,37	26,38
150	40	200	15	5	181,23	1562500	75,2	112,08	93,37	39,58
150	40	200	20	5	181,23	1562500	75,2	112,08	93,37	52,77
150	40	200	25	5	181,23	1562500	75,2	112,08	93,37	65,96
150	40	200	30	5	181,23	1562500	75,2	112,08	93,37	79,15
150	40	200	35	5	181,23	1562500	75,2	112,08	93,37	92,34
150	40	200	40	5	181,23	1562500	75,2	112,08	93,37	105,53
150	40	200	45	5	181,23	1562500	75,2	112,08	93,37	118,73
150	40	150	10	5	181,23	1125000	75,2	80,70	70,03	19,79
150	40	150	15	5	181,23	1125000	75,2	80,70	70,03	29,68
150	40	150	20	5	181,23	1125000	75,2	80,70	70,03	39,58
150	40	150	25	5	181,23	1125000	75,2	80,70	70,03	49,47
150	40	150	30	5	181,23	1125000	75,2	80,70	70,03	59,36
150	40	150	35	5	181,23	1125000	75,2	80,70	70,03	69,26
150	40	150	40	5	181,23	1125000	75,2	80,70	70,03	79,15
150	40	150	45	5	181,23	1125000	75,2	80,70	70,03	89,05
200	40	200	10	5	241,64	2666667	99,5	144,63	124,50	26,38
200	40	200	15	5	241,64	2666667	99,5	144,63	124,50	39,58
200	40	200	20	5	241,64	2666667	99,5	144,63	124,50	52,77
200	40	200	25	5	241,64	2666667	99,5	144,63	124,50	65,96
200	40	200	30	5	241,64	2666667	99,5	144,63	124,50	79,15
200	40	200	35	5	241,64	2666667	99,5	144,63	124,50	92,34
200	40	200	40	5	241,64	2666667	99,5	144,63	124,50	105,53
200	40	200	45	5	241,64	2666667	99,5	144,63	124,50	118,73
200	40	150	10	5	241,64	1562500	99,5	84,74	93,37	19,79
200	40	150	15	5	241,64	1562500	99,5	84,74	93,37	29,68
200	40	150	20	5	241,64	1562500	99,5	84,74	93,37	39,58
200	40	150	25	5	241,64	1562500	99,5	84,74	93,37	49,47
200	40	150	30	5	241,64	1562500	99,5	84,74	93,37	59,36
200	40	150	35	5	241,64	1562500	99,5	84,74	93,37	69,26
200	40	150	40	5	241,64	1562500	99,5	84,74	93,37	79,15
200	40	150	45	5	241,64	1562500	99,5	84,74	93,37	89,05
150	40	150	10	25	181,23	1125000	84,9	71,47	70,03	19,79
150	40	150	15	25	181,23	1125000	84,9	71,47	70,03	29,68
150	40	150	20	25	181,23	1125000	84,9	71,47	70,03	39,58
150	40	150	25	25	181,23	1125000	84,9	71,47	70,03	49,47
150	40	150	30	25	181,23	1125000	84,9	71,47	70,03	59,36
150	40	150	35	25	181,23	1125000	84,9	71,47	70,03	69,26
150	40	150	40	25	181,23	1125000	84,9	71,47	70,03	79,15
150	40	150	45	25	181,23	1125000	84,9	71,47	70,03	89,05

mögliche Probekörper, bei erwartetem Versagen der Schubfuge

B.2 – Probekörper „CIB“

Vorversuchsstatik für CIB Konfiguration

zum Kontrollzwecke und Versuchsplanung

Material: C24

$f_{c,0,k}$	21,00	N/mm ²	
$f_{r,ct}$	1,51	N/mm ²	nach Wallner
$f_{T,ct,k}$	2,697	N/mm ²	nach Jeitler
$f_{v,ct}$	12,80	N/mm ²	nach Jöbstl

Erwartete Bruchlasten an den Nachweisstellen:

Parameter				F _{max} für die Versagensart [kN]		
Decklage		Querlage		Lasteinleitung	Rollschub	Schubfuge
b _{DL}	t _{DL}	b _{QL}	t _{QL}	F _{max,1} [kN]	F _{max,2} [kN]	F _{max,3} [kN]
150	40	200	10	252,00	90,60	51,20
150	40	200	15	252,00	90,60	76,80
150	40	200	20	252,00	90,60	102,40
150	40	200	25	252,00	90,60	128,00
150	40	200	30	252,00	90,60	153,60
150	40	200	35	252,00	90,60	179,20
150	40	200	40	252,00	90,60	204,80
150	40	200	45	252,00	90,60	230,40
150	40	150	10	252,00	67,95	38,40
150	40	150	15	252,00	67,95	57,60
150	40	150	20	252,00	67,95	76,80
150	40	150	25	252,00	67,95	96,00
150	40	150	30	252,00	67,95	115,20
150	40	150	35	252,00	67,95	134,40
150	40	150	40	252,00	67,95	153,60
150	40	150	45	252,00	67,95	172,80
200	40	150	10	336,00	90,60	38,40
200	40	150	15	336,00	90,60	57,60
200	40	150	20	336,00	90,60	76,80
200	40	150	25	336,00	90,60	96,00
200	40	150	30	336,00	90,60	115,20
200	40	150	35	336,00	90,60	134,40
200	40	150	40	336,00	90,60	153,60
200	40	150	45	336,00	90,60	172,80
200	40	200	10	336,00	120,80	51,20
200	40	200	15	336,00	120,80	76,80
200	40	200	20	336,00	120,80	102,40
200	40	200	25	336,00	120,80	128,00
200	40	200	30	336,00	120,80	153,60
200	40	200	35	336,00	120,80	179,20
200	40	200	40	336,00	120,80	204,80
200	40	200	45	336,00	120,80	230,40

 mögliche Probekörper, bei erwartetem Versagen der Schubfuge

Anhang C – Prüfkörperherstellung

C.1 – Massenermittlung „CIB“

Massenermittlung für CIB-Konfiguration
Rohmaße der Einzelbretter vor dem Verkleben

Kürzel: DL_äu ... äußere Decklagen
DL_mi ... mittlere Decklagen
QL_M ... Querlage-Mittelbrett = Prüfbrett
QL_F ... Querlage-Füllholz oben und unten

Ausgangswarendicke (BSH-Lamellen) 46 mm

Verschnittfaktor 2,5

Probekörper Nr. #	Teile Bez.	Abmessungen			Lage im Stamm			Anzahl der Probekörper	Gesamtanzahl der Teile	Anzahl der Bretter		Anzahl der Bretter		Nettomenge ohne Verschnitt [m³]			
		Länge	Breite	Dicke	Stück	I _{fm}	SW			HR	R	KB	Netto	Brutto	210	170	210
CIB A	DL_äu	450	170	40	4	1,8	x		40	210	170	210	170	0,14	0,14		
CIB A	DL_mi	450	155	40	2	0,9	x		20					0,07	0,07		
CIB A	QL_M	480	205	10	1	0,5	x		10	1,2	2,3	3,0	5,6	0,05	0,05		
CIB A	QL_F	480	110	10	2	1,0	x		20	2,4	2,4	6,0	6,0	0,08	0,08		
CIB B	DL_äu	450	170	40	4	1,8	x		40	4,5	4,5	11,3	11,3	0,14	0,14		
CIB B	DL_mi	450	155	40	2	0,9	x		20	2,3	2,3	5,6	5,6	0,07	0,07		
CIB B	QL_M	480	155	10	1	0,5	x		10	1,2	1,2	3,0	3,0	0,04	0,04		
CIB B	QL_F	480	135	10	2	1,0	x		20	2,4	2,4	6,0	6,0	0,08	0,08		
CIB C	DL_äu	450	170	40	4	1,8	x		40	4,5	4,5	11,3	11,3	0,14	0,14		
CIB C	DL_mi	450	155	40	2	0,9	x		20	2,3	2,3	5,6	5,6	0,07	0,07		
CIB C	QL_M	480	155	20	1	0,5	x		10	1,2	1,2	3,0	3,0	0,04	0,04		
CIB C	QL_F	480	135	20	2	1,0	x		20	2,4	2,4	6,0	6,0	0,08	0,08		
CIB E	DL_äu	450	170	40	4	1,8	x		40	4,5	4,5	11,3	11,3	0,14	0,14		
CIB E	DL_mi	450	155	40	2	0,9	x		20	2,3	2,3	5,6	5,6	0,07	0,07		
CIB E	QL_M	480	155	20	1	0,5	x		10	1,2	1,2	3,0	3,0	0,04	0,04		
CIB E	QL_F	480	135	20	2	1,0	x		20	2,4	2,4	6,0	6,0	0,08	0,08		
CIB F	DL_äu	450	170	40	4	1,8	x		40	4,5	4,5	11,3	11,3	0,14	0,14		
CIB F	DL_mi	450	155	40	2	0,9	x		20	2,3	2,3	5,6	5,6	0,07	0,07		
CIB F	QL_M	480	155	20	1	0,5	x		10	1,2	1,2	3,0	3,0	0,04	0,04		
CIB F	QL_F	480	135	20	2	1,0	x		20	2,4	2,4	6,0	6,0	0,08	0,08		
CIB G	DL_äu	450	170	40	4	1,8	x		40	4,5	4,5	11,3	11,3	0,14	0,14		
CIB G	DL_mi	450	155	40	2	0,9	x		20	2,3	2,3	5,6	5,6	0,07	0,07		
CIB G	QL_M	480	155	20	1	0,5	x		10	1,2	1,2	3,0	3,0	0,04	0,04		
CIB G	QL_F	480	135	20	2	1,0	x		20	2,4	2,4	6,0	6,0	0,08	0,08		
CIB H	DL_äu	450	170	40	4	1,8	x		40	4,5	4,5	11,3	11,3	0,14	0,14		
CIB H	DL_mi	450	155	40	2	0,9	x		20	2,3	2,3	5,6	5,6	0,07	0,07		
CIB H	QL_M	480	155	20	1	0,5	x		10	1,2	1,2	3,0	3,0	0,04	0,04		
CIB H	QL_F	480	135	20	2	1,0	x		20	2,4	2,4	6,0	6,0	0,08	0,08		
CIB I	DL_äu	490	170	40	4	2,0	x		40	4,9	4,9	12,3	12,3	0,15	0,15		
CIB I	DL_mi	490	155	40	2	1,0	x		20	2,5	2,5	6,1	6,1	0,08	0,08		
CIB I	QL_M	520	155	20	1	0,5	x		10	1,3	1,3	3,3	3,3	0,04	0,04		
CIB I	QL_F	520	135	20	2	1,0	x		20	2,6	2,6	6,5	6,5	0,08	0,08		
Summen										1,2	82,5	3,0	206,3	0,05	2,58	0,12	6,45
										84,0	210,0						

C.2 – Massenermittlung „EN“

Massenermittlung für EN-Konfiguration

Rohmaße der Einzelbretter vor dem Verkleben

Kürzel: DL ... Decklage
 QL_M ... Querlage-Mittelbrett = Prüfbrett
 QL_F ... Querlage-Füllholz oben und unten

Ausgangswarendicke (BSH-Lamellen)
 Verschnittfaktor

46 mm
 2,5

Probekörper Nr. #	Teile Bez.	Abmessungen						Lage im Stamm				Anzahl der Probekörper	Gesamtanzahl der Teile	Anzahl der Bretter Netto		Anzahl der Bretter Brutto		Nettomenge ohne Verschnitt [m ³]	
		Länge	Breite	Dicke	Stück	lfm	SW	HR	R	KB	210			170	210	170	210	170	
EN A	DL	700	160	40	4	2,8	x						40	210	170	210	170	0,22	
EN A	QL_M	320	200	10	1	0,3	x					10	10	0,8		17,5		0,03	
EN A	QL_F	320	210	10	2	0,6	x					20	20	1,6		4,0		0,06	
EN B	DL	700	160	40	4	2,8	x					40	210	170	210	170	0,22		
EN B	QL_M	320	160	10	1	0,3	x					10	10	0,8		2,0		0,03	
EN B	QL_F	320	210	10	2	0,6	x					20	20	1,6		4,0		0,06	
EN C	DL	700	160	40	4	2,8	x					40	210	170	210	170	0,22		
EN C	QL_M	320	160	20	1	0,3	x					10	10	0,8		2,0		0,03	
EN C	QL_F	320	210	20	2	0,6	x					20	20	1,6		4,0		0,06	
EN D	DL	700	160	40	4	2,8	x					40	210	170	210	170	0,22		
EN D	QL_M	320	160	30	1	0,3	x					10	10	0,8		2,0		0,03	
EN D	QL_F	320	210	30	2	0,6	x					20	20	1,6		4,0		0,06	
EN E	DL	700	160	40	4	2,8	x					40	210	170	210	170	0,22		
EN E	QL_M	320	160	20	1	0,3	x					10	10	0,8		2,0		0,03	
EN E	QL_F	320	210	20	2	0,6	x					20	20	1,6		4,0		0,06	
EN F	DL	700	160	40	4	2,8	x					40	210	170	210	170	0,22		
EN F	QL_M	320	160	20	1	0,3	x					10	10	0,8		2,0		0,03	
EN F	QL_F	320	210	20	2	0,6	x					20	20	1,6		4,0		0,06	
EN G	DL	700	160	40	4	2,8	x					40	210	170	210	170	0,22		
EN G	QL_M	320	160	20	1	0,3	x					10	10	0,8		2,0		0,03	
EN G	QL_F	320	210	20	2	0,6	x					20	20	1,6		4,0		0,06	
EN H	DL	700	160	40	4	2,8	x					40	210	170	210	170	0,22		
EN H	QL_M	320	160	20	1	0,3	x					10	10	0,8		2,0		0,03	
EN H	QL_F	320	210	20	2	0,6	x					20	20	1,6		4,0		0,06	
EN I	DL	780	160	40	4	3,1	x					40	210	170	210	170	0,24		
EN I	QL_M	340	160	20	1	0,3	x					10	10	0,9		2,1		0,03	
EN I	QL_F	340	210	20	2	0,7	x					20	20	1,7		4,3		0,07	
Summen												90	86,0	70,3	38,3	175,6	214,0	0,59	2,20
Summen												90	86,0	70,3	38,3	175,6	214,0	1,48	5,49

C.3 – Feuchtigkeitskontrolle

15.10.2010

Bez.	m _w [g]	m ₀ [g]	HF [%]	Anmerkungen
SW 1			11,0	elektrisch gemessen
SW 2			14,0	elektrisch gemessen
SW 3			12,0	elektrisch gemessen
SW 4				ausgeschieden
SW 5			12,0	elektrisch gemessen
SW 6	112,98	100,48	12,4	
SW 7	115,77	102,60	12,8	
SW 8	120,86	107,59	12,3	
SW 9	139,98	124,83	12,1	
SW 10	76,24	67,79	12,5	
SW 11	101,82	89,02	14,4	
SW 12	105,35	92,32	14,1	
SW 13	83,40	75,08	11,1	
SW 14	83,67	75,17	11,3	
SW 15	104,12	92,20	12,9	
SW 16	109,07	96,78	12,7	
SW 17	96,28	84,17	14,4	
SW 18	90,07	78,77	14,3	
SW 19	83,99	75,46	11,3	
SW 20	106,48	92,90	14,6	
SW 21	97,49	86,43	12,8	
SW 22	96,68	86,06	12,3	
SW 23	98,45	86,31	14,1	
SW 24	84,80	75,15	12,8	
SW 25	113,71	98,65	15,3	
SW 26	90,48	79,16	14,3	
SW 27	96,01	84,97	13,0	
SW 28	94,67	82,85	14,3	
SW 29	93,26	81,28	14,7	
SW 30	87,92	76,68	14,7	
SW 31	100,36	87,60	14,6	
SW 32	86,66	76,52	13,3	
SW 33	96,32	84,17	14,4	
SW 34	84,58	73,30	15,4	
SW 35	71,24	63,77	11,7	
SW 36	82,89	71,88	15,3	
KB 1			10,0	elektrisch gemessen
KB 2			11,0	elektrisch gemessen
KB 3			11,0	elektrisch gemessen
KB 4			13,0	elektrisch gemessen
KB 5			10,0	elektrisch gemessen
KB 9	101,22	89,43	13,2	
KB 10	107,76	94,40	14,2	
KB 11	96,15	84,44	13,9	

Min **10,0**
Max **15,4**
Mittelwert **13,1**

C.4 – Klebstoffdatenblatt

Jowapur®

Flüssiger Einkomponenten-Polyurethan-Klebstoff für den tragenden Holzleimbau

686.60

Anwendungsbeispiele: Jowapur® 686.60 ist ein fugenfüllender, faserverstärkter Einkomponenten-Klebstoff, der durch die Einwirkung der Holzfeuchte oder der Luftfeuchte aushärtet. Jowapur® 686.60 wird für Brettschichtholz und Keilzinkenverbindungen, im Anwendungsbereich entsprechend dem Klebstofftyp I in Anlehnung an DIN EN 301, verwendet. Weitere Einsatzgebiete sind maßhaltige, nicht tragende Bauteile aus Holz und vielen anderen Werkstoffen. Für Lärchenholz nicht geeignet.

Eigenschaften: Jowapur® 686.60 ist von der Materialprüfungsanstalt (Otto-Graf-Institut) der Universität Stuttgart bzw. vom Norsk-Treteinisk Institut/Norwegen nach DIN 68 141, in Anlehnung an DIN EN 302 sowie nach weiteren Kriterien geprüft worden. Es wurde festgestellt, dass der Klebstoff für die Herstellung von tragenden geleimten Holzbauteilen für den Innen- und Außenbereich im Sinne der DIN 1052 eingesetzt werden kann, solange die Fugendicke 0,3 mm nicht übersteigt.

Jowapur® 686.60 ist vom DIBT unter der Zulassungsnummer Z-9.1-636 für die Herstellung verklebter tragender Holzbauteile zugelassen.

Jowapur® 686.60 wird auch für eine Vielzahl von anderen Verklebungsvorgängen eingesetzt.

Der Klebstoff härtet durch seinen Gehalt an Isocyanatgruppen, welche mit der Holzfeuchtigkeit reagieren, zu einem wasserunlöslichen Harz aus.

Verarbeitungshinweise: Zur Herstellung von Bauteilen nach DIN 1052 sind die Seiten 3 - 5 sowie die Zulassung Z-9.1-636 zu beachten.

Parameter		nicht tragende Anwendungen	tragende Anwendungen
Offene Zeit (Wartezeit) bei +20 °C:		50 – 70 min	30 – 45 min
Verarbeitungstemperatur:		>+10 °C	>+20 °C
Presszeit bei +20 °C:		3 – 4 h	siehe Tabelle S.4
Pressdruck	bei Weichholz:	0,3 – 1,0 N/mm ²	0,6 – 1,0 N/mm ²
	bei Hartholz:	0,8 – 1,2 N/mm ²	
Leimauftragsmenge	Lamellierung:	100 – 230 g/m ²	*)150 – 250 g/m ²
	Keilzinkung:		*)120 – 200 g/m ²
Holzfeuchte	Flächenklebungen:	8 – 18 %	8 – 15 %
	Keilzinkung Vollholz:		8 – 18 %
bei Holz für den Innenausbau mit einer Feuchte von 6 – 8 % ist das Besprühen mit Wasser erforderlich.			

*) Die Klebstoffauftragsmenge ist so zu berücksichtigen, dass nach der Pressung eine vollflächige Benetzung der Fügeiteile gewährleistet ist.

Fortsetzung auf Seite 2



Seite 2 Jowapur® 686.60 – 07/10

Technische Daten:	Viskosität bei +20 °C [mPas]:	ca. 10.500 (Brookfield)
	Dichte [g/cm ³]:	ca. 1,15
	Festkörper [%]:	ca. 99,5
	NCO-Gehalt [%]:	ca. 15
	Aussehen:	hellbeige
Lagerung:	In gut verschlossenen Originalgebinden trocken und kühl (15 – 25 °C) mindestens 6 Monate lagerfähig.	
Entsorgung:	Ausgehärteter Klebstoff über Hausmüllentsorgung.	
Verpackung:	Gebinde und Packungseinheiten auf Anfrage.	
Anmerkung:	Weitere Hinweise zum Umgang, Transport und Entsorgung sind dem Sicherheitsdatenblatt zu entnehmen. Unsere Angaben in diesem Datenblatt stützen wir auf von uns selbst durchgeführte Laborprüfungen und Praxiserfahrungen unserer Kunden. Sie können allerdings nicht alle Parameter abdecken, die in dem jeweiligen Anwendungsfall zu berücksichtigen sind und sind deshalb unverbindlich. Die Angaben stellen weder eine Beschaffenheitsgarantie im Rechtssinne noch eine Zusicherung von Eigenschaften dar. Aus diesen Angaben und auch aus der Inanspruchnahme unseres kostenlos zur Verfügung gestellten technischen Beratungsdienstes können keine rechtlichen Ansprüche hergeleitet werden.	

Anhang D – Zusammenfassung der Prüfergebnisse

Serie	Prüfkonfiguration EN						Prüfkonfiguration CIB					
	F_{max} [kN]	$k = K_{ser}$ [N/mm]	$f_{v,12}$ [N/mm ²]	ρ_{12} [kg/m ³]	HF [%]		F_{max} [kN]	$k = K_{ser}$ [N/mm]	$f_{v,12}$ [N/mm ²]	ρ_{12} [kg/m ³]	HF [%]	
A	Median	22489	46887	10,81	396,8	12,3	42541	80990	10,43	405,5	12,5	
	Stabw	1250	2866	0,65	7,2	0,3	2675	6064	0,67	12,1	0,3	
	COV [%]	5,56	6,11	6,06	1,82	2,28	6,29	7,49	6,47	2,98	2,43	
B	Median	17001	34968	11,18	404,2	12,7	34015	64819	11,36	396,0	12,4	
	Stabw	1017	3758	0,71	17,4	0,4	1841	8452	0,67	16,7	0,5	
	COV [%]	5,98	10,75	6,35	4,31	3,49	5,41	13,04	5,91	4,22	4,28	
C	Median	26711	41685	8,69	400,0	13,0	52779	72799	8,91	406,7	12,8	
	Stabw	1319	2758	0,43	10,5	0,3	3495	5830	0,58	22,0	0,1	
	COV [%]	4,94	6,62	4,97	2,62	2,52	6,62	8,01	6,48	5,40	1,10	
D	Median	33384	45056	7,37	399,9	12,9	44038	65756	7,60	397,0	12,3	
	Stabw	3342	4754	0,70	14,5	0,2	5044	7778	0,94	27,4	0,6	
	COV [%]	10,01	10,55	9,49	3,63	1,31	11,45	11,83	12,35	6,90	5,15	
F	Median	22937	39933	7,44	395,0	12,4	44038	65756	7,60	397,0	12,3	
	Stabw	2078	1566	0,73	13,3	0,5	5044	7778	0,94	27,4	0,6	
	COV [%]	9,06	3,92	9,80	3,37	3,72	11,45	11,83	12,35	6,90	5,15	
G	Median	27244	47829	8,90	444,1	13,1	52909	80743	9,00	431,6	13,0	
	Stabw	1156	2670	0,37	8,3	0,2	3300	7042	0,56	10,2	0,2	
	COV [%]	4,24	5,58	4,16	1,87	1,64	6,24	8,72	6,27	2,36	1,38	
H	Median	28546	54546	9,33	412,3	13,0	56008	97539	9,50	426,4	12,9	
	Stabw	2500	5627	0,80	3,5	0,2	2734	5444	0,43	7,7	0,2	
	COV [%]	8,76	10,32	8,61	0,84	1,71	4,88	5,58	4,48	1,81	1,79	
I	Median	24739	25727	8,14	415,9	13,0	50307	48206	8,50	452,9	12,9	
	Stabw	1330	1697	0,45	29,4	0,2	3365	3515	0,58	30,6	0,1	
	COV [%]	5,38	6,60	5,49	7,06	1,42	6,69	7,29	6,79	6,75	0,99	

Dies ist eine Veröffentlichung des

FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau & Flächentragwerke, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe

S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | F – Forschungsberichte
V – Vorträge, Tagungen | M – Masterarbeiten

Institutskennzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik